XIX
CONGRESO ARGENTINO
DE ACÚSTICA

AdAA2025

LIBRO DE ACTAS

19 y 20 de Noviembre
Universidad Nacional de Lanús

Reverso de tapa en blanco

Actas del XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

Jorge Petrosino y Georgina Lizaso (Compiladores)

Actas del XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

ISBN 978-631-91690-0-3

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025 : actas / Leandra Abadía ... [et al.] ; Compilación de Jorge Petrosino ; Georgina
Lizaso. - 1a ed. - Ciudad Autonoma de Buenos Aires : Asociación de Acústicos Argentinos, 2026.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-631-91690-0-3

1. Acústica. 2. Acústica Arquitectónica. 3. Aislamiento Acústico. I. Abadía, Leandra II. Petrosino, Jorge, comp. III. Lizaso, Georgina, comp.
CDD 729

ISBN 978-631-91690-0-3
9 786319 169003

Índice

Prólogo AdAA.....5

Prologo UNLa.....6

Prefacio.....7

Comités.....8

Auspicios Institucionales.....9

Patrocinadores.....10

Trabajos presentados.....11

Índice alfabético de autores.....438

Prólogo AdAA

Desde su fundación en 1976, la Asociación de Acústicos Argentinos cumple 49 años de labor ininterrumpida promoviendo el desarrollo de la acústica en el país, impulsando la investigación, la docencia y la aplicación profesional de esta disciplina. Como miembro activo de la Federación Iberoamericana de Acústica —cuya presidencia ejerce desde 2016—, así como de la Comisión Internacional de Acústica y del Instituto Internacional de Ingeniería de Control de Ruido, la Asociación representa con orgullo a los profesionales argentinos en el ámbito internacional.

En esta ocasión, la AdAA se complace en presentar las *Actas del XIX Congreso Argentino de Acústica (AdAA2025)*, realizado en la Universidad Nacional de Lanús. Este encuentro siempre ha constituido un espacio fundamental para el intercambio de experiencias, la difusión de conocimientos y el fortalecimiento de los vínculos dentro de nuestra comunidad acústica.

La Comisión Directiva de la AdAA expresa su reconocimiento y gratitud a las autoridades de la Universidad Nacional de Lanús por su apoyo institucional y su hospitalidad: al Rector Mtro. Daniel Bozzani; al Director del Departamento de Humanidades y Artes, Dr. Aritz Recalde; y al Director de la Licenciatura en Audiovisión, Ing. Germán Calvi. También deseamos agradecer al Comité Organizador, conformado por Georgina Lizaso y Esteban Lombera, por su dedicación y esfuerzo para hacer posible este encuentro.

El Congreso contó con una amplia y destacada participación de investigadores, docentes y profesionales de diversas regiones, así como con la valiosa contribución de tres conferencistas invitados. Expresamos nuestro agradecimiento al Ing. Jorge Petrosino, al Ing. Horacio Cristiani y al Dr. Ing. Ernesto Accolti, cuyos aportes enriquecieron el intercambio académico y fortalecieron el desarrollo de la acústica en la Argentina.

Las contribuciones reunidas en estas Actas reflejan la calidad, la diversidad y el espíritu colaborativo de nuestra comunidad. Confiamos en que este Congreso continúe siendo un espacio de aprendizaje, encuentro y proyección hacia el futuro.

En nombre de la Comisión Directiva de la Asociación de Acústicos Argentinos,

Nilda Vechiatti
Presidente de AdAA

Prólogo UNLa

Es un honor y un orgullo para nuestra Universidad ser sede del XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025. Agradecemos profundamente esta distinción y los invitamos a disfrutar de la calidez humana y la belleza de nuestro campus, que esperamos inspire el desarrollo de estas jornadas.

Para la Licenciatura en Audiovisión y el Departamento de Humanidades y Artes, este Congreso representa un hito histórico. Es una oportunidad invaluable para que nuestros estudiantes y docentes se integren activamente en el ecosistema de la acústica, interactuando directamente con sus principales referentes. Este vínculo no solo enriquece la formación académica, sino que fortalece lazos para futuras colaboraciones en investigación y desarrollo. Confiamos en que el intercambio con profesionales y colegas investigadores durante el evento impulse nuevos proyectos conjuntos y active líneas de trabajo que involucren a nuestros equipos docentes y estudiantiles.

Celebramos la realización de este Congreso, donde los profesionales del sector se organizan con una clara visión de desarrollo nacional e inserción internacional. La acústica, como disciplina, impacta directamente en la calidad de vida de nuestra sociedad, por lo que es esencial que su avance se discuta colectivamente y con un firme sentido de responsabilidad social. La diversidad de ejes temáticos que aborda este Congreso refleja un campo maduro y consciente de su rol multifacético en el entramado productivo y cultural de Argentina.

En una época marcada por la aceleración tecnológica, resulta vital reafirmar y preservar la conducción humanista de la ciencia y la técnica. Los desafíos acústicos actuales no se resuelven solo con algoritmos o instrumentos de medición; exigen una escucha atenta, sensibilidad estética, ética aplicada y una comprensión profunda de la experiencia sonora humana. Este Congreso, al convocarnos presencialmente para el debate y la construcción colectiva de conocimiento, reivindica ese componente humano, esencial.

Por último, queremos felicitar a los organizadores, comités y a todos los participantes por hacer posible este encuentro. Queremos reconocer especialmente a nuestros docentes, por su labor de investigación que jerarquiza a nuestra institución, su labor docente y su aporte a la organización sectorial, marcando el camino. Estamos seguros de que las jornadas en la UNLa serán productivas e inspiradoras, y que los vínculos que aquí se fortalezcan contribuirán a consolidar una comunidad acústica argentina más integrada, pujante y comprometida con el desarrollo nacional.

Dr. Aritz Recalde	**Ing. Germán Calvi**	**Lic. Esteban Bernal Jeanneret**
Director Depto. Humanidades	Director Lic. en Audiovisión	Coordinador Lic. En Audiovisión

Prefacio

El presente Libro de Actas del XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025 reúne los trabajos presentados durante las jornadas del 19 y 20 de noviembre del corriente año. Este volumen refleja la diversidad temática de la comunidad acústica argentina, integrando aportes que abarcan desde desarrollos teóricos y estudios experimentales hasta aplicaciones tecnológicas y abordajes interdisciplinarios.

Los artículos incluidos se organizan en secciones temáticas que dan cuenta de la amplitud y transversalidad de la acústica como disciplina. Esta estructura busca facilitar la consulta y favorecer la lectura de investigadores, profesionales, docentes y estudiantes interesados en los distintos campos que conforman el área.

En esta edición, el Congreso ofreció dos modalidades de presentación y publicación. Una de ellas contempla la participación en el evento con la publicación del trabajo completo exclusivamente en este Libro de Actas, manteniendo así el carácter tradicional de difusión dentro de nuestra comunidad. La segunda modalidad, desarrollada en colaboración con la revista Elektron de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, permite que los autores interesados postulen sus trabajos completos para una eventual publicación en dicha revista, manteniendo su originalidad editorial. Para asegurar la presencia de estas contribuciones dentro del programa general del Congreso, se incorporan en este volumen sus respectivos resúmenes ampliados, preservando el vínculo entre el intercambio académico del evento y la proyección de los trabajos hacia instancias de referato.

Agradecemos especialmente a quienes enviaron sus contribuciones, así como a los miembros de nuestro Comité Científico. Extendemos también nuestro reconocimiento a la Universidad Nacional de Lanús, institución anfitriona que brindó su apoyo para la organización del Congreso y la publicación de estas actas.

Confiamos en que este volumen será de utilidad para la comunidad acústica y que contribuya a promover nuevos desarrollos, vínculos y colaboraciones científicas en el ámbito regional e internacional.

Jorge Petrosino y Georgina Lizaso
Compiladores

Comité Organizador

Ing. Nilda Vechiatti
Presidente AdAA

Lic. Georgina Lizaso
Secretaria AdAA

Dr. Esteban Lombera
Prosecretario AdAA

Comité Científico

Accolti, Ernesto

Basso, Gustavo

Blanc, Silvia

Bonello, Oscar

Brianza, Alejandro

Calcagno, Esteban

Eguía, Manuel

Farina, María Andrea

Gomez, Pablo

Lizaso, Georgina

Lombera, Esteban

Mansilla Benasco, Joaquín

Maristany, Arturo

Miyara, Federico

Pérez Villalobo, Jorge

Petrosino, Jorge

Vechiatti, Nilda

Vergara, Ramiro

Instituciones Organizadoras

ASOCIACIÓN de ACÚSTICOS ARGENTINOS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANUS UNLa

DEPARTAMENTO DE HUMANIDADES Y ARTES

LICENCIATURA EN AUDIOVISIÓN

CEPSA (CENTRO DE ESTUDIOS Y PRODUCCIÓN SONORA Y AUDIOVISUAL)

con el patrocinio de

ICA

Auspicios Institucionales

FIA FEDERACIÓN FEDERAÇÃO IBEROAMERICANA DE ACÚSTICA

AES Argentina Audio Engineering Society

MAH MUTUALIDAD ARGENTINA DE HIPOACÚSICOS

Nosotros te entendemos

Patrocinadores

Sponsors Platino

Sponsors Oro

Sponsors Plata

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Estudio Sistemático de la Textura Acústica de un Recinto para Diferentes Superficies Revestidas con Difusores

Alejandro Bidondo[†*]

[†] *Centro Integral de Servicios Tecnológicos de Acústica y Sonido UNTREF, Universidad Nacional de Tres de Febrero. Dr. Alfredo Springolo S/N - Entre Pje. Marín y Benito Lynch, Saenz Peña Provincia de Buenos Aires, Argentina*

[*] *Ingeniería de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero, UNTREF Buenos Aires, Argentina.*

[†*] abidondo@untref.edu.ar

Resumen La presente investigación mide los parámetros microscópicos de la textura acústica del campo sonoro establecido dentro de una cámara reverberante con distribución no uniforme de absorción sonora, para diferentes superficies de un mismo tipo de difusor acústico de forma sistemática, analizando respuestas de impulso monoaurales que mapean el interior de la misma. La textura acústica es la cuantificación de la distribución temporal y de amplitudes de las reflexiones tempranas existentes en cualquier respuesta al impulso de un recinto, hasta el tiempo de transición. Los resultados muestran el efecto, dentro del campo temprano y en el dominio del tiempo, de incrementar la superficie de difusores acústicos para un valor constante de EDT. Se propone así una ecuación que relaciona la textura con la superficie revestida dentro del recinto. Finalmente se propone éste como un método robusto para establecer mediante mediciones en diferentes etapas de un proyecto la cantidad de superficie a cubrir con ellos en cualquier recinto, hasta alcanzar la textura acústica deseada.

Palabras clave: acústica arquitectónica; textura acústica, difusores; tiempo de transición; difusión temporal.

Abstract This study systematically measures the microscopic parameters of the acoustic texture of the sound field established within a reverberation chamber with a non-uniform sound absorption distribution for different surfaces of the same type of acoustic diffuser. Monaural impulse responses mapping the chamber's interior are analyzed. Acoustic texture is the quantification of the temporal and amplitude distribution of early reflections present in any impulse response of a room, up to the transition time. The results show the effect of increasing the surface area of acoustic diffusers, in the time domain within the early field, for a constant EDT value. An equation is proposed that relates the acoustic texture to the surface area coated within the room. Finally, this method is proposed as a robust method for determining, through measurements at different stages of a project, the amount of surface area to be covered with them in any room until the expected acoustic texture is achieved.

Keywords: Architectural acoustics; room acoustic texture; transition time; temporal diffusion.

1. INTRODUCCIÓN

La difusión acústica es un concepto con variadas interpretaciones, usos y definiciones, dependiendo del autor y de la aplicación, usualmente asociado a la distribución de energía en el espacio. Por ello generalmente -por no decir siempre- es asociada al *scattering*, *s*, al coeficiente de difusión, *d*, a los campos difusos, a las reflexiones difusas y a las superficies difusoras [1]. A su vez estos están relacionados con: a) aplicaciones en cámaras reverberantes y los conceptos homogeneidad, uniformidad e isotropía [2], con el fin de maximizar éstas mediante el uso de superficies difusoras; b) estudios de grabación, para minimizar el efecto de las reflexiones tempranas y su consecuente coloración; c) en salas de conciertos, para establecer la “personalidad acústica” de cada una; d) en el control de energía sonora especular o para controlar los “flutter echoes”, distribuyéndo la energía en el espacio al impactar

sobre superficies difusoras, e) mediciones estandarizadas de coeficiente de absorción, de transmisión y de potencia acústica, entre otras tantas aplicaciones.

Las propiedades investigadas acerca de los campos difusos dentro de recintos son la uniformidad espacial del nivel sonoro, la uniformidad espacial del tiempo de reverberación, la linealidad de las curvas de decaimiento, la función de correlación espacial, la intensidad neta causada por una distribución uniforme de componentes netas de intensidad, la aplicación de estadísticas de alto orden y la cantidad de fluctuaciones a lo largo del decaimiento del campo sonoro [3]. Éstas con consecuencias *espaciales* del fenómeno.

A diferencia de los conceptos antes mencionados, motiva la presente investigación la búsqueda de evidencia empírica objetiva relacionada con la difusión en el dominio del tiempo. Previamente otros autores también han indagado en la difusión temporal; entre ellos Sato [4], Fujii *et al* [5] y Kuttruff [6].

Debido a que un oyente está en un único punto físico dentro de un recinto y no en todo el recinto simultáneamente, se plantea entonces la siguiente hipótesis: si el coeficiente de absorción afecta el campo sonoro (por ejemplo el tiempo de reverberación entre otros parámetros acústicos) de un recinto, y esto es observable en una respuesta al impulso (RIR), ¿Podría utilizarse la textura acústica para cuantificar unívocamente el efecto de las superficies difusoras en el campo sonoro, en el dominio del tiempo?

Se plantea en esta investigación el estudio sistemático de la textura de un conjunto de RIRs utilizando sus parámetros microscópicos [7], registradas éstas dentro de una cámara reverberante a escala, con material absorbente distribuido de forma no uniforme, para diferentes superficies (m^2) revestidas con difusores acústicos. Se tuvo especial consideración en mantener el tiempo de decaimiento temprano, EDT [s], constante para que la única variable fuera la superficie de difusores. La evidencia encontrada exhibe la relación entre una superficie incremental de difusores y una mejora en la textura, es decir una reducción paulatina del parámetro nOD (*normalized Ordinal Distance*), lo que implica también una mejora en la inteligibilidad de la palabra, en la localización de fuentes sonoras, en una menor coloración del sonido directo y en una "personalidad" acústica con tendencia a "neutra".

2. ESTUDIOS PREVIOS

En 1962 Beranek, L. [8], dentro de un conjunto de 18 parámetros acústicos que describen aspectos del sonido y la percepción acústica mientras se reproduce música dentro de recintos, definió la textura acústica como "la impresión subjetiva que los oyentes derivan de los patrones en los cuales la secuencia de reflexiones sonoras tempranas llega a sus oídos. En una sala excelente, las reflexiones que llegan poco después del sonido directo siguen una secuencia más o menos uniforme. En otras salas puede haber un intervalo considerable entre la primera reflexión y la siguiente. Una buena textura requiere un gran número de reflexiones tempranas, uniformemente pero no espaciadas con precisión, y sin que ninguna reflexión domine a las demás" [9]. Para determinar esta distribución temporal y de amplitud de las reflexiones tempranas es esencial: a) reconocer la duración en la que la información del campo sonoro temprano es perceptible y b) poder extraer las reflexiones tempranas de cualquier respuesta al impulso de un recinto (RIR), para proceder posteriormente a su análisis. En ambos casos es fundamental encontrar el instante en el que las reflexiones tempranas dejan de predominar sobre las tardías, entendiendo que el sistema evoluciona de un estado determinístico a un estado estocástico. Aquí aparecen distintos nombres para definir dicho momento: "tiempo de transición", Tt [ms], "crossover time", Ct [ms] y "mixing time", Mt [ms].

Referirse a reflexiones tempranas y tiempo de transición implica mencionar la difusión de un campo sonoro. Este concepto tiene varias acepciones, uno espacial y otro temporal. El primero hace referencia a la distribución de energía que los revestimientos difusores producen dentro de un campo sonoro, y el segundo al funcionamiento temporal de éstos analizado en uno o varios puntos de su interior.

Diferentes autores proponen diversas definiciones al tiempo de transición, al tiempo de mezcla y al tiempo de *crossover* [10]. Algunos son:

Hidaka [11] derivó empíricamente el "tiempo de transición" promedio como el 8 % del tiempo de reverberación (RT) en la banda de octava de 500 Hz para 24 salas sinfónicas, 13 salas de música de cámara y 22 teatros de ópera, encontrando una correlación de 0,76 entre ambos parámetros.

Abel *et al* definieron un "perfil de densidad de eco normalizado" (NEPD), que describe el grado de gaussianidad de la función de densidad de probabilidad de amplitudes analizando ventanas temporales consecutivas. Propusieron definir el comienzo del campo tardío, es decir el "*mixing time*", como el momento en el que el perfil de densidad de eco normalizado, η(t), alcanza por primera vez un valor de uno [12].

Por otro lado, Lindau *et al* [13] definieron un "*mixing time*" perceptual mediante pruebas de escucha binaural. El tiempo de transición de una RIR también fue definido por Stewart *et al* [14] como el primer momento en el que la densidad de las reflexiones ha alcanzado un umbral de percepción, en el que las reflexiones individuales ya no se pueden distinguir. También propusieron la curtosis de una RIR como una medida de la evolución de la gaussianidad de las reflexiones dentro de una ventana temporal móvil.

En 2016, Jeong, continuando los estudios de Defrance y Polack, también propuso calcular la curtosis en una RIR, observando cambios al utilizar absorbentes y difusores [15]. Rizzi *et al* [16] también denominaron el "tiempo de transición" desde la reverberación temprana a la tardía como "*mixing time*" e investigaron la relación entre éste y la difusión del sonido; los resultados experimentales revelaron cómo la presencia de difusores acústicos QRD redujo el "*mixing time*" ayudando al establecimiento y estabilización del campo sonoro difuso en espacios claramente no sabíneos. Li *et al* [17], también propusieron una definición del "*mixing time*", como el punto límite entre las reflexiones tempranas y la reverberación tardía. También comentaron: "El nivel de reverberación tardía estuvo determinado por el nivel promedio de las primeras reflexiones alrededor del *mixing time*". Esta es una de las pocas veces que la palabra "nivel" apareció en escena. Estrictamente, el "*mixing time*" se refiere al proceso de mezcla y generalmente se ilustra en términos de trayectorias de partículas cuando, con el tiempo, la posición y dirección de dos rayos sonoros inicialmente adyacentes se vuelven estadísticamente independientes. Un requisito para que un recinto esté "mezclado" (en términos acústicos) es la ergodicidad, lo que significa que en algún momento el comportamiento estadístico en todos los puntos del espacio es igual al comportamiento estadístico en un punto cualquiera en el tiempo (el promedio temporal en un punto es igual al promedio del conjunto, [9], [18]), es decir, el campo sonoro ha "perdido por completo toda memoria" de su estado inicial.

