

Cavitation and cetacean

Cavitación y cetáceos



PACS: 43.30.30.-k

Abstract

Bubbles are the most acoustically active naturally occurring entities in the ocean, and cetaceans are the most intelligent. Having evolved over tens of millions of years to cope with the underwater acoustic environment, cetaceans may have developed techniques from which we could learn. This paper outlines some of the possible interactions, ranging from the exploitation of acoustics in bubble nets to trap prey, to techniques for echolocating in bubbly water, to the possibility that man-made sonar signals could be responsible for bubble generation and death within cetaceans.

Introduction

Acoustics affects our lives profoundly and commonly, both as a nuisance and a necessity. Through speech, acoustics has dominated our communications for millennia. It underpins not only recorded music but also live transmissions, from entertainment in theatres and concert venues to public address systems. Although our experience for millennia has been dominated by audiofrequency sound in air, today we use ultrasound in liquids for biomedical diagnosis and therapy, for sonochemistry and ultrasonic cleaning, and for the monitoring and preparation of foodstuffs, pharmaceuticals and other domestic products. From the Second World War to the present conflicts, acoustics has had an unrivalled role in the underwater battlespace. Underwater sound sources are used

*Timothy G. Leighton; Daniel C. Finfer; Paul R. White
Institute of Sound and Vibration Research,
University of Southampton,
Southampton SO17 1BJ,
United Kingdom; tgl@soton.ac.uk
(<http://www.isvr.soton.ac.uk/fdag/UUA/Cetaceans.HTM>)*

Resumen

Las burbujas son las entidades naturales del océano más activas acústicamente, y los cetáceos las más inteligentes. Tras decenas de millones de años de evolución para adaptarse al entorno acústico submarino, los cetáceos pueden haber desarrollado una serie de técnicas de las que bien podríamos aprender. Este artículo pone de relieve algunas posibles interacciones, que van desde la explotación de la acústica en redes de burbujas utilizadas como trampas para presas, hasta técnicas para la “ecolocación” en aguas burbujeantes, o la posibilidad de que las señales sonares provocadas por el hombre sean responsables de la generación de burbujas y de muerte de cetáceos.

Introducción

La acústica afecta a nuestras vidas frecuente y profundamente, no solo como una molestia sino como una necesidad. La acústica ha dominado nuestra comunicación, a través del habla, desde hace milenios. Sostiene, no únicamente la música grabada, sino también las transmisiones en directo, desde los espectáculos de música y teatro hasta los sistemas de comunicación públicos. A pesar de que nuestra experiencia milenaria ha estado dominada por el sonido audio frecuencial en el aire, hoy en día utilizamos los ultrasonidos en líquidos para diagnósticos y terapias biomédicas, limpieza ultrasónica y química acústica, así como para el monitoreo y la preparación de alimentos y de productos farmacéuticos y domésticos. Desde la Segunda Guerra Mundial hasta los conflictos actuales, la acústica ha jugado un papel sin parangón en las batallas en el espacio submarino. Se utilizan las

to map petrochemical reserves and archaeological sites, as well as to monitor a huge variety of important commercial and environmental features, from fish stocks to climate change.

Many of these applications in ocean acoustics, sonochemistry, biomedical ultrasonics etc. involve the passage of sound or ultrasound through liquid or liquid-like media. When sound at frequencies of ~ 1 kHz or greater is passed through water in the natural world, gas bubbles are the most potent naturally-occurring entities that influence the acoustic propagation, if they are present [1-4]. However our experience as humans of audiofrequency sound in air does not equip us with an intuitive appreciation of the acoustic environment in liquids. With 20 million years or so in which to evolve systems and solutions, the mammals with greatest experience of using acoustics in bubbly water are cetaceans (whales, dolphins and porpoises). Given the complexity and potency of gas bubbles in liquids, and the potential for their exploitation, this paper addresses the question of whether there is anything we can learn from the acoustical response of cetaceans to the bubbly marine environment [1, 5, 6].

The problem is particularly apt given that, whilst most of human sonar was developed for us in the deep-water environments which typified the requirements of the Second World War and the Cold War, since the fall of the Berlin Wall the emphasis for military sonar has been on shallower waters, the so-called littoral zone. The development of human underwater sonar throughout the 20th Century concentrated on acoustic problems relevant to the deep-water threats which characterized the Cold War. Now however the requirement to detect large, quiet nuclear submarines passing under the Arctic icecap has been replaced by the requirement to detect quieter submarines (diesel electric) and obstacles and mines in shallower waters, to mitigate threats to commercial or humanitarian shipping or landing craft, or to detect diver incursions and saboteurs in harbours etc. Sonar expertise needs to develop to cope with this more challenging environment, which can for example hide mines that can be relatively inexpensive, threaten civilian shipping and personnel as well as military, and which can interfere with operations if their absence or locations cannot be confirmed. With these new challenges has however come an impetus to explore how the transformation of acoustic propagation by complex environments may be used as a diagnostic tool for characterising that environment, from our oceans [7-9] to off-world environments [1, 10-14].

Acoustic signals do not usually propagate well in bubbly water, and yet whales, dolphins and porpoises not

fuentes de sonido submarinas tanto para mapear reservas petroquímicas y sitios arqueológicos como para monitorear una gran variedad de elementos comerciales y medioambientales, desde las reservas de pescado hasta el cambio climático.

Muchas de estas aplicaciones en la acústica oceanográfica, química acústica, ultrasonidos biomédicos, etc. suponen el paso del sonido o del ultrasonido por el medio líquido o cuasi líquido. Cuando un sonido a frecuencias de ~ 1 kHz o superiores pasa a través del agua en el mundo natural, las burbujas gaseosas son las más potentes entidades naturales que influyen en la propagación acústica [1-4]. Sin embargo, nuestra experiencia, como seres humanos, con el sonido audio frecuencial en el aire no nos dota de una apreciación intuitiva del entorno acústico en líquidos. Con aproximadamente 20 millones de años durante los cuales han desarrollado sistemas y soluciones diversas, los mamíferos con la mayor experiencia en el uso de la acústica en agua burbujeante son los cetáceos (ballenas, delfines y marsopas). Habida cuenta de la complejidad y potencia de las burbujas gaseosas en líquidos, y del potencial para su explotación, este artículo trata la cuestión de saber si podemos aprender algo de la respuesta acústica de los cetáceos al medio ambiente marino burbujeante [1, 5, 6].

El problema es particularmente pertinente, habida cuenta que, mientras la mayoría del sonar humano fue desarrollado para nosotros en entornos de aguas profundas, según los requisitos típicos de la Segunda Guerra Mundial y de la Guerra Fría, la caída del muro de Berlín ha puesto el énfasis en el sonar militar en aguas superficiales, en la llamada "zona litoral". El desarrollo del sonar humano submarino a lo largo del siglo XX se concentró en problemas acústicos relevantes para las amenazas de las aguas profundas, que caracterizaron la Guerra Fría. Sin embargo, hoy en día, la necesidad de detectar grandes y silenciosos submarinos nucleares pasando bajo la capa de hielo del Ártico, ha sido substituida por la necesidad de detectar submarinos más silenciosos (diesel eléctricos) así como obstáculos y minas en las aguas menos profundas, con el fin de mitigar las amenazas para los buques o lanchas humanitarios o comerciales, o de detectar incursiones y saboteadores submarinos en los puertos, etc. La habilidad en la disciplina sonar necesita desarrollarse para adaptarse a este entorno más complejo, que puede, por ejemplo, esconder minas que son relativamente baratas, amenazando buques civiles y militares, y pudiendo interferir con operaciones si su ausencia o ubicación no pueden ser confirmados. Con estos nuevos retos ha surgido, además, un impulso para explorar cómo se puede utilizar la transformación de la propagación acústica por entornos complejos a modo de herramienta diagnóstica para caracterizar ese entorno desde nuestros océanos [7-9] hasta entornos externos [1, 10-14].

Habitualmente, las señales acústicas no se propagan bien en el agua burbujeante y, sin embargo, las ballenas, los delfines y las marsopas no sólo funcionan eficazmente en aguas costeras

only function effectively in shallow coastal waters, but also at times generate large bubble fields to assist with catching prey. This paper outlines the challenges faced by cetaceans in using acoustics in such environments, and proposes acoustical techniques which would work. The validities of such proposed acoustical solutions are explored through theory, simulation and experimentation. The scenarios in question relate to the circular and spiral bubble nets generated to trap prey by humpback whales, and solutions to difficulties associated with echolocation by dolphins and porpoises in bubbly water. Whether the solutions are exploited by cetaceans is uncertain, but their efficacy in test tanks and implications for man-made sonar are demonstrated.

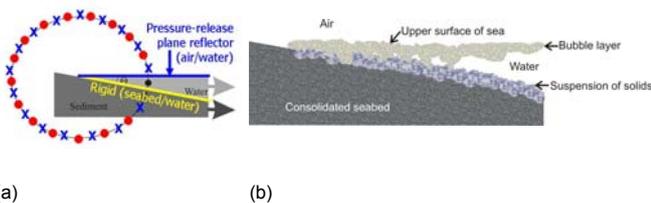


Figure 1.- (a) If a coastal zone can be approximated by a wedge shape of ocean, with a bottom which reflects acoustic pressure waves with no phase change, and an air/water interface which reflects them with π phase change, then for frequencies high enough for a ray approach to be valid, the net sound field built up in the water by an object (●) emitting sound will be that which would be produced were the object in free-field, and sound were in addition emitted image sources either in phase (○) with the original source, or in antiphase (×). The sediment and atmosphere boundaries of the water column being flat acoustic mirrors in this model, in the 2D plane passing vertically through the source these images will be distributed around the circle shown by the dashed line. The first few image sources are shown (○, ×). For certain wedge angles Θ (such as the 15° used here) the sources map onto discrete sites on the dashed circle. (b) In this more realistic diagrammatic representation of the coastal zone, both the sea-air interface and consolidated seabed are more complicated reflectors than in (a). The air/sea interface will not only undulate with the passing of surface waves, but be punctuated with the noisy entrainment of bubble clouds. These bubbles can persist for many minutes against buoyancy, forming a dynamic sub-surface bubble layer which will attenuate and scatter acoustic signals (potentially nonlinearly), and can alter the sound speed by $\pm 50\%$ or more. Likewise, the near-bottom suspended solids will scatter and attenuate sound travelling near the sea-bed, and may contain trapped gas which has attached itself to the solid particulate grains.

Figure 1 illustrates a classical picture of a wedge-shaped beach, as modelled for acoustical propagation [15, 16]. Even the simplest models indicate surroundings which have great potential to confuse a detection system which relies on active acoustic sonar. In Fig. 2(a) only the two most simple (i.e. time-invariant) acoustic scatterers in the coastal water column are included: the sediment and the air/water interface (both modelled as plane static reflectors). Even here a

menos profundas, sino que a veces también generan grandes campos de burbujas para ayudarse en la captura de las presas. Este artículo subraya los retos a los que se enfrentan los cetáceos a la hora de utilizar la acústica en semejantes entornos, y propone técnicas acústicas que podrían funcionar. La lógica de las soluciones acústicas propuestas será explorada a través de la teoría, la simulación y la experimentación. Los diferentes planteamientos en cuestión se refieren a las redes de burbujas circulares o en espiral generadas por las ballenas jorobadas para atrapar a sus presas, así como a las dificultades asociadas a la ecolocación por parte de los delfines y las marsopas en agua burbujeante. Aunque no esté claro que estas soluciones sea explotadas por los cetáceos, se ha demostrado su eficacia en pruebas en tanques, así como las implicaciones para el sonar humano.

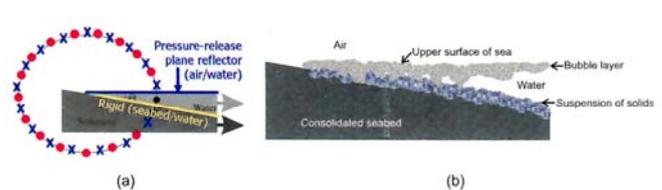


Figura 1.- (a) Si se puede aproximar una zona costera con un océano en forma de cuña, con un fondo que refleje las ondas de presión acústica sin cambio de fase, y una interfase aire/agua que las refleje con un cambio de fase π , entonces el campo de red acústica construido en el agua por un objeto (●) que emite sonidos para frecuencias lo suficientemente altas para que sea validado un enfoque de rayo, será aquel que se produzca si el objeto estuviera en un campo abierto y el sonido fuera emitido por fuentes de imagen, bien sea en fase (○) con la fuente original o en antifase (×). El sedimento y los límites atmosféricos de la columna de agua que en este modelo son planos espejos acústicos, en el plano 2D pasando verticalmente a través de la fuente esas imágenes se distribuirán alrededor del círculo dibujado por la línea discontinua. Se muestran las primeras y escasas fuentes de imagen (○, ×). Para ciertos ángulos grandes Θ (como los de 15° utilizados aquí) las fuentes mapean los sitios específicos dentro de la línea discontinua. (b) En esta representación más realista y esquemática de la zona costera, tanto la interfase aire/mar como el fondo marino consolidado son unos reflectores más complicados que en (a). La interfase aire/mar no sólo ondulara con el paso de las olas de la superficie, sino que estará interrumpida con el ruidoso traqueteo de las nubes de burbujas. Estas burbujas pueden persistir durante varios minutos contra la flotabilidad, formando una dinámica capa de burbujas en una sub-superficie que atenuará y dispersará las señales acústicas (potencialmente de manera no lineal), y puede alterar la velocidad del sonido en $\pm 50\%$. Igualmente, los sólidos suspendidos en el fondo menos profundo dispersarán y atenuarán el sonido que viaja cerca del fondo marino y pueden contener gas atrapado que se ha adherido a las partículas granulares sólidas.

La figura 1 ilustra una imagen clásica de una playa con forma de cuña, como modelada para la propagación acústica [15, 16]. Hasta los modelos más sencillos indican contornos con gran potencial para confundir un sistema de detección basado en un sonar acústico activo. En la figura 2 (a), están incluidos en la columna del agua costera únicamente los dos dispersores acústicos más sencillos (tiempo-invariable): el sedimento y la interfase aire/agua (ambos modelados como reflectores estáti-

single target turns into a multitude (with appropriate time/phase delays). The case when the observer is itself the source of sound is particularly fascinating. A sound source in a wedge-shaped coastal waters can ‘perceive’ image sources; were such a simple wedge ever to exist, one can, for example, imagine how a single cetacean might see this as a ring of ‘siblings’.

cos planos). Incluso aquí, una simple diana se convierte en una multitud (con retrasos tiempo/fase apropiados). El caso en el que el observador es él mismo la fuente de sonido es particularmente fascinante. Una fuente de sonido en aguas costeras con forma de cuña puede “percibir” fuentes de imagen; si existiera semejante cuña, uno podría imaginar, por ejemplo, cómo un simple cetáceo podría ver esto como semejantes juntados en forma de anillo.

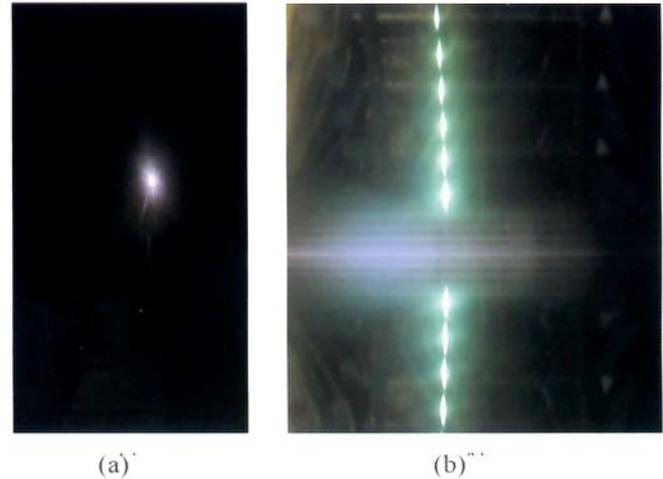
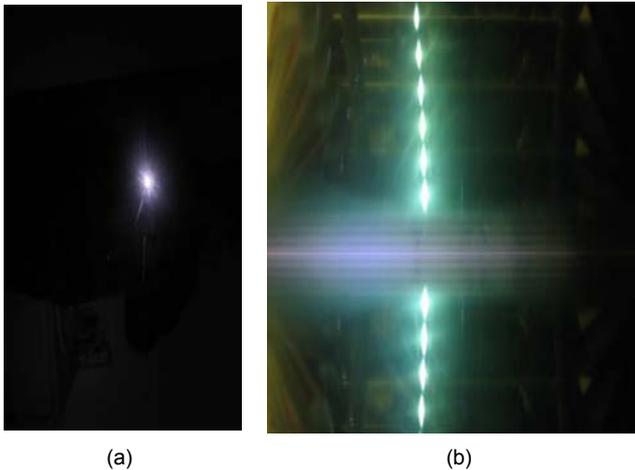


Figure 2.- Image obtained by the observer when a torch (flashlight) is shone by the author (a) at a plane mirror and (b) into a ‘wedge’ formed by two angled planar mirrors.

Figura 2.- Imagen obtenida por el observador cuando la antorcha (flashlight) se enfoca por el autor (a) hacia un espejo plano (b), dentro de una cuña formada por dos espejos angulosos.

Of course most coastal regions do not resemble the flat-sided wedge of Fig. 2(a). Real ocean coastlines provide features whose optical equivalents would be stranger than a carnival “hall of mirrors” [5], its floor covered by a fluctuating ‘dry-ice fog’ (the optical equivalent of suspended sediment particles), its wedge-shape complicated by ripples on the mirrored floor. Its ceiling would be an undulating, highly reflecting mirror, in some places focusing the sound in moving “hot spots” within the water column and floor, and in other places producing areas of dark, absorbing bubble clouds covered with a bright speckle of resonant bubble scatterers. Imagine those clouds being explosively generated by a breaking wave, then spreading over time. The optical equivalent of monostatic or bistatic sonar might involve one or more people with flashlights in this otherwise dark ‘hall of mirrors’. The optical equivalent of nonlinearity would be if the flashlight emitted a strongly-attenuated red light in the carnival hall of mirrors; when, to compensate for this, the brightness of the flashlight is increased, blue new colours might be generated (the optical production of second-harmonic production, though of course the frequencies of blue light in the optical analogue is not twice that of red).

Por supuesto, la mayoría de las regiones costeras no se parecen a la cuña plana representada en la Fig. 2(a). Las líneas costeras verdaderas ofrecen rasgos cuyos equivalentes ópticos serían más extraños que la “sala de los espejos” de un carnaval [5], su suelo cubierto por una fluctuante niebla de dióxido de carbono sólido (el equivalente óptico de partículas de sedimento suspendidas), su cuña complicada por las ondas en el suelo reflectante. Su techo sería un espejo ondulante y altamente reflectante, en algunos lugares concentrando el sonido en sitios delicados móviles entre la columna de agua y el fondo, y en otros lugares produciendo áreas de oscuridad, absorbiendo las nubes de burbujas cubiertas de una mota brillante de dispersores de burbujas resonantes. Imagine que esas nubes sean generadas explosivamente por una ola y que luego se dispersen con el tiempo. El equivalente óptico del sonar monoestático o biestático podría involucrar a una o más personas con antorchas en esta distinta y oscura “sala de los espejos”. El equivalente óptico de la no-linealidad se daría si las antorchas emitieran una luz roja muy atenuada en esta “sala de los espejos” de carnaval; cuando se aumenta el brillo de la antorcha para compensar, se podrían generar nuevos colores azules (la producción óptica de segundo armónico, aunque por supuesto las frecuencias de la luz azul en el análogo óptico no son el doble que las frecuencias de la luz roja).

Therefore even if the sound speed were constant in time and the homogeneous throughout the ocean (as is the case

Por lo tanto, aunque la velocidad del sonido fuera constante en el tiempo y homogéneo a través del océano (como en el

for the speed of light in the visual equivalent of Figure 3), the shallow-water environment would be difficult enough to navigate in. However the presence of bubbles complicates matters significantly. Figure 4(a) shows the bubble size distribution measured at-sea. Whilst, if no bubbles were present, the sound speed would have been almost constant with frequency at $\sim 1500 \text{ m s}^{-1}$, the addition of the bubble population of Figure 4(b) reduces the sound speed at low frequencies, leaves it relatively unaffected at high frequencies (in the absence of multiple scattering effects), and in the frequency range of 100 Hz to 100 kHz through-resonance effects are seen (Figure 4(b)). Figure 4(b) shows the extra attenuation which, it is calculated, the presence of this bubble population would impart. These behaviours can be readily understood from the slope of the maps of bubble volume against applied pressure, where the area mapped out corresponds to the dissipation and the slope corresponds to the sound speed [1, 3, 17]. Measured sound speed profiles and attenuations will be discussed in Figure 21). Hence bubble activity can reduce the sound speed dramatically (Birkin *et al.* [18] for example, measuring a sound speed reduction to nearly 50% of its original value in cavitating conditions).

caso de la velocidad de la luz en el equivalente visual de la Figura 3), sería bastante difícil navegar en este entorno de aguas poco profundas. Sin embargo, la presencia de burbujas complica seriamente las cosas. La Figura 4(a) muestra la distribución del tamaño de burbujas medido en el mar. Mientras que si no hubiera habido burbujas, la velocidad del sonido hubiera sido prácticamente constante, con una frecuencia de $\sim 1500 \text{ m s}^{-1}$, el añadir las burbujas de la Figura 4(b), reduce la velocidad del sonido a frecuencias bajas, y la deja relativamente igual en frecuencias altas (en ausencia de efectos de dispersión múltiples), y en el abanico de frecuencias entre 100 Hz y 100 kHz se pueden observar efectos de resonancia (Figura 4(b)). La Figura 4(b) muestra la atenuación añadida que impartiría la presencia de las burbujas (está calculado). Se pueden entender rápidamente estos comportamientos con la pendiente de los mapas del volumen de burbuja contra la presión aplicada, donde el área mapeada corresponde a la disipación y la pendiente corresponde a la velocidad del sonido. [1, 3, 17]. (Se discutirán los perfiles medidos de la velocidad del sonido y las atenuaciones en la Figura 21). Por lo tanto, la actividad de las burbujas puede reducir fuertemente la velocidad del sonido (Birkin *et al.* [18] por ejemplo, midiendo una reducción de velocidad del sonido a casi el 50% de su valor original en condiciones de cavitación).

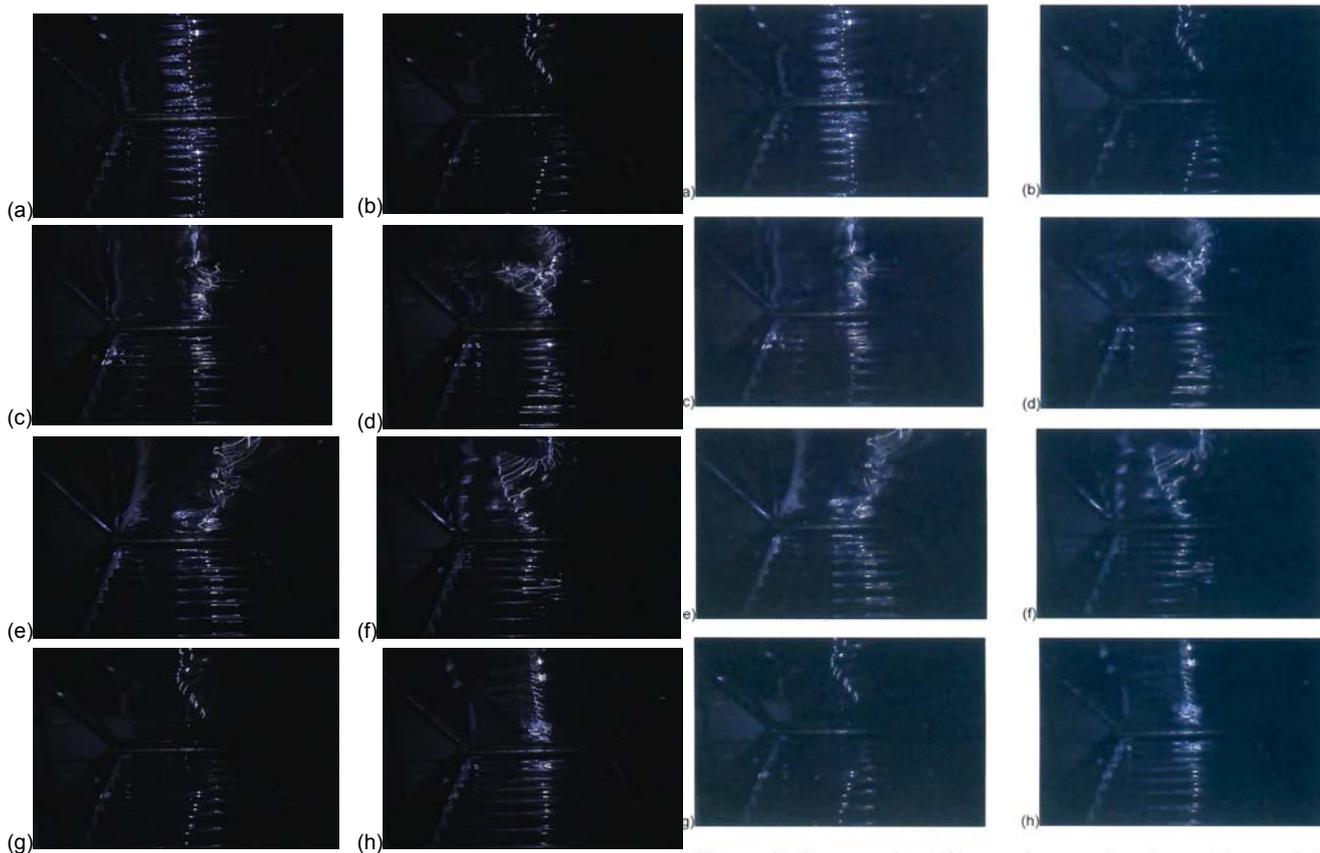


Figure 3.- The image obtained when the experiment of Figure 2(b) is repeated, but the bottom surface of the wedge is formed by plating a mirrored surface onto some corrugated plastic sheeting, and the top surface of the wedge has been made using a flexible mirror. In (a) the two surfaces are still; but for the images in parts (b) to (h), the upper surface is moved in a wave-like manner. To see a movie of this, go to:

<http://www.isvr.soton.ac.uk/fdag/UUA/Cetaceans.HTM>

Figura 3.- Imagen obtenida cuando se repite el experimento de la Figura 2(b), pero la superficie del fondo se forma al aplicar una superficie reflectante sobre una capa de plástico ondulado, y se ha formado la superficie superior de la cuña utilizando un espejo flexible. En (a) las dos superficies son iguales; pero para las imágenes en las partes (b) a (h), la superficie superior se mueve a la manera de una ola. Para ver una película sobre esto, véase: <http://www.isvr.soton.ac.uk/fdag/UUA/Cetaceans.HTM>

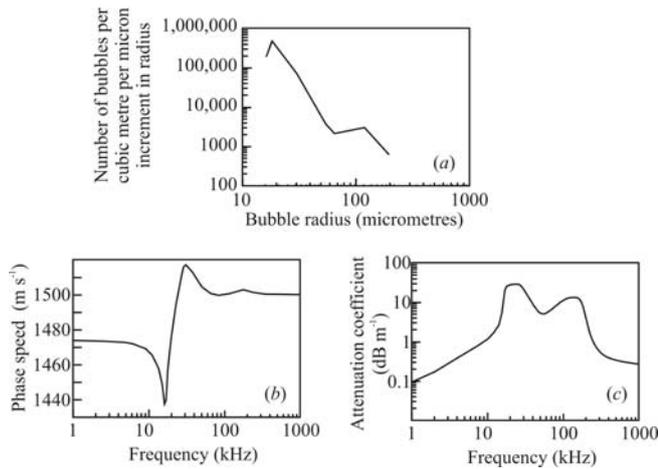


Figure 4.- (a) A bubble distribution function taken from a sea trial using the combination frequency technique. The mantissa plots the number of bubbles per cubic metre, per micron increment in radius. (b) Phase speed variations with frequency derived for the bubble population shown in (a). (c) The excess attenuation (i.e. that component of attenuation for which bubbles are responsible) with frequency derived for the bubble population shown in figure (a) (data from T. G. Leighton, S. D. Meers).

