



AGENCIA NACIONAL  
DE INVESTIGACIÓN  
E INNOVACIÓN

# Informe final publicable de proyecto

## Parámetros de transporte y propagación no-lineal en medios aleatorios mediante inversión temporal de ondas acústicas

Código de proyecto ANII: FCE\_1\_2017\_1\_135582

31/03/2021

**BENECH GULLA, Nicolás** (Responsable Técnico - Científico)

**GARAY GODOY, Gonzalo Andrés** (Investigador)

**NEGREIRA CASARES, Carlos Alther** (Investigador)

---

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE CIENCIAS (Institución Proponente)

## Resumen del proyecto

El objetivo general de este proyecto es comprender la propagación de ondas a través de medios aleatorios. Para ello es importante poder estimar los parámetros de transporte de dicho medio, en particular, el libre recorrido medio y el coeficiente de difusión. Durante este proyecto hemos realizado experiencias de laboratorio en medios diluidos y compactos que permiten esta estimación. Además, investigamos la propagación de ondas de alta potencia a través de este tipo de medios, con el objetivo de entender si la alta potencia "sobrevive" al medio aleatorio o incluso si lo puede reordenar. Durante la investigación hemos mostrado cómo estimar los parámetros de transporte. Además, arrojamos luz sobre la interacción de ondas de potencia y aleatoriedad. Por último, mostramos cómo, utilizando la inversión temporal acústica, es posible reordenar un medio aleatorio en una zona focalizada del mismo.

**Ciencias Naturales y Exactas / Ciencias Físicas / Óptica, Acústica / Acústica física, física ondulatoria**

**Palabras clave: múltiple scattering, ondas acústicas, fenómenos de transporte / interacción no-linealidad - múltiple scattering / /**

## Introducción

La interacción de ondas con medios aleatorios es un tema de larga data ya que tiene interés tecnológico, en particular para las telecomunicaciones. Es así que los primeros estudios sobre el tema se centraron en detección por radar en condiciones atmosféricas adversas (lluvia, niebla, humo, etc.). Con el paso del tiempo, el área fue creciendo hacia otras zonas de interés, en particular, la calidad de imágenes ópticas y/o acústicas, la sismología y la geofísica así como la interacción de ondas de materia (electrones) en un metal policristalino. Todos estos ejemplos tienen por detrás una teoría en común que es el scattering múltiple de ondas. Dada la aleatoriedad de los medios donde se propaga la onda, no interesa conocer el detalle de la propagación. Por el contrario, los modelos teóricos indican que se puede caracterizar esta propagación mediante algunos parámetros físicos promedio conocidos como parámetros de transporte. En general, el scattering múltiple es visto como una "molestia" para la propagación de ondas pues hace que la onda pierda su coherencia. En este sentido, la formación de imágenes o la detección de objetos por ejemplo se dificulta cuando la onda atraviesa un medio de este tipo. Sin embargo, en los últimos años, varios investigadores han mostrado la posibilidad de utilizar el medio aleatorio como un aliado para la focalización de ondas. En particular, se ha mostrado que el método de inversión temporal de ondas, permite una mejora en la concentración de la energía ondulatoria cuando atraviesa un medio aleatorio. Con estos antecedentes no propusimos, en este proyecto, avanzar más en la caracterización de este tipo de medios utilizando ondas acústicas en el rango de frecuencias ultrasonoras. En el caso de nuestras experiencias, el rango de frecuencias de trabajo es entre 500 kHz y 5 MHz. Los objetivos planteados son dos: diseñar experiencias que permitan estimar los parámetros de transporte con experiencias únicas (en lugar de realizar un promedio sobre un conjunto de experiencias) y estudiar la interacción entre ondas de alta potencia con medios aleatorios. Sobre este último punto hay muy poca bibliografía y este proyecto significa un avance en el conocimiento en este sentido.

