

## CARACTERIZACIÓN DEL CAMPO DE ULTRASONIDOS GENERADO POR UN SONICADOR EN AGUAS POCO PROFUNDAS

PACS: 43.35.Yb

A. Caparrós Morente; I. López-Coto; J.P. Bolívar Raya; E. Gutiérrez San Miguel  
Departamento de Física Aplicada, Universidad de Huelva  
Facultad de Ciencias Experimentales  
21007 Huelva  
E-mail: [israel.lopez@dfa.uhu.es](mailto:israel.lopez@dfa.uhu.es), [amparo.caparros@dfa.uhu.es](mailto:amparo.caparros@dfa.uhu.es)

### ABSTRACT

The pressure field generated by an ultrasound transducer in a large shallow water lake has been characterized. The detection of the acoustic signal has been performed by a mobile probe, incorporating a measuring remote system. An algorithm to calculate the pressure and intensity levels, using local plane wave approximation, has been implemented in the hydrophone. The decrease of signal intensity with distance is close to a cylindrical propagation model modified by a correction factor, which can be attributed to the reflections around the enclosure.

### RESUMEN

Se ha caracterizado el campo de presiones generado por un emisor de ultrasonidos fijado en una laguna de agua poco profunda de grandes dimensiones. La captura de la señal acústica se ha realizado mediante una sonda móvil que lleva incorporada un equipo de medida controlado de forma remota. Se ha implementado un algoritmo para el cálculo del nivel de presión e intensidad eficaz que utiliza la aproximación local de onda plana. La disminución de la intensidad de la señal con la distancia es mayor que el previsto por un modelo de propagación cilíndrico, lo cual puede atribuirse a las reflexiones en el contorno del recinto.

### 1. INTRODUCCIÓN

El estudio que expondremos en este trabajo es una parte de un proyecto más amplio sobre los efectos que los ultrasonidos de alta potencia producen la materia orgánica y los microorganismos, el cual trata de sustituir los tratamientos químicos tradicionales de eliminación de microalgas y microorganismos de pequeñas lagunas por tratamientos físicos no agresivos con el medio ambiente. Los tratamientos con ultrasonidos, normalmente denominados como “ultrasonicación”, han demostrado ya su aplicabilidad y rentabilidad comercial en la solución de problemas en el campo del tratamiento de aguas residuales, eliminación de aguas en estanques de riego, por ejemplo [1,2].

A medida que una onda acústica se propaga en un medio la intensidad de la misma sufre una reducción de su amplitud en función de la distancia entre el emisor y el receptor. Un parámetro muy utilizado para evaluar cuantitativamente esta disminución es el denominado como *pérdida por transmisión* (TL, del inglés "*Transmission Loss*") [3]. Este parámetro proporciona el valor en decibelios de la intensidad a una distancia específica  $r$  desde la fuente con el nivel de intensidad medido a una distancia de referencia  $r_0$ :

$$TL = 10 \log_{10} \frac{I_{rms}(r)}{I_{rms}(r_0)} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

Ambas intensidades son valores escalares iguales a la intensidad rms (Root Mean Square value of a quantity) de una onda plana equivalente en el punto de localización, cuya relación con la presión eficaz viene dada por

$$I_{rms}(r) = \frac{p_{rms}^2(r)}{\rho c} \quad (2)$$

siendo  $c$  y  $\rho$  la velocidad del sonido en el agua y su densidad, respectivamente.

El origen de esta disminución de intensidad es doble; por una parte se debe a las pérdidas geométricas procedentes de la distribución de la energía acústica en los frentes de onda de mayor superficie según aumenta la distancia al foco, término denominado "atenuación por divergencia geométrica", y en segundo lugar encontramos las pérdidas disipativas del medio o "absorción".

La pérdida de intensidad por absorción del medio depende de las propiedades físico-químicas del agua así como de la frecuencia de la señal acústica. A frecuencias menores de 1 MHz el coeficiente de absorción en agua dulce depende del cuadrado de la frecuencia de forma directa, pudiéndose expresar como [4]:

$$\alpha = 1.42 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{1240/T} f^2 \quad (\text{dB/m}) \quad (3)$$

donde  $T$  la temperatura absoluta del agua y  $f$  la frecuencia de la señal en kHz.