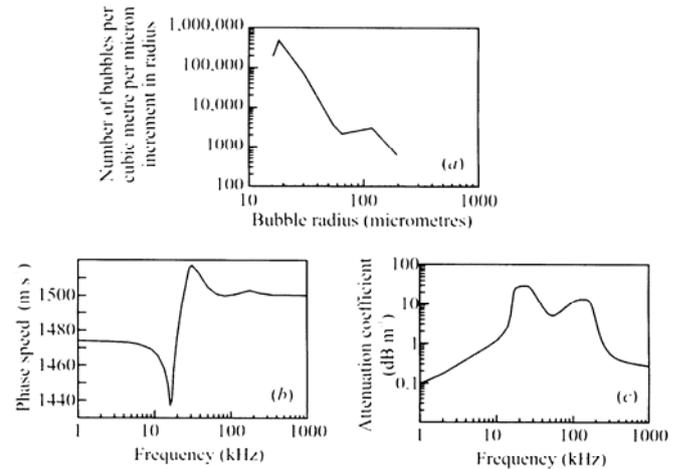


Figura 4.- (a) Una función de distribución de la burbuja tomada de un ensayo en el mar, utilizando la técnica de combinación de frecuencias. La mantissa traza el número de burbujas por metro cúbico, por incremento de micrón en radio. (b) Variaciones de la fase de velocidad con la frecuencia derivada para las burbujas mostradas en (a). (c) La atenuación del exceso (i.e. aquel componente de la atenuación del que son responsables las burbujas) con frecuencia derivada para las burbujas mostradas en (a) (datos de T.G. Leighton, S.D. Meers).

There are species of dolphin and porpoise (odontoceti) which inhabit shallow coastal waters. Consider the task faced by such creatures if they attempt to echolocate in such an environment. If a human were to find themselves suddenly in a world where the speed of light varied by factors of two on a sub-second timescale, they would no doubt find it almost impossible to function, and that is the circumstance in which the coastal odontoceti find themselves. However the key here is that the odontoceti have evolved in this environment. Given their intelligence, the possibility that odontoceti have found fascinating solutions to these acoustical challenging circumstances, and even that they are larger cetaceans could exploit these features, is a fascinating area for investigation. Given that the UK restricts measurements which can be made on cetaceans, a series of 'thought experiments' have been proposed by the author in which to explore this possibility [1, 5]. These will now be outlined in the following sections.

The bubble nets of humpback whales

This section will outline a hypothesis regarding one possible implication of the effects of bubbles on sound speed that were illustrated in Figure 4(c). Specifically, this is that low frequencies tend to experience a reduced sound speed in bubbly water. This led to a hypothesis [1, 5, 19] which might explain the mystery of the mechanism by which humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) exploit bubble nets to catch fish.

Existen especies de delfines y marsopas (odontoceti) que habitan las aguas costeras poco profundas. Es preciso considerar la tarea que tienen que llevar a cabo estas criaturas, si intentan practicar la ecolocación en semejantes entornos. Si los humanos se encontraran de golpe en un mundo en el que la velocidad de la luz variara con factor 2 en una escala temporal inferior al segundo, les resultaría sin lugar a dudas casi imposible funcionar; y ésta es precisamente la situación en la que se encuentran los odontoceti costeros. Sin embargo la clave aquí consiste en que los odontoceti han evolucionado en este entorno. Habida cuenta de su inteligencia, la posibilidad de que los odontoceti hayan encontrado soluciones fascinantes a estas retadoras circunstancias acústicas, e incluso que cetáceos más grandes pudieran explotar estos elementos, es un área fascinante que queda por investigar. Considerando que el Reino Unido restringe las mediciones que se pueden hacer sobre los cetáceos, el autor propone una serie de "experimentos del pensamiento" con los que se podría explorar esta posibilidad [1, 5]. Estos serán tratados en las siguientes secciones del documento.

Las redes de burbujas de las ballenas jorobadas

Esta sección pondrá de relieve la hipótesis referente a una posible implicación de los efectos de las burbujas en la velocidad del sonido, como se ilustra en la Figura 4(c). Específicamente que las frecuencias bajas tienden a experimentar una velocidad de sonido reducida en aguas burbujeantes. Esto lleva a una hipótesis [1, 5, 19] que podría explicar el misterio del mecanismo por el cual las ballenas jorobadas (*Megaptera novaeangliae*) utilizan las redes de burbujas para atrapar peces.

It has been known for decades [20] that humpback whales, either singly or in groups, sometimes dive deep and then release bubbles to form the walls of a cylinder, the interior of which is relatively bubble-free (Figure 5(a, b)). The prey are trapped within this cylinder, for reasons previously unknown, before the whales ‘lunge feed’ on them from below (Figure 5(c)). In addition to the circular nets of Figure 5(b), spiral nets have also been photographed (Figure 6), although the relative frequency of circular, spiral, or other net geometries is not known [21]. Originally, an acoustical hypothesis for why the prey are trapped [1, 5, 19] was based on circular bubble nets, because the bubble nets of humpback whales are frequently described as being ‘circular’ [20, 22-24]. This was followed by an acoustical hypothesis regarding spiral nets [12].

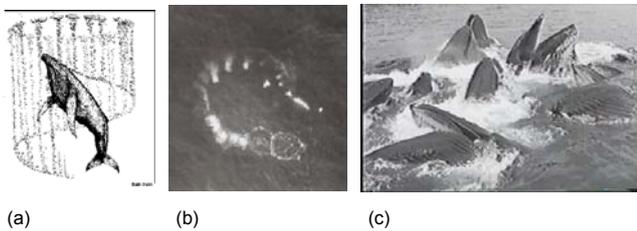


Figure 5.- (a) Schematic of a humpback whale creating a bubble net. A whale dives beneath a shoal of prey and slowly begins to spiral upwards, blowing bubbles as it does so, creating a hollowed cylindrical bubble net. The prey tends to congregate in the centre of the cylinder, which is relatively free of bubbles. Then the whale dives beneath the shoal, and swims up through the bubble-net with its mouth open to consume the prey (‘lunge feeding’). Groups of whales may do this co-operatively (Image courtesy of Cetacea.org). (b) Aerial view of a humpback bubble net (photograph by A. Brayton, reproduced from reference [25]. The author has obtained permission from the publisher but has been unable to contact the photographer.) (c) Humpback whales lunge feeding (Image courtesy of L. Walker, <http://www.groovedwhale.com>).

Durante décadas se ha sabido [20] que las ballenas jorobadas, tanto en solitario como en grupo, a veces bajan a aguas profundas y entonces sueltan burbujas para formar las paredes de un cilindro, el interior del cual está relativamente libre de burbujas (Figura 5 (a, b)). Las presas quedan atrapadas dentro de este cilindro por razones previamente desconocidas, antes de que las ballenas carguen contra ellas desde abajo (*alimentación por embestida*) (Figura 5(c)). Además de las redes circulares de la Figura 5(b), también han sido fotografiadas redes espirales (Figura 6), a pesar de que no se conozca la frecuencia relativa de las redes circulares o espirales o con otras formas geométricas [21]. Originalmente, una hipótesis acústica del porqué las presas se ven atrapadas [1, 5, 19], estaba basada en las redes de burbujas circulares, porque las redes de burbujas de las ballenas jorobadas son frecuentemente descritas como “circulares” [20, 22-24]. A esta le siguió una hipótesis acústica sobre redes espirales [12].

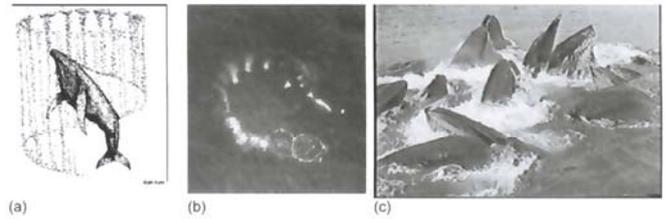


Figura 5.- (a) Dibujó esquemático de una ballena jorobada creando una red de burbujas. Una ballena bucea por debajo de un banco de presas y comienza a ascender lentamente en espiral a la vez que expele burbujas, creando así una red de burbujas cilíndrica. Las presas tienden a congregarse en el centro del cilindro, zona relativamente libre de burbujas. Entonces la ballena se sitúa debajo de la red y asciende a través de la red con la boca abierta para consumir las presas (*alimentación por embestida*). Este ejercicio puede ser realizado por grupos de ballenas, de manera cooperativista (imagen cortesía de Cetacea.org). (b) Vista aérea de una red de una ballena jorobada (fotografía de A. Brayton, reproducida a partir de la referencia [25]. El autor ha obtenido el permiso del editor pero no ha podido contactar con el fotógrafo). (c) Ballenas jorobadas comiendo las presas (*alimentación por embestida*) (imagen cortesía de L. Walker, <http://www.groovedwhale.com>).



Figure 6.- Three images illustrating the formation (a)-(c) of a spiral bubble net, with lunge-feeding occurring in frame (c). Note the presence of opportunistic birds. (Photographs by Tim Voorheis - www.gulfmaineproductions.com. Photographs were taken in compliance with United States Federal regulations for aerial marine mammal observation).

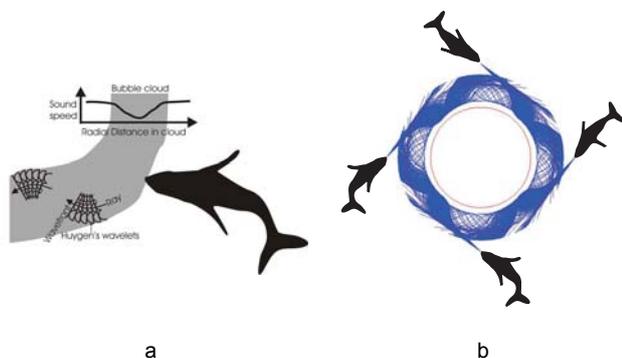


Figura 6.- Tres imágenes que ilustran la formación (a)-(c) de una red de burbujas espiral, con la ingesta de las presas (*alimentación por embestida*) ilustrada en el cuadro (c). Se percibe la presencia de aves oportunistas. (Fotografías de Tim Voorheis - www.gulfmaineproductions.com. Estas fotografías fueron tomadas respetando las regulaciones de EE.UU. para la observación aérea de mamíferos marinos).

It was proposed that humpback whales use bubble nets as acoustic waveguides to create a sonic trap for prey, as shown in Figure 7 [1, 5, 19]. When the whales

Se propuso que las ballenas jorobadas utilizaban las redes de burbujas como guías acústicas para crear trampas sónicas para las presas, como se muestra en la Figura 7 [1,5,19]. Cuando las

form such nets, they emit very loud, ‘trumpeting feeding calls’ [26]. The available recordings containing energy up to at least 4 kHz. A suitable void fraction profile would cause the wall of the cylinder to act as a waveguide, creating a ‘wall of sound’ with a relatively quiet interior at the centre of the cylinder. Figure 7(a) illustrates schematically how the bubble nets may cause sound to be trapped within the bubbly region. This plan view shows a section of the bubble net, with the whale emitting sound from outside of it. As shown by the sound speed graph, the speed of sound varies across the bubbly region, with a minimum on the axis. As indicated in Figure 4(b), this will be the case for sound waves of frequencies which are less than the resonant frequencies of the individual bubbles, and where the bubble density is a maximum on the axis. The behaviour of the sound within the bubbly region can be described by Huygens’ principle. The new position of a propagating wavefront may be found from the envelope of the small Huygens wavelets spreading out from the previous position



ballenas forman este tipo de redes, emiten unos sonidos muy fuertes (“llamadas de trompeta al alimento”) [26]. Las grabaciones disponibles contienen energía hasta de 4 kHz. Un perfil fraccionado vacío provocaría que la pared del cilindro actuara como una guía, creando un “muro del sonido” con un interior relativamente en calma en el centro del cilindro. La Figura 7(a) ilustra de manera esquemática cómo las redes de burbujas pueden hacer que el sonido quede atrapado dentro de la zona burbujeante. Este plano muestra una sección de la red de burbujas, con la ballena emitiendo un sonido desde fuera de él. Como se muestra en el gráfico de la velocidad del sonido, ésta varía a través de la zona burbujeante, con un mínimo de variación en los ejes. Como se indica en la Figura 4(b), éste será el caso para ondas sonoras de frecuencias que son menos que las frecuencias resonantes de las burbujas individuales, y donde la densidad de las burbujas está al máximo en los ejes. Se puede describir el comportamiento del sonido dentro de la zona burbujeante por el principio de Huygens. La nueva posición de un frente de propagación de olas, se puede encontrar desde la cubierta de las pequeñas olas

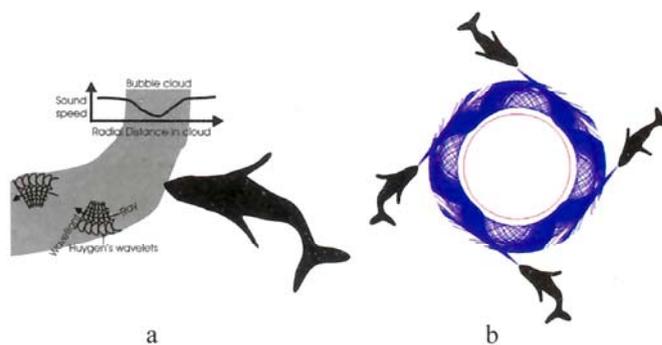


Figure 7.- (a) Schematic of a whale insonifying a bubble-net (plan view), illustrating the sound speed profile in the cloud and, by Huygens’ construction, sample ray paths. The sound speed profile assumes void fractions are greatest in the mid-line of the net wall, and assumes that the bubbles pulsate in stiffness mode. Hence the closer a Huygens wavelet is to the mid-line, the smaller the radius of the semicircle it forward-plots in a given time. Rays tend to refract towards the mid-line. (b) Plan view of four whales insonifying an annular bubble net (having 20 m mean diameter and a wall width of 4 m). Here the bubbles are driven in stiffness-controlled mode such that the sound speed decreases linearly from 1500 m/s at the walls (i.e. the sound speed in bubble-free water), to 750 m/s at the cloud midline (corresponding to a void fraction there of $\sim 0.01\%$). The rays are coloured blue, and the locations of the inner and outer walls of the net are shown in red. Computed ray paths, where each whale launches 281 rays with an angular extent of 10° , refract as in (a). The rays gradually leak out, although some rays can propagate around the entire circumference. Plotting of a raypath is terminated when it is in isovelocity water and on a straight-line course which will not intersect the cloud. This refers to rays whose launch angles are such that they never intersect the net; and to rays which, having entered the net and undertaken two or more traverses of the mid-line, leave it [19]. For further details see:

http://www.isvr.soton.ac.uk/fdag/spiral_nets.htm

Figura 7.- (a) Esquema de una ballena “insonificando” una red de burbujas (vista en plano), ilustrando el perfil de la velocidad del sonido en la nube, y, según la construcción de Huygens, de las trayectorias simples de los rayos. El perfil de la velocidad del sonido asume que las fracciones vacías son más grandes en la línea media de la pared de la red, y asume también que las burbujas laten de manera rígida. Por lo tanto, cuanto más cerca se encuentra una pequeña ola de Huygens de la línea media, más pequeño es el radio del semicírculo en un momento dado. Los rayos tienden a refractarse en la línea media. (b) Vista en plano de cuatro ballenas “insonificando” una red de burbujas anular (la medida mediana del diámetro es de 20 m y la anchura de la pared de 4 m). Aquí las burbujas son conducidas en un modo rígido, de manera que la velocidad del sonido descende linealmente de 1500 m/s en las paredes (i.e. la velocidad del sonido en agua libre de burbujas), hasta 750 m/s en la línea central de la nube (correspondiente a una fracción vacía de $\sim 0.01\%$). Los rayos están representados en azul, y la localización de las paredes interiores y exteriores está representada en rojo. La trayectoria calculada de los rayos, donde cada ballena envía 281 rayos con una extensión angular de 10° , se refracta como puede verse en (a). Los rayos de desvanecen gradualmente, aunque algunos rayos pueden propagarse alrededor de toda la circunferencia. El trazado de la trayectoria queda finalizado cuando se encuentra en agua isoveloz y en una órbita en línea directa que no cruzará la nube. Esto se refiere a los rayos cuyos ángulos de lanzamiento son tales que nunca cruzan la red; así como a rayos que, habiendo penetrado en la red y atravesado una o dos veces la línea central, la abandonan [19]. Para más detalles véase:

http://www.isvr.soton.ac.uk/fdag/spiral_nets.htm

of the wavefront. Since the speed of sound near the centre line of the bubbly region is less than that nearer the edge, the wavelets near the axis will have smaller radii than those near the edge (since, in any finite small time, they travel less far). The wavefronts therefore change direction and refract towards the centreline of the region. Even if the interior is not bubble-free, similar refraction occurs in this model, provided the void fraction decreases as one moves into the cylinder interior.

Figure 7(b) shows a two-dimensional ray diagram representing in plan view the interaction of sound with a bubble net. The bubble net is modelled as an annular region containing the bubble population, whilst the regions in the centre of and outside the annulus are free of bubbles. It is assumed that, just as for the oceanic bubble size distribution of Figure 4(b), the size distribution in the net is such that the sound speed in the walls of the net will be lower than that in bubble-free water for the <4 kHz insonification used by the whales.

The hypothesis is that any prey which attempted to leave the trap prey would enter a region where the sound is subjectively loud, be startled, and in response school (the bubble net turning the 'schooling' survival response into an anti-survival response). Furthermore, the trumpeting calls encountered in the 'wall of sound' were appropriate for exciting swim bladder resonances in the prey [1, 5, 12, 27, 28]. Either or both effects could encourage the prey to remain within the bubble net, and so trap them ready for consumption. The natural schooling response of fish to startling would, in the bubble net, be transformed from a survival response into one that aids the predator in feeding.

There are however inefficiencies associated with the circular bubble net. To generate a 'wall of sound' of the form shown in Figure 7(b), the insonification needs to be tangential to the walls and, even if it is, the waves which propagate within the bubbly layer are attenuated and scattered by the bubbles (Figure 4(c)). Whilst of course sufficient attenuation on its own could generate a 'wall of sound' by simply preventing sound levels within the bubble net from attaining significant values, the refractive component of the 'wall of sound' required both tangential insonification and, if the attenuation were sufficiently great, the sound field might need reinforcing by other whales to generate a complete wall (as in Figure 7(b)). Furthermore, rays which refract out of the net are effectively wasted energy as they cannot be recaptured by the 'wall of sound'.

de Huygens, dispersándose desde la posición anterior del frente de olas. Habida cuenta de que la velocidad del sonido cerca de la línea central de la zona burbujeante es menor que ésta cuando estando cerca del límite, las pequeñas olas cerca de los ejes tendrán radios menores que aquellas que se encuentran cerca de los límites (ya que en un espacio de tiempo finito, viajan a distancias menores). Los frentes de ola cambian, por tanto, de dirección y se refractan hacia la línea central de la región. Aunque el interior no esté libre de burbujas, ocurren refracciones similares en este modelo, siempre y cuando la fracción vacía descienda a medida que uno se mueve en el interior del cilindro.

La Figura 7(b) muestra un diagrama radial bidimensional, representando la interacción del sonido con una red de burbujas. La red de burbujas está modelada como una zona anular que contiene burbujas; mientras que en las regiones dentro y fuera del anillo no hay burbujas. Se asume que, como para la distribución de las burbujas en el mar de la Figura 4 (b), la distribución de tamaños en la red es tal que la velocidad del sonido en las paredes de la red será inferior que la velocidad en agua libre de burbujas para la "insonificación" <4 kHz utilizada por las ballenas.

La hipótesis es que cualquier presa que intentara abandonar la trampa entraría en una zona donde el sonido es subjetivamente alto, se asustaría y volvería al banco de peces (la red de burbujas convierte así la respuesta de supervivencia de permanecer en el banco de peces en una respuesta anti-supervivencia). Más aún, las fuertes llamadas ("*de trompeta*") encontradas en el "muro del sonido" fueron apropiadas para excitar resonancias en la vejiga natatoria de las presas [1, 5, 12, 27, 28]. Cualquiera de los dos efectos, o los dos, podría animar a las presas a permanecer dentro de la red de burbujas, y así atraparlas para ser devoradas. La respuesta natural de un pez a permanecer en el banco de peces ante un sobresalto podría pasar, en la red de burbujas, de ser una respuesta de supervivencia a una que ayuda al depredador a alimentarse.

Existen, sin embargo, ineficiencias asociadas con la red de burbujas circular. Para generar un "muro del sonido" tal y como se muestra en la Figura 7(b), la "insonificación" ha de ser tangencial a los muros, y aunque así sea, las olas que se propagan dentro de la zona de burbujas se ven atenuadas y dispersadas por las burbujas (Figura 4(c)). Una atenuación suficiente podría, por supuesto, generar un "muro del sonido" por sí misma si se impide que los niveles de sonido dentro de la red de burbujas obtengan valores significativos. Pero el componente refractivo del "muro del sonido" requirió una "insonificación" tangencial y, además, si la atenuación era lo suficientemente importante, el campo sonoro necesitaría ser reforzado por otras ballenas para generar un muro completo (como en la Figura 7(b)). Además, los rayos que se refractan fuera de la red constituyen una pérdida de energía, ya que no pueden volver a ser capturados por el "muro del sonido".

The spiral bubble nets of Figure 6 do not suffer from these disadvantages [12, 21]. Just as in the circular bubble net of Figure 7(b), the propagating rays which form the ‘wall of sound’ can be confined within bubbly water by refraction. However in both cases the rays trapped by refraction propagate through bubbly water, where the attenuation is greater than it would be for bubble-free water. It is therefore advantageous in forming a ‘wall of sound’ that the spiral bubble nets contain a second, complementary path, where the containment of the rays works through reflection, and crucially, the propagation occurs through bubble-free water where the attenuation is less. Furthermore the open end of the spiral forms a more robust entry point for the sound, and does not require shallow angles of the sort shown in Figure 7(b) in order to create a wall of sound with a quiet interior. The trap is therefore much more tolerant to the positioning of the whale.

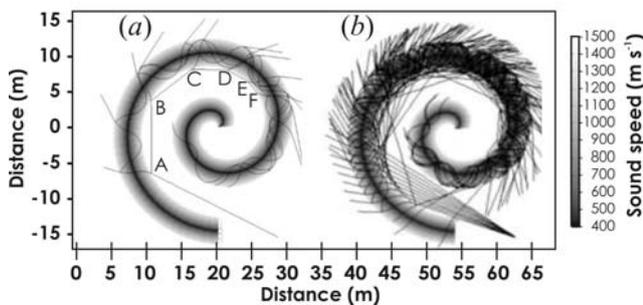


Figure 8.- Plan view of 2D spiral bubble net. (a) A single ray is launched. It reflects off the outer wall of the bubble-free arm of the spiral, the grazing angle decreasing each time (34° at A; 29° at B; 23° at C; 19° at D; 16° at E; 13° at F). At each reflection, not only does a reflected ray propagate further into the bubble-free arm, but a refracted ray propagates into the bubbly arm of the spiral. Attenuation is not included. (b) A beam of rays is launched into the spiral. The spiral generates clear regions which are both bubble-free and quiet (for further details see references [12, 21] and http://www.isvr.soton.ac.uk/fdag/spiral_nets.htm).

Consider just one ray as it enters the bubble-free arm of the spiral, as shown in Figure 8(a) (all modelling in this paper is restricted by the limitations of ray representation, as discussed earlier [19]). When it first meets the outer edge of the bubble-free arm (at the point labelled A, here with a grazing angle of 34°), the subsequent propagation is represented by two rays: a refracted ray in the bubbly arm, and a ray which is reflected into the bubble-free arm. The refracted ray propagates in the bubbly waveguide. As it approaches the edge of the bubbly water in principle it may of course be internally refracted back into the bubbly water. Alternatively a given ray may intersect the edge of the bubbly waveguide, which in the model results in two rays propagating onwards: one is reflected back into the

Las redes de burbujas en espiral de la Figura 6 no sufren estas desventajas [12, 21]. Sólo en la red circular de la Figura 7(b), los rayos de propagación que forman el ‘muro del sonido’ pueden ser confinados en el agua burbujeante por refracción. Sin embargo, en ambos casos los rayos atrapados por la refracción se propagan a través del agua burbujeante, donde la atenuación es mayor que en aguas libres de burbujas. Es por lo tanto ventajoso en la formación del ‘muro del sonido’ que las redes de burbujas en forma de espiral contengan una segunda y complementaria trayectoria, donde la contención de los rayos funcione a través de la reflexión y, punto crucial, donde la propagación ocurra a través de aguas libres de burbujas con menor atenuación. Además, la parte final de la espiral forma un punto de entrada más robusto para el sonido, y no requiere ángulos llanos como los que se muestran en la Figura 7(b), con el fin de crear un ‘muro del sonido’ con un interior en calma. La trampa es por lo tanto mucho más tolerante con la posición de la ballena.