## Metodología/diseño del estudio

En los ejemplos mencionados anteriormente, hay muy poco control y conocimiento sobre el medio aleatorio (tamaño y posición de los difusores, densidad y compresibilidad de los mismo, caracterización dieléctrica, etc.). Para poder realizar un estudio de los parámetros relevantes, diseñamos experiencias de laboratorio que permitan mejor control sobre el medio. En este estudio trabajamos con dos tipos de medio: medios diluidos (en los que las partículas que lo componen no tienen contacto entre si) y medios compactos o granulares donde hay contacto entre partículas que permiten la propagación de ondas más allá del medio que compone la matriz de fondo. Para los primeros existen modelos matemáticos que permiten predecir el comportamiento ondulatorio. Este modelo se conoce como ISA (Independent Scattering Approximation). Como medio diluido utilizamos un "bosque de alambres". Este se compone de un conjunto de alambres de cobre todos iguales y paralelos entre si, dispuestos en forma aleatoria en una grilla. Para este medio podemos controlar el contraste de impedancia acústica, el tamaño de los alambres así como el porcentaje de ocupación en la grilla. Estas variables se utilizan en el modelo ISA para predecir el recorrido libre medio y el coeficiente de difusión. Si la onda que atraviesa al medio diluido es de alta potencia, de forma que el campo acústico es no-lineal, el modelo ISA ya no describe adecuadamente los resultados. Nos propusimos en este proyecto estudiar la interacción entre la no-linealidad

y el scattering múltiple. No hay demasiados antecedentes en la bibliografía al respecto. Esperamos entonces que los resultados de este estudio resulten un aporte significativo en esta área.

Para los medios granulares no hay un modelo teórico para la propagación de ondas. Experimentalmente se observa que las ondas en estos medios exhiben características comunes con los medios diluidos pero también diferencias importantes. Una de ellas que existe un corrimiento hacia las bajas frecuencias en la propagación coherente de la onda. La otra diferencia es que la propagación de ondas se da a través de los contactos de las partículas del medio granular a través de las llamadas "cadenas de fuerza". Por lo tanto, la propagación de ondas es muy sensible al contacto entre partículas. Pequeños cambios en los contactos pueden producir grandes cambios en la propagación de ondas produciendo por ejemplo un aumento de la velocidad de propagación (efecto conocido como hardening) o una disminución de la misma (efecto conocido como softening). Estos cambios en la cadena de fuerza se conocen como un reordenamiento (rearranging) del medio. En este proyecto nos proponemos estudiar si es posible producir un reordenamiento local del medio utilizando ondas acústicas de alta potencia. Es decir que la cadena de fuerza se modifique localmente en dimensiones comparables a la longitud de onda, sin alterar el resto del medio.

Por último, en muchos ejemplos donde se encuentran medios aleatorios en la naturaleza, estos son medios dinámicos (es decir las partículas que componen el medio no están estáticas en su posición sino que por el contrario, están en movimiento). Podemos mencionar como ejemplos, burbujas de aire en el agua, lluvia, niebla o humo en el aire, bancos de peces en el océano, o incluso tejidos biológicos in vivo. Para que los resultados de este proyecto abarquen medios dinámicos se deben estudiar los tiempos de coherencia en los mismos, es decir el período de tiempo durante el cual el medio se comporta como "estático".