[10], [19], [13] Compararon varios descriptores sin llegar a un descriptor robusto o confirmar uno existente; además, muchos de ellos utilizaron auralizaciones en recintos sintéticos sin confirmar una definición definitiva de los "tiempos de transición" físico, "*mixing time*" y "*corsover time*".

Mientras la capacidad del sistema auditivo humano para reconocer un grupo de reflexiones discretas dentro del campo sonoro temprano es cuestionable, algunas investigaciones buscan confirmar la audibilidad de una densidad particular de reflexiones; otras, de superposición entre éstas. Lo anterior es aún más cuestionable cuando la ventana de integración temporal del sistema auditivo humano depende del valor mínimo de la duración efectiva de la autocorrelación continua de la señal del estímulo [20].

Esta investigación propone trabajar con la audibilidad del nivel sonoro de las reflexiones tempranas (determinísticas), progresivamente enmascaradas en el tiempo por las reflexiones tardías (estocásticas). Esta condición permitió definir el tiempo de transición, Tt [ms], un conjunto de parámetros microscópicos asociados a ella y el desarrollo de una herramienta de cálculo de la textura acústica de una RIR llamada "Texture Analyzer" [7] [21].

3. DEFINICIONES

El tiempo de transición, Tt [ms] (*Transition time*), se define como el último instante en que el campo reverberante, compuesto sólo por las reflexiones estocásticas, enmascara perceptualmente a las reflexiones tempranas, compuestas sólo por las reflexiones determinísticas; el umbral de enmascaramiento aplicado es de -10 dB y la duración de la ventana de integración de la energía es de

20 ms. Las reflexiones tempranas son todas aquellas de origen determinístico, dentro del intervalo {0, Tt}. El Número Acumulado de Reflexiones Tempranas, CNERs (*Cummulative Number of Early Reflections*), es la cantidad total de reflexiones tempranas existentes desde t = 0 hasta Tt [ms]. El tiempo de decaimiento del campo temprano, EDTt [s], cuyo dominio es el intervalo {0, Tt}, definido como el tiempo que le toma a una línea recta, establecida entre el máximo de una integración reversa de Schroeder (calculada sobre la RIR sin descomponer) y su intersección con la atenuación [dB] en Tt, para decaer 60dB. Esta propuesta tiene como objetivo cuantificar el decaimiento del campo temprano *real*. La textura acústica está dada por la distancia ordinal normalizada. En [21] se encontró que la curva ideal de crecimiento de energía de reflexiones tempranas (para un campo sonoro temprano totalmente difundido temporalmente (máxima textura posible, es decir *nOD* ≅ 0, obtenido a partir de RIRs sintéticas de ruido blanco gausiano) es una función de carga del capacitor (ec. 1); ésta es denominada "*edf ideal*" (*edf*: función de densidad de ecos); por otro lado, calculando la suma acumulada del sonido directo y las reflexiones tempranas hasta Tt, se puede construir otra función similar, la "*edf real*".

$$ideal\ edf(t) = \left(1 - a \cdot e^{b \cdot t}\right) \tag{1}$$

La Distancia Ordinal, *OD*, es definida según ec. 2:

$$OD = \sum \left(abs(real\ edf - ideal\ edf)\right) \tag{2}$$

Aplicando el método de la "integral de línea" para encontrar la longitud de la *edf* ideal (ec. 3):

$$|\Gamma'(t)| = \sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2} \tag{3}$$

Siendo *x* el vector tiempo, *y* la salida de la función exponencial, y |Γ'(t)| la magnitud del vector tangente en cada punto.

La longitud de la curva *edf* ideal es L, según ec. 4:

$$L = \int_{t1}^{t2} |\Gamma'(t)| dt \tag{4}$$

De esta forma, la distancia ordinal normalizada, *nOD*, es dada por la ecuación 5:

$$nOD = \frac{OD}{\frac{L \cdot 1000}{fs}} \tag{5}$$

Siendo *fs* la frecuencia de sampleo.

La distancia ordinal normalizada, *nOD*, es la distancia ordinal dividida por la longitud de la *edf ideal* (por lo que el resultado queda normalizado a 1 ms). El valor *nOD* ideal, aquel que refleja una textura acústica neutra, resultante del análisis en un conjunto de RIRs sintéticos confeccionados con ruido blanco gaussiano, es aquel cercano a cero. Si bien el máximo valor posible es infinito, magnitudes de más de 5 expresan gran "personalidad acústica" en el punto físico de análisis (lugar de registro de la RIR), dentro del campo sonoro.

Dado que existe un conjunto de parámetros acústicos definidos para los campos sonoros temprano y tardío, como ser: tiempo de decaimiento temprano (EDT), tiempo de reverberación (RT), correlación cruzada interaural (IACCE e IACCL), claridad (C50 y C80), fracción lateral temprana (ELF), envolvimiento del oyente (LEV), entre otros, poder determinar la duración del campo temprano y cuantificar la textura acústica, permitiría calcularlos con mayor precisión y relacionarlos (todos entre sí) como "vasos comunicantes". El vaso transversal sería Tt.

Además era previsible que los efectos de las superficies difusoras se presentaran dentro del intervalo {0, Tt [ms]} de toda RIR porque después del Tt las reflexiones son del tipo estocásticas, comúnmente denominadas "difusas", es decir, ya afectadas por la difusión.

4. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

La tesis de Xin Bai [22], en su página 16 indica: *"Absorption distribution. Foam absorbers are evenly distributed in the chamber"*. Debido a que en ella los resultados no fueron concluyentes utilizando una distribución uniforme de revestimientos absorbentes, se resolvió estudiar el mismo fenómeno pero dentro de un recinto con distribución no uniforme de éstos, es decir con un campo sonoro anisotrópico [23].

Para determinar el efecto de las superficies difusoras en el dominio del tiempo, evitando establecer las condiciones acústicas de uniformidad de distribución de revestimientos ya probadas [22], [24], se conformó un campo sonoro anisotrópico reuniendo material absorbente en sólo una superficie del interior del recinto. Se previó que el coeficiente de absorción presentado fuera máximo dentro del rango de frecuencias de análisis.

Se utilizó una cámara reverberante a escala, de altura 81 cm, largo 86 cm y ancho 80 cm, cuya superficie interna total es de 4.06 m^2 con un volumen de 0.55 m^3.

Se muestreó el campo sonoro en 40 puntos interiores con 2 micrófonos lavalier omnidireccionales miniatura, de medición, marca DPA, modelo 4060-BM. Los 2 micrófonos se situaron en 20 posiciones a dos alturas diferentes: 35 y 58 cm respecto de la base.

Se utilizaron 3 unidades de superficie difusoras del tipo exhibido en la figura 1. Sus dimensiones son 61 cm x 61 cm. Además se agregó material absorbente (placas de espuma de poliuretano) buscando mantener el EDT promedio aproximadamente constante para cada serie de experimentos.

Se utilizó una fuente sonora marca Auratone, modelo 5PSC cuyas dimensiones son 16.5, 15 y 16.5 cm. El diámetrode su único altavoz es de 9 cm y su ancho de banda sobre su eje axial, medido en forma anecoica, va de 120 a 12500 Hz.

El software utilizado para el cálculo de la textura acústica y sus parámetros micróscópicos en las 200 RIRs registradas fue "Texture Analyzer" [7], en su versión 15. En ancho de banda de análisis fue de 1500 Hz a 5000 Hz.

El estímulo sonoro utilizado fue un barrido logarítmico de 90 segundos de duración para asegurar una buena relación señal – ruido (S/N).

Se llevaron a cabo dos (2) experimentos.

4.1 Experimento 1

En este experimento se llevaron a cabo registros del campo sonoro según 4 arreglos diferentes de difusores, detallados en la Tabla 1 y en la figura 1, con la fuente ubicada sobre el piso de la cámara reverberante, radiando en forma "rasante".

4.2 Experimento 2

En este experimento se llevó a cabo el registro del campo sonoro sólo para el arreglo con 3 difusores y material absorbente concentrado sobre una cara de la cámara reverberante, con la fuente sonora elevada y ubicada en una esquina de la cámara reverberante, radiando en forma omnidireccional dentro del rango de frecuencias bajo análisis, según puede observarse en la figura 2.

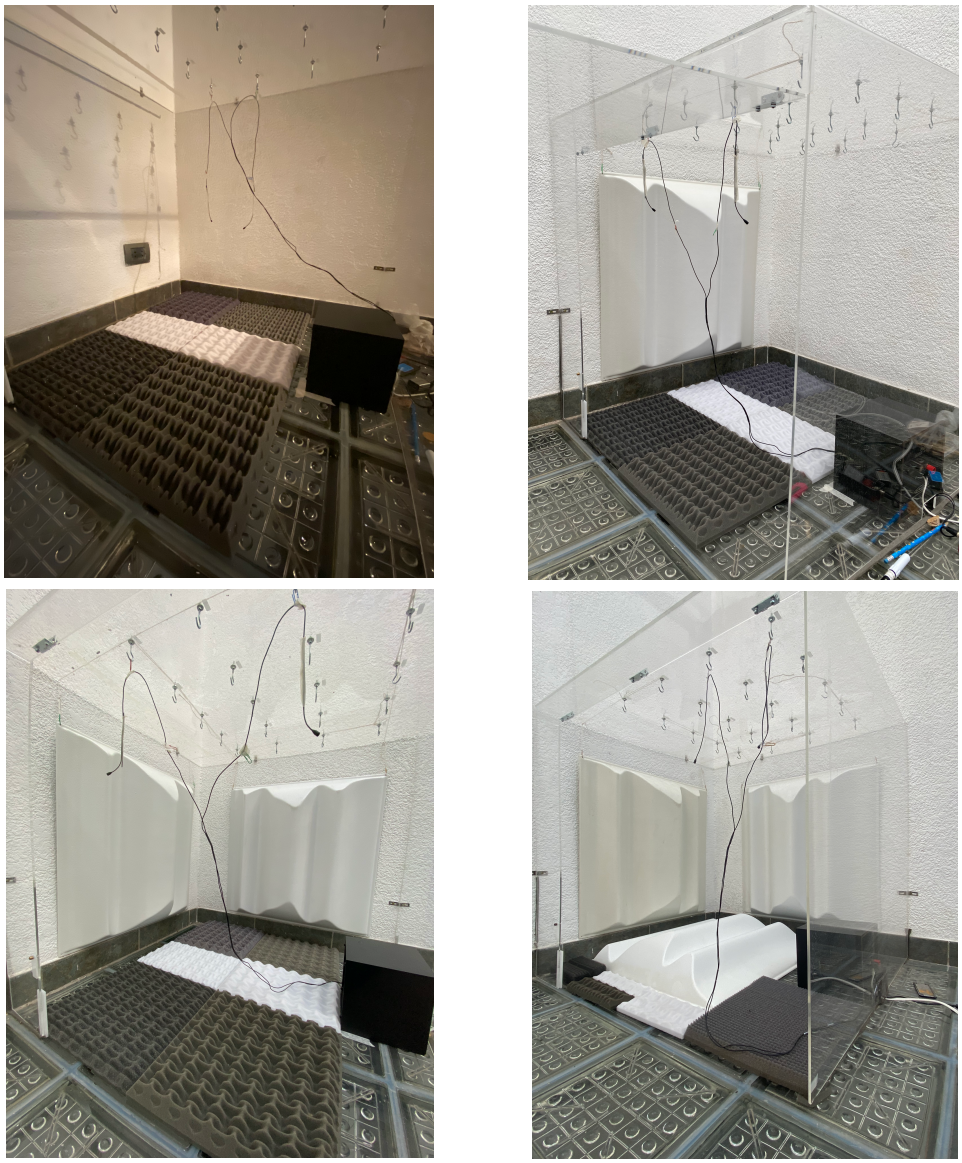


Figura 1: Arreglos de difusores numérico – curvos utilizados en el Experimento 1, todos con material absorbente dispuesto en sólo una superficie con el objetivo de generar un campo sonoro no uniforme y mantener constante el EDT [s] promedio. Imagen superior izquierda: Cámara reverberante sin difusores. Imagen superior derecha: Cámara reverberante con 1 (uno) difusor. Imagen inferior izquierda: Cámara reverberante con 2 (dos) difusores. Cámara reverberante con 3 (tres) difusores. Se observan también los micrófonos utilizados, los puntos de cuelgue, la fuente sonora Auratone ubicada en forma rasante, sobre el piso y el material absorbente apoyado en la base de la cámara.

Tabla 1: Configuración de los diferentes arreglos ensayados en la cámara reverberante a escala para el Experimento 1.

Setup (cantidad de difusores)	Superficie de Difusores [m^2]	Superficie con absorbente [m^2]	Superficie sin absorción ni difusores [m^2]	Superficie de Diffusores / Superficie interna total
0	0	0.48	3.58	0
1	0.372	0.48	3.2	0.1
2	0.744	0.48	2.84	0.224
3	1.116	0.314	2.63	0.379

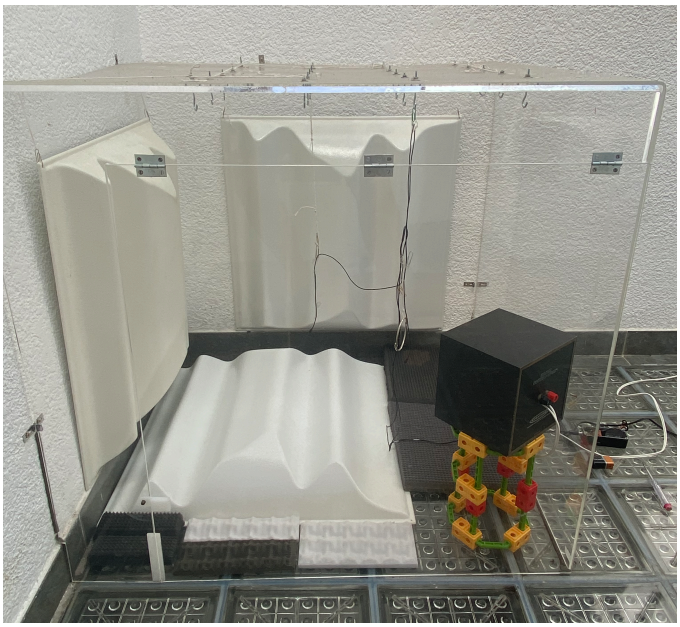


Figura 2. Arreglo de 3 difusores con material absorbente aglutinado en una única superficie, con la fuente sonora elevada, radiando en forma omnidireccional (dentro del ancho de banda de análisis).

5. RESULTADOS

Las 40 RIRs registradas en cada arreglo de difusores se procesaron en un ancho de banda de 1500 Hz a 5000 Hz. Los resultados observables en la Figura 3 muestran una reducción de la textura acústica, *nOD*, a medida que se incrementa la superficie de difusores. Es decir, la adición de superficies difusoras aportarían incrementalmente a una distribución de reflexiones estrictamente tempranas (es decir, dentro del intervalo {0, Tt}) más uniforme, tanto en términos de su espaciamiento temporal como en una atenuación gradualmente exponencial de éstas. Los gráficos de reflexiones tempranas en función del tiempo para cada setup se pueden observar en la figura 5.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2 y en las Figuras 3 y 4; se observó una reducción de la textura acústica, *nOD*, a medida que se incrementó la superficie de difusores.

La curva de ajuste logarítmica de la figura 3 se puede escribir de la siguiente forma:

$$\mathrm{nOD} \cong -0.23 * \ln(S) + 0.76 \tag{6}$$

siendo *S:*

$$S = \frac{\text{Superficie de difusores}}{\text{Superficie interior total}} \tag{7}$$

Este ajuste presenta un coeficiente de determinación, R^2, de 0.975534

Tabla 2. Resultados promedio de los parámetros microscópicos de la textura acústica en cada arreglo: Textura acústica (nOD), cantidad acumulada de reflexiones tempranas (CNR), tiempo de transición (Tt), tiempo de decaimiento temprano (EDT) y tiempo de decaimiento del campo temprano (EDTt), para los 4 setups correspondientes a la fuente ubicada sobre el piso (radiación rasante).

	Setup (cantidad de difusores dentro de la cámara reverberante); fuente rasante			
Parámetros microscópicos de Textura Acústica	0	1	2	3
nOD (Textura)	2.376	1.29	1.136	0.97
CNR (*Cumulative Number of Early Reflections*)	162	141	122	134
Tt [ms]	85.3	75.36	66.6	70.8
EDT [s]	0.185	0.18	0.169	0.181
EDTt [ms]	0.254	0.206	0.176	0.187
Energía RMS de Early Reflections [dB]	-19.22	-18.55	-18.43	-18.32

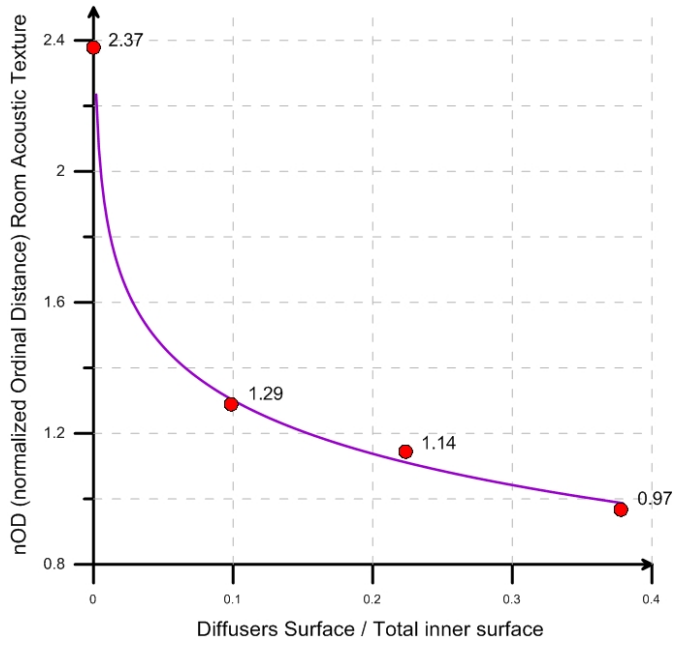


Figura 3. Textura (nOD) en función de la relación Superficie de difusores / Superficie total interior de la cámara reverberante. Los puntos rojos muestran los resultados para cada experimento. Trazo violeta: ajuste logarítmico de los resultados.

Se analizó la evolución del EDT y EDTt en cada arreglo. Las curvas *edf* (*echo density functions*) y las linealizaciones de EDT y EDTt representativas de los resultados expuestos en la tabla 2 son las de la Figura 5. Éstas 4 RIRs fueron elegidas dentro de cada conjunto de 40 RIRs como aquellas cuyos valores de textura se aproximaron más al resultado promedio del conjunto, para mostrar el fenómeno.