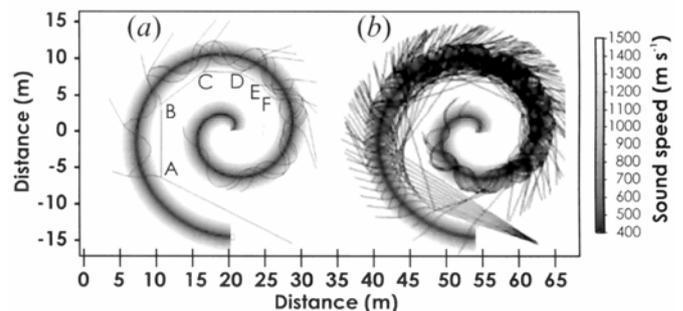


Figura 8.- Plano en 2D de una red de burbujas en forma de espiral. (a) Se lanza un simple rayo. Se refleja en el muro exterior del brazo sin burbujas de la espiral, y el ángulo de incidencia va decreciendo todo el tiempo (34° en A; 29° en B; 23° en C; 19° en D; 16° en E; 13° en F). En cada reflexión, no sólo se propaga un rayo reflejado dentro de la sección libre de burbujas, sino que un rayo refractado se propaga dentro de la sección burbujeante de la espiral. No está incluida la atenuación. (b) Se lanza un haz de rayos dentro de la espiral. Ésta genera zonas claras que son a la vez zonas libres de burbujas y tranquilas (para más detalles, véase las referencias [12, 21] y el sitio: http://www.isvr.soton.ac.uk/fdag/spiral_nets.htm).

Consideremos solamente un rayo en el momento de penetrar una sección libre de burbujas de la espiral, como se muestra en la Figura 8(a) (todo el modelo utilizado en este trabajo se ve restringido por las limitaciones de las representaciones de los rayos, como se ha debatido anteriormente [19]). Cuando se encuentra por primera vez con el límite exterior del brazo libre de burbujas (en el punto llamado A, con un ángulo de incidencia de 34°), la subsiguiente propagación está representada por dos rayos; un rayo refractado en el brazo burbujeante y un rayo que se refleja dentro del brazo libre de burbujas. El rayo refractado se propaga en la zona burbujeante que sirve de guía. A medida que se acerca al límite del agua burbujeante puede verse por supuesto internamente refractado de vuelta en el agua burbujeante. Alternativamente, un rayo puede cruzar el límite

bubble-free water (either within the spiral, or outside of it). Propagation within the bubbly waveguide is attenuated much more than propagation in the bubble-free arm. Because of the absence of attenuation in Figure 8(a), and because of the ability for rays to multiply at interfaces, there is of course no information in the figure with respect to acoustic intensity.

The ray which at A reflected into the bubble-free arm of the spiral, propagates through it until it next meets the bubbly water at B, with a reduced grazing angle (here, 29°). Again two rays are shown propagating away from B, a refracted ray (which recharges the attenuated sound field in the bubbly water), and a reflected ray which continues through the bubble-free water towards C. Further reflections at C, D etc. occur with reduced grazing angle, each one recharging the field in the bubbly water. The number of reflections is artificially truncated in the calculation at F.

The ever-reducing grazing angle will keep the inner edge of the bubbly net quiet, and the attenuation in the bubble cloud, and loss of energy from the ray in the bubble-free water each time it reflects, serve to reduce the sound field towards the centre of the spiral. In this way, quiet regions are generated. These are not just at the centre of the net, as with the circular net, but also along the inner edge of the bubble-free arm. Fish here will be in bubble-free, quiet water, but trapped within the spiral 'maze': in 2D, few positions will have an exit visible along the line of sight, and in real 3D nets the locations of the predators must be taken into account. Whilst Figure 8(a) showed the results (without attenuation) of the launching of a single ray into the spiral, Figure 8(b) shows a ray plot for the launching of a beam. As before, the plot lacks attenuation and requires the generation of both a refracted ray and a reflected one at interfaces, such that intensity information is incomplete. Note that the only rays with large grazing angles in the bubble-free arm have first propagated through the bubbly layer and suffered losses when refracting through the interface at least twice, and hence will be heavily attenuated.

There are clearly simplifications in Figure 8, some of which were discussed in reference [19]. As stated earlier, available recordings of the humpback call emitted during bubble net feeding contain significant energy in the 4 kHz range. The ray tracing approach used in the model presented here is appropriate for this frequency range, given the overall dimensions of the net. However, to understand

de la zona burbujeante, mientras que otro rayo se verá refractado en la zona libre de burbujas (bien sea dentro o fuera de la espiral). La propagación dentro de la zona burbujeante se ve mucho más atenuada que la propagación en el brazo libre de burbujas. Por la ausencia de atenuación en la Figura 8(a), y por la habilidad de los rayos en multiplicarse en las interfaces, no hay por supuesto información en la figura acerca de la intensidad acústica.

El rayo que en A se refleja en la sección libre de burbujas de la espiral, se propaga en ella hasta que se encuentra con el agua burbujeante en B, con un ángulo de incidencia reducido (29°). Se muestran de nuevo dos rayos propagándose hacia fuera desde B, un rayo refractado (que recarga el campo sonoro atenuado en el agua burbujeante), y un rayo reflejado que sigue a través del agua libre de burbujas hacia C. Ocurren más reflexiones en C, D, etc., con un ángulo de incidencia reducido, cada uno de ellos recargando el campo en el agua burbujeante. El número de reflexiones está artificialmente truncado en el cálculo en F.

El siempre reducido ángulo de incidencia mantendrá tranquilo el margen interno de la red, y la atenuación en la nube de burbujas y la pérdida de energía del rayo en el agua libre de burbujas cada vez que se refleja, sirven para reducir el campo sonoro hacia el centro de la espiral. De esta manera, se generan zonas tranquilas. Éstas no están únicamente en el centro de la red, como en la red circular, sino también a lo largo del margen interno del brazo libre de burbujas. El pez, en este caso, estará en agua tranquila, libre de burbujas, pero atrapado dentro del laberinto espiral: en 2D, pocas posiciones tendrán una salida visible en la línea de visibilidad, y en las redes reales en 3D es preciso tomar en cuenta las localizaciones de los depredadores. Mientras que la Figura 8(a) mostraba los resultados (sin atenuación) del lanzamiento de un solo rayo dentro de la espiral, la Figura 8(b) muestra un trazado para el lanzamiento de un haz. Como antes, el trazado carece de atenuación y requiere la generación de un rayo refractado y de un rayo reflejado en las interfaces, sabiendo que la información sobre la intensidad es incompleta. Hay que señalar que únicamente los rayos con grandes ángulos en la sección libre de burbujas se han propagado los primeros en la zona burbujeante y han sufrido pérdidas al refractarse a través de la interfase al menos dos veces, y por lo tanto serán seriamente atenuados.

Existen claramente simplificaciones en la Figura 8, algunas de las cuales ya han sido discutidas en la referencia [19]. Como se ha dicho anteriormente, las grabaciones disponibles de las llamadas de las ballenas jorobadas emitidas durante la ingesta en la red de burbujas contienen una cantidad significativa de energía dentro del rango 4 kHz. El enfoque del seguimiento del rayo utilizado en el modelo presentado aquí es el apropiado para este rango de frecuencias, habida cuenta de las dimensio-

the role of low frequency energy emitted during bubble net feeding, modal analysis would be required.

Figure 8 is, of course, two-dimensional representations, but the key elements would also pertain to a 3D spiral net. Therefore, should the whale emit its feeding call into the net from below, the propagation path in 3D can readily be visualised from this 2D representation. The walls of the net in Figures 8 are smooth and generate specular reflection, whilst the degree to which the walls of Figure 3 are rough is difficult to estimate, particularly as the visible shape of the net is dominated by the large bubbles: in contrast, the small bubbles can be less easy to see, but very potent acoustically. The roughness as perceived by the scattered acoustic field depends on the wavelength (λ) and the grazing angle (θ), such that the Rayleigh roughness criterion states a surface is rough if $kh \sin \theta = (2\pi/\lambda)h \sin \theta \gg 1$, where h is the mean height of the surface undulations, and k is the wavenumber. In the absence of data on the geometry of the net which includes all bubbles², it is difficult to make calculations regarding smoothness. Because of the way the spiral continually reduces the grazing angle of rays as they penetrate further within it, then all else being equal, the inner regions of the spiral may therefore appear smoother, so creating robust regions within the spiral that are bubble-free and quiet. However this trend will be tempered by any change in h along the length of the spiral (reflecting the size of bubbles blown and the age of that portion of the net). The surface will appear most rough for the highest frequencies, which we take as 4 kHz [19]. For acoustic fields in bubble-free water, this gives a wavelength of 0.375 m, so that for test values of h of 0.1 m and 1 m, the wall will appear smooth for grazing angles less than about 37° and 4° respectively, with commensurately larger angles for lower frequencies. The angles compare well with the sequence of angles recorded in the caption to Figure 8(a).

Why some nets should be spiral is not clear. It may be a pragmatic or incidental response to practical limitations. Conceivably however the whales could be exploiting the different acoustical properties of circular and spiral nets. These could confer possible advantages to the spiral configuration through the following features:

- A wall of sound can be generated using acoustic paths which propagate in bubble-free water (Figure 8) and hence suffer less attenuation than seen for acoustic paths in bubbly water (to which circular nets are restricted).

nes generales de la red. Sin embargo, para entender el papel de la energía de baja frecuencia emitida durante la ingesta en la red de burbujas, se requeriría el análisis modal.

La Figura 8 consiste, por supuesto, en representaciones en dos dimensiones, pero los elementos clave pertenecen también a una red espiral en 3D. Por lo tanto, si la ballena emitiera sus llamadas dentro de la red desde abajo, se puede visualizar claramente la trayectoria de la propagación en 3 D desde la representación en 2 D. Las paredes de la red en la Figura 8 son lisas y generan reflexión especular, mientras que es difícil estimar el grado de aspereza de las paredes, particularmente porque la forma visible de la red está dominada por grandes burbujas: en contraste, puede que sea más difícil ver las burbujas pequeñas, pero éstas son muy potentes acústicamente hablando. La aspereza percibida por el campo acústico dispersado depende de la longitud de onda (λ) y del ángulo de incidencia (θ), de forma que el criterio de aspereza de Rayleigh establece que una superficie es áspera si $kh \sin \theta = (2\pi/\lambda) h \sin \theta \gg 1$ donde h es la altura media de las ondulaciones en superficie, y k es el número de onda. En ausencia de datos sobre la geometría de la red que incluye todas las burbujas², es difícil realizar cálculos sobre la lisura. Por la manera en que la espiral reduce continuamente el ángulo de incidencia de los rayos cuando éstos penetran más en ella, entonces, si todos los demás factores son iguales, las regiones internas de la espiral pueden por lo tanto parecer más lisas, creando así fuertes regiones dentro de la espiral que son tranquilas y está libres de burbujas. Sin embargo, esta tendencia se verá afectada por cualquier cambio en h a lo largo de la espiral (reflejando el tamaño de las burbujas explotadas y la edad de esta porción de la red). La superficie aparecerá prácticamente rugosa para las frecuencias altas, que tomaremos como 4kHz [19]. Para campos acústicos en un agua libre de burbujas, esto da una longitud de onda de 0,375 m; para valores de prueba de h de 0.1 m y 1 m, la pared aparecerá lisa para ángulos de incidencia menores de 37° y 4° respectivamente, con ángulos proporcionalmente más grandes para frecuencias inferiores. Los ángulos se comparan bien con la secuencia de los ángulos registrados en la leyenda de la Figura 8(a).

El porqué algunas redes deberían tener la forma de una espiral no está claro. Puede ser una respuesta pragmática o accidental a las limitaciones prácticas. Es posible, sin embargo, que las ballenas estuvieran explotando las diversas propiedades acústicas de redes circulares y espirales. Esto podría conferir una serie de ventajas a la configuración espiral a través de las siguientes características:

- Un muro de sonido puede ser generado utilizando trayectorias acústicas que propagan un agua libre de burbujas (Figura 8) y que por lo tanto sufre menos atenuación que lo observado para trayectorias acústicas en aguas con burbujas (a las que están restringidas las redes circulares).

- Whilst both the bubble-free and bubbly paths in the spiral individually contribute to the wall of sound, the interactions between them create a synergistic effect: there will be ray paths which propagate at times in the bubble layer, and then leave it to enter the bubble-free layer, of the spiral; and reflections at interfaces between bubbly- and bubble-free water will be only partial. This has two advantages. First, whilst a ray which leaves the circular net is lost from the net, a ray which refracts out of a region of bubbly water in the spiral net can remain trapped within the spiral system. Specifically, when a ray leaves the circular bubble net of Figure 7(b) it is lost to the ‘wall of sound’; but except for rays crossing the outermost interface of the spiral bubble net, rays crossing boundaries in the spiral net remain contained within it. Second, the field which propagates in the bubble-free arm of the spiral, can ‘recharge’ through refraction the more attenuated field within the bubbly arms (as occurs at the lettered points (A) to (F) in Figure 8(a)). This has the further advantage of attenuating the sound in the bubble-free arm to facilitate the generation of quiet regions in the centre of the net.
- A spiral form which contains a closed inner ring of bubbles surrounding a bubble-free centre gives additional acoustic protection to the quiet zone at the centre of the net. High-angle rays need only cross two walls to penetrate the centre of the circular bubble net and degrade its quietness; in contrast, they must cross many such interfaces in the spiral net, reflecting at each boundary and attenuating across the width of several bubbly arms.
- Spiral nets need not be generated to such exacting standards as to contain a closed inner ring of bubbles surrounding a bubble-free centre. The circular net requires closure of the circle in order to create a quiet bubble-free region. Of course the inner end of the spiral could close up upon itself, creating in effect a circular bubble net within a spiral one, with a quiet bubble-free region in the centre in which prey are trapped. However spiral nets do not need such accuracy in their construction: they will still work even if there is no complete closure of the bubble layer surrounding a bubble-free centre; and they will still work even if the centre is not bubble-free. This is because the spiral geometry generates new regions, away from the centre but still forming a trap, which are free of bubbles and sound, within the inside edge of the bubble-free arms of the spiral. The ever-
- Mientras que ambas trayectorias, con y sin burbujas, dentro de la espiral contribuyen individualmente al muro de sonido, las interacciones entre ellos crean un efecto de sinergia: habrá trayectorias de rayos que se propagarán a la vez en zonas con burbujas para abandonarlo más delante y entrara en la zona libre de burbujas de la espiral; las reflexiones en las interfases entre agua con y sin burbujas será únicamente parcial. Esto conlleva dos ventajas. Primero, mientras que un rayo que abandona la red circular se pierde, un rayo que se refracta fuera de una región con burbujas en la red espiral puede permanecer atrapado dentro del sistema espiral. Específicamente, cuando un rayo abandona la red circular con burbujas de la Figura 7(b) se pierde en el “muro del sonido”; pero, excepto de los rayos que atraviesan la interfase más extrema de la red espiral con burbujas, los rayos que cruzan fronteras en la red espiral permanecen dentro de ella. Segundo, el campo que se propaga en la sección de la espiral libre de burbujas, puede recargarse a través de la refracción del campo más atenuado dentro de las secciones con burbujas (como ocurre en los puntos (A) a (F) en la figura 8(a)). Esto tiene la ventaja añadida de atenuar el sonido en la sección libre de burbujas para facilitar la generación de zonas tranquilas en el centro de la red.
- Una espiral que contiene un anillo interno de burbujas que rodean un centro libre de burbujas, otorga una protección acústica adicional a la zona tranquila en el centro de la red. Los rayos de gran ángulo sólo necesitan atravesar dos paredes para penetrar el centro de la red circular de burbujas y alteran su tranquilidad; en contraste, tienen que cruzar muchas interfases en la red espiral, reflejándose en cada línea y atenuándose a través del ancho de varios brazos con burbujas.
- Las redes espirales no necesitan ser generadas de tal manera que contengan un anillo interno cerrado de burbujas rodeando un centro libre de burbujas. La red circular requiere el cierre del círculo con el fin de crear una zona tranquila libre de burbujas. Naturalmente, el extremo interior de la espiral podría cerrarse sobre sí mismo, creando en efecto una red circular de burbujas dentro de la red espiral, con una zona tranquila libre de burbujas en cuyo centro quedan atrapadas las presas. Sin embargo, las redes espirales no necesitan tanta precisión en su creación: seguirán funcionando aunque no se dé el cierre completo de la zona de burbujas rodeando un centro de libre de burbujas; y seguirán funcionando incluso si el centro no está libre de burbujas. Esto es porque la geometría espiral genera nuevas zonas, apartadas del centro pero que siguen constituyendo una trampa, que están libres de burbujas y sonido, dentro del límite interior de las secciones

closing spiral wall means that, as they progress into the spiral, the reflected rays meet the outer edge of the bubble free arm of the spiral with ever-decreasing grazing angles (Figure 8(a)), such that the inner edge of the bubble-free arms remains quieter (Figure 8(b)).

- The geometry of Figure 8(b) shows how the whale could speculatively obtain feedback on the performance of the spiral net, since the efficiency of the “wall of sound” could be diagnosed through monitoring the outbound sound as it leaves the spiral.

All this is of course speculation. The authors have no facilities to make measurements in the wild, and whilst it is possible to gain preliminary evidence (Figure 9), this is by no means adequate proof of the theory. Indeed the construction of laboratory bubble nets to test or disprove these theories could provide misleading results. If laboratory experiments are to be conducted, the realism of the model should be critically assessed. For example, it is relatively simple to construct a 1:100 scale model bubble net by submersing expanded polystyrene in water and obtain measured sound fields which at first sight look convincing (Figure 9). Note that this is a spiral with a closed centre, not an open one of the type modelled in Figure 8. Because there is only reflection to consider, propagation in such a net is simple to model numerically [21]. The reason for this is that, in this case, the ‘bubble net’ was made of expanded polystyrene, a solid matrix containing such a high fraction of gas bubbles frozen in place that it acts as a pressure-release interface underwater. No sound propagated in this scaled-down ‘bubble layer’, so that the experiment incorporated only the propagation path through the bubble-free arms of the spiral, and did not capture either refraction or propagation within the bubbly arm of the spiral. As a result, the polystyrene model could hardly fail to produce a ‘wall of sound’ with a quiet interior.

Why use expanded polystyrene at all for this simple demonstration, rather than proceeding directly to a miniature net of real bubbles? The reason is that the polystyrene only models the impedance mismatch between high-void-fraction bubbly water, and bubble-free water: It is better knowingly to eliminate a key feature (the bubble resonance) from the scale model than it would be to include it with inappropriate scaling.

The problem is that, whilst a physical laboratory model of a net can readily be made to scale the gross dimensions

de la espiral libres de burbujas. La pared de la espiral en continuo cierre supone que, al tiempo que progresan dentro de la espiral, los rayos reflejados se encuentran con el límite exterior del brazo libre de burbujas de la espiral con ángulos de incidencia en continua disminución (Figura 8(a)), de manera que el límite interior de los brazos libres de burbujas permanecen más tranquilos.

- La geometría de la Figura 8(b) muestra cómo la ballena podría especulativamente obtener retroalimentación sobre la actuación de la red espiral, ya que la eficiencia del “muro del sonido” podría ser diagnosticado a través del seguimiento del sonido que va hacia fuera cuando abandona la espiral.

Todo esto es, por supuesto, especulación. Los autores no tienen la posibilidad de realizar las mediciones reales, y si bien es posible recabar ciertas pruebas preliminares (Figura 9), esto no es en absoluto una prueba adecuada de la teoría. Ciertamente, la construcción en el laboratorio de redes de burbujas para probar o rechazar estas teorías podría llevar a resultados engañosos. Si han de llevarse a cabo experimentos de laboratorio, habría que valorar muy de cerca el realismo del modelo aplicado. Por ejemplo, es relativamente sencillo construir un modelo de red de burbujas a escala 1:100, sumergiendo poliestireno expandido en agua y obtener mediciones de campos acústicos que a primera vista parecen convincentes (Figura 9). Hay que señalar que esto es una espiral con un centro cerrado, no del tipo abierto como se puede ver en la Figura 8. Porque sólo hay que considerar la reflexión, la propagación en una red de estas características es fácil de modelar numéricamente [21]. La explicación de esto es que, en este caso, la “red de burbujas” estaba hecha de poliestireno expandido, una matriz sólida que contiene tan elevada fracción burbujas de gas congeladas in situ, que actúa como una interfase liberadora de presión submarina. No se ha propagado ningún sonido en esta capa de burbujas reducida, por lo tanto el experimento ha incorporado únicamente la trayectoria de propagación a través los brazos libres de burbujas de la espiral, y no ha capturado ni la refracción ni la propagación dentro de la sección burbujeante de la espiral. Como resultado, el modelo de poliestireno podía difícilmente dejar de producir un “muro del silencio” con un interior tranquilo.

¿Por qué utilizar, de todos modos, el poliestireno expandido para esta simple demostración, en vez de proceder directamente con una red en miniatura con burbujas reales? La razón es que el poliestireno únicamente modela la mala impedancia entre el agua con burbujas con grandes fracciones vacías y agua libre de burbujas. Es mejor eliminar a conciencia un rasgo clave (la resonancia de la burbuja) del modelo a escala, que incluirlo en una escala inapropiada.

El problema es que, mientras que un modelo de red de laboratorio puede ser fácilmente realizado para poner en escala las

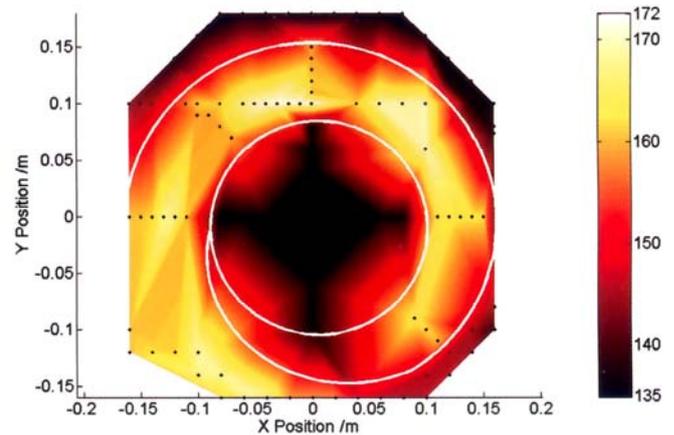
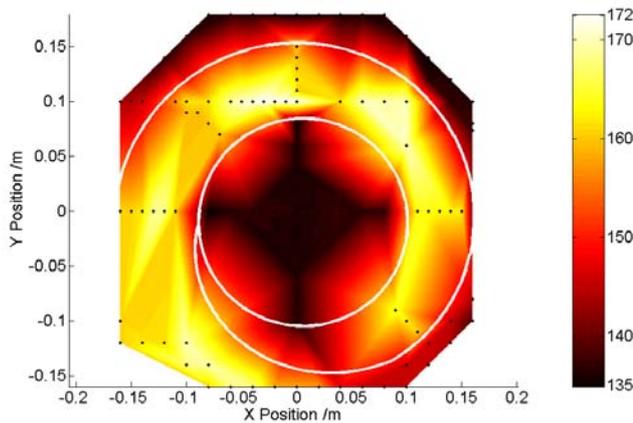


Figure 9.- Measured acoustic field in horizontal plane in demonstration spiral bubble net of expanded polystyrene (1:100 scale, so that the Blacknor Technology sound source projected a 375 kHz pulse into the open end of the spiral). The white line shows plan view position of spiral. Data only exists for the discrete measurement points shown as black dots: between these the colour indicates an interpolation and so, whilst visually appealing, cannot include the zero-pressure at the spiral wall. Colour scale: rms sound pressure level (dB re 1 μ Pa) at each measurement location, time-averaged over the entire 2 ms window from the start of one pulse to the start of the next (pulses having $\sim 8 \mu$ s free-field duration of a 375 kHz basic frequency sinusoid), so that all the reflections within the spiral were included in the calculation. See reference [21] for details.

Figura 9.- Campo acústico medido en plano horizontal en una demostración de red de burbujas espiral de poliestireno expandido (escala 1:100, de manera que la fuente de sonido Blacknor Technology proyectó una pulsación de 375 kHz en el extremo abierto de la espiral). La línea blanca muestra la posición en plano de la espiral. Sólo existen datos para los puntos de medición específicos representados por los puntos negros: entre ellos el color indica una interpolación y ésta, aunque visualmente llamativa, no pude incluir la presión cero en la pared de la espiral. Escala de color: rms nivel de presión acústica (dB re 1 μ Pa) en cada punto de medición en un tiempo promedio de 2 ms desde el comienzo de una pulsación hasta el comienzo de la siguiente (las pulsaciones tienen una duración en un campo libre de $\sim 8 \mu$ s a una frecuencia sinusoidal fundamental de 375 kHz). De esta manera, se incluyeron en el cálculo todas las reflexiones dentro de la espiral. Para detalles, consúltese la referencia [21].

of the net, it is no simple matter to scale the fine structure of the bubble size distribution. The scaling factor used in this experiment is around 1:100. For this, scaling of the gross features is simple: the model net diameter is 0.3 m compared to 30 m in the wild, and the acoustic wavelength is 4 mm compared to the 400 mm chosen to represent the longest wavelength of interest in the net. However such a scaling factor causes problems in generating a suitable bubble population. This is because, whilst the bubble size distribution in the net is not known, it is likely to contain bubbles having radii ranging from centimetres to microns, and this cannot readily be scaled. More importantly, a simple 1:100 scaling is insufficient: as discussed earlier (see Figure 4), for sound to be trapped within the bubble net by refraction, the presence of bubbles must reduce the sound speed, which happens when the bubbles controlling the sound speed are driven at frequencies less than their resonance frequency (i.e. they are driven in stiffness-controlled regime) [1, 3, 4]. The resonance frequency of an air bubble in water varies roughly inversely with its radius (for bubble greater than, say, ten microns in radius). For insonification at 375 kHz in the scale model, the bubbles which are resonant have radii of less than about 10 microns. Bubbles larger than this would be driven in the inertia-controlled regime [1, 3, 4]. The generation of a bubble net of diameter 30 cm which contained no bubbles larger than about 10 microns radius would be difficult and expensive, involving

dimensiones brutas de la red, no es tarea fácil poner en escala la fina estructura de la distribución de tamaños de las burbujas. La escala utilizada en este experimento es de aproximadamente 1:100. Por ello, poner en escala los rasgos brutos es sencillo: el diámetro del modelo de red es de 0.3 m, comparado con los 30 m en la realidad, y la longitud de onda es de 4 mm, comparado con los 400 mm elegidos para representar la longitud de onda mayor de interés de la red. Sin embargo, semejante factor de escala causa problemas a la hora de generar una población de burbujas adecuada. Esto es porque, aunque la distribución de tamaños de las burbujas en la red no es conocida, es probable que contenga burbujas cuyos radios oscilen entre radios y micrones, y no es fácil ponerlo a escala. Más importante aún, una simple escala 1:100 es insuficiente: como ya se vio anteriormente (ver Figura 4), para atrapar el sonido dentro de una red de burbujas por refracción, la presencia de las burbujas debe reducir la velocidad del sonido, lo que ocurre cuando las burbujas que controlan la velocidad del sonido son conducidas hacia frecuencias menores a su frecuencia de resonancia (son conducidas en un régimen de rigidez controlada) [1,3,4]. La frecuencia de resonancia de una burbuja de aire en el agua varía aproximadamente inversamente a su radio (para burbujas más grandes que, supongamos, diez micrones de radio). Para la “insonificación” a 375 kHz en el modelo a escala, las burbujas resonantes tienen radios de menos de 10 micrones radio. Burbujas más grandes que eso, serían conducidas en un régimen de inercia controlada [1,3,4]. La generación de una red de burbujas de un diámetro de 30 cm

biomedical contrast agents, electrolysis, chemical reaction, or other alternative [21]. Whilst production of a circle (or even a spiral) of bubbles in a water tank is not too difficult, ensuring that the resonance effects (and therefore sound speed profile) of the bubbly water are scaled appropriately is no simple matter. For this reason, only the reflective element was tested in this preliminary scale model used for Figure 9.