## **Resultados, análisis y discusión**

Los resultados experimentales en medios diluidos muestran que en general, el modelo ISA es adecuado para describir medios aleatorios de este tipo. Hemos verificado incluso que el modelo resulta satisfactorio aún en medios diluidos que estrictamente no cumplen con la hipótesis. En el modelo ISA, las partículas deben estar separadas entre sí por distancias mayores a la longitud de onda. Esto impide que el campo ondulatorio se componga de "rebotes" múltiples entre partículas y el análisis de campo coherente y campo difuso es más sencillo analíticamente. Para medios diluidos compactos, donde las partículas no están en contacto entre sí pero están a distancias comparables a la longitud de onda, se espera que el efecto de múltiples "rebotes" entre partículas modifique el comportamiento ondulatorio significativamente. Sin embargo, en las experiencias de laboratorio, observamos que este es un efecto menor en el campo siempre que la frecuencia de propagación de la onda no se encuentre dentro de una frecuencia de resonancia del sistema. Otro resultado obtenido en medios diluidos es que el campo de inversión temporal de ondas acústicas es un campo autopromediante. Es decir, el resultado de una única experiencia coincide con el resultado promedio de múltiples experiencias. Esto alienta la idea de que es posible estimar los parámetros de transporte del medio aleatorio con una única medida. Sin embargo, este resultado terminó siendo más esquivo de lo previsto originalmente en el proyecto. Por un lado, es posible estimar el libre recorrido medio con una única medida siempre que el espesor del medio aleatorio que atraviesa la onda sea del orden de esta cantidad. Es decir, si la dimensión del medio aleatorio que atraviesa la onda es mucho mayor al libre recorrido medio, el campo se vuelve completamente difuso y la experiencia de inversión temporal no logra estimar el recorrido libre medio. Por otro lado, no es posible estimar el coeficiente de difusión con una única medida desde "fuera" del medio aleatorio. Los modelos teóricos a los que hemos llegado muestran que o bien la fuente o bien el sensor deben estar "embebidos" en el medio aleatorio. Hemos realizado experiencias con la fuente dentro del medio aleatorio que permiten una estimación inicial de este parámetro. Sin embargo, los resultados todavía no son concluyentes y debemos profundizar este estudio. Por otro lado, en el proceso de inversión temporal a través de un medio diluido, surgió un resultado no previsto inicialmente. La forma espacial del foco por inversión temporal está relacionada a la distribución espacial de difusores en el medio aleatorio. Es decir, que el estudio del foco puede brindar información sobre la distribución de difusores. Este resultado lo hemos mostrado a nivel teórico utilizando el modelo ISA pero falta aún una confirmación experimental. Las experiencias sobre este punto se vieron atrasadas por la emergencia sanitaria y van a comenzar en el segundo semestre de 2021.

Respecto a la propagación no-lineal en medios diluidos, hemos mostrado experimental y teóricamente que el efecto del múltiple scattering produce un desacoplamiento del campo acústico no lineal. Es decir, una vez que el campo ingresa al medio aleatorio, sus componentes armónicas se propagan en forma independiente, cada una obedeciendo una ecuación lineal de propagación. Esto se debe a la pérdida de coherencia de la onda incidente que impide la formación de nuevos armónicos durante la propagación. En este sentido mostramos que la riqueza frecuencial del campo no lineal mejora la focalización espacial por inversión temporal cuyo ancho queda determinado por una longitud de onda efectiva dada por las componentes frecuenciales del campo incidente.

Para medios granulares hemos mostrado la separación frecuencial entre el campo coherente y el campo difuso. El campo coherente tiene un desplazamiento hacia las bajas frecuencias respecto a la onda incidente. Por lo tanto, los dos regímenes se pueden separar aplicando un filtro pasa-altos a las señales. La inversión temporal del campo difuso logra una focalización espacial de la energía en el medio aleatorio. Si en el segundo paso de la inversión temporal (el paso de re-emisión), se utilizan ondas de alta amplitud, se logra un reordenamiento local del medio aleatorio en torno a la posición focal. Este es un resultado relevante de este proyecto. Todavía está en una etapa de verificación si además del reordenamiento en el foco (resultado buscado), se produce un reordenamiento en torno a la fuente de emisión de ondas (resultado no buscado). El trabajo deberá continuar en este sentido

Por último, hemos realizado en medios granulares, el proceso de inversión temporal con la fuente embebida dentro del medio. Algunas expresiones teóricas trabajadas en paralelo al desarrollo de las experiencias, muestran que es posible estimar el coeficiente de difusión asociado al medio aleatorio con experiencias de este tipo. Los resultados obtenidos hasta el momento son alentadores. Debemos profundizar la investigación en el modelo teórico para obtener resultados concretos de estas experiencias.