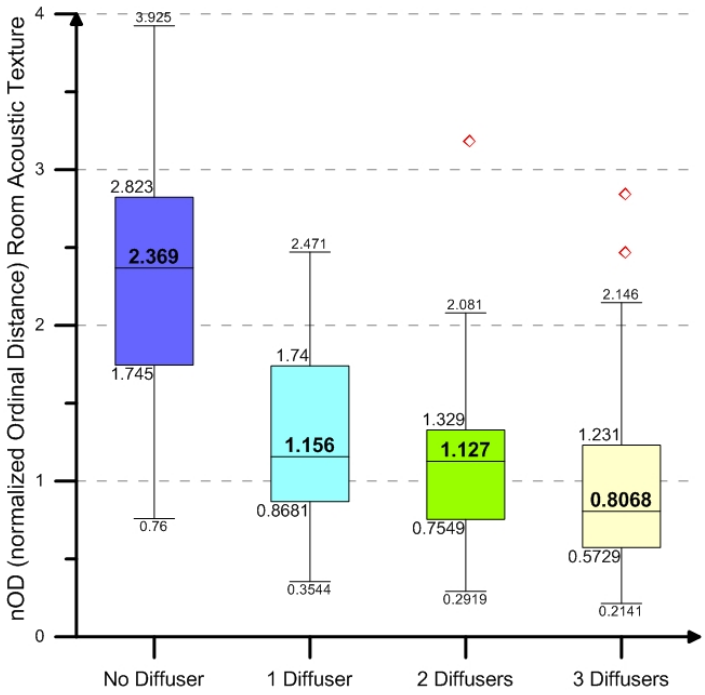
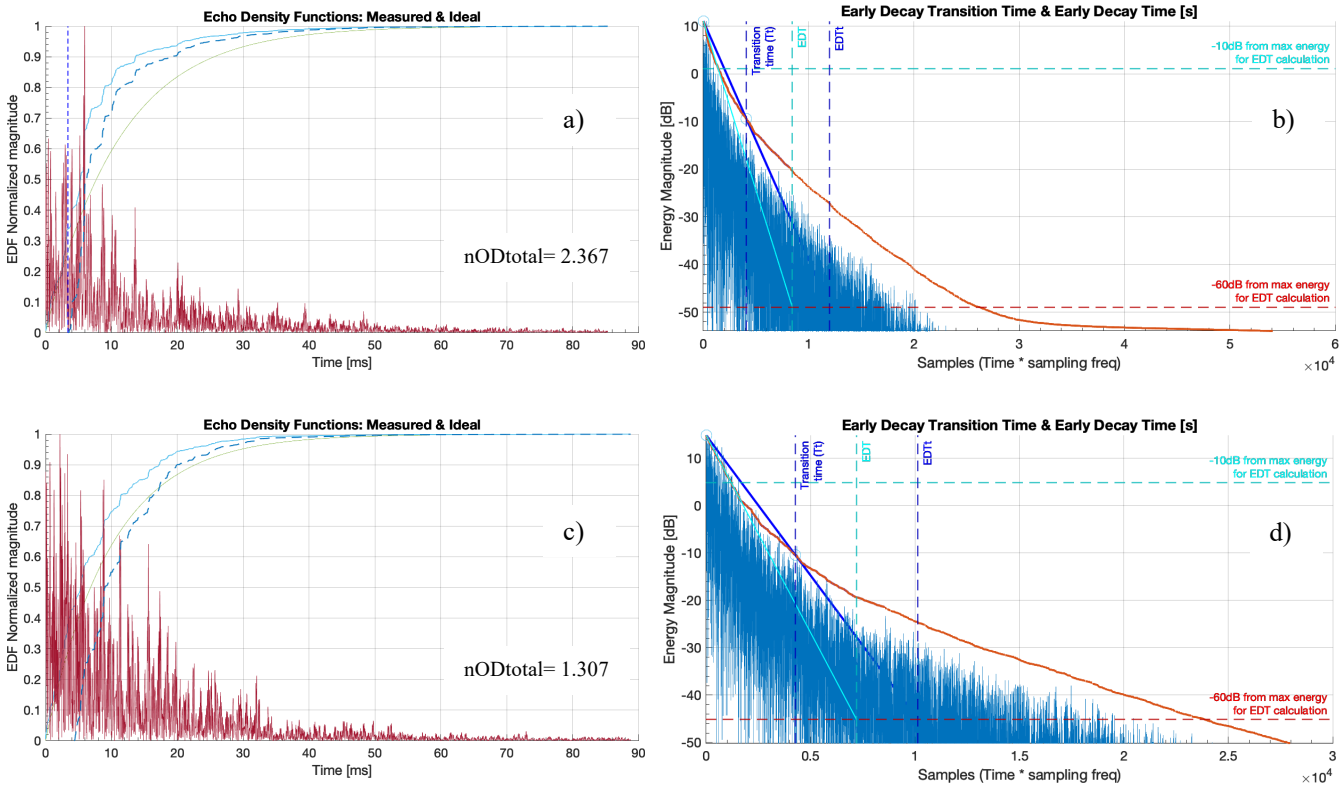


Figura 4. Resultados de textura acústica, nOD, en función de cada uno de los arreglos con la fuente sonora ubicada en el piso. Gráfico tipo Box – Whisker, mostrando la mediana, los cuartiles, máximos, mínimos y los outliers (rombos de color rojo).



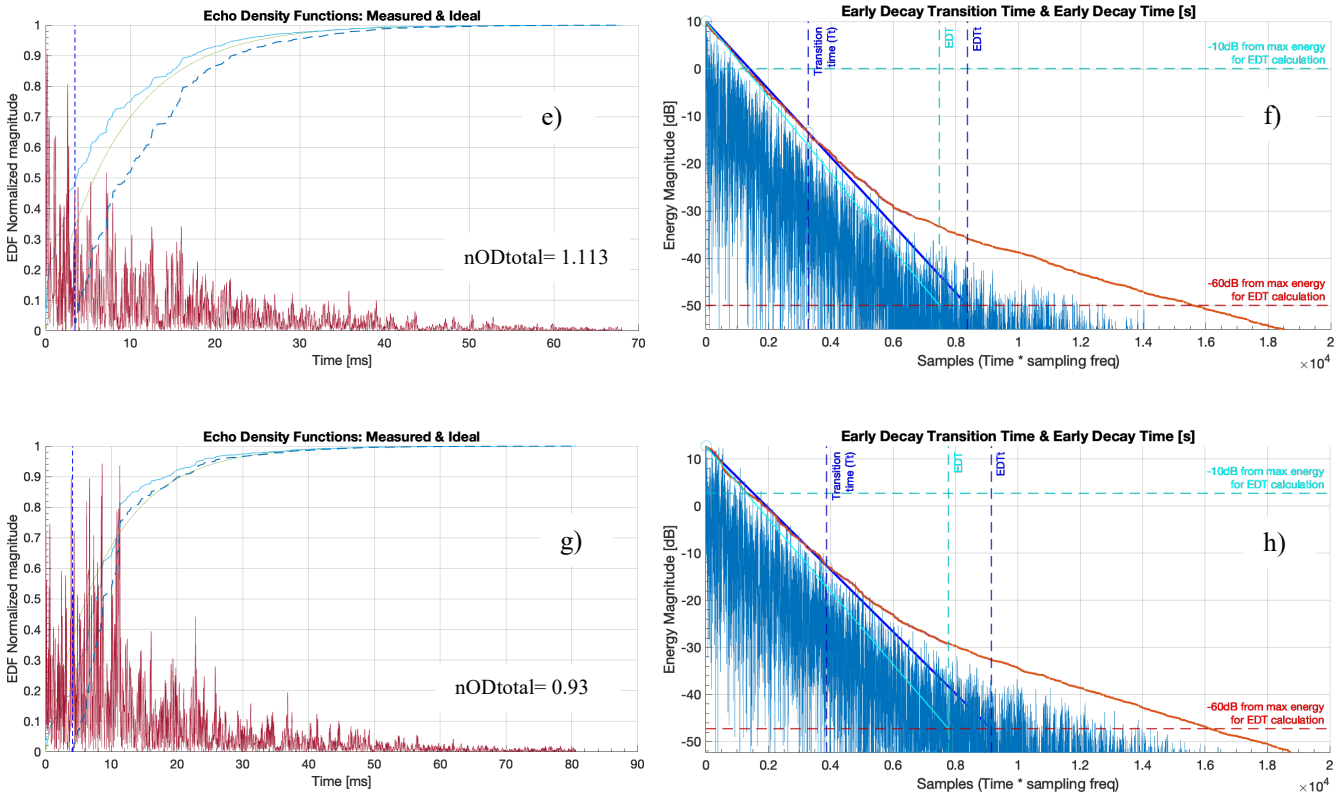


Figura 5. Gráficos representativos de los resultados de cada arreglo: gráficos a) y b) corresponden a la cámara vacía, sin difusores; gráficos c) y d) corresponden al arreglo de 1 difusor; gráficos e) y f) corresponden al arreglo con 2 difusores; g) y h) corresponden al arreglo con 3 difusores. Columna izquierda de gráficos: reflexiones tempranas (en color rojo), curvas *edf* ideales (en color verde y trazo continuo) y curvas *edf* bajo análisis (en color celeste y trazo continuo), las rectas verticales punteadas señalan el ACd en cada caso; Columna derecha de gráficos: Integral reversa de Schroeder (en color rojo y trazo continuo), ETC (en color azul), recta de linealización del EDT (en color celeste) y recta de linealización del EDTt (en color azul oscuro). Entre los gráficos a), c), e) y g) se observa la evolución de la diferencia de distancia entre la *edf* bajo análisis (trazo celeste continuo) y la *edf* ideal (trazo verde continuo), la cual tiende a reducirse a medida que se agregan difusores en el experimento. De igual manera, en los gráficos b), d), f) y h) se observa la evolución de la diferencia entre el EDT y el EDTt, la cual tiende a reducirse a medida que se agregan difusores al *setup* de pueba.

De la Tabla 2 y de la Figura 5 se puede observar que el EDTt paulatinamente converge en el EDT (o viceversa). Este análisis se observa en la figura 6.

Se observó una reducción del cociente EDTt/EDT a medida que se incrementó la superficie de difusores dentro de la cámara, siempre en condiciones anisotrópicas de material absorbente.

La curva de ajuste logarítmica de la figura 6 se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{\mathrm{EDTt}}{EDT} \cong -0.086 * \ln(S) + 0.93 \tag{8}$$

Este ajuste presenta un coeficiente de determinación, R^2, de 0.9.

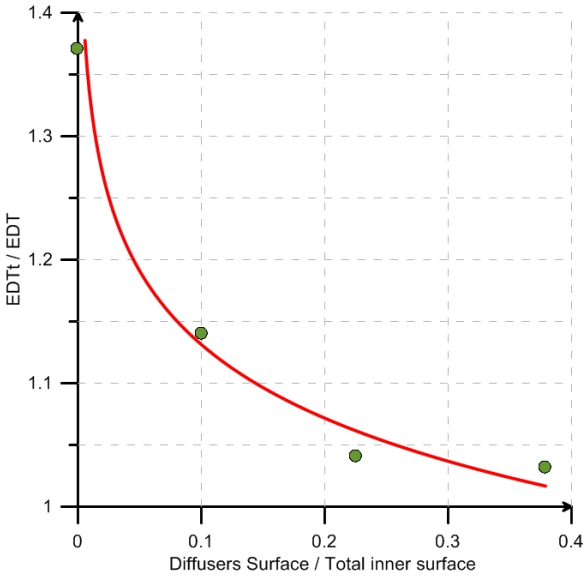


Figura 6. Cociente EDTt / EDT en función de la relación Superficie de difusores / Superficie total interior de la cámara reverberante. Los puntos verdes muestran los resultados para cada experimento. Trazo rojo: ajuste logarítmico de los resultados.

Para comprobar si la posición de la fuente sonora también es una variable que afecta la textura acústica se estudiaron los resultados del experimento 2. Esto se observa en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados promedio de los parámetros microscópicos de la textura acústica, tiempo de transición (*Tt*), cantidad acumulada de reflexiones tempranas (*CNR*), tiempo de decaimiento temprano (*EDT*), tiempo de decaimiento del campo temprano (*EDTt*) y Textura acústica (*nOD*), para el *setup* correspondiente a 3 difusores, con la fuente ubicada sobre el piso (fuente rasante) y con la fuente elevada.

	Tt [ms]	CNR	EDT [s]	EDTt [ms]	Textura (nOD)
Fuente rasante	70.836	134	0.181	0.187	0.975
Fuente elevada	71.512	137	0.177	0.182	0.918

La fuente sonora elevada produce un resultado promedio de textura más neutra (una menor diferencia entre la curva exponencial ideal y la curva de energía acumulada de reflexiones tempranas de la RIR), *nOD* = 0.918, que la fuente rasante, *nOD* = 0.975. Se demuestra que la textura también depende de la posición de la fuente sonora, manteniendo la cantidad de revestimientos y sus posiciones, constantes.

6. CONCLUSIONES

Se probó sistemáticamente la influencia de la superficie de difusores, utilizando 4 arreglos diferentes de difusores, en la textura acústica de un campo sonoro anisotrópico, es decir, en el dominio del tiempo dentro del intervalo {0, Tt [ms]}.
Se observó la variación de la textura acústica y del cociente EDTt / EDT, con el cociente entre la superficie revestida y la superficie interior total del recinto.
La relación EDTt / EDT podría ser un descriptor para analizar la uniformidad de la distribución de revestimientos acústicos absorbentes dentro de un recinto. Cuanto más cercano a 1 es el mismo, más uniforme es dicha distribución.
Se probó una herramienta robusta para su aplicación en proyectos, es decir, en todo proyecto podría definirse un rango de textura acústica objetivo, el cual sería cuantificable a medida que avanza la etapa de colocación de revestimientos difusores.
Es posible cuantificar y modificar la personalidad acústica de un recinto, mediante el estudio de la textura acústica.
El estudio de la variación de la textura acústica en función de la colocación de superficies difusores (y absorbentes), en el espacio volumétrico de la zona de escucha, permite reconocer objetivamente el grado de uniformidad espacial de los efectos de éstos, en el dominio temporal.

La simple inspección visual de la distribución espacial de absorción y scattering dentro de un recinto cualquiera no ofrece un resultado preciso para poder determinar si la misma es uniforme o no, o si el campo sonoro es isotrópico u homogéneo.
Para orientar trabajos a futuro, quedan como preguntas a responder: ¿Cómo se modificarían las ecuaciones (6) y (8) utilizando difusores con diferente coeficiente de scattering? ¿Cómo se modificarían las ecuaciones (6) y (8) utilizando una fuente sonora con diferente ubicación dentro del recinto? ¿Cómo se relaciona el coeficiente de scattering con la textura? ¿Qué grado de sensibilidad perceptual hay frente a variaciones en la textura acústica de un recinto?, entre otras.

REFERENCIAS

[1]: Cox *et al*. "Scattering and diffusion coefficients tutorial". Acta Acustica united with Acustica. Vol. 92 (2006).

[2]: Zhang, S.; Lee, J. "Diffuseness Quantification in a Reverberation Chamber and Its Variation with Fine-Resolution Measurements". Buildings 2021, 11, 519. https://doi.org/10.3390/ buildings11110519

[3]: Cheol-Ho Jeong, Nolan M. "Difficulties in comparing diffuse sound field measures and data/code sharing for future collaboration". *Euronoise 2018*. Crete, Grece.

[4]: Sato, S. "Evaluation of temporal diffusion of room impulse responses by using the autocorrelation analysis". Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics. Buenos Aires, 5 to 9 September, 2016. https://www.researchgate.net/publication/307958458_Evaluation_of_temporal_diffusion_of_room_impulse_responses_by_using_the_autocorrelation_analysis .

[5]: Fujii, K.; Hotehama, T.; Kato, K.; Shimokura, R.; Okamoto, Y.; Suzumura, Y.; Ando, Y. "Spatial distribution of acoustical parameters in concert halls: comparison of different scattered reflection". Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment, Vol. 4 (1), 2004, pp. 59-68.

[6]: Kuttruff, H. Room Acoustics. Elsevier Science, London (UK) 1991.

[7]: Bidondo, A. "Software analizador de textura acústica para educación". *XVIII Congreso Argentino de Acústica*, 2023.

[8]: R. Lacatis, A. Giménez, A. Barba Sevillano, S. Cerdá, J. Romero, R. Cibrián. "Historical and chronological evolution of the concert hall acoustics parameters". *Euronoise & Acoustics `08 Paris*. 2008.

[9]: L. Beranek. "Concert and Opera Halls. How they sound". Acoustical Society of America. 1996.

[10]: K. Meesawat, D. Hammershøi An investigation on the transition time from early reflections to a reverberation tail in a BRIR. *Proceedings of the 2002 International Conference on Auditory Display*, Kyoto, Japan, July 2-5, 2002.

[11]: T. Hidaka, Y. Yamada, T. Nakagawa. "New definition of boudary point between early reflections and late reverberation in room impulse responses". Journal of the acoustical Society of America 122 (1), 326 – 332, 2007.

[12]: J.S. Abel and P. Huang, "A simple, robust measure of reverberation echo density", 121st Audio Engineering Society Convention, San Francisco, CA, October 2006.

[13]: A. Lindau, L. Kosanke, S. Weinzierl. "Perceptual Evaluation of Model- and Signal-Based Predictors of the Mixing Time in Binaural Room Impulse Responses". Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 60, Nº 11, 2012 November.

[14]: R. Stewart, M. Sandler. "Statistical measures of early reflections of room impulse responses". Proc. of the 10th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-07), Bordeaux, France, September 10-15, 2007.

[15]: Cheol-Ho Jeong. "Kurtosis as a diffuseness measure". *Proceedings of the International Congress on Acoustics 2016*. Buenos Aires (2016).

[16]: L. Rizzi, G. Ghelfi. "Measuring Mixing Time in non-Sabinian Rooms: how scattering influences small-room responses". Audio Engineering Society, 132nd Convention. Budapest. Hungary (2012).

[17]: S. Li, J. Feng. "The influence of acoustic cues in early reflections on sourcelocalization". Audio Engineering Society Conference paper. Presented at the 2022 International Conference on Audio for Virtual and Augmented Reality. Redmond, WA, USA (2022).

[18]: J.-D. Polack, "Modifying chambers to play billiards. The foundations of reverberation theory". Acustica, Vol. 76, pp. 257-272 (1992).

[19]: P. Götz, K. Kowalczyk, A. Silzle. E. Habets. "Mixing time prediction using spherical microphone arrays". Journal of the Acoustical Society of America 137 (2), February 2015. http://dx.doi.org/10.1121/1.4907547

[20]: A. Bidondo, M. Recuero. "Temporal Integration Function of the Human Auditory System, W Audition". Investigative sufficiency Thesis. Universidad Politécnica de Madrid. 2013. https://www.researchgate.net/publication/261950930_Temporal_Integration_Function_of_the_Human_Auditory_System_W_AUDITION

[21]: A. Bidondo, L. Pepino. "Room acoustic texture: a methodology for its quantification". *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen. Gemany. 2019.

[22]: Bai, Xin. "Experimental investigations on two potential sound diffuseness measures in enclosures". Rensselaer Politechic Institute. Master Thesis. 2017. https://doi.org/10.1121/1.4988336

[23]: Nolan, M. "Anisotropic sound fields in reverberation-room measurements of sound absorption coefficients: Wavenumber spectrum theory". *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics;* 9 to 13 September 2019. Aachen. Germany.