To what extent the humpback whales make use of these acoustical properties is not known, as it is difficult to obtain objective measurements of the sound field, and an assessment of whether whales exploit these features would require a survey which correlated behaviour with acoustics. The geometries of net used have not been surveyed, let alone the relative occurrence of spiral and circular nets. Indeed lunge feeding is seen with other geometries of net [21], but without simultaneous acoustic information, reliable bubble data and behavioural observations, and in sufficient quantity, it is impossible to be certain as to the extent, if any, humpback whales are exploiting these. Visual impressions by observers of the shape of bubble nets, and the distributions of bubbles within it, may not accurately reflect the way the acoustic field ‘sees’ the net. This is because whilst large bubbles catch the eye and rise quickly under buoyancy to the surface, where they are seen, the greater acoustical effect may be generated by clouds of smaller bubbles which persist for long times in the water column, and (from our experience in test tanks) can be much more difficult to see. It may be that the formation of spirals nets is simply the by-product of some behaviour designed to achieve another purpose, such as efficient motion during the formation of the net, just as the shape of natural spirals whose response to pressure perturbations is key to their function (e.g. the cochlea, the nautilus shell) has been attributed to expedient (if the perhaps mundane) explanations such as efficient packing. However the remarkable effect of the spiral on fields propagating along it (such as the ever-decreasing grazing angle which will, if the spiral is sufficiently long, eventually generate wall-hugging surface waves; the robustness to the particulars of the entry; and the possibility of feedback from back-propagating fields) are suggestive of possibilities that should be explored.

The bubble nets of odontoceti

The bubble nets discussed so far in this paper were generated by humpback whales, and the associated feeding

que no contenga burbujas superiores a los 10 micrones radio sería difícil y caro, involucrando a agentes de contraste biomédicos, electrolisis, reacciones químicas u otra alternativa [21]. Mientras que la producción de un círculo (o incluso de una espiral) de burbujas en un tanque de agua no es muy complicado, asegurar que los efectos de resonancia (y por lo tanto el perfil de la velocidad del sonido) del agua con burbujas estén apropiadamente puestos a escala, no es tarea fácil. Por esta razón, se ha probado únicamente el elemento reflexivo en este modelo a escala preliminar utilizado para la Figura 9.

Hasta qué punto las ballenas jorobadas hacen uso de estas propiedades acústicas es algo que no se sabe, ya que es difícil obtener medidas objetivas del campo acústico, y una valoración de si las ballenas utilizan estas características requeriría una encuesta que relacionara comportamiento con acústica. Las geometrías de las redes utilizadas no han sido estudiadas, y menos aún la existencia relativa de las redes circulares y espirales. Desde luego, la alimentación por embestida está vista con otras geometrías de red [21], pero sin información acústica simultánea, datos fiables sobre burbujas y observaciones sobre el comportamiento, y en cantidad suficiente, es imposible saber hasta qué punto las ballenas jorobadas, están explotando estas propiedades, o si de hecho no las están explotando. Las impresiones visuales de los observadores de las formas de las redes de burbujas y la distribución de las burbujas dentro de ellas, pueden no reflejar de manera precisa la manera en la que el campo acústico “ve” la red. Esto es así porque mientras las burbujas grandes atrapan la mirada y suben rápidamente por la flotabilidad hacia la superficie, donde son vistas, el mayor efecto acústico puede ser generado por nubes de burbujas más pequeñas que persisten durante largos tiempos en la columna de agua, y (desde nuestra experiencia en las pruebas en tanques) puede ser mucho más difícil verlo. Puede ser que la formación de las redes espirales es simplemente un sub-producto de un comportamiento diseñado para alcanzar otro objetivo, como por ejemplo el movimiento eficaz durante la formación de la red, como la forma de las espirales naturales cuya respuesta a las perturbaciones de presión es clave para su funcionamiento (por ejemplo, la cóclea o el caracol nautilus); esto ha sido atribuido a explicaciones oportunas (quizás prosaicas) como por ejemplo el empaquetamiento eficaz. Sin embargo, el efecto sobresaliente de la espiral en campos que se propagan en ella (como el ángulo de incidencia es siempre decreciente, si la espiral es lo suficientemente larga, finalmente generará olas de superficie ceñidas al muro; la solidez de las partículas de la entrada; y la posibilidad de retroalimentación de los campos de propagación) sugieren posibilidades que deberían ser exploradas.

Las redes de burbujas de los odontoceti

Las redes de burbujas que han sido analizadas hasta ahora en este trabajo, habían sido generadas por ballenas jorobadas, y

calls contained energy at frequencies less than 4 kHz. As such, the acoustical interaction between the two (which, it is postulated, might be a deliberate endeavour to aid feeding) is relatively simple: from Figure 4, assuming a bubble size distribution resembling that found at sea, the bubbles at these frequencies will tend to reduce the sound field in a relatively stable manner (Figure 4(b)), and the extra attenuation produced by the bubble presence will be lower than at other frequencies (the absolute value depending on the void fraction).

The acoustics of odontoceti in bubbly water are a different matter altogether, because whilst there is no firm evidence to date of humpback whales exploiting such >30 kHz frequencies, *odontoceti* are well-known for using echolocation frequencies of tens of kHz or even in excess of 100 kHz [29, 30]. Furthermore, the information requirements for echolocation of prey are likely to be much greater than those of forming a 'wall of sound'.

Nevertheless certain species of dolphins and porpoises have renowned abilities for operating in the shallow coastal waters and biologically active rivers where bubbles persist, and indeed some species of river odontoceti have effectively no visual acuity. Such creatures no doubt have a range of advantageous features to assist in the detection, localization and characterisation of targets by sonar, such as their 'platform' capability. That is to say, their sonar is mounted on a body which can move rapidly through the environment and expose a target to a sequence of sonar signals in quick succession from a range of angles and viewpoints, and with the capability to change the distance and orientation to target with rapidity and control.

Given their acoustic potency, bubbles constitute a key feature which compromises active sonar in such shallow water environment. However some species of odontoceti not only tolerate the bubbles of coastal waters, but at times generate them. The filming associated with Byatt *et al.* [31] detailed bubble nets produced by dolphins (Figure 10(a)-(d)). It also showed bubble plumes generated by gannets (Figure 10(e)-(g)) diving into a shoal of sardines which dolphins have herded to the sea surface. These plumes will no doubt complicate an underwater sound field already populated by the calls and bubble nets of dolphins, and the entrainment noise of the gannet bubble plumes, and could further stimulate the sardines to school. Gannets, dolphins, sharks and whales etc. (Figure 10(h)) all benefit from this, although to what extent this is intentional is unknown.

las llamadas de comida asociadas contenían energía a frecuencias inferiores a 4 kHz. De esta manera, la interacción acústica entre los dos (que, se postula, podría ser un intento deliberado para obtener comida) es relativamente sencilla: de la Figura 4, asumiendo una distribución de tamaños de las burbujas que se parezca a la que se produce en el mar, las burbujas en esas frecuencias tenderán a reducir el campo acústico de una manera relativamente estable (Figura 4(b)), y la atenuación extra producida por la presencia de la burbuja será inferior de lo que serían en otras frecuencias (el valor absoluto depende de la fracción vacía).

La acústica de los odontoceti en un agua con burbujas es un asunto totalmente distinto, porque mientras no existen hoy en día pruebas firmes de ballenas jorobadas que exploten esas frecuencias de >30 kHz, los odontoceti son bien conocidos por utilizar las frecuencias de ecolocación de decenas de kHz o incluso de más de 100 kHz [29,30]. Además, los requerimientos de información para la ecolocación de las presas son aparentemente mucho mayores que aquellos que forman un "muro de sonido".

Sin embargo, ciertas especies de delfines y marsopas tienen fama por la habilidad para operar en las aguas costeras poco profundas y ríos biológicamente activos donde persisten las burbujas, y ciertas especies de odontoceti de río no poseen agudeza visual. Estas criaturas sin duda poseen un abanico de rasgos ventajosos para detectar, localizar y caracterizar a las presas gracias al sonar, tales como la capacidad de "plataforma". Esta quiere decir que su sonar está montado sobre un cuerpo que puede moverse rápidamente a través del entorno y exponer su objetivo a una secuencia de señales de sonar, en una serie rápida, desde diversos ángulos y puntos de vista, y con la capacidad de cambiar la distancia y la orientación para atacar con rapidez y control.

Habida cuenta de su potencia acústica, las burbujas constituyen un rasgo clave que comprometen el sonar activo en un entorno de aguas poco profundas. Sin embargo, algunas especies de odontoceti no sólo toleran las burbujas de las aguas costeras, sino que a veces las generan ellos mismos. La grabación asociada a Byatt *et al* [31] mostró en detalle las burbujas de las aguas costeras producidas por los delfines (Figura 10 (a)-(d)). También mostró columnas de burbujas generadas por los pájaros (Figura 10 (e)-(g)) buceando en un banco de sardinas que los delfines han dirigido hacia la superficie. Estas columnas complicarán sin duda un campo acústico submarino, ya habitado por las llamadas y las redes de burbujas de los delfines y el ruido de las columnas de burbujas de los pájaros, y podrían empujar a las sardinas a formar bancos. Aves, delfines, tiburones y ballenas, etc., (Figura 10 (h)) todos ellos se benefician de esto, aunque no se sepa hasta qué punto es intencionado.

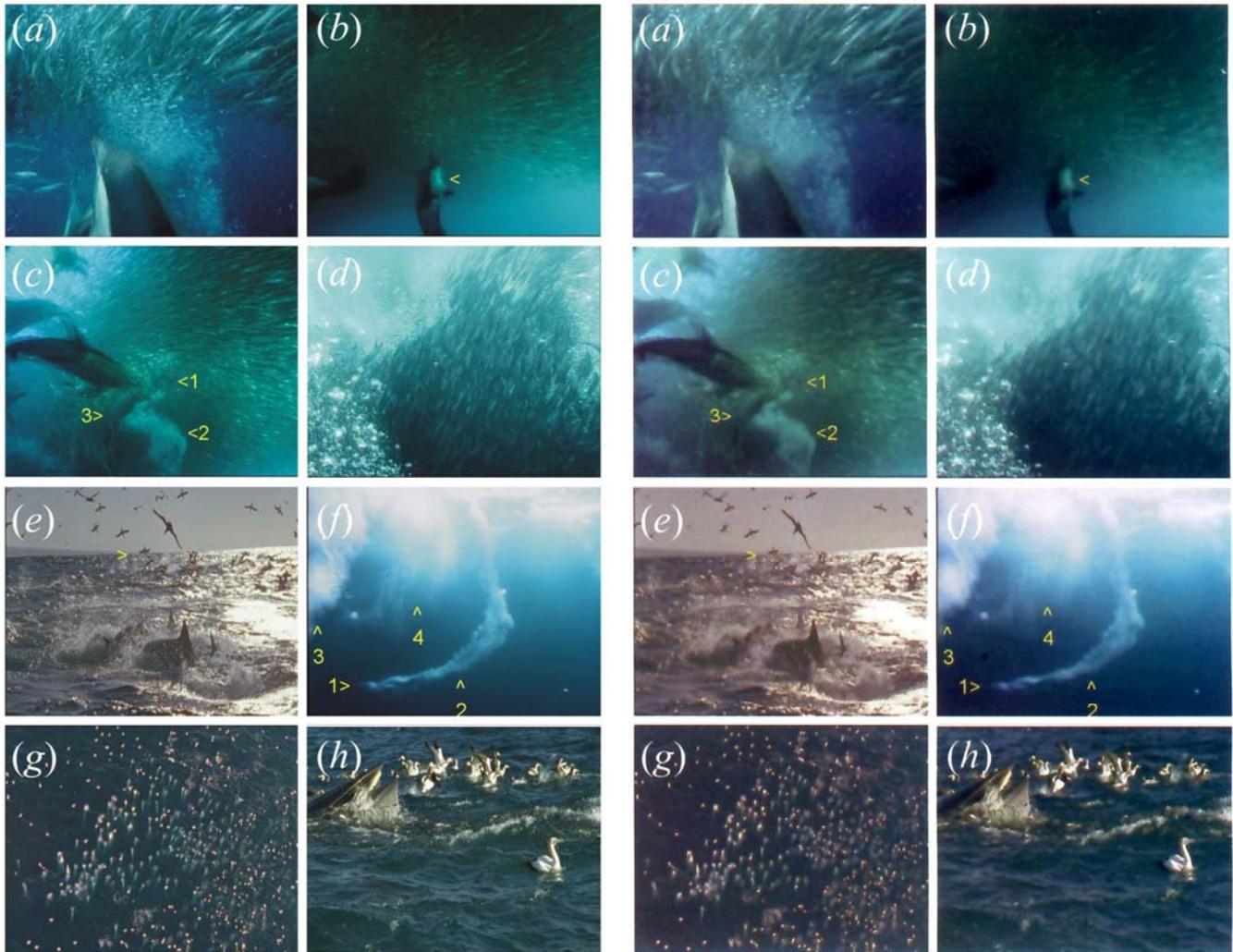


Figure 10. (a) Common dolphins herd sardines with bubble nets. (b) A dolphin starts to release a cloud of bubbles (arrowed) from its blowhole. A moment later (c) this dolphin (1) swims on, leaving behind the expanding cloud (2). Other dolphins (including the individual labeled '3') enter the frame. (d) The sardines school within a wall of bubbles that they are reluctant to cross, whilst (e) gannets dive into the sardine shoal to feed (arrowed). (f) On diving, a gannet (1) entrains a bubble plume (2). Plumes a few seconds old (3, with an older 4) have spread. (g) An aerial view shows hundreds of tight bubble plumes beneath airborne gannets. (h) A Bryde's Whale joins the feed. It surfaces with open mouth, which it then closes, sardines spilling from it. Images copyright of The Blue Planet (BBC) and reproduced with permission. The accompanying book to the series is Byatt et al. [31].

This paper will explore the possibility that some species might be deliberately generating and exploiting multiple pulses to ameliorate the clutter generated by bubbles in the water column. The hypothesis is not biomimetic, in that no attempt was made to mimic signals generated by natural creatures. The proposal was inspired when the first author saw the BBC video footage from which Figure 10 has been generated, when he was unaware that some species of

Figura 10. (a) Delfines comunes reúnen sardinas con redes de burbujas. (b) Un delfín comienza a soltar un nube de burbujas (señalado con la flecha). Un momento más tarde (c) este delfín (1) comienza a nadar dejando tras él la nube de burbujas en expansión (2). Otros delfines (incluido el que está marcado con el "3") entran en la estructura. (d) El banco de sardinas se mueve dentro de una pared de burbujas que no quieren atravesar, mientras (e) los pájaros caen en picado sobre el banco de sardinas para comer (flecha). (f) Al bucear, un pájaro ("1") provoca una columna de burbujas ("2"). Las columnas de antigüedad de algunos segundos se han expandido ("3" y otra más antigua "4"). (g) Una vista aérea muestra cientos de finas columnas de burbujas debajo de los pájaros volando. (h) Una ballena de Bryde se une para comer. Avanza por la superficie con la boca abierta, que entonces cierra y las sardinas se vierten desde ella. Los derechos de autos de las imágenes son de "El planeta azul" (BBC) y están reproducidas con su permiso. El libro que acompaña a esta serie es de Byatt et al [31].

Este trabajo explorará la posibilidad de que ciertas especies podrían deliberadamente generar y explotar múltiples pulsaciones para mejorar la confusión provocada por las burbujas en la columna de agua. La hipótesis no es biomimética, en cuanto no se ha pretendido mimetizar señales generadas por criaturas naturales. La propuesta se originó cuando el primer autor vio las imágenes de video de la BBC que han servido para crear la Figura 10; el autor no era entonces consciente de que ciertas es-

odontoceti might generate multiple pulses. That footage shows dolphins deliberately generating bubble nets in which to hunt. No man-made sonar would function in such bubble clouds. In response to logical conclusion that these dolphins either (i) were deliberately impairing their sonar when they generated such nets to hunt, or (ii) had evolved a sonar system which could detect targets in such bubble clouds, he proposed that they might be exploiting multiple pulses with inverted phases [1, 5]. These references contained a proposed thought-experiment (illustrated in Figure 11). In this, one wishes to use sonar to detect a linear scatterer, given that there is a bubble cloud in the propagation path. Such a linear scatterer might be a fish, with or without a swim bladder (which at sufficiently high frequencies would behave linearly) within a dolphin bubble net. If amplitude of the insonifying field were to be high enough to generate a nonlinear response, it might be possible to enhance scatter from the mine, whilst simultaneously suppressing it from the bubbles. Consider an insonifying field consisting of two high amplitude pulses, one having reverse polarity with respect to the other (Figure 11, top line). Linear reflection from the linearly scattering body (which we shall call the ‘solid’) is shown in b(i). The bubble generates nonlinear radial excursions (Figure 11 a(i)) and emits a corresponding pressure field (Figure 11 a(i)) (the relevant time histories can readily be calculated [17]). Normal sonar would not be able to detect the signal from the solid (Figure 11 b(i)), as it is swamped by that from the bubbles (Figure 11 a(ii)).

pecies de odontoceti podrían generar múltiples pulsaciones. Esas imágenes muestran delfines generando de manera deliberada redes de burbujas en las cuales poder cazar. Ningún sonar hecho por el hombre podría funcionar en semejantes nubes de burbujas. En respuesta a la lógica conclusión de que esos delfines (i) estaban deliberadamente dañando su sonar cuando generaban semejantes redes para cazar o (ii) habían desarrollado un sistema de sonar que podría detectar objetivos en este tipo de nubes de burbujas, el autor propuso que podrían estar explotando múltiples impulsos con fases invertidas [1,5]. Estas referencias proponían un experimento (ilustrado en la Figura 11). En él, uno desearía utilizar el sonar para detectar un dispersador lineal, ya que hay una nube de burbujas en la trayectoria de propagación. Semejante dispersador lineal podría ser un pez, con o sin vejiga natatoria (que a frecuencias lo suficientemente altas se comportaría de manera lineal) dentro de una red de burbujas de delfines. Si la amplitud del campo de “insonificación” fuera lo suficientemente alta como para generar una respuesta no lineal, sería posible aumentar la dispersión desde la mina, mientras se suprimiría simultáneamente de las burbujas. Consideremos un campo de insonificación consistente en dos pulsaciones de alta amplitud, una teniendo una polaridad inversa con respecto a la otra (primera línea de la figura 11). Se muestra en b(i) la reflexión lineal desde la estructura dispersada (que llamaremos “sólido”). La burbuja genera excursiones radiales no lineales (Figura 11 a(i)) y emite un campo de presión correspondiente (Figura 11 a(i)) (se puede calcular fácilmente el historial de tiempo relevante [17]). Un sonar normal no podría detectar la señal desde lo “sólido” (Figura 11 b(i)) ya que se ve inundado por las burbujas (Figura 11 a(I)).

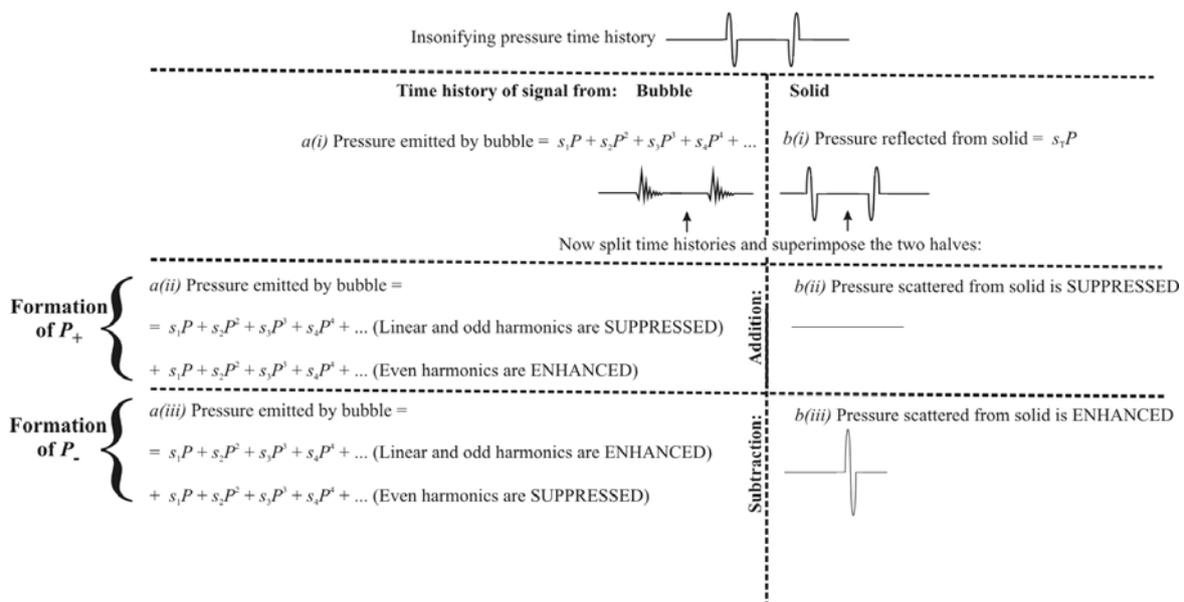


Figure 11.- Schematic of the formation of P_+ and P_-

Figura 11.- Esquema de la formación y de P_+ y de P_-

If however the returned time histories are split in the middle and combined to make a time history half as long, enhancement and suppression occurs. If the two halves of the returned signals are added, the scattering from the bubble is enhanced (Figure 11 a(iii) and a(iv)), whilst the scatter from linear scatterers (such as the solid) is suppressed (Figure 11 b(ii)). This could be used to enhance the scatter from contrast agents [32, 33]. If however the two halves of each returned signal are subtracted from one another, the scattering from the bubbles is suppressed (Figure 11 a(v) and a(vi)) whilst the reflections from the solid body are doubled (Figure 11 b(iii)).

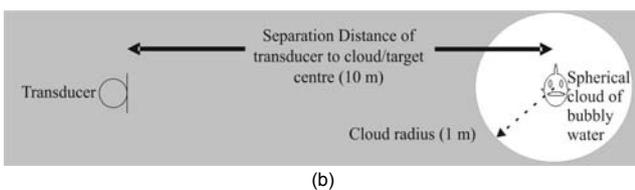
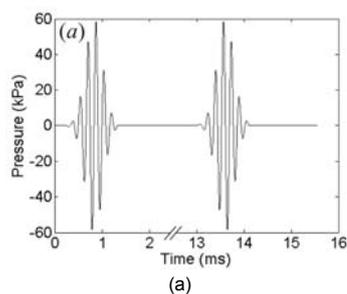


Figure 12. (a) The wavetrains used to insonify the marine environment in the particular implementation of TWIPS used in the simulation (b) Diagram of simulation geometry for transducer, target and spherical bubble cloud (see [9, 35] for details).

Simulations have been undertaken to test whether the proposed Twin Inverted Pulse Sonar (TWIPS) could reveal a linearly scattering object that hidden to conventional sonar within a bubble cloud [6, 28, 34, 35]. The simulation incorporated three basic elements: an insonifying wavetrain (Figure 12(a), a bubble cloud and a target (Figure 12(b)). When present, the target is located at the centre of the cloud and assumed to scatter linearly. The simulation uses target strengths of -20 and -25 dB (the latter would be equivalent to Atlantic cod (*Gadus morhua*) broadside to an acoustic beam operating in the frequency regime of interest). The bubble cloud is assumed to be a sphere of radius 1 m, containing around 35 million bubbles following the population size distribution as measured at sea [36], such that the void fractions (the ratio of the volume of gas within a cloud to the total volume occupied by the cloud) on the order of 10^{-7} (i.e. 10^{-5} %).

Sin embargo, si las historias temporales son divididas por la mitad y combinadas para conseguir una historia temporal mitad de larga, se producen el crecimiento y la supresión. Si se añaden las dos mitades de las señales de retorno, se incrementa la dispersión de las burbujas (Figura 11 a(iii) y a(iv)), mientras que se suprime la dispersión desde los dispersores lineales (Figura 11 b(ii)). Esto podría ser utilizado para incrementar la dispersión desde los agentes de contraste [32,33]. Si, sin embargo, se restan las dos mitades de cada señal, se suprime la dispersión desde las burbujas (Figura 11 a(v) y a(vi)), mientras se multiplican por dos las reflexiones desde el cuerpo sólido (Figura 11 b(iii)).

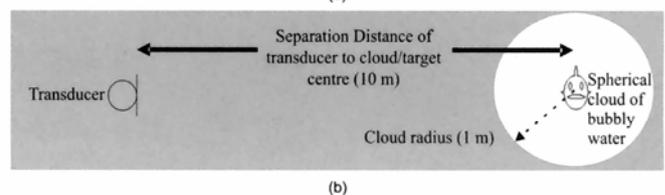
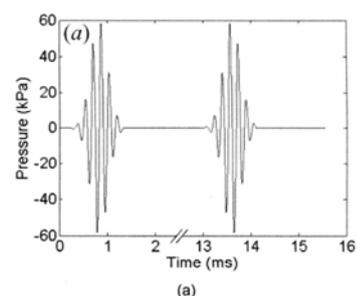


Figura 12. (a) Las ondas utilizadas para "insonificar" el entorno marino en la particular implementación de los TWIPS utilizados en la simulación (b) Diagrama de la geometría de simulación para el transductor, el objetivo y la nube de burbujas esférica (véase [9, 35] para más detalles).