Cuando se producen condiciones de campo libre, el modelo de propagación geométrico seguido por la señal es el de una onda esférica, en el que se asume que la fuente es puntual y que la señal se emite en todas direcciones. La pérdida por transmisión debido a propagación esférica toma la forma de la ecuación 4, donde  $r_0 = 1\text{m}$  es la referencia estándar tomada como nivel de fuente [3,5].

$$TL_{\text{esf}} = 20 \log_{10} \frac{r}{r_0} + \alpha(r - r_0) \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

Desde el punto de vista acústico, se puede considerar que las aguas cumplen la condición de poco profundas (*shallow waters*) cuando la propagación de la señal se ve afectada por numerosas reflexiones en el fondo y la superficie. Esta condición se verifica si la profundidad del agua es un número no muy grande de longitudes de onda de la señal que se está propagando por el medio. Bajo estas condiciones, la propagación de la onda sigue un patrón de tipo cilíndrico, en el que la intensidad de la señal decrece con la inversa de la distancia recorrida desde el punto de emisión. El TL se expresa en este caso según la ecuación 5.

$$TL_{\text{cil}} = 10 \log_{10} \frac{r}{r_0} + \alpha(r - r_0) \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

En la práctica, dependiendo de las características del emisor y del entorno específico (medio, geometría, etc.) en el que se propaga la onda, la ley de propagación real de ésta será intermedia entre las predicciones proporcionadas por los modelos (2) y (3).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### Sistema En Estudio

La laguna elegida para realizar el estudio se encuentra situada dentro de las instalaciones del Parque Moret (Huelva). El recinto elegido es una laguna artificial de agua dulce para uso recreativo cuyas dimensiones útiles empleadas en la experiencia se muestran en la figura 1.



Figura 1. Laguna artificial de agua dulce (Parque Moret, Huelva)

El nivel alcanzado por el agua oscila entre un valor máximo de 1.50 m en la franja central, lugar desde el que el nivel comienza a disminuir de forma monótona hasta alcanzar los extremos. La temperatura del agua se mantiene constante en el tiempo y homogénea con un valor de 20 °C durante el tiempo de experimentación.

Para la adquisición de la señal se dispone de un equipo compuesto de dos partes: una sonda móvil y una unidad en tierra (ver figura 2). La sonda móvil se ha elaborado a partir de un dispositivo de flotación que permite mantener en superficie y libre de contacto con el agua el equipo electrónico encargado de la adquisición de la señal, a excepción del hidrófono, el cual se mantiene anclado a la sonda verticalmente a la profundidad deseada. El equipo electrónico se compone de un hidrófono 8103 omnidireccional (Brüel&Kjaer) para medidas absolutas de presión, un amplificador de carga Nexus 2692 (Brüel&Kjaer) para el acondicionamiento de la señal y un osciloscopio registrador M521 basado en PC de la casa ETCSK, con frecuencia de muestreo real de hasta 60 MHz. La unidad en tierra se encarga de controlar en remoto la sonda móvil mediante comunicación Wi-Fi, (estándar IEEE 802.11n).

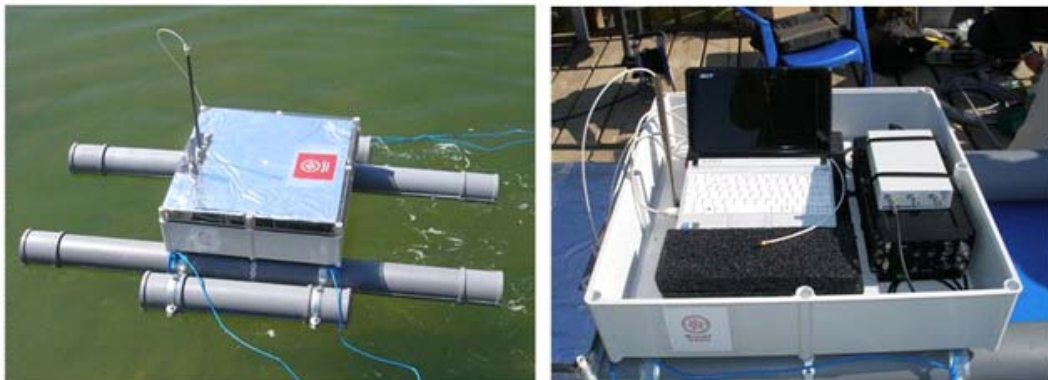


Figura 2. Izquierda: Sonda móvil. Derecha: equipo electrónico interno.

El emisor es un transductor tipo sonotrode cilíndrico de punta cónica, con una frecuencia de 25 kHz y 600 W de consumo eléctrico máximo. El emisor se mantiene sumergido con el eje axial paralelo a la superficie del agua y alineado con el hidrófono a una profundidad constante de 24 cm. La posición del emisor se mantiene invariable en toda la experiencia (ver figura 1), siendo por tanto el desplazamiento del hidrófono en el plano horizontal el que permite caracterizar el

campo acústico. Asimismo, se han tomado varias medidas del ruido subacuático con el objeto de considerar la influencia del ruido de fondo presente en el medio en ausencia de emisión acústica.