[24]: Bradley, D., Müller-Trapet, M., Adelgran, J., Vorländer, M. "Effect of boundary diffusers in a reverberation chamber: Standardized diffuse field quantifiers". *Journal of the Acoustical Society of America* 135 (4), April 2014, pp: 1898-1906. http://dx.doi.org/10.1121/1.4866291

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Estudio de la Textura Acústica del Teatro San José

Musolino, Lautaro[†,1]**; Bidondo, Alejandro** [†,2]

[†] CISTAS, Universidad Nacional de Tres de Febrero.
Dr. Alfredo Springolo S/N – Entre Pje. Marín y Benito Lynch
Saenz Peña, Provincia de Buenos Aires, Argentina
[1] lautaromusolino@yahoo.com.ar, [2] abidondo@untref.edu.ar

Resumen La presente investigación tiene por objeto el estudio de la textura acústica y algunos de sus parámetros microscópicos dentro de una sala de conciertos. Esta información está contenida en la distribución temporal y de amplitudes de las reflexiones tempranas, en toda respuesta al impulso (RIR). La sala analizada fue el teatro San José de la ciudad de Buenos Aires, Argentina. En su interior se registraron un conjunto de RIRs tanto monoaurales como binaurales, mapeando el espacio de audiencia. Posteriormente estas fueron procesadas para obtener los diferentes parámetros, a saber: el tiempo de transición, Tt [ms], la duración de la autocorrelación, ACd [ms], la textura acústica normalizada, nOD, la claridad en Tt, CTt [dB], el tiempo de decaimiento del campo temprano, EDTt [s] y el tiempo de decaimiento temprano, EDT [s]. El resultado muestra un análisis acústico diferente del tradicional, con mapeos de la distribución de la "personalidad" acústica de la sala, respetando el instante en que el campo temprano sería inaudible frente al tardío en cada punto de medición.

Palabras clave: Tiempo de transición; difusión temporal; textura acústica de recintos; reflexiones tempranas.

Abstract The present investigation aims to study the acoustic texture and some of its microscopic parameters inside a concert hall. This information is contained in the temporal and amplitude distribution of early reflections in every impulse response (IRR). The analyzed hall was the San José Theater in Buenos Aires, Argentina. A set of both monaural and binaural RIRs were recorded inside, mapping the audience's space. These were subsequently processed to obtain different parameters, namely: transition time, Tt [ms], autocorrelation duration, ACd [ms], normalized acoustic texture, nOD, clarity at Tt, CTt [dB], early sound field decay, EDTt [s], and the decay time, EDT [s]. The result shows a different acoustic analysis from the traditional one, with mappings of the distribution of the acoustic "personality" of the hall, respecting the instant in which the early sound field would be inaudible compared to the late sound field at each measurement point.

Palabras clave: Transition time; temporal diffusion; room acoustic texture; early reflections.

1. INTRODUCCIÓN

En los orígenes de la acústica arquitectónica según se conoce actualmente el parámetro fundamental por predecir y registrar fue el tiempo de reverberación, RT60. Posteriormente y con el avance del procesamiento de señales y el conocimiento de la percepción sonora como el resultado de diversas cualidades acústicas se fueron agregando descriptores como la claridad, C80, C50 y C7 [dB], el tiempo de decaimiento temprano, EDT [s], el coeficiente de correlación interaural, $IACC_{EARLY}$ y el envolvimiento del oyente, LEV, entre otros, invocando siempre la existencia del campo sonoro temprano. Estudiados y analizados de esta forma pareciera que no tienen relación alguna entre sí, siendo que el tiempo de transición, Tt [ms], es el vaso comunicante entre todas ellas. Además, en gran cantidad de literatura como ser [1], [2], [3] se comprueba que la personalidad acústica (*acoustical signature*) de una sala cualquiera está dada por las reflexiones tempranas.

De poderse extraer eficientemente las reflexiones tempranas de una respuesta al impulso, RIR, sería posible determinar el campo temprano y su decamiento real, el Tt, y con este un conjunto de nuevos parámetros microscópicos relativos a la textura acústica [4].

2. TEXTURA DE UNA RIR

En 1962 Beranek, dentro de un conjunto de 18 parámetros acústicos que describen aspectos del sonido y la percepción acústica mientras se reproduce música dentro de recintos, definió la textura acústica como "*la impresión subjetiva que los oyentes derivan de los patrones en los cuales la secuencia de reflexiones sonoras tempranas llega a sus oídos. En una sala excelente, las reflexiones que llegan poco después del sonido directo siguen una secuencia más o menos uniforme. En otras salas puede haber un intervalo considerable entre la primera reflexión y la siguiente. Una buena textura requiere un gran número de reflexiones tempranas, uniformemente pero no espaciadas con precisión, y sin que ninguna reflexión domine a las demás*". Esta definición hace referencia a una distribución temporal y de amplitudes de las reflexiones tempranas, por ello es esencial poder extraer éstas de cualquier respuesta al impulso de un recinto (RIR) y reconocer primeramente la duración del campo sonoro temprano. Para esto se hace imprescindible separar la información determinística -de las reflexiones tempranas- y la estocástica -de las reflexiones tardías (o "difusas")-, e introducir dos variables perceptuales que son: a) el nivel al cual un campo sonoro es enmascarado por otro; dicho nivel se establece en -10 dB, y b) la duración de la ventana de integración temporal del sistema auditivo, la que se establece en 20 ms como un valor provocado por la percepción de un estímulo con duración efectiva de la autocorrelación [5], τ_e, baja; esta duración de ventana se aplica para el cálculo de la energía en función del tiempo de las RIRs determinística y estocástica. Sabiendo que el sistema recinto evoluciona de un estado determinístico a un estado estocástico, el instante en que el campo tardío predomina por sobre el temprano permite definir el tiempo de transición.

El estudio de la textura acústica hace referencia a parámetros estrictamente de campo temprano obtenidos a partir de una RIR, como ser: tiempo de transición, Tt [ms], tiempo de decaimiento real del campo temprano, EDTt [s] -cuyos extremos de linealización son 0 dB y la magnitud a la cual sucede el Tt-, cantidad acumulada de reflexiones tempranas en el intervalo {0 – Tt}, CNERs, la duración de la autocorrelación, ACd [ms] -que establece la duración del sonido directo ó "*direct sound package*", la distancia ordinal normalizada total y del recinto, nOD_{total} y nOD_{room} – que miden la distancia entre la curva ideal y las funciones de densidad de reflexiones en los dominios {0, Tt} y {ACd, Tt} respectivamente-, y la difusión temporal. Esta última está íntimamente relacionada con la distribución temporal de las reflexiones tempranas y sus amplitudes, con el Tt y con los nOD. Dentro de un recinto con distribución no uniforme de revestimientos, a mayor cantidad de superficie de difusores menor será el nOD y el Tt, para valores de EDT constante.

3. EL TEATRO SAN JOSÉ

El teatro San José es la sala de actos del Colegio San José, la institución educativa privada más antigua de la ciudad de Buenos Aires, Argentina, fundada en 1858. Funciona desde 1915 y es uno de los teatros más antiguos de la ciudad. Con un volumen de 9200 m^3 y una capacidad reportada por el establecimiento para 1500 personas, la sala presenta un marcado eclecticismo arquitectónico que puede observarse en las Figura 1. En la platea se observa un estilo dórico, mientras que las galerías muestran influencias del estilo jónico romano. Además, en la base del cielo raso se encuentran detalles como ser molduras corintias. Ubicado en el barrio Balvanera, inicialmente era de uso exclusivo para actividades del colegio. En la actualidad se lo utiliza para actos de graduación de otras escuelas, reuniones y convenciones multitudinarias. También se lo alquila para eventos culturales musicales de diversos tipos, como formatos de orquesta reducida. La sala presenta tres áreas de audiencia: una en la planta baja con sillas no fijas, otra en los laterales de la planta alta con bancos de madera montados en forma de gradas y otra en la parte posterior de la planta alta con sillas de plástico también montadas en forma de gradas.

La sala es de tipo “caja de zapatos” (*shoebox*), y sus dimensiones de planta son 28.83 m x 19.5 m. Las dimensiones del escenario son 6.5 m x 8.56 m.

En la planta superior presenta balcones laterales, a izquierda y derecha, de 4.25 m de ancho, mientras que el balcón trasero tiene un ancho aproximado de 6.5 m. En la Figura 2 se observa el plano 3D de la sala.

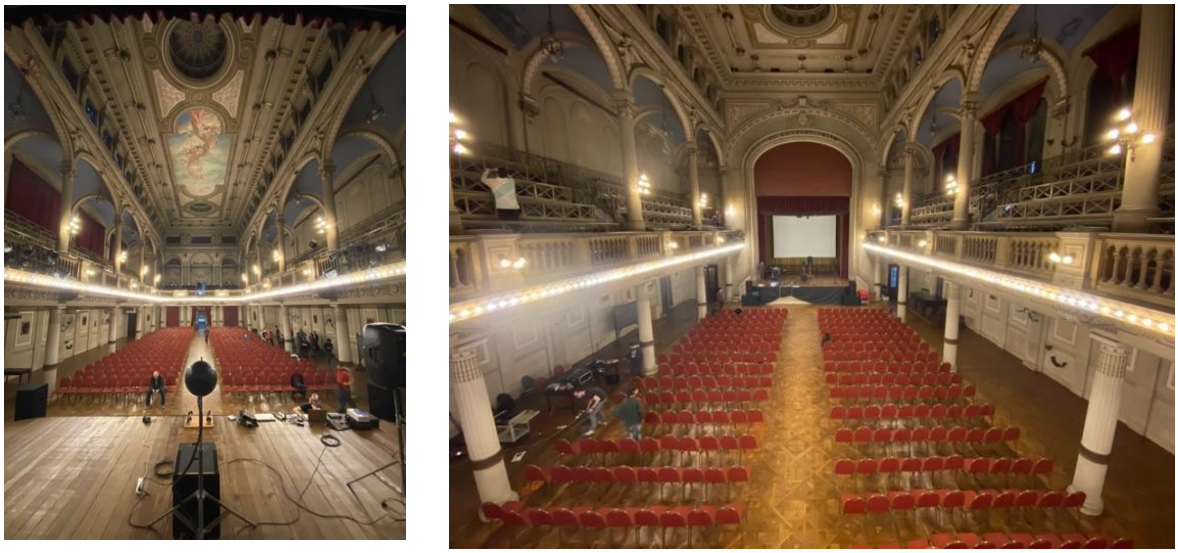


Figura 1: Interior de la sala del teatro San José desde el escenario (izquierda) y desde el fondo de la sala (derecha). En la izquierda se observa la fuente sonora omnidireccional utilizada y su ubicación. En la derecha se visualiza la disposición de las gradas del palco.

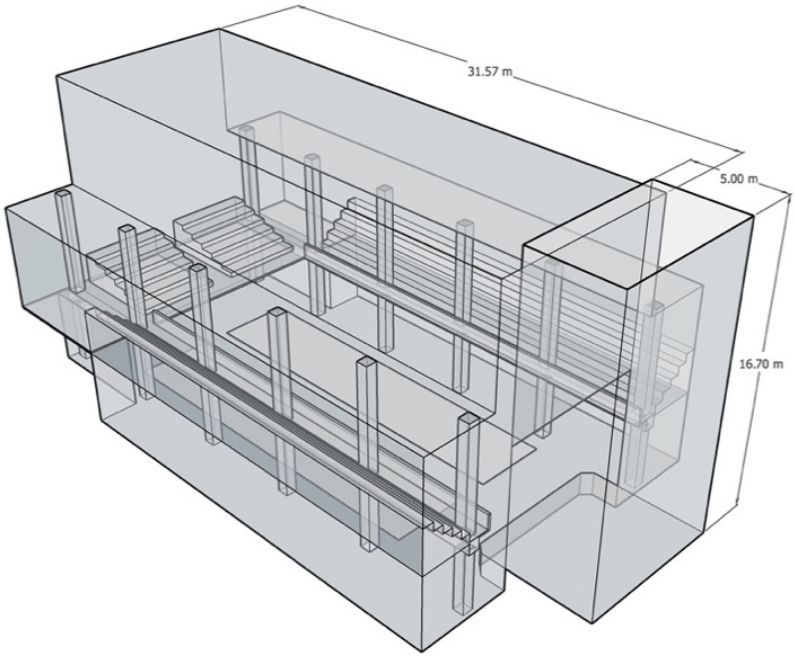


Figura 2. Imagen 3D del teatro San José. Se pueden observar sus dimensiones macroscópicas y la disposición de las gradas en la planta alta.

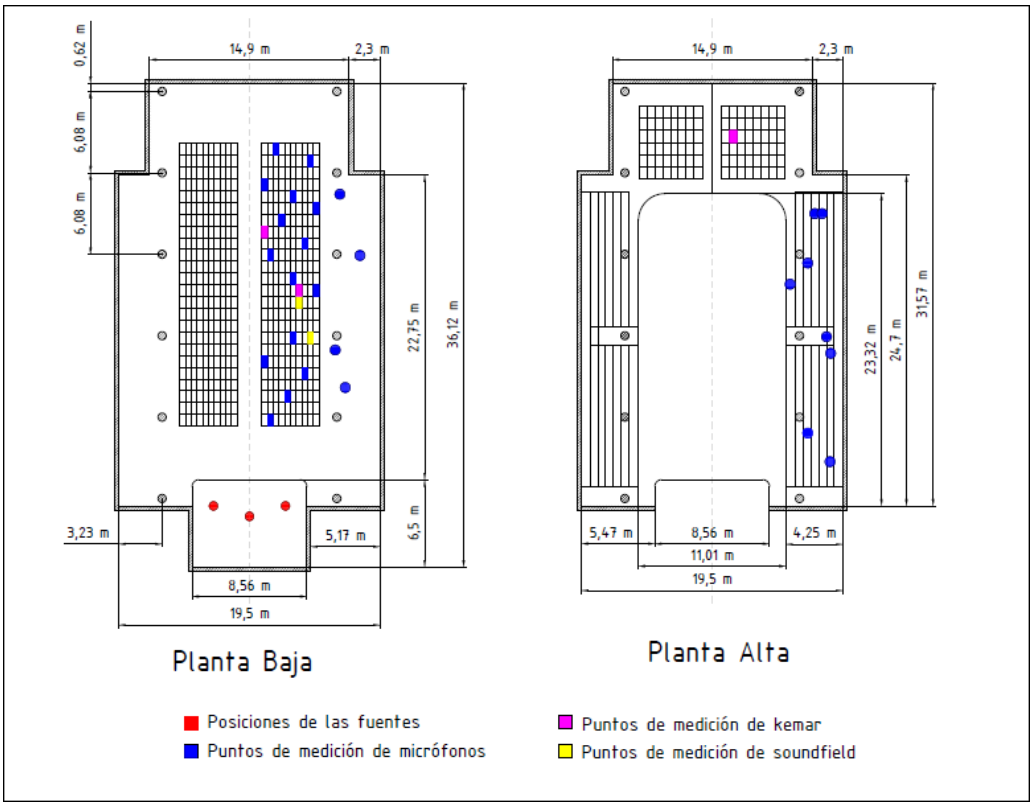


Figura 3: Plano del teatro San José con sus respectivas cotas y ubicaciones de los dispositivos de medición.

4. METODOLOGÍA

En el año 2024 se llevó a cabo la medición acústica del Teatro San José durante un intervalo de 6 horas. Para obtener las respuestas al impulso se utilizaron placas adquisidoras marca RME, 20 micrófonos Earthworks M50 apareados, una fuente sonora omnidireccional normalizada Outline Sound Globe con subwoofer, un simulador de cabeza y torso marca GRAS, modelo KEMAR con pinnaes de adulto, un micrófono Soundfield, dos sonómetros Svantek Svan 959 y una notebook con software de grabación. Para el registro de señales se utilizó una frecuencia de muestreo de 48 KHz y una resolución de 24 bits. Los micrófonos fueron distribuidos uniformemente dentro de la sala, situando la fuente sonora al centro del escenario. En la Figura 3 se observa la disposición de los elementos de medición.

Las señales estímulo fueron, entre otras, barridos logarítmicos sinusoidales de 90 segundos de duración cada uno para asegurar la mejor relación señal – ruido posible.

5. RESULTADOS

Para determinar la calidad acústica de un recinto la norma ISO 3382-1 establece los parámetros por relevar, como ser el T_{20}, T_{30}, EDT, C80, IACC, entre otros, los procedimientos a llevar a cabo para auditorios y salas de conciertos, y las definiciones y criterios de cálculo para parámetros acústicos monoaurales y binaurales. Ésta no hace referencia a determinar el campo temprano y la información que este contiene. Esta investigación propone un análisis diferente al determinar la duración del campo temprano en todas las RIRs, calcular los parámetros microscópicos de la textura acústica y presentar su mapeo en las zonas de audiencia de una sala de conciertos. Los resultados numéricos fueron obtenidos mediante el software Texture Analyzer [6]. Se observan a continuación los resultados numéricos, presentados en forma de mapeos espaciales, en las Figuras 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11.

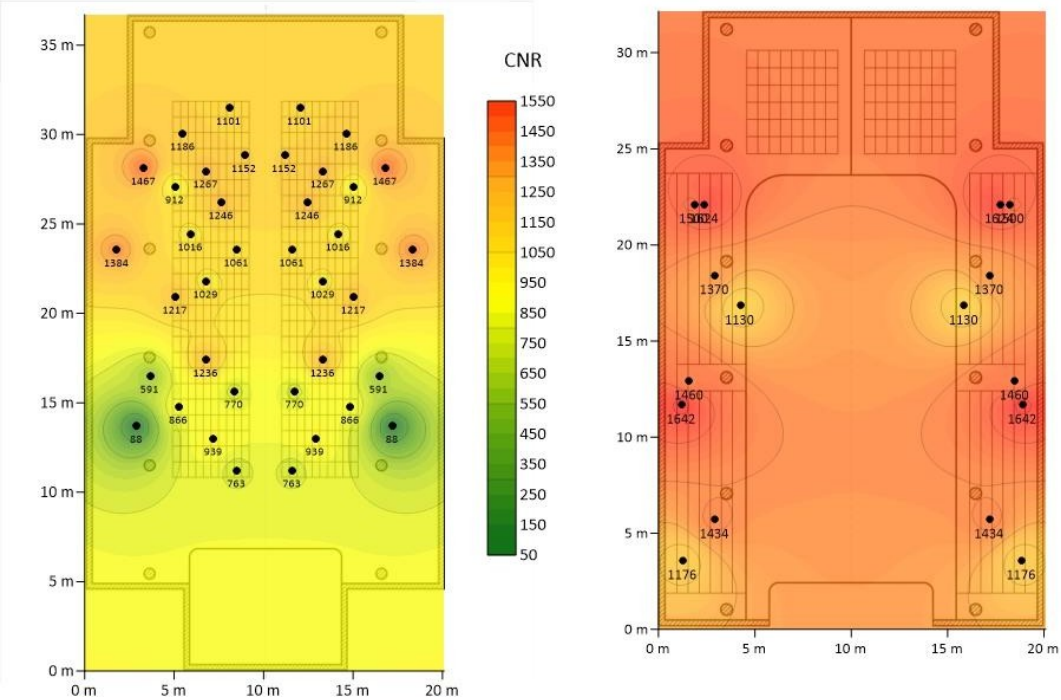


Figura 4: Mapeo superficial del parámetro CNER en la planta baja (izquierda) y planta alta (derecha). El escenario se encuentra en la parte inferior de ambas plantas.