Se han aplicado una serie de simulaciones con el fin de comprobar si los Sonares De Pulso Invertidos Gemelares (Twin Inverted Pulse Sonar, TWIPS) podían revelar un objeto de dispersión lineal que oculte el sonar convencional dentro de una nube de burbujas [6,28, 34,35]. La simulación incorporó tres elementos básicos: una onda de "insonificación" (Figura 12(a), una nube de burbujas y un objetivo (Figura 12 (b)). Si existe, el objetivo se coloca en el centro de la nube y se asume que se dispersará de manera lineal. La simulación utiliza fuerzas de objetivo de -20 y -25 dB (el último sería equivalente al bacalao del Atlántico, *Gadus morhua*, de costado respecto a un rayo acústico operando en el régimen de frecuencia de interés). Se asume que la nube de burbujas es una esfera de un radio de 1 m, conteniendo cerca de 35 millones de burbujas, siguiendo la distribución de tamaños de la población, como se mide en el mar [36], de manera que las fracciones vacías (la proporción entre el volumen del gas dentro de una nube y el volumen total ocupado por la nube) son del orden de 10^{-7} (10^{-5} %).

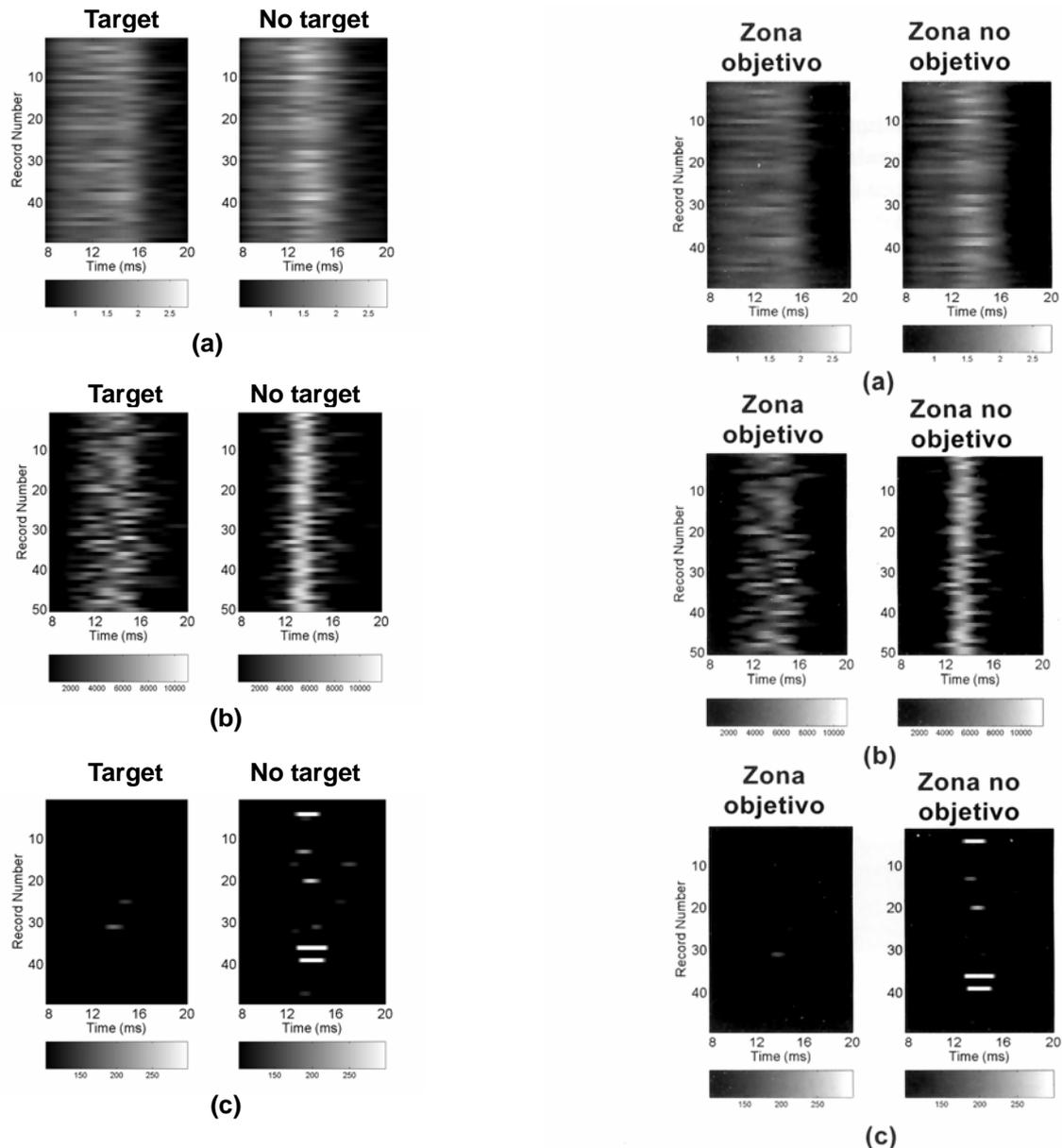


Figure 13. Fifty pulse pairs were projected at the cloud, spaced at intervals of 10 ms, and the echoes processed using (a) conventional sonar deconvolution techniques, (b) TWIPS1 and (c) TWIPS2b. The left plot in each panel shows the case when there is no target present, and the right plot shows the case when a target is inserted at the cloud centre ($TS = -20$ dB). The cloud, of 1 m radius, contains 35 million bubbles, and evolves appropriately between each ping, as described earlier (Fig. 11). (a) A single average was formed from the two pulses that make up each pulse pair, such that 50 averages are available for plotting. Each average was plotted as a time history on a one-dimensional line, with a greyscale such that the amplitude of the signal at the corresponding moment in the time history was displayed. These processed echo time histories were then stacked, one above each other, to form an image. (b) TWIPS1 processing of the 50 pulse pairs (no averaging) are displayed similarly, by stacking the consecutive grey-scale time series one above the other, were projected at the cloud, spaced at intervals of 10 ms. The TWIPS1 processed echoes were plotted, each as a time history on a one-dimensional line, as in (a). (c) TWIPS2b processing is used (no averaging) and the image displayed as in (b). See Leighton et al. [6, 35] for details.

Figura 13. Se proyectaron cincuenta pares de pulsaciones en la nube, espaciadas por intervalos de 10 ms y los ecos procesados utilizando (a) técnicas de deconvolución de sonar clásicas, (b) TWIPS1 y (c) TWIPS2b. El cuadro izquierdo de cada panel muestra el caso cuando no existe un objetivo, y el cuadro derecho muestra el caso en el cual se inserta un objetivo en el centro de la nube ($TS = -20$ dB). La nube, de 1 m de radio, contiene 35 millones de burbujas y evoluciona de manera apropiada entre cada sonido, como ya se describió anteriormente (Fig. 11). (a) Se hizo una media simple de las dos pulsaciones que formaron cada par de pulsaciones, así que están disponibles 50 medias para trazarse. Cada media fue trazada como una historia temporal en una línea unidimensional, con una escala de grises de forma que se mostraba la amplitud de la señal a su correspondiente tiempo en la historia temporal. Estas historias temporales de eco procesadas fueron entonces acumuladas, una encima de la otra, para formar una imagen. (b) Se muestra el procesamiento TWIPS1 de los 50 pares de pulsaciones (sin realizar medias) de manera similar, amontonando las series temporales consecutivas de la escala de grises, proyectadas en la nube, espaciadas por intervalos de 10 ms. Los ecos de los TWIPS1 procesados fueron trazados, cada uno en una historia temporal en una línea unidimensional, como se muestra en (a). (c) El procesamiento TWIPS2b se utiliza (sin realizar medias) y la imagen mostrada es como en (b). Ver Leighton et al. [6,35] para más detalles.

The cloud is dynamic, evolving as a consequence of turbulence, buoyancy etc. [1, 17], although the average number and spatial distribution of bubbles is constant. The insonifying wavetrain is shown in Figure 12(a). It consists of two pulses, identical except that the second (the 'negative' pulse) has opposite polarity to the first (the 'positive' pulse).

The scattered pressure for monostatic operation was calculated from a region of seawater containing spherical cloud of bubbles of radius 1 m, centred on the target (which was at range 10 m from the transducer) (Figure 12(b)), in order to determine which sonar system could detect whether a target was present in the cloud.

In current sonar signal processing, averaging and correlation are used to amplify signals which are consistently found in the same temporal location. Experience has shown that this technique does not yield useful results in the complex, dynamic acoustic environment encountered in a bubble cloud. For the same set of incident pulses, conventional sonar processing was compared with two forms of TWIPS: TWIPS1 and TWIPS2b. TWIPS covers a range of processing techniques, with different capabilities. All are designed to enhance contrast of targets in bubble clouds, both by increasing the scatter from the target and, very importantly, at the same time suppressing the signals from the bubbles. TWIPS1 is designed always to enhance target contrast, producing a reliable enhancement with every ping. TWIPS2b gives much greater contrast enhancements, but not with every ping: the particular form demonstrated here 'glints' on about 10% of pings. However the contrast enhancement is much greater than occurs with TWIPS1. It is particularly useful for sources that have the luxury of insonifying a region with multiple pings.

For conventional sonar (Figure 13(a)), TWIPS1 (Figure 13(b)) and TWIPS2b (Fig. 13(c)), 50 pulse pairs were projected at the cloud, spaced at intervals of 10 ms. The processed echoes were then stacked, one above each other, to form an image. As a stationary feature in the display, detection of the target in every ping would correspond to the observation of a vertical white line which is visible when the target is present, but absent from the corresponding sonar plot when the target is absent.

The left hand plots in the individual panels of Figure 13 correspond to the cloud when there is no target present, and the right hand plots of each panel in Figure 13 correspond to the bubble cloud when the target (TS = -20 dB) is present. In comparing the results, resist the temptation to

La nube es dinámica y evoluciona como consecuencia de la turbulencia, de la flotabilidad, etc. [1,17] a pesar de que la media y la distribución espacial de las burbujas sean constantes. En la Figura 12(a) se muestra la onda de "insonificación". Consiste en dos pulsaciones idénticas, excepto que la segunda (la pulsación "negativa") tiene una polaridad opuesta a la primera (la pulsación "positiva").

Se calculó la presión dispersada para la operación monoestática desde una zona de agua de mar, que contenía una nube esférica de radio 1m, centrada en el objetivo (que estaba en el rango de 10 m desde el transductor) (Figura 12(b)), con el fin de determinar qué sistema sonar podría detectar si el objetivo estaba realmente presente en la nube.

En el procesamiento actual del sonar, se utilizan las medias y correlaciones para amplificar señales que se encuentran consistentemente en la misma localización temporal. La experiencia demuestra que esta técnica no produce resultados útiles en el entorno acústico complejo y dinámico que encontramos en una nube de burbujas. Para la misma serie de pulsaciones incidentes, se ha comparado el procesamiento de sonar convencional con dos formas de TWIPS: los TWIPS1 y los TWIPS2b. Los TWIPS cubre un rango de técnicas de procesamiento, con capacidades distintas. Todas están diseñadas para incrementar el contraste de los objetivos en las nubes de burbujas, aumentando la dispersión desde el objetivo y, también muy importante, suprimiendo las señales de las burbujas. Se diseñan siempre los TWIPS1 con el objetivo de incrementar el contraste del objetivo, produciendo un incremento fiable con cada sonido. Los TWIPS2b producen unos incrementos de contraste mucho mayores, pero no con cada sonido: la particular forma mostrada aquí centellea en aproximadamente 10% de los sonidos. Si embargo, el incremento de contraste es mucho mayor que el que ocurre con los TWIPS1. Es particularmente útil para las fuentes que tienen el lujo de "insonificar" una región con múltiples impulsos.

Para el sonar convencional (Figura 13(a)), los TWIPS1 (Figura 13(b)) y los TWIPS2b (Figura 13(c)), se proyectaron 50 pares de pulsaciones en la nube, con intervalos de 10 ms. Se apilaban entonces los ecos procesados unos encima de los otros, para formar una imagen. Como un rasgo estático en la demostración, la detección del objetivo en cada impulso correspondería a una observación de una línea blanca vertical que se hace visible cuando el objetivo está presente, pero ausente del trazo del sonar correspondiente, cuando el objetivo está ausente.

Los cuadros de la parte izquierda de los paneles individuales de la figura 13 corresponden a la nube cuando no existe objetivo, y los cuadros de la parte derecha de la Figura 13 corresponden a la nube de burbujas cuando el objetivo (TS = -20 dB) está presente. Al comparar los resultados hay que resistir a la tentación de comparar entre ellos los cuadros con objetivo exis-

compare against each other the ‘target present’ plots in (a)-(c). Rather, consider the judgements made by sonar operators: Recalling that the same echo can be processed by conventional and TWIPS techniques simultaneously, consider the difference between the left and right plots in each panel, and ask whether a sonar operator or dolphin or porpoise could tell, from the left panel, that a target was absent; and from the right, whether there is a possible target to investigate.

Standard sonar processing fails to detect the target: There is insufficient difference between the two plots in Figure 13(a) because scatter from the bubbles masks the presence of the target. TWIPS1 detects the target on almost every occasion, such that there is a vertical line on the right of Fig. 13(b) compared to the plot on the left (where, importantly, it has suppressed the bubble signal). As stated earlier, TWIPS2 is designed to work spectacularly for about 10% of pings. This feature is shown in Figure 13(c), in that for some pings it fails to detect the target is present at all. However when it does detect one, the amplitude is very high (see plot on the right); when the target is not present (left hand plot), it rarely delivers a high amplitude return, very effectively suppressing the returned signal. The plots all have a linear greyscale and no thresholding has been applied.

Following simulations which indicated that the TWIPS procedure would be viable [6, 34, 35], the authors undertook experiments [35, 37] to verify these predictions. In the proof-of-principle experiments (Figure 14), the bubble clouds had dimensions of O (1 m). Efforts were made to ensure that the clouds contained bubbles ranging in radii resembling that found in the ocean [38]. It should be pointed out that (i) the efficacy of TWIPS decreases as the bubble size distribution increases, so that proof that it works with such a wide ocean-like distribution is important; and (ii) the characteristics of the bubble cloud were only measured after the successful deployment of TWIPS reported here: this was not a case of using *a priori* information on the bubble cloud in order to optimise the insonification signal or the processing.

Figure 14 shows the component of the experiment which comprises the equipment use to detect the target. The bubble generation system is shown in Figure 15 (the two are drawn separately for clarity, although they were deployed at the same time).

The outgoing signal was a train of 14 pulses, varying in frequency from 3 to 197 kHz (Figure 16). These were

tentes en (a) y (c). Al contrario, hay que considerar las evaluaciones realizadas por los operadores del sonar, recordando que el mismo eco puede ser procesado simultáneamente por técnicas convencionales y de TWIPS, es necesario considerar la diferencia entre los cuadros izquierdos y derechos en cada panel, y preguntarse si un operador de sonar o un delfín o una marsopa podrían afirmar, a partir del cuadro izquierdo, que un objetivo estaba ausente; y, a partir del cuadro derecho, si existía un posible objetivo para investigarlo.

El procesamiento estándar del sonar fracasa en su intento de detectar el objetivo. Hay una diferencia insuficiente entre los dos cuadros de la figura 13(a) porque la dispersión de las burbujas enmascara la presencia del objetivo. Los TWIPS1 detectan el objetivo en casi cada ocasión, de manera que existe una línea vertical a la derecha de la Figura 13(b), comparado con el trazado de la izquierda (donde, y esto es importante, ha suprimido la señal de la burbuja). Como ya se ha mencionado antes, los TWIPS2 están diseñados para trabajar de manera espectacular con cerca del 10% de los sonidos. Esta característica se muestra en la Figura 13(c); para algunos sonidos fracasa del todo en el intento de detectar la presencia del objetivo. Sin embargo, cuando sí detecta uno, la amplitud es muy alta (véase el trazado a la derecha); cuando el objetivo no está presente (cuadro izquierdo), raramente ofrece una amplitud de retorno alta, suprimiendo de manera muy eficaz la señal de retorno. Todos los trazados tienen una escala gris lineal y no se ha aplicado ningún nivel umbral.

Siguiendo las simulaciones que indican que los procesos de los TWIPS podrían ser viables [6,34,35], los autores llevaron a cabo experimentos [35,37] con el fin de verificar estas predicciones. En los experimentos de verificación del principio (Figura 14), las nubes de burbujas tenían dimensiones de O (1m). Se realizaron esfuerzos para asegurar que las nubes contenían burbujas en un rango de radios que se asemejaban a los que se encuentran en el océano [38]. Hay que subrayar que (i) la eficacia de los TWIPS decrece a medida que la distribución del tamaño de la burbuja aumenta; así que la prueba de que esto funciona con esta amplia distribución parecida a la del océano es importante y (ii) que las características de la nube de burbujas se midieron únicamente después del despliegue de los TWIPS informados aquí. Este no fue el caso con la utilización de información *a priori* en la nube de burbujas, con el fin de optimizar la señal de “insonificación” o el procesamiento.

La Figura 14 muestra el componente que permite el uso del equipo para detectar el objetivo. Se muestra el sistema de generación de burbujas en la Figura 15 (se han dibujado los dos separadamente por claridad, aunque fueron desplegados al mismo tiempo).

La señal saliente era un tren de 14 pulsaciones con una frecuencia variable entre 3 y 197 kHz (Figura 16). Estas fueron generadas por una tarjeta de adquisición de datos e igualadas gra-

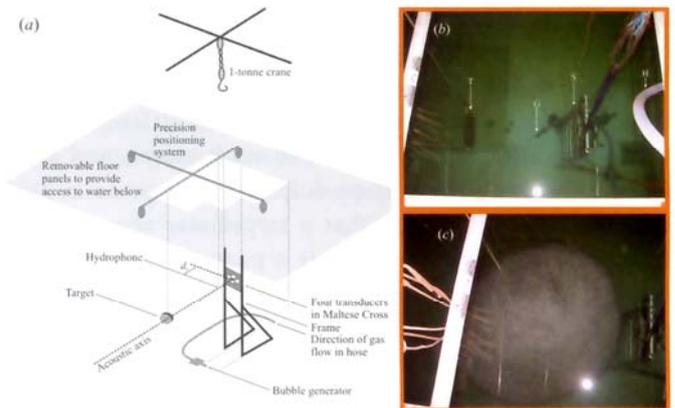
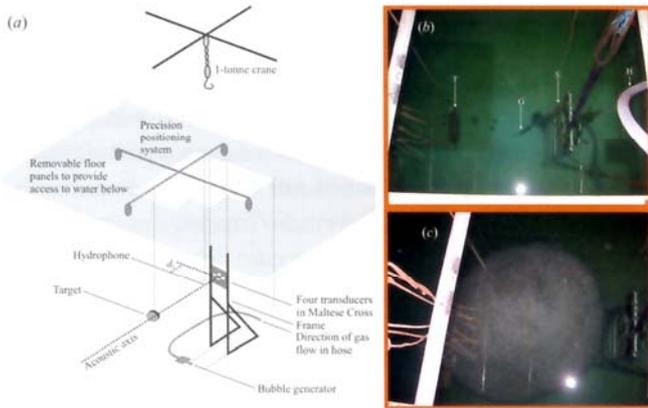


Figure 14.- (a) Schematic of proof-of-principle TWIPS experiment. Below the floor (shown shaded) is an underground water tank, $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 5\text{ m}$ deep. A rigid frame holds 4 transducers in a Maltese Cross, A hydrophone and a target are aligned on the horizontal acoustic axis, the hydrophone behind $d_h=0.40\text{ m}$ in front of the source faceplate. (b) Photograph looking down into the water. Target (T) is 2.00 m from source (S). Hose (H) feeds the bubble distribution unit (G). (c) The same perspective as (b), but now with bubble cloud. Target detection experiments with this cloud are detailed in reference [35]. The cloud used for the target detection results presented in this paper is shown in Figure 19.

Figura 14.- (a) Esquema de un experimento TWIPS de verificación del principio. Debajo del suelo (sombreado) se encuentra un tanque de agua subterráneo de $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 5\text{ m}$ de profundidad. Un marco rígido sostiene 4 transductores en una Cruz de Malta. En el eje horizontal acústico se alinean un hidrófono y un objetivo; el hidrófono detrás $d_h=0.40\text{ m}$ delante de la tapa. (b) Fotografía mirando hacia abajo dentro del agua. El objetivo (T) se encuentra a 2.00 m de la fuente (S). La manguera (H) alimenta la unidad de distribución de las burbujas (G). (c) La misma perspectiva que en (b), pero ahora con una nube de burbujas. En la referencia [35] se detallan los experimentos de detección de los objetivos con esta nube. En la Figura 19 se muestra la nube utilizada para los resultados de la detección de objetivos presentados en este trabajo.

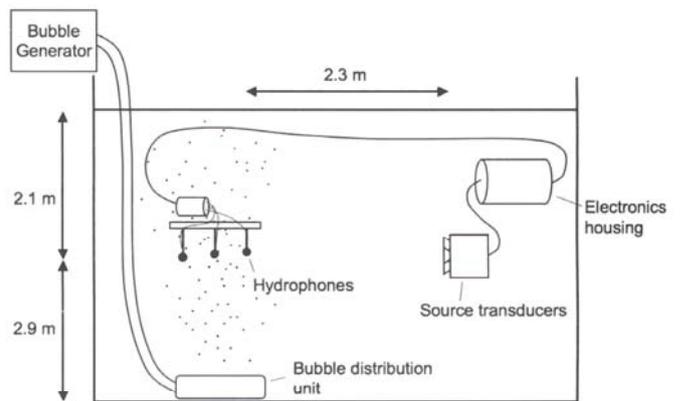
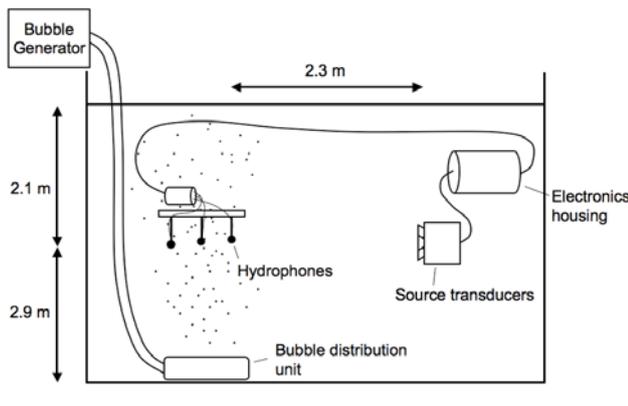


Figure 15.- Bubble generation and measurement components of the tank tests which took place in the $8 \times 8 \times 5\text{ m}^3$ AB Wood tank alongside the target detection tests of Figure 14. The hydrophone spacing is 0.31 m . From Coles and Leighton [38].

Figura 15.- Pruebas de generación de burbujas y componentes de medida del tanque que se realizaron en el tanque AB Word de $8 \times 8 \times 5\text{ m}^3$ al lado de las pruebas de detección del objetivo de la Figura 14. El espaciamiento del hidrófono es de 0.31 m . De Coles y Leighton [38]

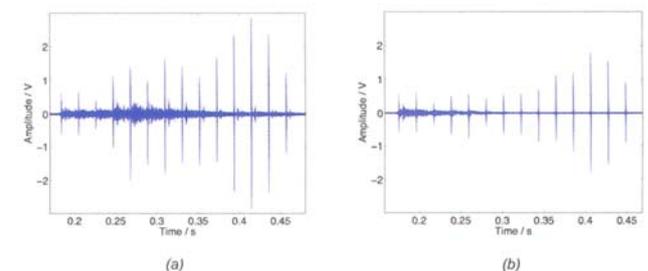
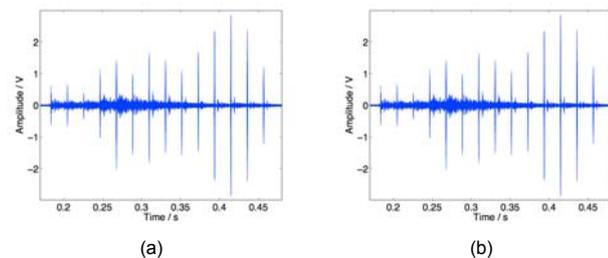


Figure 16.- The signals used to characterise the bubble population (not for target detection). (a) The pulse train measured at the second hydrophone with no bubbles present. (b) The increased attenuation at the same hydrophone when bubbles (shown in Figure 19(b)) are present. From Coles and Leighton [38].

Figura 16.- Las señales utilizadas para caracterizar la población de burbujas (no para la detección del objetivo). (a) La pulsación medida en el segundo hidrófono cuando no están presentes las burbujas. (b) La atenuación aumentada para el mismo hidrófono cuando las burbujas están presentes (mostrado en la Figura 19(b)). De Coles y Leighton [38].