Se ha medido el campo acústico en 110 puntos distribuidos uniformemente a lo largo de una malla horizontal cubriendo la totalidad de la laguna hasta 42 m en la dirección axial del haz (figura 1). En cada uno de los puntos se han realizado registros de 12 s de duración. Posteriormente, la señal se procesa mediante una herramienta de análisis desarrollada para tal efecto (figura 3 izquierda). El valor de presión rms promedio  $p_{rms}$  a lo largo de la duración de cada registro permite obtener la intensidad efectiva  $I_{rms}$  haciendo uso de la aproximación de onda plana (ecuación 2). La aplicación muestra, a su vez, el espectro en frecuencias de la señal mediante el cálculo de la FFT (figura 4, derecha), observándose en el mismo de forma clara el armónico fundamental a 25 kHz (frecuencia de emisión) y sus armónicos superiores pero con una intensidad casi despreciables en relación al fundamental.

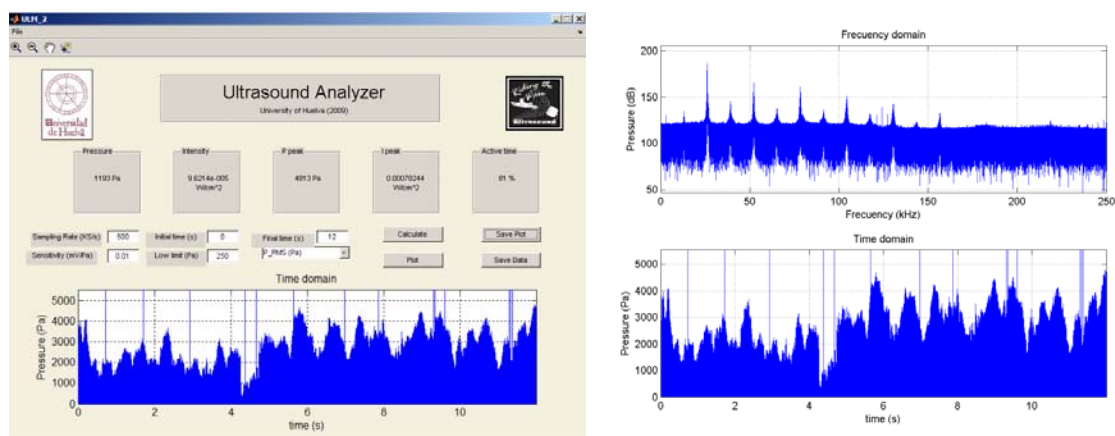


Figura 3. Izquierda: interfaz gráfica de procesamiento y análisis de la señal. Derecha: análisis FFT (superior) y transitorio (inferior) de la señal muestreada.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 4 se muestra la interpolación realizada a partir del conjunto de valores de la presión rms registrados.

El campo acústico presenta una distribución marcada por la directividad del emisor, apareciendo de forma clara un lóbulo principal en la dirección axial, en la cual se alcanzan los valores máximos de presión en las cercanías de la fuente. El efecto de las reflexiones en los contornos del recinto se hace patente fundamentalmente en los laterales más próximos al emisor, donde aparecen zonas de concentración de presión.

Tomando como temperatura del agua 20°C y con una señal de 25 kHz propagándose a través de la misma, el valor del coeficiente de absorción que se deduce de la ecuación 3 es de  $\alpha = 1.5 \times 10^{-4}$  dB/m, y teniendo en cuenta que la distancia máxima a la fuente que se ha caracterizado es 42 m, la absorción del medio es totalmente despreciable frente a la atenuación producida por la divergencia geométrica de la onda.

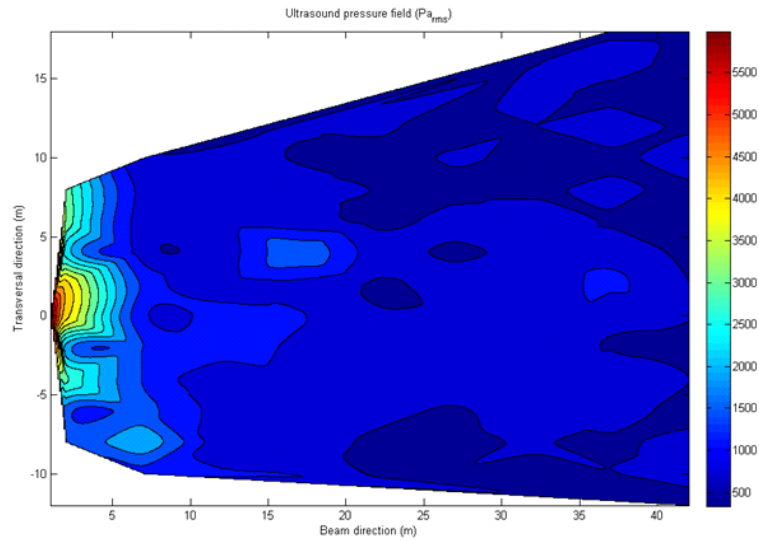


Figura 4. Campo de presiones en la sección del recinto muestreada

A partir de los valores de TL experimentales obtenidos para la dirección axial del haz (tabla 1), se ha realizado un ajuste por mínimos cuadrados de la ecuación 5, pero expresada como