La figura 4 muestra la cantidad de reflexiones tempranas acumuladas, CNERs (*Cummulative Number of Early Reflections*), en el dominio {0, Tt}, Se puede observar que la planta baja presenta una CNERs que fluctúa entre 50 y 1150, mientras que la planta alta presenta mayoritariamente una variación entre 1120 y 1550 reflexiones tempranas, en el mismo intervalo.

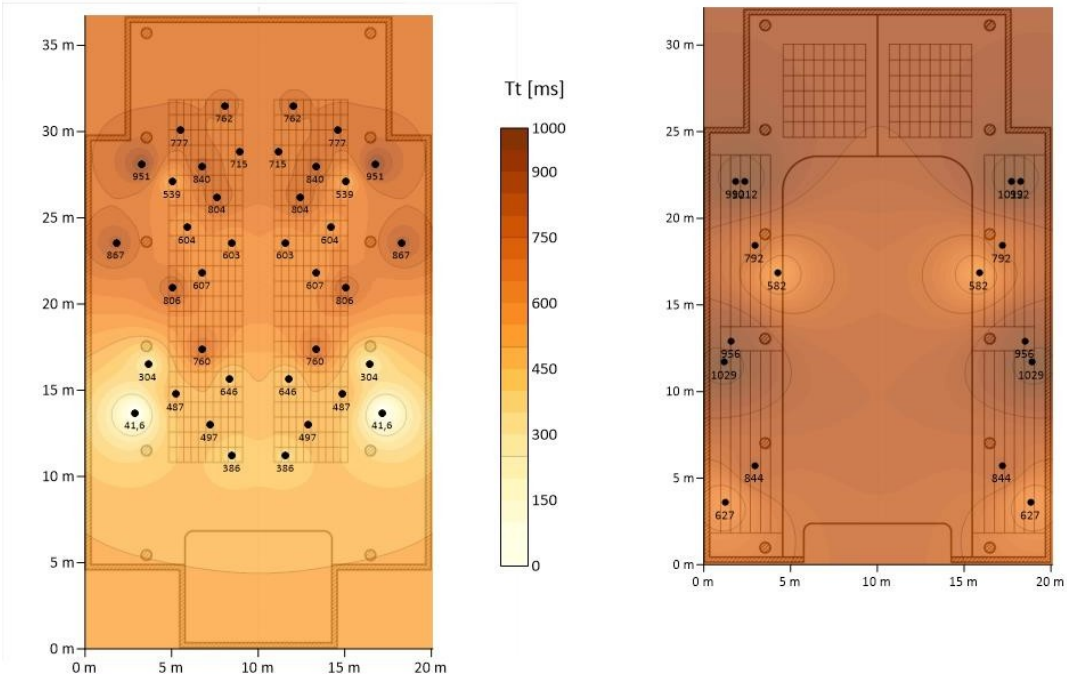


Figura 5: Mapeo superficial del parámetro Tiempo de transición, Tt [ms]. El escenario se encuentra en la parte inferior de ambas plantas.

La figura 5 muestra la duración del campo temprano, Tt (*Transition time*) [ms] distribuido en el espacio. En la planta baja esta variable no es uniforme, presentando valores desde 42 ms hasta 951 ms; por otro lado, en la planta alta presenta algo más de uniformidad, registrándose valores desde 582 ms hasta aproximadamente 1029 ms.

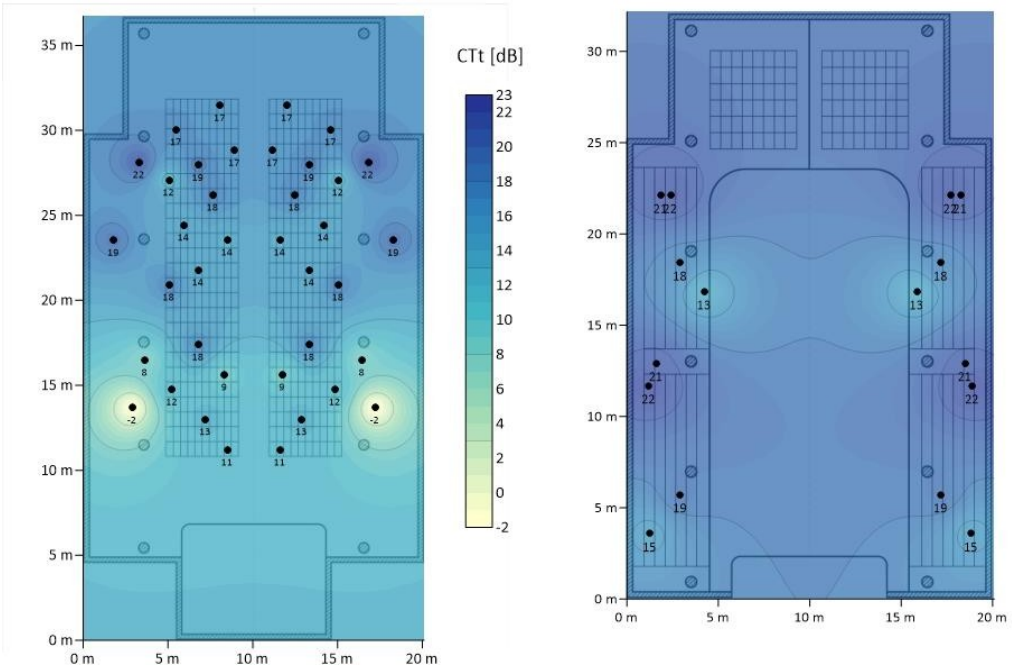


Figura 6: Mapeo superficial del parámetro Claridad en Tt [dB]. El escenario se encuentra en la parte inferior de ambas plantas.

La figura 6 muestra la claridad tomando como límite temporal el tiempo de transición, CTt (*Clarity at Tt*) [dB], de cada punto de registro de la RIR. Se observa que CTt presenta valores uniformes en la parte trasera de la planta baja, con un promedio de 16 dB aproximadamente, y en la planta alta, con un promedio de 18 dB aproximadamente, observándose los valores más bajos en la primera mitad de la planta baja de la sala, cercana al escenario.

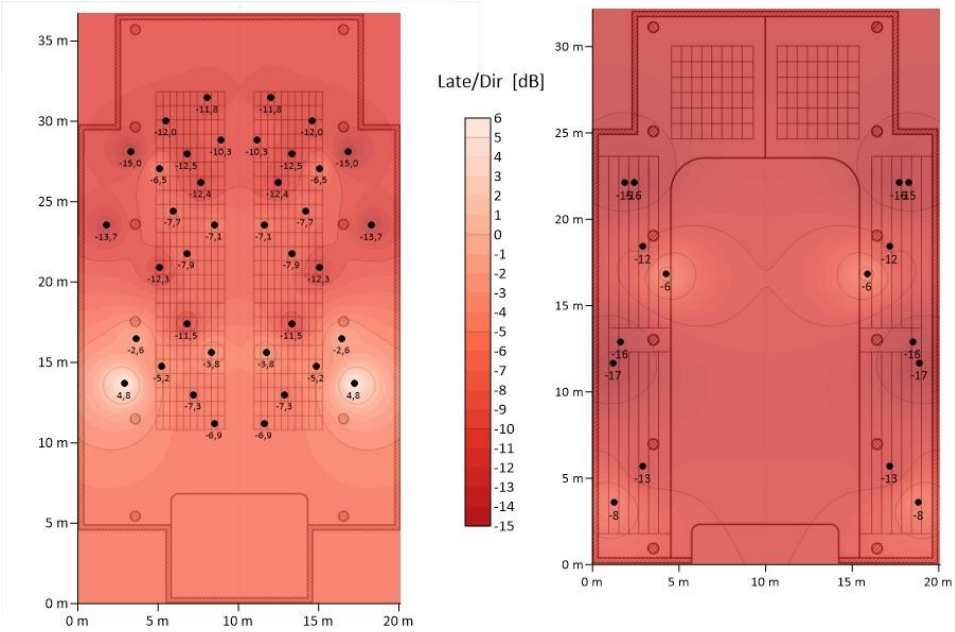


Figura 7: Mapeo superficial del parámetro Late / Dir. El escenario se encuentra en la parte inferior de ambas plantas.

En la Figura 7 se observa el mapeo del parámetro Late / Dir; éste hace referencia al nivel de la energía reverberante, es decir posterior al Tt, respecto de la energía del conjunto llamado "sonido directo" ("*direct sound package*"), es decir la energía contenida dentro del intervalo de duración de la autocorrelación de una RIR, ACd (*Autocorrelation duration*) [ms]. En esta sala sólo la mitad más cercana al escenario de la planta baja presenta valores claramente mayores de Late / Dir [dB] que el resto de la sala.

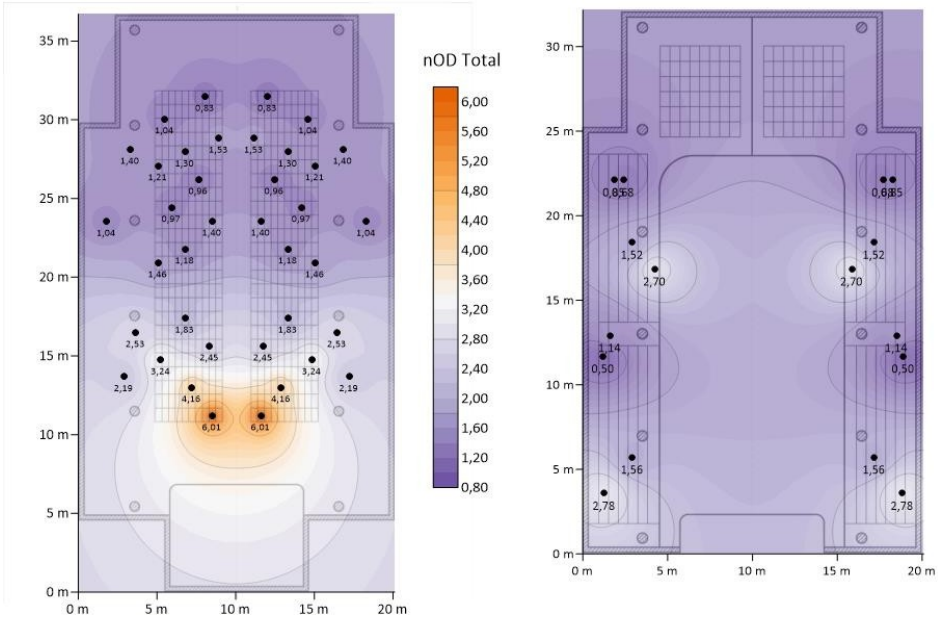


Figura 8: Mapeo superficial del parámetro nOD_{total}. El escenario se encuentra en la parte inferior de ambas plantas.

El parámetro Distancia Ordinal normalizada total, nOD_{total}, (*total normalized Ordinal Distance*), presenta su dominio entre {0, Tt} y sus resultados se acotan entre {0, ∞}, siendo los valores menores a 1.5 (aproximadamente) aquellos que se corresponden con una distribución temporal y de amplitudes -relativamente- uniforme de las reflexiones tempranas en el intervalo analizado.

Un resultado cercano a 0, significa que la distribución de estas reflexiones será más cercana a la ideal; uno más alejado de cero, significa que su distribución presentará irregularidades, agrupamientos, ausencias y amplitudes salientes, es decir se aleja de la ideal, produce coloraciones incrementalmente sobre el sonido directo y hace sentir su "personalidad acústica". Según se observa en la Figura 8, en el caso de esta sala la mitad más cercana al escenario de la planta baja presenta valores de textura alejados de la neutralidad, desde 1.83 hasta 6, y la segunda mitad de la misma y toda la planta alta valores mucho más cercanos a 0, es decir, con tendencia a respuestas tempranas –con "personalidad acústica" – neutras.

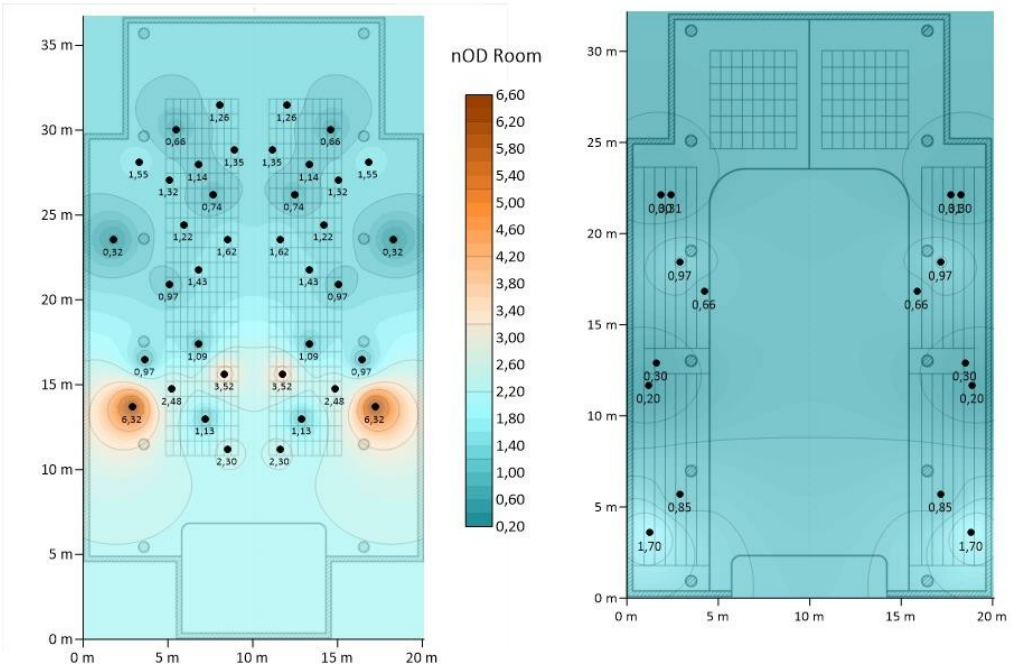


Figura 9: Mapeo superficial del parámetro nOD_{room}. El escenario se encuentra en la parte inferior de ambas plantas.

El parámetro Distancia Ordinal normalizada del recinto, nOD_{room}, (*room´s normalized Ordinal Distance*), presenta su dominio entre {ACd, Tt} y sus resultados se acotan entre {0, ∞}. Estos son equivalentes a aquellos de nOD_{total}, pero presuponen que la distribución de reflexiones entre {0, ACd} es la ideal, por lo que los resultados sólo responden a las características aportadas por aquellas superficies alejadas de la fuente sonora; por ello el sufijo de "*room*". Este descriptor permite detectar el grado de influencia de las superficies muy cercanas a la fuente comparado con la textura provista por las superficies más alejadas de aquella. En la Figura 8 se observa que la planta baja de la sala presenta una mayor uniformidad de valores de textura *room* respecto de *total*, excepto en zonas de poca extensión y muy localizadas; es decir, la diferencia entre ambos descriptores hace referencia a que la acústica del escenario (superficies muy cercanas a la fuente sonora) le agregan personalidad a la sala. La planta alta también presenta mayoritariamente valores bajos de textura, exhibiendo una "personalidad acústica" tendiendo a neutra.

La Figura 10 presenta el mapeo del decaimiento temprano tradicional, EDT (*Early Decay Time*), mientras que la figura 11, el mapeo del decaimiento del campo temprano, EDTt (*Early Decay Transition Time*), para su comparación. El EDTt se calcula a partir de la pendiente de la recta comprendida entre 0 dB y la atenuación (Att at Tt, [dB]) alcanzada en el tiempo de transición.

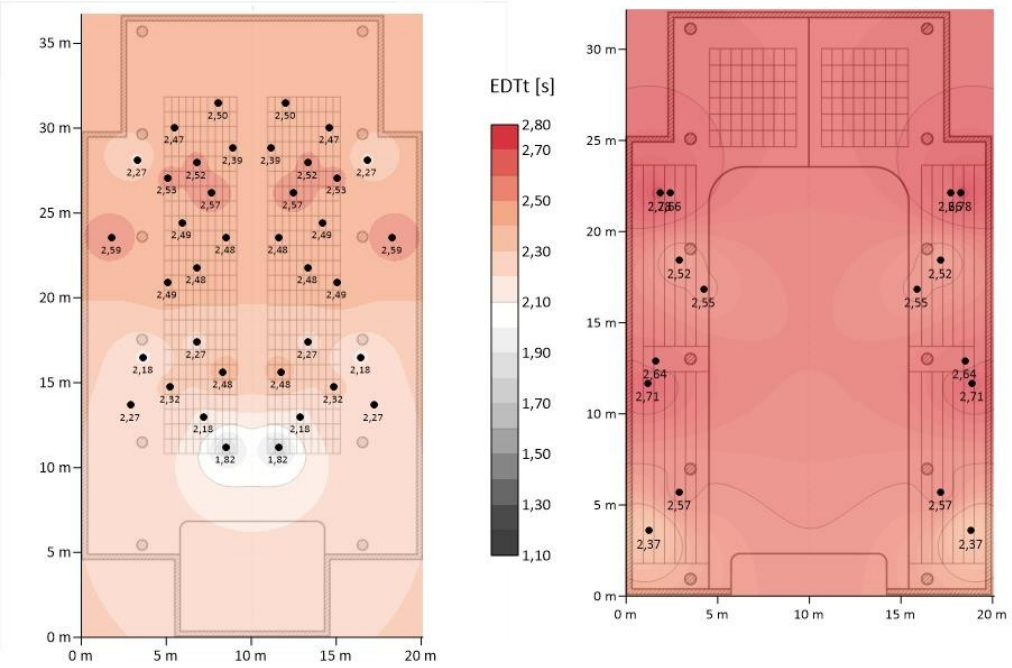


Figura 10: Mapeo superficial del Tiempo de Decaimiento Temprano (EDT) [s]. El escenario se encuentra en la parte inferior de ambas plantas.