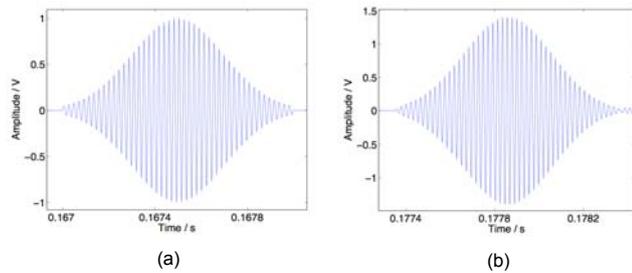


Figure 17.- Components of the signals used to characterize the bubble population (not for target detection). (a) The outgoing 46 kHz pulse signal that was transmitted to the power amplifiers prior to output into the water. (b) The same pulse as measured by the hydrophones in bubble-free conditions. From Coles and Leighton [38].

generated by a data acquisition card, and matched via the power amplifiers and transducers such that the pulses in the water followed the waveforms supplied by the data acquisition card with high fidelity (Figure 17) [38]. This high fidelity was designed by Paul Doust of Blacknor Technology. The hydrophones used were D/140 broadband hydrophones. The 3 to 197 kHz frequency range allowed measurements for bubble sizes ranging from 17 – 1107 μm in radius to be carried out. Each pulse was 1 ms long, short enough so the received signal was not to be affected by any

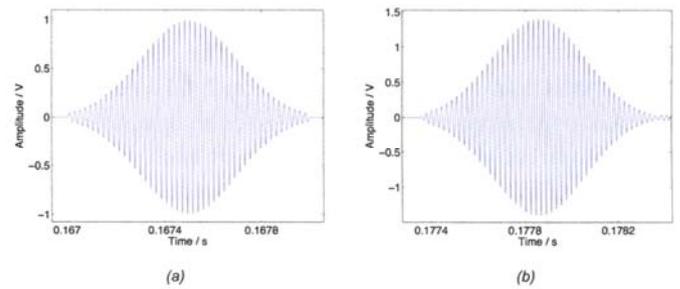


Figura 17.- Componentes de las señales utilizadas para caracterizar la población de burbujas (no para la detección del objetivo). (a) La señal de pulsación saliente de 46 kHz que fue transmitida a los amplificadores de energía antes de enviarla dentro del agua. (b) La misma pulsación como ha sido medida por los hidrófonos en condiciones de agua libre de burbujas. De Coles y Leighton [38].

cias a los amplificadores y a los transductores, de manera que las pulsaciones en el agua siguieron la forma de las ondas proporcionadas por la tarjeta de adquisición de datos con alta fidelidad (Figura 17) [38]. Esta alta fidelidad fue diseñada por Paul Doust de Blacknor Technology. Los hidrófonos utilizados fueron hidrófonos de banda ancha D/140. El rango de frecuencias de 3 a 197 kHz permitió llevar a cabo mediciones para burbujas de tamaños entre 17 – 1107 μm de radio. Cada pulsación medía 1 ms, siendo lo suficientemente corta para que la señal recibida no se viera afectada por ninguna reflexión de múltiple trayectoria. Hubo un

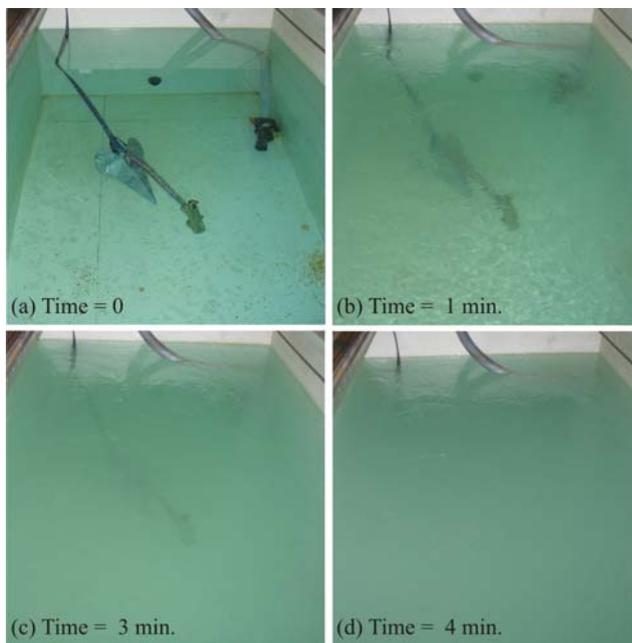


Figure 18.- The water in the bubble generator shown at the top left corner of figure 15. The images corresponding to times of (a) 0, (b) 1 min., (c) 3 min and (d) 4 min. after activation of the generator. They show the system filling a tank of normal fresh water (measuring 1.5 m x 2.5 m x 1.5 m) with a dense cloud of minute bubbles, without the production of large bubbles. As a result, the initially clear water turns milky white, obscuring from view the Delta 22 anchor which lies under 1.5 meters of water and measures 27.375 inches end-to-end and a maximum of 12.25 inches between the fluke tips. No chemicals were used.

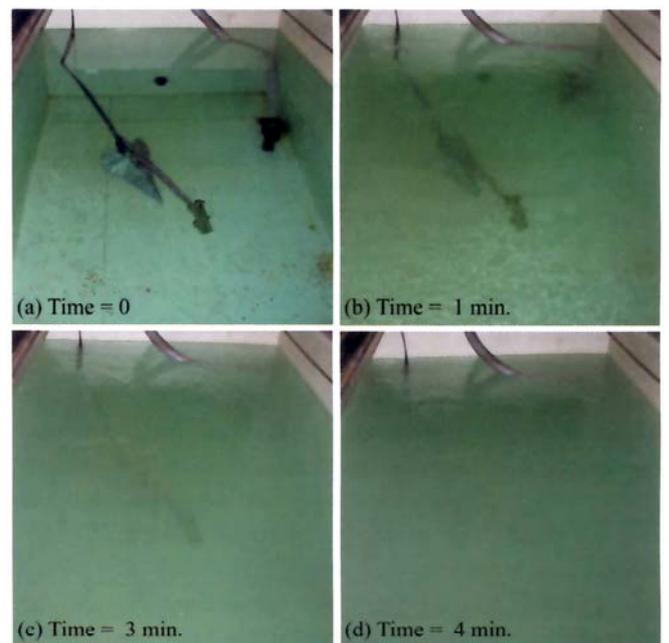


Figura 18.- El agua en el generador de burbujas mostrado en el extremo superior izquierdo de la Figura 15. Las imágenes corresponden a los tiempos de (a) 0, (b) 1 min., (c) 3 min. y (d) 4 min. tras la activación del generador. Muestran al sistema rellenando un tanque de agua fresca (que mide 1.5 m x 2.5 m x 1.5 m) con una densa nube de pequeñas burbujas, sin producir grandes burbujas. Como resultado, el agua clara inicial se convierte en agua blanca lechosa, oscureciendo el ancla Delta 22 que se encuentra a 1.5 metros de profundidad y mide 27.375 pulgadas de punta a punta y un máximo de 12.25 pulgadas entre las puntas. No se utilizaron productos químicos.

multi-path reflections. There was a 20 ms off-time between pulses to allow for bubble ring-down. The time between pulse trains was approximately 1 second, dictated by the speed at which the computer could save the data files. The attenuation between the hydrophones at each frequency was measured. To generate bubbles, a Venturi system was used (Figure 15). The water in the ‘bubble generator’ shown in the top left corner of Figure 15 is filled with a population of very small bubbles (Figure 18), through Venturi action. This bubbly water then pumped through the hose (labelled H in Figure 14(b), and shown on the left of Figure 15) to the base of the main tank, where the various ‘bubble distribution unit’ (labelled ‘G’ in Figure 14(b), and shown in Figure 15) are placed. These modify the bubble size distribution to provide the population required (such as the spherical cloud of Figure 14(c), or the more homogeneous distributions shown in Figure 19).

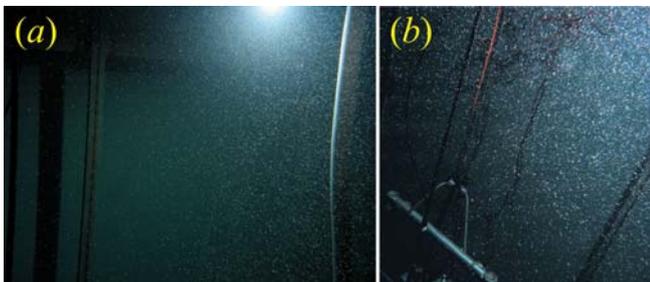


Figure 19.- (a) This image shows the bubble cloud used during one TWIPS test. The section of wall visible in the background of the photo measures ~ 3.3 m x 2.5 m, and is at a distance of 3 m from the camera location. The bubble cloud is distributed into the water column by a diffuser located halfway between the camera and the wall. The hose (white, at right), is 5 cm in diameter, and is along the approximate centreline of the cloud, at a distance of 1.5 m from the camera location. (b) Photograph from the top of the water column, showing the scaffolding bar at the top of the frame which holds the source. That bar is at a depth in the water of 2.03 m, and its length is 0.8 m.

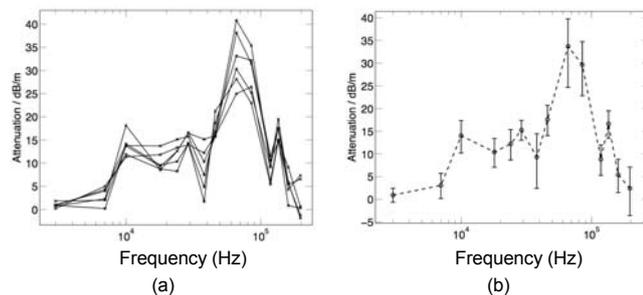


Figure 20.- Data for the bubble population of Figure 19(b). (a) The additional attenuation due to bubbles between the 1st and 3rd hydrophones, which were at a distance of 0.62 metres apart. The figure shows 6 separate readings, spaced approximately 1 second apart. (b) The mean of the 6 values shown in (a) (calculated from linear pressure data, not dBs). The error bars represent 1 standard deviation from the mean of the 6 values and also take into account the uncertainty of the hydrophone calibrations. From Coles and Leighton [38].

tiempo de 20 ms entre las pulsaciones para permitir una reducción de las burbujas. El tiempo entre los trenes de pulsaciones fue de alrededor de 1 segundo, dictado por la velocidad a la que el ordenador podía grabar los datos. Se midió la atenuación entre los hidrófonos en cada frecuencia. Para generar burbujas, se utilizó un sistema Venturi (Figura 15). El agua del ‘‘generador de burbujas’’ mostrado en la esquina superior izquierda de la Figura 15 se rellena con una población de burbujas muy pequeñas (Figura 18), a través del sistema Venturi. Este agua burbujeante es seguidamente bombeada con la manguera (denominada H en la Figura 14(b) y mostrada a la izquierda de la Figura 15) en la base del tanque principal, donde se han situado las diversas ‘‘unidades de distribución de burbujas’’ (denominadas G en la Figura 14(b) y mostradas en la Figura 15). Estas modifican la distribución del tamaño de las burbujas para proporcionar la población requerida (como la nube esférica de la Figura 14(c)), o las distribuciones más homogéneas mostradas en la Figura 19.

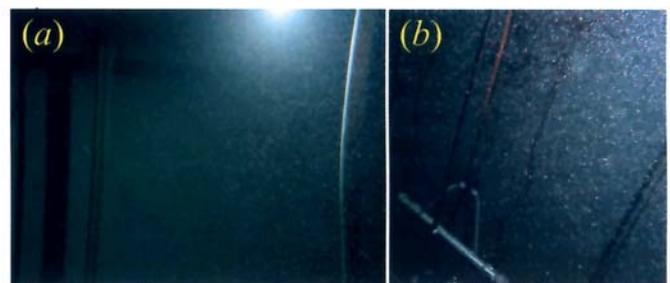


Figura 19.- (a) Esta imagen muestra la nube de burbujas utilizada durante un experimento de TWIPS. La sección de pared visible al fondo de la fotografía mide ~ 3.3 m x 2.5 m, y se encuentra a una distancia de 3m de la cámara. Un difusor situado a medio camino entre la cámara y la pared distribuye la nube de burbujas dentro de la columna de agua. La manguera (blanca, a la derecha) tiene un diámetro de 5 cm y se encuentra a lo largo de la línea central de la nube, a 1.5 m de la cámara. (b) Fotografía desde lo alto de la columna de agua, mostrando la barra de andamio en lo alto de la estructura que sostiene esta fuente. La barra se encuentra a 2.03 m de profundidad y mide 0.8 m de largo.

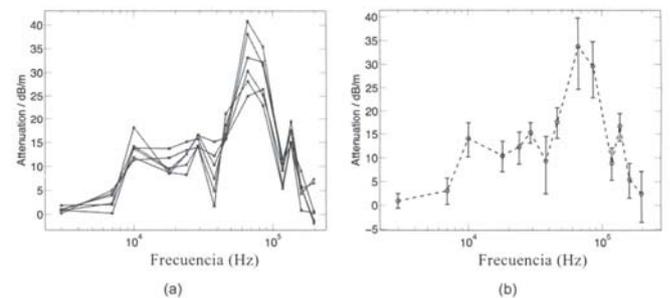


Figura 20.- Datos para la población de burbujas de la Figura 19(b). (a) La atenuación adicional debida a las burbujas entre el 1^o y el 3^o hidrófonos, que se encontraban a una distancia de 0.62 m. La figura muestra 6 lecturas separadas aproximadamente por 1 segundo. (b) La media de los 6 valores mostrados en (a) (calculados con los datos de la presión lineal, no en dBs). Las barras de error representan una desviación estándar de la media de los 6 valores y también tienen en cuenta la incertidumbre de las calibraciones de los hidrófonos. De Coles y Leighton [38].

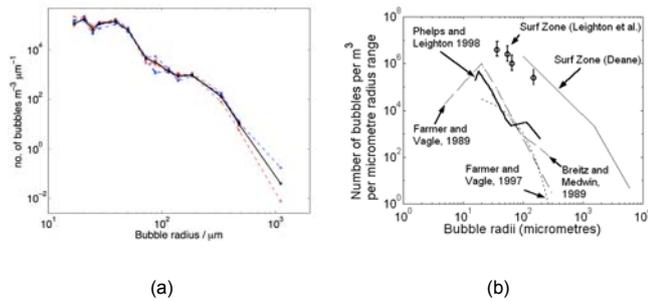


Figure 21.- (a) Bubble size distributions as calculated from measured attenuations of Figure 20. The bold black line shows the 6 second average population, the dashed lines show the six individual populations which make up the average. From Coles and Leighton [38]. (b) Previously measured oceanic bubble populations (taken from [2], where the sources are listed in full)

The measured acoustic attenuation (Figure 20) was inverted to estimate the bubble size distribution and void fraction generated by this system (Figure 21(a)), and check that, as required, it was similar to the characteristics of oceanic bubble populations (Figure 21(b)).

An example of the measured attenuation due to bubbles is shown in Figure 20. The error bars in Figure 20 (b) are at times large because of the fluctuating nature of the bubble cloud as it rises through the tank. The mean attenuation data from 6 readings were inverted to obtain bubble size distributions (Figure 21 (a)) [38]. As would be expected from Figure 24, very few bubbles were found at the largest bubble radius (1107 μm). The distribution measured in the tank (Figure 21(a)) is very similar in gradient and magnitude to historical measurements (Figure 21(b)). Comparison of Figures 20 and 21 with Figure 4 confirms that the bubble population in the test tank resembles that founding the ocean.

The outgoing waveform consists of two pulses sent out 20 ms apart, the second having reversed polarity with respect to the first. The waveform prior to 1 ms in Fig 22(a) shows the first of this pair of pulses in the absence of bubbles, under which conditions it has a temporal peak pressure amplitude (0-peak) of around 25 kPa at 1 m from the source, and 15 kPa at the target. The target is a steel disc of diameter 415 mm and thickness 50 mm, and at range 2 m from the source. Its calculated target strength is -10 dB.

Figure 22 shows a sequence of hydrophone records, arbitrarily chosen, which demonstrate the effect which the presence of bubbles have on the detectability of the target. When 10 such returns (arbitrarily chosen) are stacked (Figure 23), the ability of TWIPS to detect the target when it is hidden by bubbles is clearly demonstrated. The agreement between the experiment, and the simulations

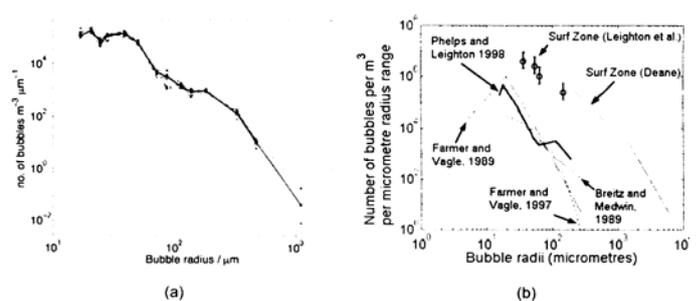


Figura 21.- (a) Distribuciones de tamaño de las burbujas como se han calculado con las atenuaciones medidas de la Figura 20. La línea negra en negrita muestra la población media de 6 segundos; las líneas discontinuas muestran las 6 poblaciones individuales que hacen la media. De Coles y Leighton [38]. (b) Poblaciones de burbujas oceánicas medidas previamente (tomado de [2], donde se incluyen todas las fuentes).

La atenuación acústica medida (Figura 20) fue invertida con el fin de estimar la distribución del tamaño de las burbujas y las fracciones vacías generadas por este sistema (Figura 21(a)), y para comprobar que, tal y como fue requerido, era similar a las características de las poblaciones de burbujas oceánicas (Figura 21(b)).

Un ejemplo de la atenuación medida debido a las burbujas se muestra en la Figura 20. Las barras de error en la Figura 20(b) pueden ser grandes a veces por la naturaleza fluctuante de la nube de burbujas a medida que sale del tanque. La media de los datos de la atenuación a raíz de las 6 lecturas fue invertida con el fin de obtener las distribuciones del tamaño de las burbujas (Figura 21 (a)) [38]. Como se podía haber esperado de la Figura 24, se encontraron muy pocas burbujas con el mayor radio de burbujas (1107 μm). La distribución medida en el tanque (Figura 21(a)) es muy similar en inclinación y magnitud a las medidas históricas (Figura 21(b)). La comparación de las Figuras 20 y 21 con la figura 4 confirma que la población de burbujas en el tanque de prueba se parece a aquellas halladas en el océano.

La onda saliente consiste en dos pulsaciones enviadas con un intervalo de 20 ms, la segunda teniendo una polaridad inversa a la primera. La onda anterior a 1 ms en la Figura 22(a) muestra el primero del par de pulsaciones en la ausencia de burbujas, en cuyas condiciones tiene un pico temporal de amplitud de presión (0-peak) de alrededor de 25 kPa a 1 m de la fuente, y de 15 kPa al objetivo. El objetivo es un disco de metal de un diámetro de 415 mm y un grosor de 50 mm y a 2 m de la fuente. Se calcula su fuerza objetivo de en -10 dB.

La Figura 22 muestra una secuencia de registros de hidrófonos, elegidos arbitrariamente, que demuestran el efecto que la presencia de burbujas tiene en la detección del objetivo. Cuando se acumulan 10 retornos como esos, elegidos arbitrariamente (Figura 23), la habilidad de los TWIPS para detectar el objetivo cuando está escondido por las burbujas queda claramente demostrado. La concordancia entre los experimentos y

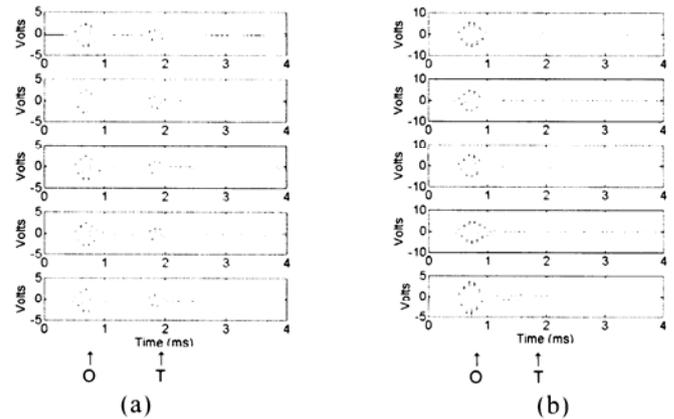
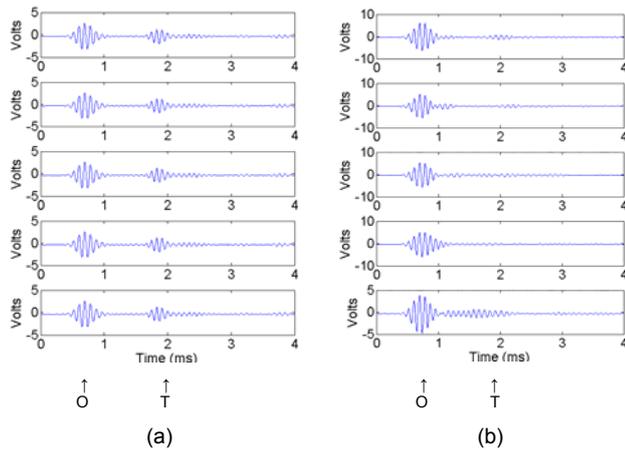


Figure 22.- A sequence of consecutive signals from the hydrophone of Fig. 1(a), arbitrarily selected for display. In (a) no bubbles are present. The first of the outgoing twin pulses (O, propagating out from source to target) is shown, followed around 1 ms later by the returning echo from the target (T, which propagates back from target to source). The second in the pair of TWIPS pulses is sent out 20 ms afterward, and produces corresponding echoes. In (b) bubbles are present (Figure 19(b) and 21(a)). Although the outgoing pulse is relatively stable, there is significant clutter from the bubbles and the signal from the target is attenuated.

Figura 22.- Una secuencia de señales consecutivas del hidrófono de la Figura 1(a), seleccionada arbitrariamente. En (a) no hay presencia de burbujas. Se muestra el primero de los pares de pulsaciones gemelares (O, propagándose desde la fuente al objetivo), seguido al cabo de aproximadamente 1 ms de un eco desde el objetivo (T, que se propaga de vuelta del objetivo a la fuente). El segundo en el par de pulsaciones TWIPS es enviado 20 ms más tarde, y produce los ecos correspondientes. En (b) las burbujas están presentes (Figura 19(b) y 21(a)). A pesar de que la pulsación saliente es relativamente estable, se produce una confusión significativa desde las burbujas y la señal desde el objetivo se ve atenuada.

made in 2005 before any experiment was planned [6, 28], is spectacular. An example of this is found in the intermittent manner in which TWIPS2a detects the target. This feature was predicted in the simulations [6, 34], and is one that could be offset in human or dolphin sonar by the use of a train of clicks: note that no fitting or adjustment parameters have been used with this data.

las simulaciones llevadas a cabo en 2005, antes de se planificara cualquier experimento [6,28], es espectacular. Se puede encontrar un ejemplo de esto en la manera intermitente que los TWIPS2a detectan el objetivo. Este rasgo se predijo en las simulaciones [6,34]; y es tal que podría ser compensado en el sonar humano o del delfin con la utilización de un tren de golpecitos; subrayamos aquí que no se han utilizado parámetros de ajuste con estos datos.

The implications of verifying the simulations of TWIPS working by providing an operational demonstration in the laboratory are significant. There is need for a method which allows active sonar to operate in shallow coastal waters (the littoral zone), a problem which, despite significant investment, has not previously been solved. Quoting Rear Admiral W.E. Landay (Chief of Naval Research, Marine Corps for Science and Technology). O. Kreisher wrote 'The explosive ordnance disposal divers and the marine mammals run counter to the drive to get people out of the minefields, Landay said, but they provide "so much flexible capability" that they are likely to remain. The divers and the mammals work mainly in very shallow water and the surf zone, which "continues to be the most challenging environment" for mine warfare, he said' [39]. If TWIPS could be made operational at sea, this would be a step towards replacing the current need of the US Navy to deploy odontoceti, and increase security for navy personnel and equipment in shallow bubbly waters. Such innovations are required since military operations (e.g. mine detection, landings, and the protection of harbours and shipping lanes for military, commercial and aid craft) cannot rely on the

Las implicaciones de verificar las simulaciones de los TWIPS aportando una demostración operativa en laboratorio, son significativas. Se necesita un método que permita al sonar activo operar en aguas costeras poco profundas (la zona litoral), un problema que, a pesar de la significativa inversión, no ha sido resuelto anteriormente. Parafraseando a Rear Admiral W.E. Landsay (Chief of Naval Research, Marine Corps for Science and Technology). O. Kreisher escribió 'los submarinistas y los mamíferos marinos corren en contra empujando a la gente fuera de los campos de minas, dijo Landay, pero proporcionan tanta "capacidad flexible" que posiblemente se queden. Los submarinistas y los mamíferos trabajan sobre todo en aguas muy superficiales y en las zonas de surf, que continúan siendo los entornos más desafiantes para la guerra de minas, dijo' [39]. Si los TWIPS pudieran hacerse operativos en el mar, esto podría ser un paso adelante hacia la necesidad actual de la Marina estadounidense de desplegar odontoceti, y aumentar la seguridad del personal de la Marina y de los equipos en aguas burbujeantes de poca profundidad. Se requieren este tipo de innovaciones ya que las operaciones militares (detección de minas, desembarcos, y la protección de los puertos y líneas de navegación para buques militares, comerciales y de asistencia) no pueden basar-

the decades of sonar experience built up for deep water applications during the Cold War. Such advances in sonar are also required because of the increasing use of sonar in shallow waters (e.g. for fisheries, surveying, and to cope with bottom sensing in increasingly-crowded and wake-filled waters by commercial and leisure craft). TWIPS sonar not only enhances the scatter from the target, but suppresses the clutter from the bubbles. As such it opens the door for then employing further processing techniques, such as target recognition imaging or through the exploitation of target resonances (for which the pulses of Figures 12(a) and 22(a) would be well suited).

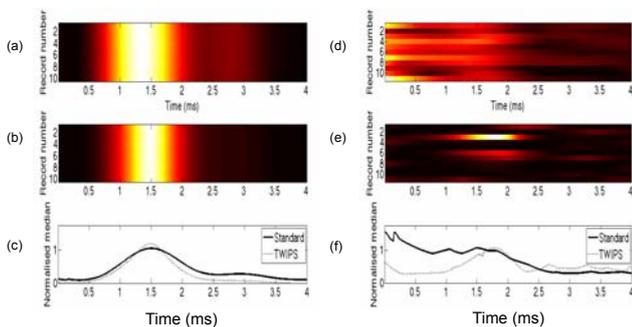


Figure 23: For both standard sonar (Panel (a) & (d) and TWIPS2a (Panel (b) & (e)) (as defined in reference [35]), hydrophone signals of the type shown in Fig. 2 are stacked consecutively one above the other, with start time $t=0$ chosen to be after the outgoing pulse (labelled O in Fig. 2) has passed over the hydrophone. Panels (a)-(c) refer to measurements taken in the absence of bubbles. The target is clearly visible at $t=1.4$ ms to both standard sonar (Panel (a)) and TWIPS2a (Panel (b)). When the normalised median of these 10 signals is calculated in (c), both standard sonar and TWIPS2a clearly show the target. Panels (d)-(f) shows the equivalent plot as for (a)-(c), but now with the introduction of a bubble population [38]. In (d) standard sonar can no longer see the target: the image is dominated by scatter from the bubble cloud. In (e) the scatter from the bubble cloud has been suppressed, and that from the target has been enhanced, such that the target is clearly visible. In (f) TWIPS2a clearly shows the presence of the target (note the suppression of its echoes from the bubbles), whilst standard sonar does not.

There are also implications for electromagnetic radiation in the ability to suppress unwanted nonlinear clutter (such as the ‘rusty bolt’ effect in radomes) or enhance it (to detect covert circuitry with radar, or to detect combustion products with LIDAR). There is a range of commercial and security applications (for example with optoelectronics and THz radiation) [35].

Recall that the impetus for this problem came from the search for a possible way of obtaining sonar enhancement in bubbly waters, given that odontoceti were observed to

se en décadas de experiencia con el sonar construido para aplicaciones en aguas profundas durante la Guerra fría. Estos avances en la tecnología sonar son requeridos por el uso creciente del sonar en aguas poco profundas (para pesca, monitoreo y protección de los fondos cada vez más invadidos por los barcos comerciales y de placer). Los sonar TWIPS no sólo aumentan la dispersión desde el objetivo, sino que suprimen la confusión emanada de las burbujas. De esta manera, abren la puerta para el uso de futuras técnicas de procesamiento, como el reconocimiento del objetivo a través de imágenes o de la explotación de las resonancias del objetivo (para las cuales serían muy adecuadas las pulsaciones de las Figuras 12(a) y 22(a)).