$$TL = 10 \delta \log_{10} r \quad (dB \text{ ref } 1m) \quad (6)$$

De esta forma, el parámetro  $\delta$  proporciona una medida del grado de desviación del comportamiento previsto por el modelo de propagación cilíndrica.

La curva de ajuste obtenida mostrada en la figura 5 proporciona un valor de  $\delta = 1.3$  como valor óptimo del parámetro de desviación. En los primeros 7 m de distancia de la fuente, el comportamiento de la señal está cercano al esperado por un patrón de propagación esférico, pero sería necesario realizar un mayor número de medidas en este intervalo de distancias (1-7 m) si se desea verificar esta hipótesis. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia, el efecto de las reflexiones en la superficie y en el fondo del recinto provoca el refuerzo de la señal en los puntos medidos, aproximándose a los valores de pérdidas por propagación que se obtendrían en un modelo perfectamente cilíndrico.

r (m)	1	2	7	12	17	22	27	37	42
$p_{rms}$ (Pa)	$6,4 \cdot 10^3$	$4,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^2$	$8,0 \cdot 10^2$	$8,2 \cdot 10^2$	$7,4 \cdot 10^2$
TL (dB, ref 1m)	0	3,5	14,8	14,5	15,1	18,6	18,1	17,8	18,7

Tabla 1. Valores de presión rms y pérdidas por propagación en distintos puntos a lo largo del eje axial.

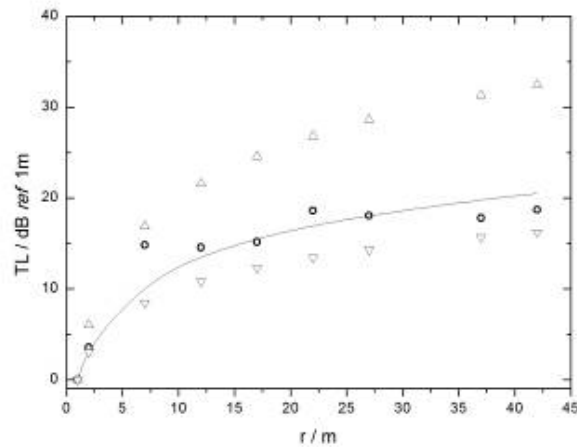


Figura 5. Valores de TL experimental (B), esférico ( $\epsilon$ ), cilíndrico ( $\epsilon$ ) y curva de ajuste (—).

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una metodología, además de la puesta a punto y calibración de la instrumentación necesaria, para registrar y analizar ultrasonidos subacuáticos en recintos de grandes dimensiones. Esto ha permitido caracterizar el campo acústico generado por un emisor de ultrasonidos en un recinto acotado de agua poco profunda. Asimismo, se ha buscado la ley empírica seguida por la propagación de la onda mediante el análisis de las pérdidas por transmisión medidas a distintas distancia de la fuente. El comportamiento obtenido se ve fuertemente influenciado por el efecto de las reflexiones de la onda en la interfase agua-aire y en el fondo y paredes del recinto, por lo que el campo acústico presenta valores de intensidad superiores a los esperables en condiciones de medio infinito.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] T. J. Mason, E. Joyce, S.S. Phull, J.P. Lorimer, *Potencial uses of ultrasound in the biological contamination of water*. Ultrasonics Sonoch., 10 (6) 2003, pp. 319-323
- [2] Parag R. Gogate, *Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes*. Advances in Environmental Research 6 2002, pp. 335-358
- [3] Daniel R. Raichel, *The Science and Applications of Acoustic*. (2006) Ed. Springer Science.
- [4] R. A. Vadov, *Low-Frequency Sound Absorption and Attenuation in Marine Medium*, Acoustical Physics, Vol. 46, No. 5, 2000, pp. 544-550
- [5] Jens M. Hovem, *Underwater acoustics: Propagation, devices and systems*, J. Electroceram. (2007) 19, pp.339-347

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto ASYS, en colaboración con la empresa Toscano Medio Ambiente S.L. y parcialmente financiado por la Agencia Idea y el CDTI.