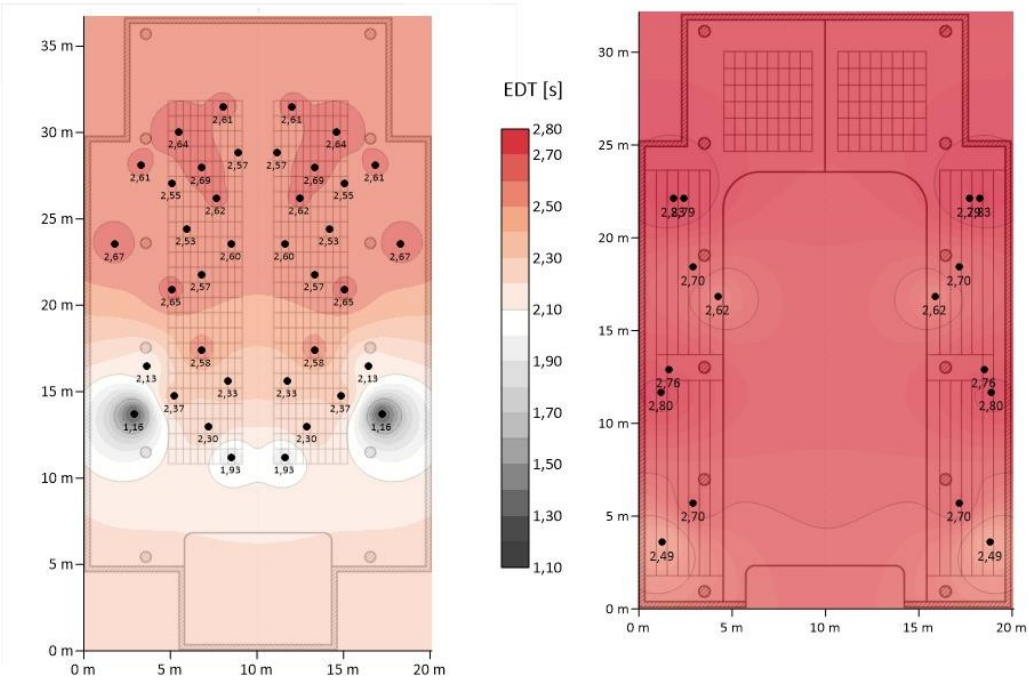


Figura 11: Mapeo superficial del Tiempo de Decaimiento del campo Temprano (EDTt) [s]. El escenario se encuentra en la parte inferior de ambas plantas.

En las Figuras 10 y 11 se observan los parámetros decaimiento temprano (EDT) y decaimiento del campo temprano (EDTt); éstos ofrecen una información diferente entre sí. La duración del campo temprano distribuida en la superficie de la sala es más uniforme que los resultados del cálculo del EDT. Los respectivos promedios y desvíos estándar en cada caso son 2.42 s, 0.36 s, 2.64 s, 0.18 para la planta baja y el 1er piso del EDT y 2.38 s, 0.18 s, 2.6 s y 0.13 s para la planta baja y el 1er piso del EDTt, respectivamente.

6. DISCUSIÓN

El análisis acústico a partir de la textura acústica y el mapeo de sus resultados en el espacio permite reconocer claramente la información contenida en el campo temprano, en cada punto geográfico de una sala.

Se presenta quizás por primera vez un análisis acústico que incluye el tiempo de transición como vaso comunicante entre las demás variables acústicas. Se observa claramente que éste no es único ni uniforme, lo que propone reflexionar acerca de un límite temporal fijo para los descriptores acústicos tradicionales, como ser C50, C80, $IACC_{EARLY}$, EDT, entre otros.

Asimismo, la duración del sonido directo, representado por la duración de la autocorrelación normalizada de una RIR, ACd [ms], tampoco es constante en toda la superficie de la sala.

Los resultados de textura nOD_{total} y nOD_{room} permiten detectar y ubicar espacialmente la presencia de superficies que generan reflexiones fuertes, que introducen "personalidad acústica" en la percepción de la fuente sonora; para evitar esto sería útil el agregado de superficies difusoras dado que estas tienden a reducir el nOD.

REFERENCIAS

[1]: Steffens, H., Van de Par, S., Ewert, S. D. *The role of early and late reflections on perception of source orientation*. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol 149, issue 4. April 2021.

[2]: Barron, M., *The subjective effects of first reflections in concert halls—The need for lateral reflections. Journal of Sound and Vibration*. Vol. 15, issue 4. April 1971, pp 475 – 494.

[3]: García Gómez, J. O., Wright, O., Van Der Braak, E., Sanz, J., Kemp, L., Hulland, T. *On the Sequence of Unmasked Reflections in Shoebox Concert Halls*. Applied Sciences 2021, 11(17), 7798;

https://doi.org/10.3390/app11177798

[4]: Beranek, L. *Concert Halls, How They Sound*. P-25. 1996. Acoustical Society of America.

[5]: Ando, Y. *Concert Hall Acoustics*. Ed. Springer, Cap. 5, pp. 48–69. 1985.

[6]: Bidondo, A. *Software analizador de textura acústica para educación*. XVIII Congreso Argentino de Acústica, 2023.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

DESARROLLO DE PLACAS PARA ABSORCIÓN ACÚSTICA CON INCLUSIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA TEXTIL

Yajnes, Marta Edith[♣1,◊2]; Becerra Araneda, Abraham Alexis[♣1,◊2]; Busnelli, Roberto Rafael[♣1,◊2]; Niemetschek, Sebastián[♣1]; Posse, Carlos Manuel[✠3]; Tomeo, Daniel[✠3]; Armas Alejandro[✠3].

[♣1] Centro Experimental de la Producción, FADU, UBA, CABA

[◊2] Mat Lab, EHyS, UNSAM, San Martin.

[✠3] Laboratorio de Acústica y Luminotecnia, CIC, Gonnet

[1] meyarch@gmail.com.

Resumen La producción de residuos sólidos industriales y domiciliarios provenientes de la industria textil representa un problema ambiental, tanto en áreas industriales como en las de pequeños talleres. Esta industria tiene dificultades para reducir en especial los residuos generados por las propias máquinas como es el caso de la tejeduría plana, denominados orillo y falso orillo. Actualmente, estos residuos se encuentran fuera de la cadena de valor del reciclaje debido a la escasa demanda del mercado como materias primas secundarias.
Este trabajo tuvo una impronta inter- y transdisciplinaria porque combinó tecnología de materiales y actividades sociales de intercambio y capacitación junto a los usuarios finales del producto estudiado. Este trabajo está enfocado en la caracterización acústica de un nuevo producto para la construcción basado en placas cementicias con residuos textiles, el cual ya tiene evaluado su rendimiento térmico. Se midió el coeficiente de absorción sonora en cámara reverberante para placas con fibras acrílicas con cemento CP40 y para otras basadas en fibras de poliéster y algodón, con cemento blanco, colorantes y terminaciones, se utilizó el método de tubo de impedancia acústica. El comportamiento acústico medido fue comparable a soluciones de mercado tradicionales. Este trabajo demostró que la inserción de residuos textiles en la industria de la construcción junto a un abordaje inter- y transdisciplinario aportan a la resolución de problemáticas asociadas al empleo industrial, el impacto ambiental y a la calidad acústica de los espacios. En el ámbito social, se organizaron actividades de capacitación interactiva junto a grupos vulnerables que adquirieron saberes y aportaron su experiencia desde otros trabajos.

Palabras clave: absorción acústica, residuos textiles, caracterización, empleo industrial, impacto ambiental.

Abstract
The production of solid urban and industrial waste from the textile industry represents an environmental problem, both in industrial and small workshops areas.
Within the industry there is no way to reduce those generated by the machines themselves, such as the so-called selvedge and false selvedge of flat weaving. On the other hand, these wastes are outside the recycling value chain due to the low market demand as secondary raw materials.
This work demonstrates that the insertion of this waste into the construction industry, to manufacture new products, contributes to the resolution of problems associated with industrial employment, the environmental impact, and the acoustic quality of spaces.
The acoustic performance of these cementitious plates with acrylic waste was analyzed in tests to obtain the sound absorption coefficient in a reverberant chamber and with the acoustic impedance tube method for variants with polyester and cotton fibers, and with various cements, colorants and finishes. Acoustic performance was similar to that of market solutions. In the social sphere, interactive training activities were organized for vulnerable groups, who acquired knowledge and contributed their experience from other jobs.

Palabras clave: acoustic absorption, textile waste, characterization, industrial employment, environmental impact.

1. Introducción

1.1 La industria textil

La industria textil se basa en el uso de fibras que pueden tener origen natural o manufacturado según sintetiza, Lockuán Lavado (2013) [1] y detalla que en el primer caso pueden provenir de fuentes animales como la seda y las lanas ovinas-caprinas o de fuentes vegetales como el algodón, lino y yute. Las manufacturadas presentan una amplia variedad con una primera clasificación en las regeneradas de polímeros naturales o artificiales como las familias de rayones y modales y las sintéticas que abarcan polímeros y biopolímeros desde acrílicos, poliésteres, elastanos, aramidas y derivados de soja y maíz.

Las propiedades de la fibra afectaran aspectos de la tela terminada (Hollen (2010) [2]), tales como acumulación de estática, tiempo de secado, capacidad de teñido, vinculación con la piel, estabilidad al agua, evaporación de sudor, recuperación después del lavado (presencia de arrugas), penetración de manchas, tacto, caída, lustre, volumen, cuerpo y la sensación que producen. Estos aspectos pueden dificultar la reinserción de residuos textiles en nuevos productos debido a la dificultad para ligarlos con el material de aglomeración (cemento en el presente trabajo) y así influir en las características del producto final. La Figura 1 resume el ciclo completo de la industria textil desde el uso de las fibras para la hilatura pasando por la confección de las telas con sus procesos de ennoblecimiento hasta la confección y la generación de residuos en cada una de las etapas según Yajnes (2022) [3].

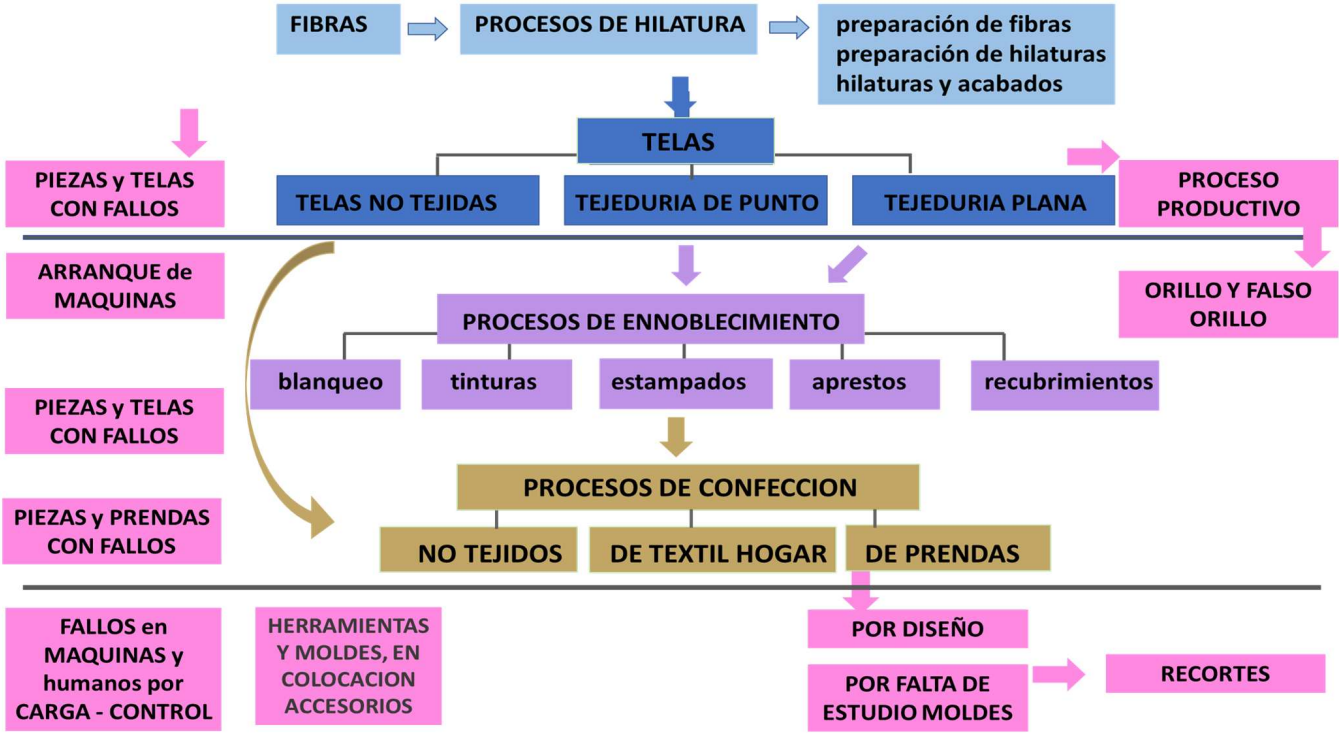


Fig. 1. Modelo de Ciclo productivo industria textil. Yajnes (2022)

Hay residuos textiles que se pueden minimizar a través de programas que reducen el impacto de los diferentes formatos y tamaños de las prendas como por ejemplo los resultantes de **procesos confección** hasta la capacitación y cantidad de recursos humanos empleados en los procesos de **tejeduría de punto** para reducir las consecuencias de los fallos de las máquinas, otros son inherentes al propio proceso como es el caso del orillo y falso orillos generados por los telares de la **tejeduría plana**. La producción de objetos basados en residuos textiles, según sostienen Rubino et al., 2018 [4] puede generar un nuevo modelo de economía circular sumado a la minimización en el envío de residuos a disposición final, reduciendo los efectos nocivos de estos residuos desechados por su acción sobre la tierra y la degradación de los entornos de vertederos legales e ilegales. Mas allá de la composición principal de la fibra que genera el hilado se debe considerar el riesgo de los procesos de ennoblecimiento por su origen.

La falta de obligación de incluir el detalle minucioso de las fibras incorporadas en las etiquetas de los productos textiles agrega complejidad a la gestión de residuos textiles para su reinserción productiva. Yajnes (2022) [3].

Otro aspecto fundamental para generar un ciclo virtuoso en la gestión de residuos textiles es considerar un enfoque integral que aborde el estudio de todo el ciclo productivo como plantean Ángeles Rojas, J. S., & Orozco Hernández, M. E. (2015) [5] para proponer un programa de manejo, con lineamientos, estrategias, mecanismos y proyectos para la reducción y reutilización del material en beneficio de la población local incluyendo las ciencias ambientales, economía, planeamiento ambiental. Nidumolu, R., Prahalad, C. K., & Rangaswami, M. R. (2010) [6] ven a la innovación como un factor clave para impulsar la sustentabilidad. Senge, P. M., & Carstedt, G. (2001) [7] vinculan los procesos productivos y de uso con sustentabilidad aplicada, a partir de lo que denominan una nueva economía con innovación, economía circular y biométrica, analizan el proceso industrial tradicional y lo contraponen a los procesos de la naturaleza donde no se generan residuos, ya que todo lo que descarta un actor lo reutilizan otros actores.

En Tröger et al [8] se propone a la ecología industrial como un enfoque para resolver tres problemas socioecológicos como son la acumulación de residuos, el desempleo y la falta de viviendas adecuadas aplicados en el partido de General San Martin en el AMBA caracterizado por su capacidad industrial especialmente en la rama textil y las deficiencias en sus edificaciones en una amplia parte de su territorio tanto en usos de vivienda como de educación.

1.2 Importancia del acondicionamiento acústico en ambientes

Según se resume en Yajnes et al (2024) [9] la aplicación de materiales que mejoren la acústica, evaluada en espacios educativos basado en estudios de Wilson et al (2002) [10], crea ambientes más naturales y relajados al mejorar comunicación verbal, reducir del nivel de presión sonora, disminuyendo el esfuerzo para hablar y el estrés ocasionado por la exposición a altos niveles de ruido.

El ruido es la fuente principal de estrés de los profesores y la influencia de un recinto sin tratamiento expone a los docentes a un esfuerzo continuo para sobrepasar el ruido de fondo existente. (Pujol et al, 2013 [10]. Una acústica deficiente en los ambientes afecta la salud de sus ocupantes, cuando se trata de recintos educativos en particular puede llevar desde aumento de los ritmos cardiacos hasta disfonías e irritación de cuerdas vocales, falta de armonía y concentración con reducción de rendimientos. Autores como Wilson et al (2002) [11], Dhanashree Pillay et al (2020) [12], Kristiansen (2014) [13], Klatte et al (2010) [14], Leena et al (2015) [15], Talarico et al (2007) [16] y Winblad et al (1997) [17] han realizado análisis de situaciones y mediciones acústicas en espacios educativos de diferentes tipos y locaciones. El disconfort encontrado se relaciona según Domínguez-Alonso et al 2019 [18] con la excesiva reverberación ocasionada por las extensas superficies reflectantes existentes en la mayoría de las aulas.

1.3 Antecedentes en el uso de materiales sustentables para la materialización de las placas

Quirós Rodríguez (2013) [19] plantea la necesidad del uso de materiales ecológicos para el diseño y producción de pantallas acústicas para carreteras de forma de evitar contaminaciones y daños ambientales, con su equipo caracterizaron el comportamiento acústico, midiendo coeficiente de absorción, perdida por transmisión y la absorción sonora de diversos materiales ecológicos

González Loeda (2017) por su parte [20] desarrolló un estudio vibroacústico de placas de tejidos naturales y resinas biodegradables, permitiendo la investigación del modelado mecánico de estos, para conseguir nuevas soluciones en aislamiento acústico, con cálculo del módulo de Young, mediante tres métodos diferentes para poder ofrecer una comparativa ente ellos y determinar un valor y del factor de pérdidas con predicción del aislamiento acústico. Con este estudio se muestran alternativas de aislamiento utilizando materiales biodegradables amigables al medioambiente.

Para el diseño en particular de la materialidad de nuestras fórmulas se contó como estado de la cuestión del trabajo de sobre la reinserción de residuos de la confección de prendas en trozos de 3x3cm en mezclas cementicias con agua desarrolladas por Magalhães, L. J. R. (2018) [21] en Portugal y de del Mar Barbero-Barrera, M., Pombo, O., & de los Ángeles Navacerrada, M. (2016) [22] que utilizaron diferentes residuos textiles con cales y agua como ligantes en España.

2. Hipótesis y objetivo del trabajo

Es posible generar placas para absorción acústica a partir de residuos provenientes de la industria textil con respuestas acústicas similares a las de productos de mercado que disminuyan al mismo tiempo la cantidad de residuos enviados a disposición final, generen puestos de trabajo y presenten condiciones estéticas innovadoras y aceptadas tanto por usuarios finales como por diseñadores.

El objetivo principal de este trabajo se basa en la caracterización de placas que utilizan residuos provenientes de la industria textil para su reinserción en un producto de la industria de la construcción como son las placas de revestimiento para confort acústico de los ambientes. Si bien en un primer momento se enfocó exclusivamente en los provenientes de la tejeduría plana de fibras acrílicas, con esta experiencia permitió avanzar en la adaptación de la propuesta a otras fibras.

3. Metodología para la fabricación de productos

1. Caracterización de los residuos: densidades, texturas, trabajabilidad, precauciones sobre su manipulación, fraccionamiento y ligazón.
2. Diseño de las placas y definición de las mezclas acorde a los residuos incluidos en cada tipología.
3. Recopilación de información de los productos de mercado para la misma función.
4. Verificación de disponibilidad de los residuos según su materialidad y etapa de generación.
5. Planteo de logísticas clasificación en origen, recolección y acopio de residuos, reducción de tamaño para facilitar el transporte y el descarte de piezas contaminadas.
6. Perfeccionamiento de sistemas de fraccionamiento y procesamiento de residuos, de moldes, máquinas y herramientas específicas.
7. Gestión para la provisión de insumos vírgenes.
8. Moldeo de productos, estiba, curado, secado de los productos húmedos de caras externas e internas húmedas, armado de bastidores.
9. Ensayos en laboratorio del producto originario en cámara reverberante y de tubo de Kundt para sus derivados.
10. Reelaboraciones de procedimientos según resultados y avances: se estudian tanto defectos de las piezas como inconvenientes en los procesos productivos para su remediación.
11. Testeo de aceptación con clientes.
12. Capacitación para fabricación de productos. Se plantean conceptos de inserción social y laboral.
13. Desarrollo de estrategias para la puesta en mercado, venta o uso aplicados a emprendimientos comerciales (vivienda, educación, ocio)
14. Desarrollo de los sistemas y métodos de comunicación de los productos en sus variantes para a) público interno académico de formación fundamentalmente técnica, con interés prioritario son los sistemas constructivos aplicados, b) público técnica externa y c) actores sociales en general, además de los originalmente planteados.