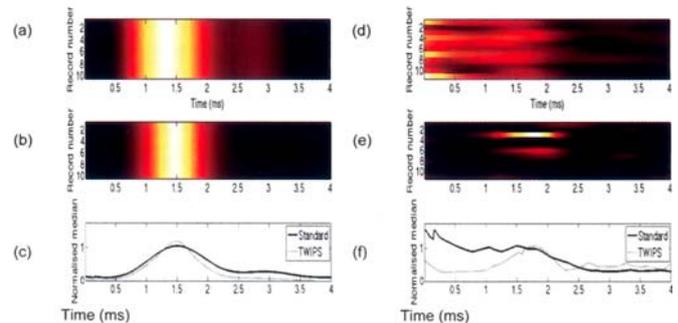


Figura 23: Para ambos sonar estándar (Panel (a) & (d) y los TWIPS 2a (Panel (b) & (e)) (tal y como está definido en la referencia [35]), se apilan de manera consecutiva, una sobre la otra, las señales hidrofónicas del tipo que se muestran en la Figura 2, con el tiempo de inicio $t=0$, elegido para empezar después de que la pulsación saliente (denominada O en la Figura 2) haya pasado sobre el hidrófono. Los Paneles (a) y (c) se refieren a las mediciones tomadas en ausencia de burbujas. El objetivo es claramente visible a $t=1.4$ ms tanto en el sonar estándar (Panel (a)) como en los TWIPS2a (Panel (b)). Cuando se calcula la mediana normalizada de estas 10 señales en (c), tanto el sonar estándar como los TWIPS2a muestran claramente el objetivo. Los paneles (d)-(f) muestran un trazo equivalente al de (a) y (c), pero ahora, con la introducción de una población de burbujas [38]. En (d) el sonar estándar ya no puede ver el objetivo: la imagen está dominada por dispersiones procedentes de la nube de burbujas. En (e) se ha suprimido la dispersión procedente de la nube de burbujas, y la dispersión procedente del objetivo se ha aumentado, de manera que el objetivo está claramente visible. En (f), TWIPS2a muestra claramente la presencia del objetivo (hay que subrayar la supresión de los ecos procedentes de las burbujas), mientras que no es el caso con el sonar estándar.

Hay también implicaciones para la radiación electromagnética en la habilidad para suprimir la confusión no lineal no deseada (como el efecto “cerrojo oxidado” de las antenas) o para aumentarla (con el fin de detectar sistemas de circuitos con radar, o para detectar productos de combustión con LIDAR). Existe un abanico de aplicaciones comerciales y de seguridad (por ejemplo con la “optoelectrónica y la radiación THz”) [35].

Recordemos que el ímpetu para este problema vino de la investigación sobre un posible camino para obtener el aumento del sistema sonar en aguas burbujeantes, habida cuenta de que

function in such waters [1,5]. The object was not to mimic the sonar of odontoceti. However having proven that TWIPS works in the laboratory, it is logical therefore to speculate whether odontoceti make use of this technique. Following the proposal of TWIPS [1, 5] and the success of the simulations [6, 34], conversations between the authors and members of the cetacean research community revealed that multiple pulses are indeed sometimes observed from *odontocete*. Whilst under very still conditions a reflection from the water/air interface could produce a phase-inverted signal, a search of the records by the authors revealed that six species of dolphins and porpoises (all belonging to the genera *Cephalarynychus* and *Phocoena*) in fact have been reported to create multiple pulses deliberately [40-42]. These species are listed in Table 1. The primary habitats for all members of these genera are shallow waters - the same waters for which TWIPS was invented as a sonar solution.

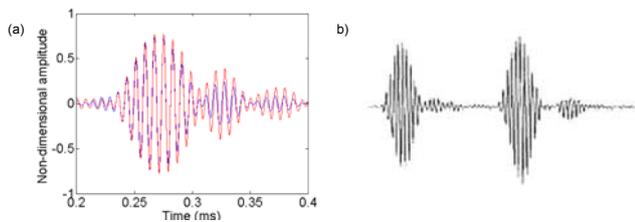


Figure 24.- (a) Two closely-spaced pulses from Hector's dolphin have been overlaid, having first inverted the 2nd pulse (shown in red). This then closely overlays the 1st pulse (shown in blue) indicating that the 2nd pulse was originally phase-inverted with respect to the 1st. However this is not conclusive evidence, because the data had to be oversampled by a factor of 10 because most of the energy within the signal falls just below the folding frequency. (Raw data courtesy Steve Dawson, University of Otago, processed by the authors). (b) Emission by Yangtze finless porpoise (reproduced from reference [43]). Axes not available. The 2nd wavepacket occurs ~300 μ s after onset of 1st. Data-limited analysis suggests 2nd packet is inverted with respect to 1st.

Pre-existing acoustic data for these mammals is scarce and, as a result of the wide bandwidth and high frequencies of the sounds they produce, it is often not sampled at a sufficiently high frequency to allow accurate phase analysis. Nevertheless phase analysis by the authors of recordings of Hector's dolphin (supplied to them by Dr Steve Dawson of the University of Otago, Dunedin, New Zealand) strongly suggests that this species is capable of deliberately generating phase inverted pulses (Figure 24(a)).

Furthermore, the twin pulses detected from the Finless Porpoise were also shown to be phase inverted by Li *et al.*

se había observado que los odontoceti funcionaban en estas aguas [1,5]. El objetivo no era únicamente imitar el sonar de los odontoceti. Sin embargo, después de haber demostrado que TWIPS funciona en el laboratorio, es por lo tanto lógico especular sobre si los odontoceti utilizan estas técnicas. Siguiendo la propuesta de TWIPS [1,5] y el éxito de las simulaciones [6,34], ciertas conversaciones entre los autores y los miembros de la comunidad de investigación sobre los cetáceos, revelaron que las pulsaciones múltiples son observadas en efecto, a veces, con los *odontocete*. Mientras que en condiciones muy tranquilas la reflexión de la interfase agua/aire podría producir una señal de fase invertida, una búsqueda de los registros por parte de los autores reveló que seis especies de delfines y marsopas (todos pertenecientes a los géneros *Cephalarynychus* y *Phocoena*) han producido de hecho pulsaciones múltiples deliberadamente [40-42]. Estas especies están indicadas en la lista de la Tabla 1. Los hábitats primarios para todos los miembros de estos géneros son las aguas poco profundas- las mismas aguas para las cuales se inventaron los TWIPS como una solución de sonar.

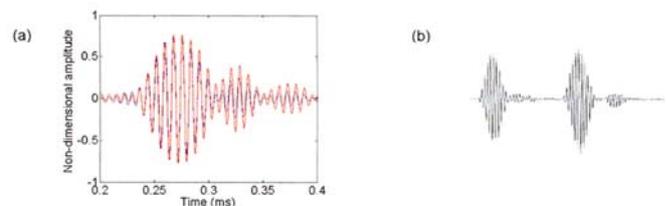


Figura 24.- (a) Dos pulsaciones muy cercanas del delfín Héctor han sido sobrepuestas, habiendo primero invertido la segunda pulsación (en rojo). Esta se sobrepone prácticamente a la primera pulsación (en azul), indicando que la segunda pulsación fue originalmente invertida en su fase en relación con la primera. Sin embargo, esto no es una prueba concluyente, porque los datos han de ser muestreados por un factor de 10, porque la mayoría de la energía que se encuentra dentro de la señal cae justo debajo de la frecuencia de plegamiento. (Datos brutos, cortesía de Steve Dawson, Universidad de Otago, procesados por los autores). (b) Emisión de la marsopa Yangtze sin aletas (reproducido de la referencia [43]). No están disponibles los ejes. El segundo paquete de ondas se produce ~300 μ m después de la primera. El análisis de los datos sugiere que el segundo paquete está invertido en relación con el primero.

Los datos acústicos pre-existentes para estos mamíferos son escasos, y como resultado de la ancha banda y de las altas frecuencias de los sonidos que producen, no se muestrea a menudo a una frecuencia lo suficientemente alta como para permitir un análisis preciso de las fases. Sin embargo, el análisis hecho por los autores de las fases de los registros del delfín Héctor (datos proporcionados por el Dr Steve Dawson de la Universidad de Otago, Dunedin, Nueva Zelanda) sugiere fuertemente que esta especie es capaz de generar deliberadamente pulsaciones de fase invertida (Figura 24(a)).

Además, las pulsaciones gemelas detectadas de la marsopa sin aleta se mostraban también como invertidas en sus fa-

[43] (Figure 24(b)). However those investigators assumed that the Finless Porpoises themselves did not generate twin inverted pulses, but rather that they generated a single pulse and that second pulse was the result of a reflection of the initial pulse from the air/water interface. Dawson and Thorpe [42] point out that while surface reflections may sometimes dominate the acoustic response, there have been many cases recorded where the multi-pulse structure (the inter-pulse timing and relative amplitude) does not vary considerably. In such cases, he argues, this would indicate that the multi-pulse is in fact emanating directly from the moving animal, as the structure of a signal inclusive of significant surface reflections would alter as the animal moved closer or further away from the hydrophone.

Convincing historical evidence which would suggest that the interpretation of multiple pulses as surface reflections is incorrect, is found in a 1966 paper by Medwin [44], who addressed the surface reflections from a wind driven surface. This paper showed reasonable agreement between Kirchhoff scattering theory and experiment. Medwin fixed an up-looking send/receive transducer on the bottom of the tank, and played 8 tones 20 times. The tones used were linearly spaced from 21.5 kHz to 194 kHz. The tank surface was maintained at a near-constant roughness throughout the course of the experiment, so that, in dimensional terms, the higher frequency measurements effectively modelled rougher seas. For anything more than superficial roughness (e.g. as the wavelength approaches the median size of surface disturbance), it becomes very difficult to obtain reflections of amplitude greater than about half that obtained when the surface was smooth and flat.

One coastal dolphin which is not listed in Table 1, but which belongs to the genera *Cephalarynychus*, is Heaviside's dolphin (*Cephalorhynchus heavisidii*). This is because the authors are unaware of any acoustic data in the public domain on this species, which is confined to coastal Africa. However, given the close evolutionary ties between Heaviside's dolphin and the other dolphins of its genus [45] and the relative similarities of their limited habitats, we propose that acoustic measurements of Heaviside's dolphin could reveal the presence of multiple phase-reversed pulses.

Undoubtedly the major hindrance in answering whether these mammals do in fact exploit TWIPS is the lack of acoustic records which were taken in a manner specifically designed to determine the relevant features of the pulses. As stated above, the sampling frequency must be sufficiently great to allow robust analysis of the phase. Multi-element acquisition systems should be used to show undoubtedly

ses por Li *et al.* [43] (Figura 24(b)). Sin embargo, estos investigadores asumieron que las marsopas sin aleta no producían pulsaciones invertidas gemelas por sí mismas, sino más bien que generaban una pulsación única y que la segunda pulsación era el resultado de la reflexión de la pulsación inicial por la interfase aire/agua. Dawson y Torpe [42] señalan que mientras las reflexiones en la superficie pueden a veces dominar la respuesta acústica, se han dado muchos casos registrados en donde la estructura de multi pulsación (el timing Inter-pulso y la amplitud relativa) no varía de manera considerable. En semejantes casos, argumenta, esto indicaría que la multi-pulsación emana directamente de los animales en movimiento, como se alteraría la estructura de una señal con reflexiones significativas de superficie con el movimiento de los animales más cerca o más lejos del hidrófono.

Pruebas históricas convincentes que sugerirían que la interpretación de las pulsaciones múltiples como reflexión de superficie es incorrecta, se puede encontrar en un artículo de 1966 de Medwin [44], quien abordó las reflexiones de superficie desde una superficie con viento. Este artículo mostró un razonable acuerdo entre la teoría de dispersión de Kirchhoff y el experimento. Medwin hizo un transductor de envío/recepción en el fondo de un tanque, y lo hizo funcionar 8 tonos 20 veces. Los tonos utilizados estaban linealmente espaciados de 21.5 kHz hasta 194 kHz. Se mantuvo la superficie del tanque a una agitación constante durante el experimento, de manera que, en términos dimensionales, las mediciones más altas de frecuencia modelaron efectivamente los mares más agitados. Para cualquier cosa distinta de la agitación superficial (por ejemplo cómo la longitud de onda se acerca al tamaño medio de la perturbación superficial) se hace muy difícil obtener reflexiones de una amplitud mayor que la mitad de la obtenida cuando la superficie era lisa y plana.

Un delfín de la costa que no está incluido en la Tabla 1, pero que pertenece al género *Cephalarynychus*, es el delfín de Heaviside (*Cephalorhynchus heavisidii*). Esto es debido a que los autores no están al tanto de que existan datos acústicos en el dominio público de esta especie, que está confinada a la costa africana. Sin embargo, habida cuenta de los lazos evolutivos entre los delfines de Heaviside y el resto de los delfines de este género [45], y las similitudes relativas de sus hábitat limitados, proponemos que las mediciones acústicas de los delfines de Heaviside podrían revelar la presencia de pulsaciones de fases revertidas.

Sin lugar a dudas, el mayor obstáculo en contestar si estos mamíferos explotan realmente los TWIPS es la falta de registros acústicos que fueran tomados de una manera específicamente diseñada para determinar los trazos relevantes de las pulsaciones. Como ya se ha mencionado anteriormente, la frecuencia de la muestra tiene que ser lo suficientemente grande como para permitir análisis sólidos de la fase. Se deberían usar

Table 1: Species for which there is tentative evidence for the deliberate use of multiple pulses for sonar in shallow water, with sources for that evidence referenced. Note: Awbrey et al. [47] made the first high frequency recordings of Dall's porpoise, but the authors of this paper were unable to obtain this report.

Species	Primary Habitat	Ref.
Dall's porpoise, <i>Phocoena dalli</i>	Near-shore, warm temperate to sub-arctic waters of the Northern Pacific Ocean.	[46,47]
Harbour porpoise, <i>Phocoena phocoena</i>	Coastal waters of subarctic & cool temperate North Atlantic & North Pacific. Often inshore.	[41]
Finless Porpoise, <i>Neophcaena phocaena</i>	In-shore waters of Asia	[43]
Commerson's dolphin, <i>Cephalorhynchus commersonii</i>	Near-shore waters <100 m depth, including east coast of Argentina, southern Chile, & Indian Ocean	[40]
Hector's dolphin, <i>Cephalorhynchus hectori</i>	New Zealand coastal waters. Often in estuaries	[48]
Chilean/Black dolphin, <i>Cephalorhynchus eutropia</i>	Coastal Chile	[49]

that multi-pulses emanate from the species in question, and are not the result of environmental reflections as some investigators have proposed [43]. The environmental conditions must be sufficiently challenging to stimulate the cetacean to use twin-pulse techniques, if it is capable of that. The measurement must be at the spatial peak of the projected beam which *Cephalorhynchus* and *Phocoena* produce, and not off-axis as is easily done given the narrow beamwidths observed [8, 11, 48, 50]. This is because TWIPS is dependent on nonlinear bubble dynamics, which in turn require high amplitude acoustic waves. Whilst careful measurements of the most closely studied dolphin (*Tursiops truncatus*, the Bottlenose dolphin, which is not a member of *Cephalorhynchus* or *Phocoena* and does not produce twin pulses) has shown [41] that they can produce 126 kPa peak-to-peak at a range of 1 m, specific measurements of the type described above need to be undertaken to determine the maximum amplitudes which can be

Tabla 1: Especies para las cuales hay pruebas tentativas para el uso deliberado de pulsaciones múltiples para el sonar en aguas poco profundas, con fuentes referenciadas para esta prueba. Nota: Awbrey et al. [47] realizó los primeros registros de alta frecuencia de la marsopa de Dall, pero los autores de esta nota han sido incapaces de dar con este informe.

Especie	Hábitat Primario	Ref.
Marsopa de Dall, <i>Phocoena dalli</i>	Cerca de la costa, de aguas templadas a subárticas del Océano Pacífico del Norte.	[46,47]
Marsopa de puerto, <i>Phocoena phocoena</i>	Aguas costeras de la zona sub-ártica y temperada del Norte de los Océanos Atlántico y Pacífico. Frecuentemente cerca de la costa.	[41]
Marsopa sin aletas, <i>Neophcaena phocaena</i>	Aguas costeras de Asia	[43]
Delfín de Commerson <i>Cephalorhynchus commersonii</i>	Aguas cercanas a la costa <100 m de profundidad, incluyendo la costa este de Argentina, el Sur de Chile y el Océano Índico	[40]
Delfín de Héctor, <i>Cephalorhynchus hectori</i>	Aguas costeras de Nueva Zelanda. Frecuentemente en estuarios	[48]
Delfín chileno/Delfín negro, <i>Cephalorhynchus eutropia</i>	Costas de Chile	[49]

sistemas de adquisición multi-elementos para mostrar que las multi-pulsaciones emanan de las especies en cuestión, y no son el resultado de reflexiones del entorno como habían propuesto algunos investigadores [43]. Las condiciones del entorno deben ser lo suficientemente importantes como para estimular que el cetáceo utilice técnicas de pulsaciones gemelares, si es capaz de ello. La medición debe hacerse en el pico espacial del rayo proyectado que producen los *Cephalorhynchus* y *Phocoena*, y no fuera de los ejes como sería más fácil dados los rayos tan estrechos observados [8, 11, 48, 50]. Esto es porque TWIPS depende de las dinámicas de burbujas no lineales, que a su vez requieren ondas acústicas de alta amplitud. Mientras que mediciones cuidadosas de los delfines más estudiados (*Tursiops truncatus*, el delfín nariz de botella, que no pertenece a los *Cephalorhynchus* o a los *Phocoena* y no produce pulsaciones gemelas) han mostrado [41] que pueden producir 126 kPa de pico a pico en un rango de 1m necesitan ser realizadas mediciones específicas del tipo descrito más arriba para determinar las amplitu-

generated by *Cephalorhynchus* and *Phocoena*. Whether or not cetaceans do indeed exploit TWIPS, the possibilities for man-made sonar applications have been demonstrated. The claim cannot be made that odontoceti use TWIPS: to quote Carl Sagan, “extraordinary claims require extraordinary evidence” and such evidence has not been obtained (the authors have not been able to obtain funding for such a study). However the object of the study was to determine whether the laws of physics would allow for the development a sonar which could operate in bubbly water, which Figure 23 proves, and as such the study says no more than would concur with Faraday when he said “Nothing is too wonderful to be true if it be consistent with the laws of nature”. That consistency has been demonstrated for TWIPS.

Investigators have been able to study biosonar detection capabilities in noisy [51] and surface reverberant environments [52, 53]. Interestingly, despite both the strategic importance of the acoustically-difficult littoral zone [54] and the well-known ability of certain odontoceti (especialmente those of the genus *Cephalorhynchus* [45-49]) to compete successfully in this habitat, there is little published work which reports on the acoustic abilities of dolphins in shallow-water conditions. Fertile ground for investigation could include observations and acoustic measurements of wild mammals which are indigenous to environments containing littoral zone challenges, such as the persistent presence of bubble clouds in their habitat. A suitable array could distinguish whether the multiple pulses are generated by individuals directly or through surface bounces (note that in principle TWIPS could work if the second pulse was generated by a surface bounced, provided it was sufficiently similar to the first pulse). It is of critical importance that the acoustic emissions of wild shallow-water species of odontoceti be non-invasively measured in conditions when microbubbles are present within the surf zone in sufficient numbers to confound standard sonar techniques (i.e. when weather, topography, wave conditions etc. are suitable). Such measurements should be made using multi-element arrays. While use of a sampling frequency about two times higher than the highest acoustic vocalisation is sufficient for basic investigations, it may not be sufficiently high to avoid signal distortion which would make it difficult to perform detailed signal analysis.

Rigorous procedures for conducting measurements of odontoceti in captivity have a well-recognised history [41]. Hypothetically, it is possible to construct a thought-experiment whereby the range of observations of those mammals already in captivity could include ones to determine to what extent it is possible for them to detect,

des máximas que pueden ser generadas por los *Cephalorhynchus* y *Phocoena*. Independientemente de saber si los cetáceos explotan TWIPS, se han demostrado las posibilidades para las aplicaciones del sonar echo por el hombre. No se puede decir que los odontoceti utilizan TWIPS: parafraseando a Carl Sagan “postulados extraordinarios requieren pruebas extraordinarias” y no se ha obtenido ese tipo de prueba (los autores no han podido obtener financiación para ese estudio). Sin embargo, el objeto del estudio era determinar si las leyes de la física permitirían el desarrollo de un sonar que pudiese operar en aguas burbujeantes, lo que prueba la Figura 23; y así el estudio no dice más de lo que podría concurrir con Farady cuando dijo “*Nada es demasiado maravilloso para ser verdad si ha de ser consistente con las leyes de la naturaleza*”. Se ha demostrado esta consistencia para TWIPS.

Los investigadores han sido capaces de estudiar las capacidades de detección biosonar en entornos reverberantes ruidosos [51] y superficiales [52,53]. De manera interesante, a pesar de la importancia estratégica de la zona litoral complicada acústicamente hablando [54] y la conocida habilidad de ciertos odontoceti (especialmente los del género *Cephalorhynchus* [45-49]) para competir con éxito en este hábitat, no hay mucho publicado sobre las habilidades acústicas de los delfines en aguas poco profundas. Un terreno fértil para la investigación podría incluir observaciones y mediciones acústicas de mamíferos salvajes que son oriundos de entornos que contienen zonas costeras desafiantes, como la persistente presencia de nubes de burbujas en su hábitat. Una serie adecuada podría distinguir si las pulsaciones múltiples están generadas directamente por individuos o a través de una superficie de rebote (hay que subrayar que, en principio, TWIPS podría funcionar si la segunda pulsación fuera generada por una superficie de rebote, siempre y cuando fuera lo suficientemente similar a la primera pulsación). Es de una importancia crítica que las emisiones acústicas de las especies salvajes en aguas poco profundas de odontoceti sean medidas en condiciones no invasivas en las que las micro burbujas están presentes en la superficie en número suficiente como para confundir las técnicas de sonar estándar. (cuando el tiempo, la topografía, las condiciones de las olas, etc. son convenientes). Deberían realizarse este tipo de mediciones utilizando series de multi elementos. Mientras que el uso de una frecuencia de muestreo dos veces más alta que la más alta vocalización acústica es suficiente para las investigaciones básicas, quizás no sería suficiente alta para evitar las distorsiones de las señales que harían difícil la realización de análisis de señales detallados.

Procedimientos rigurosos para llevar a cabo mediciones de odontoceti en cautividad tienen una historia bien reconocida [41]. Hipotéticamente, es posible construir un “experimento de pensamiento” donde el rango de observaciones de estos mamíferos ya en cautividad podría incluir aquellos que determinan hasta dónde es posible detectar, localizar e identificar peces y

localise and identify fish and other solid objects in water (using well-recognised techniques [41]) containing a bubble populations resembling those found in the wild [2, 7, 17], and comparing this ability to that obtained with other populations (e.g. of large bubbles). Whilst acoustical techniques were used to measure the bubble populations in this paper, non-acoustic methods would be preferable if odontoceti are present [55]. Possible scenarios include one where the mammal is in bubble-free water and attempts to identify an object in the presence of a bubble screen; or where both the target and the mammal are in bubbly water. The experiment would be aimed at evaluating the performance of odontoceti in conditions containing elements which present difficulties to human sonar in shallow water (such as bubbles) and to determine the source of any enhanced performance (e.g. the characteristics of the platform, acoustics, processing etc.). Both active and, potentially, passive [56-58] techniques could be considered. Measurements made in captivity are advantageous in that they make it possible to determine quantitatively the capability of an individual dolphin to find a given target in a particular condition. By varying any of these elements, it is possible to develop an overall picture of the ability of dolphins to locate targets despite a complex but controllable environment. Implementation of such a thought-experiment would be illegal to execute under UK law.

Cavitation and cetacean: the adverse effects of anthropogenic acoustic field

The impact of anthropogenic noise on marine mammals remains poorly understood. The most extreme examples of this impact are the mass strandings of cetaceans, temporally and spatially coincident with the use of mid-frequency military sonars. Initial stranding events [59] occurred before the causal link between sonar and strandings was hypothesised. Subsequent similar events are routinely the focus of investigations. In some cases these investigations have concluded that the sonars were directly implicated as causes of the strandings [60-62], whereas in other cases no evidence of a link to sonar has been determined (see, for example, reference [63]). For mass stranding events in which sonar is widely accepted as being a causal factor, the vast majority of animals affected are species of beaked whale. Consequently, considerable recent research effort has been dedicated to understanding the mechanisms which potentially lead to beaked whale strandings.

In several cases, necropsies performed on the stranded carcasses reveal the presence of gas and fat emboli [61-62]

otros objetos sólidos en el agua (utilizando técnicas bien reconocidas [41]) conteniendo poblaciones de burbujas semejantes a aquellas encontradas en la naturaleza [2,7,17], y comparando esta habilidad con la obtenida en otras poblaciones (por ejemplo de grandes burbujas). Mientras que las técnicas acústicas fueron utilizadas para medir las poblaciones de burbujas en este trabajo, serían preferibles métodos no-acústicos si los odontoceti estuvieran presentes [55]. Algunos escenarios posibles incluyen uno en el que el mamífero se encuentre en aguas libre de burbujas e intenta identificar un objeto en la presencia de una pantalla de burbujas; u otro, en el que tanto el objetivo como el mamífero se encuentran en aguas burbujeantes. El experimento tendría el objetivo de evaluar la actuación de los odontoceti en condiciones que contienen elementos que presentan dificultades para el sonar humano en aguas poco profundas (como por ejemplo burbujas) y para determinar la fuente de cualquier actuación mejorada (por ejemplo las características de la plataforma, la acústica, el procedimiento, etc.) Tanto las técnicas activas como las pasivas [56-58] podrían ser consideradas. Las mediciones realizadas en cautividad son ventajosas en el sentido que hacen posible determinar cuantitativamente la capacidad de un delfín de encontrar una zona objetivo en una condición particular. Al variar cualquiera de estos elementos, es posible desarrollar una imagen general de la habilidad de los delfines para localizar objetivos, a pesar del complejo aunque controlable entorno. La implementación de semejante experimento sería ilegal bajo las leyes del Reino Unido.

Cavitación y cetáceos: los efectos adversos de los campos acústicos antropogénicos

El impacto del ruido antropogénico en los mamíferos marinos se entiende poco todavía. Los ejemplos más extremos de este impacto son los grandes bancos de cetáceos varados, coincidentes espacial y temporalmente con el uso de sonares militares frecuencias medias. Los primeros acontecimientos [59] con estos animales varados ocurrieron antes de que se hiciera ninguna hipótesis sobre la relación casual entre el sonar y estos bancos. Acontecimientos similares posteriores han sido habitualmente el foco de investigaciones. En algunos casos estas investigaciones han concluido que los sonar estaban directamente implicados como causa de los bancos de animales varados [60-62] mientras que en otros casos no se pudo determinar una relación con el sonar (véase, por ejemplo, la referencia [63]). Para casos de bancos masivos en los cuales se acepta ampliamente que el sonar es el factor causal, la mayoría de los animales afectados son especies de ballenas picudas. En consecuencia, se ha dedicado recientemente un esfuerzo considerable en entender los mecanismos que potencialmente llevan a las ballenas a vararse.