## **Conclusiones y recomendaciones**

A continuación se presentan las conclusiones más relevantes de esta investigación

- En los medios diluidos el modelo ISA brinda predicciones acordes a los resultados experimentales aún si el medio aleatorio no cumple en forma estricta con las hipótesis del modelo
- Las experiencias de inversión temporal a través de medios diluidos son autopromediantes pero no permiten una correcta estimación de parámetros de transporte
- La focalización por inversión temporal a través de un medio diluido brinda información a cerca de la distribución espacial de difusores del medio.
- El proceso de inversión temporal potencialmente permite estimar el tiempo coherente en un sistema dinámico
- Las ondas de alta potencia se "destruyen" al atravesar un medio aleatorio. La propagación de cada componente frecuencial obedece un modelo lineal pero no se continúan generando armónicos.
- La focalización por inversión temporal mejora si se utilizan ondas de alta potencia debido a la riqueza frecuencial de las mismas antes de ingresar al medio aleatorio. El tamaño focal se explica mediante una longitud de onda efectiva.
- Es posible reordenar medios granulares localmente utilizando la focalización por inversión temporal
- Las experiencias de inversión temporal con la fuente embebida en el medio potencialmente permiten estimar el coeficiente de difusión.

## Referencias bibliográficas

- L. Foldy, "The multiple scattering of waves. General theory of isotropic scattering by randomly distributed scatterers", *Phys. Rev. Lett* 67, 107, (1945).
- V. Twersky, "Multiple scattering of waves and optical phenomena", *J. Opt. Soc. Am.* 52, 145, (1962).
- P. Anderson, "Absence of diffusion in certain random lattices", *Phys. Rev. Lett.* 109, 492, (1958).
- M. Cowan et al, "Diffusing acoustic wave spectroscopy", *Phys. Rev. E* 65, 066605, (2002).
- A. Derode et al, "Time-reversal in multiple scattering media", *Ultrasonics* 36, 443, (1998).
- A. Derode et al, "Random multiple scattering of ultrasound: Is time-reversal a self-averaging process?", *Phys. Rev. E* 64, 366061, (2001).
- N. Viard et al, "Coherent transmission of an ultrasonic shock wave through a multiple scattering medium", *Phys. Rev. E* 88, 023201, (2013).
- N. Benech et al, "Near-field effects in Green's function retrieval from cross-correlation of elastic fields: Experimental study with application to elastography", *J. Acoust. Soc. Am.* 133, 2755, (2013)
- N. Benech, Y. Abraham, C. Negreira, "Improvement of the time-reversal focalization through a multiple scattering medium by using a coherent wave compounding technique", 2014 IEEE Ultrasonics Symposium, Chicago.
- G. Garay, N. Benech, Y. Abraham, C. Negreira "Nonlinear wave propagation through multiple scattering media and virtual time-reversal focusing", *J. Acoust. Soc. Am.* 148, 1315-1324, (2020).
- G. Garay, "Propagación no lineal de ondas acústicas en un medio de múltiple scattering", UdelaR - PEDECIBA (2018).
- G. Cortela, "Estudio experimental de parámetros de scattering y transporte en la propagación de un pulso acústico", UdelaR-PEDECIBA, (2003).
- I. Núñez et al, "Application of the Schlieren pulsed method for the observation of simple and multiple scattering of ultrasonic waves", *IEEE Trans. Ultras. Ferroelec. Freq. Control* 52, 491, (2005).
- G. Montaldo, "Generación de pulsos ultrasonoros de potencia utilizando guías de ondas dispersivas", UdelaR-PEDECIBA, (2001).
- B. Van Tiggelen, "Green function retrieval and time-reversal in a disordered world", *Phys. Rev. Lett.* 91, 243904, (2003).
- O. V. Rudenko et al "Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics", Consultants Bureau, (1977).
- T. Dubinsky et al. "High-Intensity Focused Ultrasound: Current Potential and Oncologic Applications". *AJR* 190, 191, (2008)
- P. Sheng, "Introduction to wave scattering, localization and mesoscopic phenomena", Springer-Verlag, Hong-Kong, (2006).
- G. Papanicolau et al, "Stability of the P to S wave energy ratio in the diffuse regime", *Bull. Seism. Soc.*

Am. 86, 1107, (1996).

P. Westervelt " Parametric acoustic array". J. Acou. Soc. Am. 35, 535, (1963).

A. Derode et al "Influence of correlations between scatterers on the attenuation of the coherent wave in a random medium" Phys. Rev. E 74, 036606, (2006).

### **Licenciamiento**

Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional. (CC BY-NC-SA)