4. Diseño de las placas.

4.1 Tamaño de las placas

Las placas fueron pensadas para funcionar como aislación térmica a incorporar en muros de cerramiento de los edificios. En función de ello se decidieron dos medidas, una de 40x50cm para incorporar en sistemas constructivos en seco con estructura metálica y en muros húmedos de doble capa y otra medida de 33x57cm para uso de estructura de madera. En ambos casos se optó por un espesor de 3,2cm a partir de cálculos predictivos por su función y de piezas de mercado.

4.2 Fórmula de la mezcla de las placas y resultado obtenido

Luego de probar mezclas cementicias en base a fibras acrílicas y de poliéster, en ambos casos de orillo y falso orillo de la tejeduría plana, AC base, se observó que las primeras generaban un vinculación muy fuerte entre los insumos mientras que en el segundo se notó dificultad para mantener una ligazón que a la vez permitiera lograr una masa aireada, para satisfacer buenos índices de aislación térmica. La fórmula optada fue 1:0,25:1,75, cemento CP40, fibras de orillo y falso orillo en un 50% de cada una y agua en ese orden con aporte de colorante al 10% del cemento que aporta uniformidad de color y suavidad a la mezcla, con un consumo por m3 de 290 kg de cemento. Se alcanza como resultado placas con una cara lisa y otra cara con textura donde se distinguir los residuos incorporados. Ver Fig. 2.

4.3 Primeros ensayos realizados

El material logrado fue analizado en laboratorios del INTI en Propagación de Llama IRAM 11910:1994: 3,03 Clase RE2: Material de Muy Baja Propagación de Llama Clase A NBR 9442/1986 y de Densidad óptica de humos IRAM 11912:1995: 96 sin llama y 54 con llama Nivel 1: Materiales que generan Baja cantidad de Humos. Densidad Óptica Corregida e/1 y 136. Conductividad térmica IRAM 11559:1995: 0,106 W/m K ± 3%.

Fig. 2 Imagen del residuo de orillos y falsos orillos acrílicos y de un conjunto de placas. Autoría propia.

4.4 Primer estudio acústico realizado

Se realizó un ensayo de 10 m^2 de placas originales Texacem® en el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas LAL CIC del Gobierno de la Provincia de Buenos Aires. El objetivo del ensayo fue la obtención del coeficiente de absorción sonora en cámara reverberante αs de acuerdo con la norma IRAM 4065/2019 “Medición de absorción sonora en una cámara reverberante” equivalente a la ISO 354/2003, obtención de parámetros globales normalizados asociados con estos coeficientes dependientes de la frecuencia de acuerdo con las normas ASTM C 423-02a e ISO 11654. De acuerdo a la norma IRAM 4065 el material fue colocado sobre el piso de la cámara formando un rectángulo de 10,20 m^2 en 3,00 por 3,40 metros, el borde perimetral no fue sellado

acústicamente por lo que la superficie total utilizada para los cálculos incluyó la superficie de los bordes del arreglo ensayado resultando en 10,70 m^2 En la figura 3 se puede apreciar la disposición de ensayo.

El instrumental e instalaciones utilizadas fueron: a) medidor de nivel sonoro y analizador de espectros en tiempo real marca Brüel & Kjaer Type 2250, con pre amplificador de micrófono de la misma marca Type ZC0032 y micrófono de media pulgada misma marca Type 4189, b) software de medición de tiempo de reverberación misma marca Type BZ7227, c) fuente acústica de referencia misma marca Type 4231, d) amplificador de audio frecuencias marca Pyramid modelo PA1000x, e) fuentes sonoras de la cámara reverberante 2 bafles cúbicos de tres parlantes cada uno, f) cámara reverberante LAL CIC, los instrumentos trazables con patrones del Instituto Nacional de Tecnología Industrial INTI.

La sala reverberante utilizada posee un volumen de 189 m^3, una superficie total interior de 208 m^2 y tiene una forma de poliedro irregular de siete caras de base trapezoidal con techo de doble pendiente y planos enfrentados no paralelos además cuenta con 10 difusores sonoros colgados del techo aleatoriamente distribuidos, cinco placas acrílicas de forma rectangular ligeramente curvadas de 8 mm de espesor y 1,4 m^2 de superficie y cinco esferas de poliestireno expandido de 30 mm de espesor y 0,9 metros de diámetro. Durante el ensayo se utilizaron dos posiciones diferentes de las fuentes sonoras y seis posiciones del micrófono realizándose tres registros por cada combinación fuente micrófono de este modo cada tiempo de reverberación fue el resultado del promedio de 36 caídas siguiendo los recaudos expuestos en la norma antes citada este procedimiento fue llevado a cabo para dos condiciones la cámara vacía y la cámara con la muestra ensayada en su interior se constató que la temperatura y la humedad permanecieran constantes durante la realización del ensayo con los tiempos de reverberación medidos se calculó el coeficiente de absorción sonora αs adimensional para las bandas de tercios de octava comprendidos entre 100 y 5000 hz rango extendido. A partir de los valores de coeficiente de absorción sonora αs se calcularon los valores en bandas de octavas y los parámetros globales establecidos en las normas ASTM C423 2a ISO 11654/1997. En la tabla 4 y en el gráfico 4 (Figura 4) se presentan los valores calculados del coeficiente de absorción sonora para las bandas de tercios de octavas αs adimensional con sus correspondientes incertidumbres de medición U (αs).

Al final de la tabla se pueden leer los valores calculados para los parámetros globales NRC y SAA de acuerdo con lo especificado en ASTM 423 02a. En la tabla 5 y en el gráfico 5 (Figura 5) se presentan los valores calculados del coeficiente de absorción sonora práctico para bandas de octavas αp adimensional; al final de la tabla se puede leer el valor calculado del parámetro global coeficiente de absorción sonora práctico ponderado αw con los indicadores de forma y la clase de absorción acústica de acuerdo a lo especificado en la norma ISO 11654. La incertidumbre de medición está expresada como la incertidumbre expandida o basada en la incertidumbre estándar combinada multiplicada por un factor de seguridad de que igual K:2 suministrando un límite de confianza de 95 %.

Fig 3. Montaje de placas para el ensayo en cámara reverberante. Autoría LAL.

Frecuencia (Hz)	α_S	± U(α_S)
100	0,03	0,03
125	0,11	0,04
160	0,12	0,04
200	0,20	0,06
250	0,25	0,05
315	0,33	0,05
400	0,42	0,06
500	0,52	0,07
630	0,59	0,08
800	0,65	0,08
1000	0,68	0,07
1250	0,69	0,07
1600	0,76	0,07
2000	0,77	0,07
2500	0,79	0,07
3150	0,81	0,07
4000	0,82	0,07
5000	0,83	0,07
NRC	**0,55**	
SAA	**0,55**	

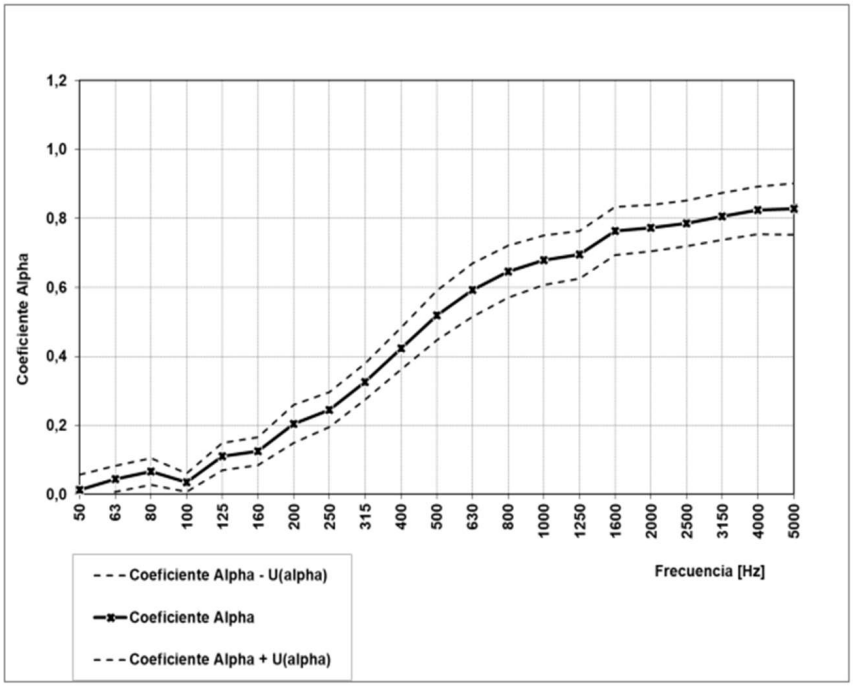


Fig 4. Tabla 4 y Gráfico 4. Coeficiente de absorción sonora práctico (α_s adimensional)

Frecuencia (Hz)	α_P
125	0,10
250	0,25
500	0,50
1000	0,65
2000	0,75
4000	0,80
α_W	0,50
Clase de absorción sonora	D

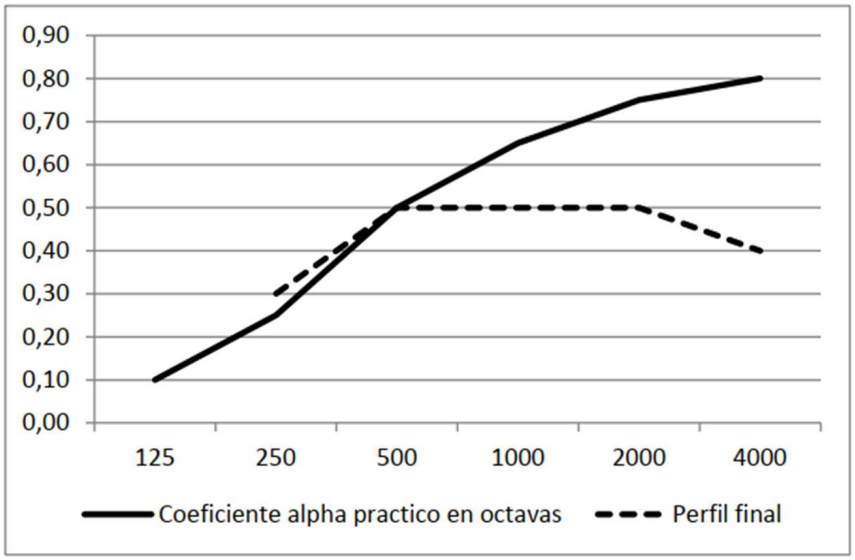


Fig 5. Tabla 5 y Gráfico 5. Coeficiente de absorción sonora práctico (αp adimensional) y clase de absorción sonora

4.5 Dificultades y remediación

Con la manipulación de las placas se evidenció que había desprendimiento de polvo de cemento, para remediarlo se realizaron pruebas con diferentes materiales de protección con resultado positivo como a) pintura al látex, b) membrana líquida para techos, c) terminación protectora para maderas al agua y d) a solvente y e) un polímero acrílico modificado que refuerza la unión del cemento con materiales difíciles. Previo al envío de las muestras para su ensayo acústico en el LAL en tubo de Kundt, por temas de seguridad para prevenir riesgos vinculados con incendios, se realizaron ensayos de propagación de fuego basada en ISO 11925-2: para Euroclass B-F, normativa que emula a los ensayos realizados en INTI bajo IRAM 11910:1994. En estos ensayos de anticipación se midió tanto la propagación de llama aplicada a probetas de 15 x 45 c 3,2 cm colocadas en forma vertical sobre bastidor midiendo el avance del efecto producido así como la percepción de la emanación de vapores. A partir de los resultados obtenidos se procedió a descartar las propuestas d) y e). Ver Fig. 6.

Fig. 6 Probetas ensayada a propagación de llama. Elaboracion propia.

4.6 Aparición de nuevos residuos

A partir de la experiencia desarrollada se comenzó a asistir técnicamente, junto con el equipo de antropología del Laboratorio Abierto de Innovación y Economía Circular de la Universidad de Quilmes, a la cooperativa Reciclando Sueños, en el partido de La Matanza Provincia de Buenos Aires que tiene como actividad y registro Clasificador de Actividades Económicas la Recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos no peligrosos. La cooperativa recibe residuos de telas de algodón y poliéster-algodón de la fabricación de sábanas de la empresa Arredo por fallos, cortes o remesas fuera de temporada o ciclo comercial, tipo de residuos que se suma a los relevados en Yajnes (2022) [3]. La cooperativa cuenta con equipamiento de alto poder de fraccionamiento denominado diablo, luego de ajustes técnicos generó, a partir del residuo, una materia prima secundaria con la que se prepararon nuevas probetas para ensayo en tubos de Kundt.

4.6 Capacitación a cooperativistas

Como prueba piloto de transferencia se llevó adelante la capacitación en laboratorio de la universidad a un grupo de diez integrantes de la Asociación Biblioteca Popular la Carcova que clasificaron residuos de tejeduría plana, los fraccionaron, prepararon las mezclas y fabricaron las placas ensayadas en el LAL. A su vez en este proceso el equipo aprendió de ellos los puntos críticos de cada etapa del proceso, para poder perfeccionar luego los métodos de corte pasando de tijeras a un equipamiento diseñado para el proceso que incluye el uso de una caladora con sierra para corte de textiles, asimismo se pasó del uso de moldes de madera utilizados en esta experiencia por otros termoformados.

5. Resultados y Discusión

En un primer paso se compara la absorción acústica del material original en base a fibras acrílicas (AC base) con las variantes sobre el mismo material base en el que se aplicaron terminaciones con Pintura látex, con membrana líquida de protección de techos y con protección de maderas al agua. Ver Tabla 1 y Figura 7 en la que se citan los 4 materiales con los valores alcanzados de coeficiente Alpha. No se

incluyen los resultados con cemento blanco ni colorantes dado que no presentaron variaciones significativas con el AC base.

Tabla 1. Coeficientes Alpha de absorción de AC base y AC base con diferentes terminaciones

frecuencia muestras	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
AC base	0,04	0,03	0,08	0,10	0,16	0,27	0,40	0,62	0,75	0,80	0,72	0,70	0,72	0,85	0,85	0,87	0,92	0,90
AC Pintura latex	0,06	0,07	0,12	0,15	0,25	0,32	0,47	0,54	0,61	0,58	0,57	0,56	0,54	0,51	0,50	0,50	0,53	0,52
AC membrana Liquido techos	0,07	0,09	0,13	0,16	0,20	0,24	0,32	0,39	0,43	0,48	0,49	0,52	0,52	0,53	0,57	0,58	0,65	0,78
AC protección maderas al agua	0,11	0,12	0,13	0,17	0,21	0,27	0,34	0,43	0,49	0,59	0,66	0,69	0,71	0,72	0,69	0,62	0,61	0,55

En todas las tres muestras con terminaciones aplicadas sobre el material AC base con posterioridad a su fabricación, se observa una modificación sustancial del perfil de absorción sonora. Esto es atribuible al carácter físico de la película superficial aplicada. La utilización de los recubrimientos genera una película continua y poco permeable sobre la cara expuesta y se advierte una reducción de la absorción entre en banda de 400 y 5000 Hz, coherente con el efecto de "sellado" de la superficie. Esto se debe a que la película disminuye la porosidad abierta en la interfase aire–material y aumenta la resistencia al flujo de aire en la capa superficial, lo que reduce las pérdidas viscosas y térmicas responsables de la disipación de energía sonora en materiales porosos. Puede comprobarse que los perfiles del material base y este mismo con las terminaciones aplicadas, poseen un comportamiento similar en la banda de 100 a 400 Hz. Asimismo, las muestras con peor desempeño en la banda de 1600 a 5000 Hz fueron AC Pintura Látex y AC Protección membrana líquida techos. En el caso de la muestra de AC Protección madera al agua, si bien se comporta menos absorbente en promedio que el AC base, presenta un incremento notorio de absorción en la banda comprendida entre 500 y 2000 Hz. para luego caer sensiblemente a medida que aumenta la frecuencia. Finalmente, la muestra AC Líquido Techos es la única que denota un ascenso continuo de la absorción acústica en toda la banda de frecuencias analizada, mostrando el mejor comportamiento de todas las muestras con terminación en la banda de los 2000 a 5000 Hz.

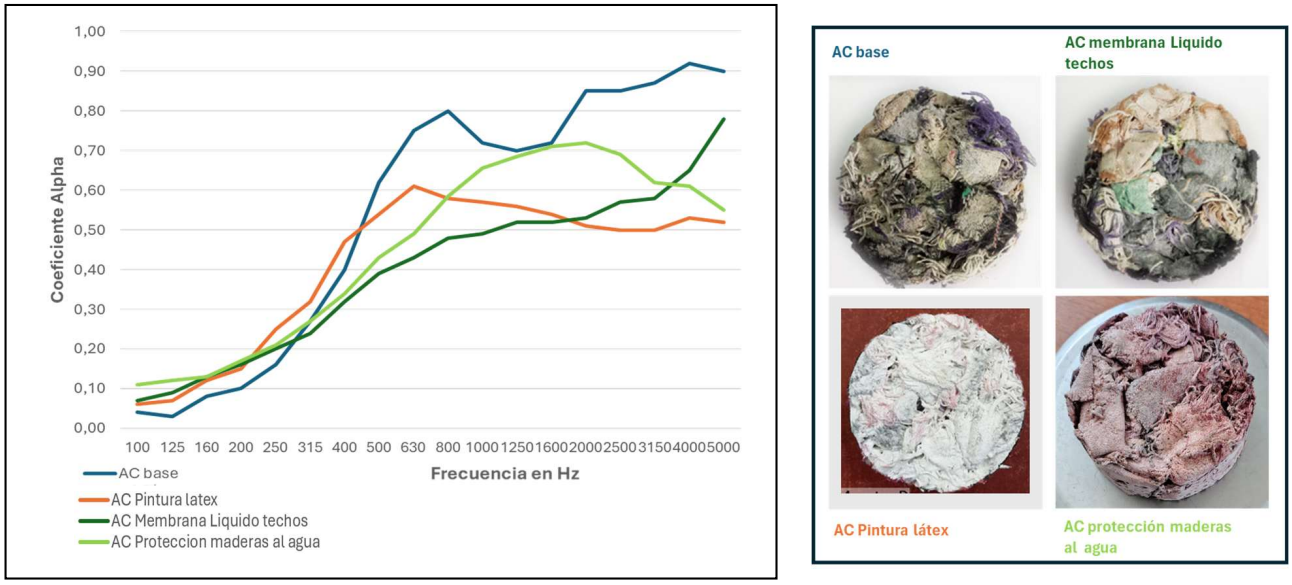


Fig. 7 Comparación de perfiles de absorción de AC base y AC base con variantes de materialidad. Elaboracion propia.