En numerosos casos, las necropsias practicadas en las carcasses varadas revelan la presencia de gas y embolia grasa

which are consistent with, but not diagnostic of, decompression sickness (DCS) [64]. Historically it has been assumed that marine mammal physiology prevents the generation of bubbles which can lead to DCS [64, 65]. Whilst it is certainly true that evolutionary forces have mitigated the risks to marine mammals from DCS, it is overly simplistic to assume the absence of *in vivo* bubble generation. Indeed, there is increasing evidence of bubble formation in cetaceans in the absence of evidence of exposure to unusual anthropogenic noise [69, 71]. The pathology associated stranded animals exposed to sonar is distinct from the examples in references [66, 67] in that the embolisms are systemic rather localised. Further the examples in [66, 67] appear to have been the consequence of sustained non-lethal processes: for example in reference [67] some lesions are surrounded by fibrosis.

There are broadly two theories as to the mechanisms by which *in vivo* bubble formation occurs in beaked whales leading to DCS. The first is that the acoustic source directly leads to the growth/generation of bubbles [68], i.e., the acoustic field generated by the sonar source generates a population of relatively large bubbles. The second mechanism is that the sonar induces a behavioural response that causes DCS [69]. The diving behaviour of beaked whales has been poorly understood, but recent studies [69, 71] have begun to provide data about typical dive profile for three species: Northern bottlenose whale (*Hyperoodon ampullatus*) [71], Cuvier's beaked whale (*Ziphius cavirostris*) [69, 70] and Blainville's beaked whale (*Mesoplodon densirostris*) [69, 70]. It seems highly likely that the typical diving behaviour of these animals is linked in some manner to their susceptibility to sonar. This may be either through a physical or a behavioural mechanism. It is almost certainly the case that both mechanisms have the potential to cause *in vivo* bubble generation. However, it is not apparent which will be the dominant mechanism under realistic conditions. For example one might consider two scenarios when a beaked whale encounters a sonar: first, the animal flees as a consequence of exposure to sonar, before a physical harm is incurred, but in doing such induces DCS; second, the animal incurs damage leading to DCS prior to, or in spite of, a behavioural response.

Conclusions

This paper has outlined a range of proposed methods by which cetaceans may be utilising the acoustical effects of gas bubbles to their advantage (such as in the generation of acoustical traps), or to mitigate the detrimental effects

[61,62] que son consistentes (aunque no representan un diagnóstico) de la enfermedad de descompresión (DCS) [64]. Históricamente se ha asumido que la psicología de los mamíferos marinos previene la generación de burbujas que pueden llevar a la DCS [64,65]. A pesar de ser probablemente cierto que las fuerzas evolutivas han mitigado los riesgos de los mamíferos marinos de padecer la DCS, es demasiado simplista asumir la ausencia de la generación de burbujas *in vivo*. De hecho, existen pruebas crecientes de la formación de burbujas en los cetáceos en ausencia de pruebas de la exposición a ruidos antropogénicos inusuales [69,71]. La patología asociada a los animales varados expuestos al sonar es distinta de los ejemplos de las referencias [66,67], diferenciándose en que los embolismos son sistémicos en vez de localizados. Aún más, los ejemplos posteriores en [66,67] parecen haber sido la consecuencia de procesos sostenidos no letales: por ejemplo, en la referencia [67] ciertas lesiones están rodeadas de fibrosis.

En líneas generales hay dos teorías en cuanto a los mecanismos por los cuales la formación de burbujas *in vivo* ocurre en ballenas picudas, provocando una DCS. La primera es que la fuente acústica lleva directamente al crecimiento/generación de burbujas [68], es decir, que el campo acústico generado por la fuente del sonar genera una población de burbujas relativamente grandes. El segundo mecanismo es que el sonar induce una respuesta en el comportamiento que produce la DCS [69]. El comportamiento al bucear de las ballenas picudas ha sido poco entendido, pero estudios recientes [69,71] han comenzado a proporcionar datos sobre el perfil típico de buceo de tres especies: la ballena nariz de botella del Norte (*Hyperoodon ampullatus*) [71], la ballena picuda de Cuvier (*Ziphius cavirostris*) [69,70] y ballena picuda de Blainville (*Mesoplodon densirostris*) [69,70]. Parece muy probable que el perfil típico de buceo de estos animales esté ligado de alguna manera con su sensibilidad al sonar. Esto podría darse a través de un mecanismo físico o de comportamiento. Es casi seguro que ambos mecanismos tienen el potencial de causar la generación de burbujas. Sin embargo, no está claro cuál será el mecanismo dominante bajo condiciones reales. Por ejemplo, se podrían considerar dos escenarios cuando una ballena se encuentra con un sonar: primero, el animal huye como consecuencia de la exposición al sonar, antes de que se haga daño físico, pero haciendo eso se induce la DCS. Segundo, el animal incurre en daño físico que le lleva a la DCS antes que sé de una respuesta de comportamiento.

Conclusiones

Este trabajo ha puesto de relieve una serie de métodos por los cuales los cetáceos pueden estar utilizando los efectos acústicos de las burbujas de gas en su beneficio (como la generación de trampas acústicas), o para mitigar los efectos perversos que las

which bubbles have on active sonar. The ability of the authors to test these hypotheses have been limited by legislation and absence of funding. The experimental model scale bubble net only provided a very limited test, and lacks the refractive element, knowledge of the actually bubble population generated by the whales in the net, and a suitable scaled version of this for the experiment. TWIPS sonar has been used to detect targets in bubble clouds which are invisible to conventional sonar. The possibility that *odontocete* might use TWIPS is intriguing, but by no means settled: the question of whether the pulse amplitudes are sufficient, and whether the frequency range is appropriate, need to be settled. Furthermore there are those who adhere to the hypothesis that the second pulse is the result of a surface bounce, and not deliberately generated by the animal. It would be intriguing to investigate whether any of the species identified in Table 1 adapt their sonar for bubbly conditions, or show an enhanced ability in shallow water (their primary habitat) compared to free-ranging species, such as *Tursiops*, that have dominated testing and training by humans. There have been extensive recordings of the emissions of the Harbour Porpoise (*Phocoena phocoena*), a shallow-water animal. Harbour porpoise emissions have been analysed by our group for the presence of equi-amplitude phase-reversed pulse pairs, but no such acoustic emissions have yet been identified. However, regardless of these intriguing questions, man-made sonar has now been demonstrated as reaching the stage where TWIPS sonar can be experimentally demonstrated, which offers the possibilities not only for applications of sonar in shallow water, but also for a range of EM applications, including radar, lidar and THz radiation [35]. Finally, the possibility that anthropogenic noise and sonar could generate detrimental effects, including bubble activity, in cetaceans was addressed.

Acknowledgements

The material on humpback whale bubble nets and echolocation by odontoceti in bubbly water was unfunded. The authors are grateful to J. K. Dix for the loan of equipment and to him, G. Robb, D. Coles, G.T. Yim and C. Powles for volunteering of manual effort to assist with manoeuvring the sizeable items of equipment in the laboratory.

The authors acknowledge Paul Jepson for advice on the potential harmful effects of anthropogenic sonar.

burbujas tienen en los sonares activos. La habilidad de los autores para probar estas hipótesis se han visto limitadas por la legislación y por la ausencia de financiación. El modelo experimental de la red de burbujas aporta únicamente una prueba muy limitada, y carece del elemento refractivo, del conocimiento de la población de burbujas actual generada por las ballenas en la red, y de una versión adaptada a escala de esto para el experimento. El sonar TWIPS ha sido utilizado para detectar objetivos en las nubes de burbujas, que son invisibles para un sonar convencional. La posibilidad de que los odontoceti pudieran utilizar TWIPS es intrigante, pero en ningún caso resuelta: la cuestión de si las amplitudes de las pulsaciones son suficientes, y de si el rango de frecuencia es apropiado, aún deben resolverse. Además están los que se adhieren a la hipótesis de que la segunda pulsación es el resultado de una superficie de rebote, y que no está deliberadamente provocada por el animal. Sería interesante investigar si alguna de las especies identificadas en la Tabla 1 adapta su sonar a las condiciones de aguas burbujeantes, o muestra una habilidad creciente en aguas poco profundas (su hábitat primario) comparado con las especies sin zona de distribución fija como los *Tursiops*, que han dominado los ensayos y entrenamientos por humanos. Ha habido extensos registros de las emisiones de la Marsopa Harbour (*Phocoena phocoena*), un animal de aguas poco profundas. Estas emisiones de la marsopa Harbour han sido analizadas por nuestro equipo buscando la presencia de pares de pulsaciones de fase invertidas de igual amplitud, pero no han sido identificadas semejantes emisiones acústicas. Sin embargo, independientemente de estas intrigantes cuestiones, se ha demostrado que el sonar hecho por el hombre está alcanzando el estadio en donde los sonares TWIPS pueden ser demostrados experimentalmente, lo que ofrece posibilidades, no sólo para aplicaciones del sonar en aguas poco profundas, sino también para un abanico de aplicaciones EM, incluyendo el radar, el LIDAR y la radiación THz [35]. Finalmente, se ha abordado la posibilidad de que el ruido antropológico y el sonar puedan generar efectos diversos, incluyendo la actividad de las burbujas, en los cetáceos.

Agradecimientos

El material sobre las redes de burbujas de las ballenas MN y la ecolocación de los odontoceti en aguas burbujeantes no estaba financiado. Los autores agradecen a J. K. Dix por el préstamo de material y a él, a G. Robb, D. Coles, G.T. Yim y C. Powles por su ayuda voluntaria y esfuerzos manuales con las maniobras con el equipamiento de tamaño considerable en el laboratorio.

Los autores agradecen a Paul Jepson sus consejos sobre los efectos potencialmente perjudiciales del sonar antropogénico.

References - Referencias

References by TGL can be downloaded from <http://www.isvr.soton.ac.uk/STAFF/Pubs/pubs90.htm>

Las Referencias de TGL se pueden descargar de la siguiente página web: <http://www.isvr.soton.ac.uk/STAFF/Pubs/pubs90.htm>

- [1] T. G. Leighton: From seas to surgeries, from babbling brooks to baby scans: The acoustics of gas bubbles in liquids', *International Journal of Modern Physics B*, **18** (2004) 3267-3314.
- [2] T. G. Leighton, G. J. Heald: "Chapter 21: Very high frequency coastal acoustics," in *Acoustical Oceanography: Sound in the Sea*, H. Medwin, Ed. Cambridge University Press, (2005) pp. 518-547
- [3] T. G. Leighton: What is ultrasound? *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, **93** Issues 1-3 (2007) 3-83.
- [4] T. G. Leighton: *The Acoustic Bubble* (Academic Press, London) (1994).
- [5] T. G. Leighton: 'Nonlinear Bubble Dynamics And The Effects On Propagation Through Near-Surface Bubble Layers,' *High-Frequency Ocean Acoustics*, Eds. M.B. Porter, M. Siderius, and W. Kuperman, (American Institute of Physics Melville, New York) *AIP Conference Proceedings* **728** (2004) 180-193.
- [6] T. G. Leighton, D. C. Finfer, P. R. White: Bubble acoustics: What can we learn from cetaceans about contrast enhancement? *Proc. 2005 IEEE International Ultrasonics Symposium* (Rotterdam) (2005) pp. 964-973.
- [7] H. Medwin, Ed. *Acoustical Oceanography: Sound in the Sea*, Cambridge University Press (2005).
- [8] T. G. Leighton, G. J. Heald, H. Griffiths, G. Griffiths (editors): *Acoustical Oceanography, Proceedings of the Institute of Acoustics* **23** Part 2 (2001).
- [9] W. H., Munk, W. C. O'Reilly, J. L. Reid: Australia-Bermuda sound transmission experiment (1960) revisited. *J. Phys. Oceanogr.* **18** (1988) 1876-1898.
- [10] S. Lee, M. Zanolin, A. M. Thode, R. T. Pappalardo, N. C. Makris: Probing Europa's interior with natural sound sources, *Icarus* **165** (2003) 144-167.
- [11] T. G. Leighton, P. R. White: The sound of Titan: a role for acoustics in space exploration. *Acoustics Bulletin* **29** (2004) 16-23.
- [12] T. G. Leighton, P. R. White, D. C. Finfer, E. J. Grover: The sounds of seas in space: the 'waterfalls' of Titan and the ice seas of Europa, *Proceedings of the Institute of Acoustics* (T. G. Leighton, editor) , **28**(1), (2006) 75-97.
- [13] T. G. Leighton, P. R. White, D. C. Finfer: The sounds of seas in space, *Proc. Int. Conf. Underwater Acoustic Measurements, Technologies and Results* (J. Papadakis, L. Bjorno, editors) (2005) 833-840
- [14] T. G. Leighton, The use of acoustics in space exploration, ISVR Technical Report (in press), May 2007.
- [15] L. M. Brekhovskikh , Yu. P. Lysanov: *Fundamentals of Ocean Acoustics* (Springer Series on Wave Phenomena; Springer-Verlag), Second Edition (1991) Section 7.3.1.
- [16] Seongil Kim, G. F. Edelmann, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, H. C. Song, T. Akal: Spatial resolution of time-reversal arrays in shallow water. *Journal of the Acoustical Society of America* **110** (2001) 820-829.
- [17] T. G. Leighton, S. D. Meers, P. R. White: Propagation through nonlinear time-dependent bubble clouds, and the estimation of bubble populations from measured acoustic characteristics, *Proceedings of the Royal Society A*, **460** (2004) 2521-2550.
- [18] P. R. Birkin, T. G. Leighton, J. F. Power, M. D. Simpson, A. M. L. Vincotte, P. Joseph: Experimental and theoretical characterisation of sonochemical cells. Part 1. Cylindrical reactors and their use to calculate the speed of sound in aqueous solutions, *J. Phys. Chem. A.*, **107** (2003) 306-320.
- [19] T.G. Leighton, S.D. Richards, P.R. White: Trapped within a wall of sound: A possible mechanism for the bubble nets of humpback whales, *Acoustics Bulletin* **29** (2004) 24-29.
- [20] F. A. Sharpe, L. M. Dill: The behaviour of Pacific herring schools in response to artificial humpback whale bubbles, *Canadian Journal of Zoology- Revue Canadienne de Zoologie* **75** (1997) 725-730.
- [21] T. G. Leighton, D. C. Finfer, E. Grover, P. R. White: An acoustical hypothesis for the spiral bubble nets of

- humpback whales and the implications for whale feeding, *Acoustics Bulletin*, 22 (2007) 17-21.
- [22] F. A. Sharpe: Social foraging of the southeast Alaskan Humpback whale, *Megaptera novaeangliae*. PhD Thesis, University of Washington (1984).
- [23] F. E. Fish: Performance constraints on the manoeuvrability of flexible and rigid biological systems. Proceedings of the Eleventh International Symposium on unmanned untethered Submersible Technology (1999) 394-406.
- [24] T. R. Kieckhefer: Humpback facts: a beginner's guide to a unique creature. Upwellings (publ. Pacific Cetacean Group) (1996) pp. 4 -5.
- [25] H. Williams, *Whale Nation*, Jonathan Cape (London) (1988).
- [26] C. G. D'Vincent, R. M. Nilson, R. E. Hanna: Vocalization and coordinated feeding behaviour of the humpback whale in southeastern Alaska, *Sci. Rep. Whales Res. Inst.*, 36 (1985) 41-48.
- [27] T. G. Leighton, S.D. Richards, P.R. White: Marine mammal signals in bubble water. Proceedings of the Institute of Acoustics Symposium on Bio-sonar and Bioacoustics Systems, Proceedings of the Institute of Acoustics 26 no. 6 (2004) 6 pages.
- [28] T. G. Leighton, P. R. White, D. C. Finfer, S. D. Richards: Cetacean acoustics in bubbly water. Proceedings of the International Conference on Underwater Acoustic Measurements, Technologies and Results, (J. S. Papadakis and L. Bjorno, editors) (2005) pp. 891-898.
- [29] W. Au, D. James, K. Andrews: High-frequency harmonics and source level of humpback whale songs, *J. Acoust. Soc. Am.*, 110, 2770 (2001).
- [30] W. W. L. Au, Harbor porpoise (*Phocoena Phocoena*) acoustics: In memory of Anthony David Goodson. Proceedings of the Institute of Acoustics Symposium on Bio-sonar and Bioacoustics Systems, Proceedings of the Institute of Acoustics vol 26 no. 6 (2004).
- [31] A. Byatt, A. Fothergill, M. Holmes and Sir D. Attenborough, *The Blue Planet*, BBC Consumer Publishing (2001).
- [32] D. H. Simpson, Ting Chin Chien, P. N. Burns: 1999: Pulse inversion Doppler: a new method for detecting nonlinear echoes from microbubble contrast agents, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 46 (1999) 372-382.
- [33] P. N. Burns, S. R. Wilson, D. H. Simpson: Pulse Inversion Imaging of Liver Blood Flow: Improved Method for Characterizing Focal Masses with Microbubble Contrast, *Invest. Radiol.* 35 (2000) 58-71.
- [34] T. G. Leighton, P. R. White, D. C. Finfer: Bubble acoustics in shallow water: possible applications in Nature. *Proc. Int. Conf. on Boundary influences in high frequency, shallow water acoustics* (Bath) (2005) pp. 433-440.
- [35] T. G. Leighton, P. R. White, D. C. Finfer: Target Detection in Bubbly Water. International patent application number PCT/GB2006/002335; claiming priority from UK patent application GB 0513031.5, University of Southampton, (2005).
- [36] S. D. Meers, T.G. Leighton, J. W. L. Clarke, [G. J. Heald](#), [H. A. Dumbrell](#), [P. R. White](#): The importance of bubble ring-up and pulse length in estimating the bubble distribution from propagation measurements," in *Acoustical Oceanography, Proceedings of the Institute of Acoustics*, (T. G. Leighton, G. J. Heald, H. Griffiths and G. Griffiths Eds., Bath University Press), vol. 23(2), (2001) pp. 235-241.
- [37] T. G. Leighton, D. C. Finfer, P. R. White: Sonar which penetrates bubble clouds, *Proceedings of the Second International Conference on Underwater Acoustic Measurements, Technologies and Results*, J.S. Papadakis and L. Bjorno, eds. (Crete) (2007) (in press).
- [38] D. Coles, T. G. Leighton: Autonomous spar-buoy measurements of bubble populations under breaking waves in the Sea of the Hebrides (in press, this volume), 2007.
- [39] O. Kreisher: Service Experts Eye 'Leap Ahead' In Mine Warfare Capabilities, *Seapower Magazine*, 2 pages (Sept. 2004).
- [40] C. Kamminga, H. Wiersma H, Investigations on cetacean sonar II. Acoustical similarities and differences in *odontocete* sonar signals, *Aquatic Mammals*, 8, pp. 41-62, 1981.
- [41] W. W. L. Au: *The Sonar of Dolphins* (Springer-Verlag, New York), (1993).

- [42] S. M. Dawson, C. W. Thorpe: A quantitative analysis of the sounds of Hector's dolphin. *Ethology* **86** (1990) 131-145.
- [43] S. Li, K. Wang, D. Wang, T. Akamatsu: Echolocation signals of the free-ranging Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*). *Journal of the Acoustical Society of America* **117** (2005) 3288-3296.
- [44] H. Medwin: Specular scattering of underwater sound from a wind-driven surface, *Journal of the Acoustical Society of America*, **41** (1966) 1485-1495.
- [45] F. B. Pichler, D. Robineau, R. N. P. Goodall, M. A. Meÿer, C. Olivarría, C. S. Baker: Origin and radiation of Southern Hemisphere coastal dolphins (genus *Cephalorhynchus*). *Molecular Ecology*, **10** (2001) 2215-2223.
- [46] W. E. Evans, F. T. Awbrey, H. Hackbarth: High frequency pulses produced by free-ranging Commerson's dolphin (*Cephalorhynchus commersonii*) compared to those of Phocoenids. In: *Biology of the genus Cephalorhynchus*. Edited by R.L.B. Jr., G.P. Donovan. Cambridge: International Whale Commission, (1988) pp. 173-181.
- [47] F. T. Awbrey, J. C. Norris, A. B. Hubbard, W. E. Evans: The bioacoustics of the Dall's porpoise salmon drift net interaction (San Diego), (1979).
- [48] S. M. Dawson: The high-frequency sounds of Hector's dolphins *Cephalorhynchus hectori*. *Rep. Int. Whal. Commn. Spec. Issue.* **9** (1988) 339-344.
- [49] R. N. P. Goodall, K. S. Norris, A. R. Galeazzi, J. A. Oporto, I. S. Cameron: On the Chilean dolphin, *Cephalorhynchus eutropia* (Gray, 1846). *Rep. Int. Whal. Commn. Spec. Issue*, (1988) pp. 197-257.
- [50] B. Mohl, S. Andersen: Echolocation: high-frequency component in the click of the Harbour Porpoise (*Phocoena ph. L.*). *J. Acoust. Soc. Am.*, **54** (1973) 1368-1372.
- [51] W. W. L. Au, R. H. Penner: Target Detection in Noise by Echolocating Atlantic Bottlenose Dolphins. *Journal of the Acoustical Society of America*, **70** (3) (1981):687-693
- [52] W. W. L. Au, C. W. Turl: Target Detection in Reverberation by an Echolocating Atlantic Bottlenose Dolphin (*Tursiops-Truncatus*). *Journal of the Acoustical Society of America*, **73** (5) (1983):1676-1681.
- [53] C. W. Turl, D. J. Skaar, W. W. Au: The Echolocation Ability of the Beluga (*Delphinapterus-Leucas*) to Detect Targets in Clutter. *Journal of the Acoustical Society of America*, **89** (2) (1991):896-901.
- [54] S. Castelin, P. Bernstein: A notional scenario for the use of unmanned system groups in littoral warfare. In: *2004 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles* (2004) 14-19.
- [55] C. D. Serdula, M. R. Loewen: Experiments investigating the use of fiber-optic probes for measuring bubble-size distributions. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **23** (4) (1998):385-399.
- [56] P. Geißler, B. Jähne: Laboratory and inshore measurements of bubble size distributions, in *Natural physical processes associated with sea surface sound* (T. G. Leighton, editor, University of Southampton), (1997) 147-154.
- [57] F. G. Wood, W. E. Evans: Adaptiveness and ecology of echolocation in toothed whales. In: *Animal Sonar Systems*. Edited by R.G. Busnel, J.F. Fish. New York: Plenum Press; 381-425, (1980)
- [58] G. B. Deane, M. D. Stokes: Air Entrainment Processes and Bubble Size Distributions in the Surf Zone, *Journal of Physical Oceanography*, **29** (1999) 1393-1403.
- [59] A. Frantzi: Does acoustic testing strand whales?, *Nature*, **392**, no. 6671 (1998) 29
- [60] D. L. Evans, G.R. England (editors): Joint Interim Report Bahamas Marine Mammal Stranding Event of 14-16 March 2000, *US Department of Commerce (NOAA)/US Navy* (2001).
- [61] A. Fernandez, J. F. Edwards, F. Rodriguez, A. E. de los Monteros, P. Herraiez, P. Castro, J. R. Jaber, V. Martin, M. Arbelo: "Gas and fat embolic syndrome" involving a mass stranding of beaked whales (Family Ziphiidae) exposed to anthropogenic sonar signals, *Veterinary Pathology*, **42**, no. 4 (2005) 446-457.
- [62] P. D. Jepson, M. Arbelo, R. Deaville, I. A. P. Patterson, P. Castro, J. R. Baker, E. Degollada, H. M. Ross, P. Herraiez, A. M. Pocknell, F. Rodriguez, F. E. Howie, A. Espinosa, R. J. Reid, J. R. Jaber, V.

- Martin, A. A. Cunningham, A. Fernandez: Gas-bubble lesions in stranded cetaceans - Was sonar responsible for a spate of whale deaths after an Atlantic military exercise? *Nature*, **425**, no. 6958 (2003) 575-576.
- [63] S. Norman, W. McLellan, D. A. Pabst, D. Ketten, S. Raverty, M. Fleetwood, J. K. Gaydos, S. Jefferies, T. M. Cox, B. Hanson, B. Norberg, L. Barre, D. Lambourn, S. Cramer: Preliminary Report: Multidisciplinary investigation of Harbour Porpoises (*Phocoena phocoena*) stranded in Washington states from 2 May - 2 June 2003 coinciding with the mid-range sonar exercise of the USS Shoup, 2004.
- [64] S. H. Ridgway, R. Howard: Dolphins and the Bends, *Science*, **216**, no. 4546 (1982) 651.
- [65] S. H. Ridgway, R. Howard: Dolphin lung collapse and intramuscular circulation during free diving - evidence from nitrogen washout, *Science*, **206**, no. 4423 (1979) 1182-1183.
- [66] M. J. Moore, G. A. Early: Cumulative sperm whale bone damage and the bends, *Science*, **306**, no. 5705 (2004) 2215.
- [67] P. D. Jepson, R. Deaville, I. A. P. Patterson, A. M. Pocknell, H. M. Ross, J. R. Baker, F. E. Howie, R. J. Reid, A. Colloff, A. A. Cunningham: Acute and chronic gas bubble lesions in cetaceans stranded in the United Kingdom, *Veterinary Pathology*, **42**, no. 3 (2005) 291-305.
- [68] L. A. Crum, Y. Mao: Acoustically enhanced bubble growth at low frequencies and its implications for human diver and marine mammal safety, *Journal of the Acoustical Society of America*, **99** (1996) 2898-2907.
- [69] P. L. Tyack, M. Johnson, N. A. Soto, A. Sturlese, P. T. Madsen: Extreme diving of beaked whales, *Journal of Experimental Biology*, **209**, no. 21 (2006) 4238-4253.
- [70] R. W. Baird, D. L. Webster, D. J. McSweeney, A. D. Ligon, G. S. Schorr J. Barlow: Diving behaviour of Cuvier's (*Ziphius cavirostris*) and Blainville's (*Mesoplodon densirostris*) beaked whales in Hawaii," *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne de Zoologie*, **84**, no. 8 (2006) 1120-1128.
- [71] S. K. Hooker, R. W. Baird: Deep-diving behaviour of the northern bottlenose whale, *Hyperoodon ampullatus* (Cetacea : Ziphiidae), *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, **266**, no. 1420 (1999) 671-676.