En un segundo paso se compara la absorción acústica del material original en base a fibras acrílicas (AC base) con las variantes de materialidad. Ver Tabla 2 y Figura 8. En todas las muestras se usó la misma dosificación, mientras el consumo de cemento paso de 290 kg/m3 en el AC base a 400 kg/m3 a usar fibras de poliéster y poliéster y algodón. En el caso de Poliéster Orillo y Falso Orillo se utilizó además un aditivo ligante del 10% del agua.

Tabla 2. Coeficientes Alpha de absorción de AC base y AC base con variantes de materialidad.

frecuencia muestras	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
AC base	0,04	0,03	0,08	0,10	0,16	0,27	0,40	0,62	0,75	0,80	0,72	0,70	0,72	0,85	0,85	0,87	0,92	0,90
Poliester Orillo y F Orillo	0,03	0,03	0,05	0,06	0,09	0,10	0,12	0,16	0,32	0,51	0,51	0,44	0,37	0,48	0,44	0,40	0,48	0,52
Algodón Poliester pulpa	0,11	0,10	0,11	0,13	0,15	0,18	0,22	0,29	0,38	0,56	0,58	0,58	0,60	0,67	0,67	0,67	0,72	0,79
Poliester pulpa	0,11	0,11	0,12	0,14	0,17	0,21	0,25	0,31	0,37	0,52	0,54	0,53	0,47	0,58	0,61	0,63	0,68	0,64

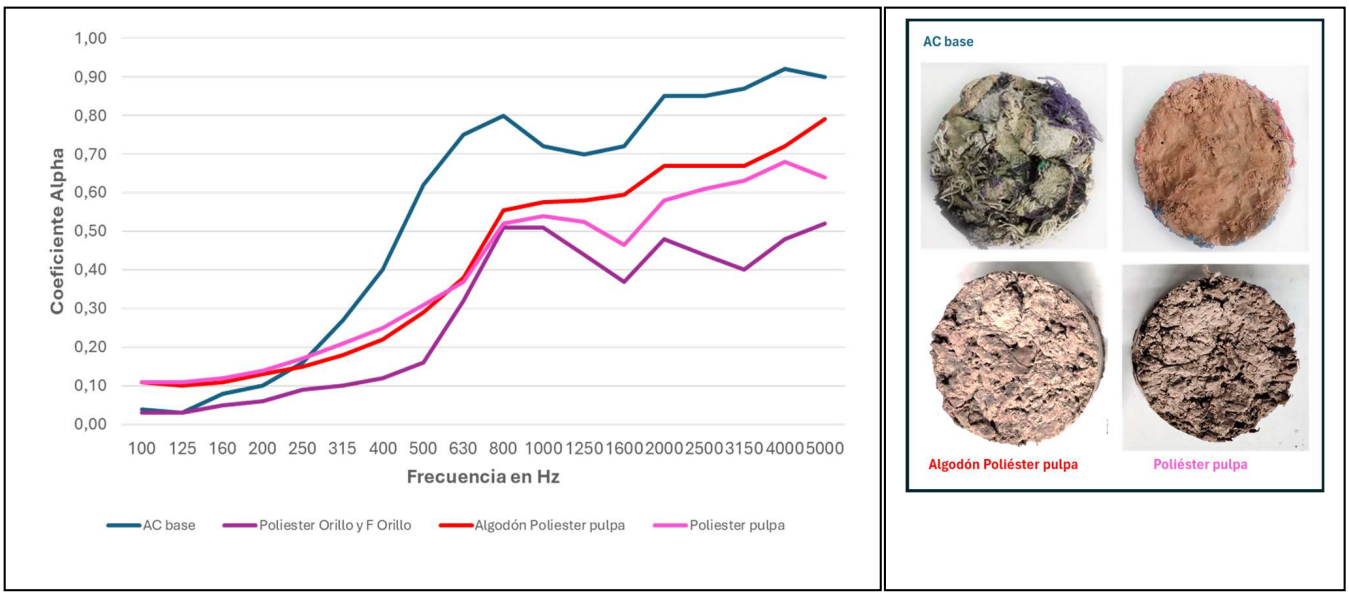


Fig. 8 Comparación de perfiles de absorción de AC base y variantes Poliéster. Elaboracion propia.

Similar a lo ocurrido con la aplicación de terminaciones, la introducción de nuevos materiales a la muestra original modifica el perfil de absorción acústica de AC base de manera negativa. Se evidencia que las diferencias de microestructura fibrosa y de interacción con el aglomerante (cemento) son el factor determinante de la respuesta acústica. Parámetros físicos como porosidad abierta, diámetro y empaquetamiento de las fibras, resistencia al flujo de aire, influyen en la disipación de energía sonora. Estructuras más abiertas y con resistencia moderada favorecen la absorción, mientras que estructuras con resistencia elevada o con canales obstruidos por el aglutinante empeoran el comportamiento absorbente del sonido. En nuestro caso, variaciones locales en la distribución del cemento y el grado de penetración entre fibras explican que muestras con composición nominal similar podrían exhibir diferencias en las curvas de absorción. A diferencia del caso con terminaciones, todos los perfiles presentan una curva ascendente de absorción a medida que la frecuencia aumenta. Puede observarse que el material Algodón Poliéster Pulpa muestra el mejor comportamiento mientras que el Poliéster Orillo F Orillo es el que tiene peor desempeño de las muestras modificadas.

6. Conclusiones y desafíos

El diseño y los materiales empleados en la elaboración de las placas cementicias le otorgan un buen desempeño en la absorción de energía acústica. Esta característica permite emplear dichas placas como acondicionador acústico para recintos, reduciendo los tiempos de reverberación y obteniendo una mejora en el confort acústico, según ensayos normalizados realizados en CIC-LAL. Las placas ofrecen una alternativa estética a los productos tradicionales de mercado personalizable en tonos y tamaños.

En este trabajo se pudo constatar que la terminación superficial de los materiales (pinturas y membranas) actúa como un parámetro de diseño acústico tan relevante como su propia composición (tipo de fibra y proporción de aglomerante, etc). De igual manera se puede afirmar que la adición de materiales a la composición base original modifica el comportamiento del mismo frente al sonido incidente, reduciendo su capacidades de absorción en promedio, aun así el material ofrece un aporte al confort acústico.

Los principales desafíos se centran en su escalado junto con la logística de recolección, la trazabilidad del residuo así como en la capacitación de mano de obra y el proceso productivo desde el fraccionamiento de las materias primas hasta la placa final y la búsqueda de terminaciones que minimicen la disminución de absorción acústica.

Con relación al rendimiento acústico, y a la respuesta al producto de posibles usuarios finales y profesionales, se espera contar en el transcurso de este año con la medición in situ de un espacio educativo con y sin placas, a cargo de los técnicos del LAL CIC, para definir próximos pasos tanto técnicos como comerciales. Así mismo se propone seguir caracterizando el material con menor capacidad de absorción y medirlo para aislación dado que tiene además mayor densidad.

Por otro lado el reemplazo de aglomerantes como el cemento es un desafío a encarar en pos de la sustentabilidad con el antecedente en Atanasoska, K. (2025) [23] quien desarrolla, en Mar del Plata, placas para aislación térmica reinsertando productivamente residuos de confección de buzos de algodón frizado aglutinados con el almidón residual de la producción industrial local de papas cortadas para frituras y aditivos para resolver la respuesta a fuego del material.

7. Citas y referencias

[1] Lockuán Lavado, Fidel Eduardo (2013) La industria textil y su control de calidad, ii. Fibras textiles. Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported. Basada en una obra en http://fidel-lockuan.webs.com.

[2] Hollen, Norma (2010) Introducción a los textiles. México. Limusa.

[3] Ángeles Rojas, J. S., & Orozco Hernández, M. E. (2015). Propuesta de manejo de residuos generados por la actividad textil en la localidad de San Andrés Ocotlán, municipio de Calimaya, Estado de México. http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/ 27476.

[4] Linder, M., & Williander, M. (2017). Circular business model innovation: inherent uncertainties. Business Strategy and the Environment, 26(2), 182-196.

[5] Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M. (2015). ¿How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European Union and the world in 2005. Journal of Industrial Ecology, 19(5), 765-777.

[6] Lewandowski, M. (2016). Designing the business models for circular economy—Towards the conceptual framework. Sustainability, 8, 3-28

[7] Senge, P. M., & Carstedt, G. (2001). Rumbo a otra revolución industrial. Gestión, 6(3), 14-25.

[8] Tröger, D; Becerra, A; Busnelli, R; Yajnes, M; Williams, F; Braun, A. Exploring eco-industrial development in the global south: recognizing informal waste-picking as urban-industrial symbiosis?, Cleaner Waste Systems, Vol5, (2023), 100096, ISSN 2772-9125, https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100096.

[9] Yajnes, M. E., Becerra Araneda, A. A., Busnelli , R. R., Posse, C. M., Tomeo, D., & Armas, A. (2024). Análisis de rendimiento para absorción acústica de placas basadas en residuos textiles aglutinados. ECOS, 5(2), 2-17. https://doi.org/10.36044/EC.V5.N2.1

[10] Pujol, S; Levain, JP; Houot, H; Petit, R; Berthillier, M; Defrance, J; Lardies, J; Masselot, C and

Mauny,F. (2013) The New York Academy of Medicine) (“Association between Ambient Noise Exposure and School Performance of Children Living in An Urban Area: A Cross-Sectional Population-Based Study”.

[11] Wilson, O; Valentine, J; Halstead, M; McGunnigle, K; Dodd, G; Hellier, A; Wood, J y Simpson R; Oticon Foundation in New Zealand, (2002). “The effects of classroom and environmental noise on children’s academic performance” - Bridget Shield and Julie Dockrell - 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem 2008). (“CLASSROOM ACOUSTICS A New Zealand Perspective”.

[12] Pillay, D y Vieira, B. (2020) Noise, screaming and shouting: Classroom acoustics and teachers’ perceptions of their voice in a developing country.South African Journal of Childhood Education | Vol 10, No 1 | a681 | DOI: https://doi.org/10.4102/sajce.v10i1.681 | © 2020 Dhanashree Pillay, Bianca L. Vieira | This work is licensed under CC Attribution 4.0

[13] Kristiansen, J; Lund, P; Persson, R; Shibuya, H; Møberg Nielsen, P y Scholz; S. (2014) A study of classroom acoustics and school teachers' noise exposure, voice load and speaking time during teaching, and the effects on vocal and mental fatigue development. The National Research Centre for the Working Environment, Lersø Parkalle 105, 2100, Copenhagen, Denmark, jkr@nrcwe.dk.PMID: 24464557- DOI: 10.1007/s00420-014-0927-8.

[14] Klatte, M., Hellbrück, J., Seidel, J., and Leistner, P. (2010c). Effects of classroom acoustics on performance and well-being in elementary school children: a field study. Environ. Behav. 42, 659–692. doi: 10.1177/0013916509336813.

[15] Leena M. Rantalai and Eeva Sala. Effects of Classroom Acoustics on teachers' Voices. Volume 22, Issue 3-4.First published online December 1, 2015. SAGE JOURNALS https://doi.org/10.1260/1351-010X.22.3-4.243

[16] Talarico, M., Abdilla, G., Aliferis, M., Balazic, I., Giaprakis, I., Stefanakis, T., et al. (2007). Effect of age and cognition on childhood speech in noise perception abilities. Audiol. Neurotol. 12, 13–19. doi: 10.1159/000096153.
Winblad, U., and Dudley, E. (1997). Primary School Physical Environment and Health: WHO Global School Health Initiative. Geneva: World Health Organization.

[17] Domínguez-Alonso, J; López-Castedo, A; Núñez-Lois, S; Portela-Pino, I y Vázquez-Varela, E. Rev. Esp. Salud Pública vol.93 Madrid (2019) “Disturbance of the voice in teachers”.

[18] Quirós Rodríguez, R.A. (2013). Estudio de pantallas acústicas elaboradas a partir de Green Composites. UP València. http://hdl.handle.net/10251/33640.

[19] González Loeda, L. (2017). Modelado vibromecánico del ecocomposites textiles para aislamiento acústico. Universitat Politècnica de València. http://hdl.handle.net/10251/87905

[20] del Mar Barbero-Barrera, M., Pombo, O., & de los Angeles Navacerrada, M. (2016). Textile fibre waste bindered with natural hydraulic lime. Composites Part B: Engineering, 94, 26-33.

[21] Magalhães, L. J. R. (2018). Estudo do potencial de aplicação de resíduos têxteis em elementos de betão leve (Doctoral dissertation, Universidade de Tras-os-Montes e Alto Douro (Portugal)).

[22] Atanasoska, K. (2025). Fabricación de placas térmicas de residuos textiles y almidón y su aplicación a una construcción en Mar del Plata. Arquitecno, (24), 1–7. https://doi.org/10.30972/arq.247995 (Original work published 27 de diciembre de 2024)

8. Agradecimientos

A la UBA que hace posible la financiación, a UNSAM que dispone de sus instalaciones, ambas instituciones que cubren los RRHH y a los pasantes, alumnos y voluntarios de investigación que hacen posibles los desarrollos así como las industrias que aportan sus residuos. Al Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas del Gobierno de la Provincia de Buenos Aires por el trabajo de sus profesionales y la disponibilidad de sus instalaciones.

9. Registros y reconocimientos

TEXaCEM marca registrada DI-2023-264-APN-DNM#INPI Modelo/Diseño Industrial INPI Nº102884 /102885.Seleccionada INNOVAR 2022 Investigación aplicada y 2023 Diseño innovador con exhibición e inclusión en para catálogo.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Comparación del Comportamiento Acústico de la Envolvente en Dos Tipologías de Vivienda en Altura en Tucumán

Agustina Cazón Narvaez [†,‡,§,1], **Isabel Juarez** [†,‡,§,2], **Beatriz Garzón** [†,‡,§,3], **Víctor Luis Cancino** [†,‡,4]

[†] Grupo de Hábitat Sustentable y Sostenible (GHabSS)

[‡] Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional de Tucumán (UNT), Tucumán

[§] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET)

[1] agus.cazon93@gmail.com, [2] isabeljuarez.arq@gmail.com, [3] bgarzon06@gmail.com, [4] luiscancino1892@gmail.com

Resumen Este estudio evalúa el comportamiento de la envolvente acústica en dos viviendas de edificios vecinos adyacentes, ubicadas en los contrafrente y expuestas a condiciones acústicas similares, en la ciudad de San Miguel de Tucumán. Esta investigación se enmarca dentro de la metodología cuantitativa —mediciones instrumentales. Los resultados obtenidos permiten caracterizar y comparar las condiciones acústicas de confort en ambos edificios, el impacto de las actividades urbanas y el entorno sobre cada vivienda, así como evaluar cómo las condiciones de diseño, tipología y soluciones constructivas influyen en el confort acústico de los usuarios. A partir de estos estudios se podrán proponer estrategias y propuestas sustentables que permitan mejorar calidad acústica. Se concluye que las condiciones de diseño y tipología arquitectónica en ambos casos, así como las soluciones constructivas acústicamente registran resultados variados en relación a los aspectos de aislación y tiempo de reverberación en el confort acústico.

Palabras clave: calidad acústica; reducción acústica; acústica arquitectónica, sustentabilidad.

Abstract This study evaluates the acoustic envelope performance in two dwellings located in adjacent neighboring buildings, positioned at the rear façade and exposed to similar acoustic conditions, in the city of San Miguel de Tucumán. The research is framed within a quantitative methodology—instrumental measurements. The results obtained allow for the characterization and comparison of the acoustic comfort conditions in both buildings, the impact of urban activities and the surrounding environment on each dwelling, as well as the assessment of how design conditions, typology, and constructive solutions influence the users' acoustic comfort. Based on these studies, sustainable strategies and proposals can be put forward to improve acoustic quality. It is concluded that the design conditions and architectural typology in both cases, as well as the constructive solutions applied, yield varied results in relation to sound insulation and reverberation time regarding acoustic comfort.

Palabras clave: acoustic quality; noise reduction; architectural acoustics; sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

Entre las temáticas actuales que se han convertido en foco de creciente discusión en el ámbito de la habitabilidad urbana, resulta fundamental considerar las condiciones en las cuales esta se desarrolla, constituyendo así un punto esencial para la salud y el desarrollo óptimo de las personas a lo largo de todas las etapas de la vida. Según Ajanovic et al. [1] se comprobado que las malas condiciones de habitabilidad exponen a los niños a serios riesgos para la salud. En este sentido, los factores asociados a la materialización de los espacios habitacionales —como los materiales de construcción inadecuados o incorrectos, como así también los defectos de edificación y la falta de un criterio ambiental que permita un diseño adecuado — pueden generar diversas problemáticas: hacinamiento, la falta de ventilación, la mala calidad del aire, la inadecuada disposición de basura y de los sistemas de recogida, la defectuosa conservación y preparación de los alimentos, las temperaturas extremas, los niveles altos de ruido, el exceso de humedad, la mala iluminación y las plagas, todo ello impacta significativamente en la salud.

Bajo esta óptica, el impacto del ruido sobre las personas está condicionado por numerosos factores. Según Morrongiello [2], a los factores que pueden causar molestia o afección como la intensidad sonora y el tiempo de exposición, se les suma las características propias de la fuente sonora incidente y por otra parte, la dimensión subjetiva, ya que, si es vivenciado de manera negativa, podrían producirse efectos adversos para el bienestar de las personas. Mientras, en el ámbito fisiológico, diversos estudios recopilados y analizados en 2021, [3] muestran una relación entre la concentración de cortisol en pacientes hospitalizados con los niveles de ruidos a los que estuvieron expuestos. Es decir, existe una relación estadística significativa entre la concentración de cortisol y los niveles de ruido. Tambo [4] respalda estos hallazgos y establece que los niveles elevados y persistentes de cortisol pueden suprimir la función de las células inmunes, reducir la producción de citoquinas proinflamatorias —necesarias para combatir infecciones— y alterar el balance entre diferentes tipos de células inmunes. De este modo se reconoce la conexión entre el ruido ambiental, el estrés y la salud inmunológica, lo que subraya la importancia de abordar la contaminación acústica no solo como molestia ambiental, sino también como un agente que impacta directamente en la salud pública.

2. DESARROLLO

La contaminación ambiental no es un fenómeno ajeno a los países emergentes en América Latina. Freire-Vinueza et al. [5] analisa que la trayectoria de la contaminación en la región ha tenido una tendencia creciente en relación con el desarrollo económico de cada país. Estos autores señalan que “los países que poseen los mayores niveles de contaminación son los países de altos ingresos, estos registran una tasa de decrecimiento del 1.1 % de la degradación ambiental”. Asimismo, advierten que incluso los países de bajos ingresos muestran una tendencia de creciente contaminación en relación con el mismo indicador de crecimiento: “en los tres países de menores ingresos la tasa fue del 3 % y en la región latinoamericana fue de 1.4 % en este mismo periodo” [5, p. 11].

Por su parte, Romero-Villacrés et al. [6] analiza que “en los últimos 50 años, en América Latina el crecimiento urbano ha aumentado en varios países hasta un 80%, como resultado de un éxodo rural hacia las ciudades. La urbanización, el crecimiento económico y la popularización del automóvil, son las principales fuentes de ruido en entornos urbanos.” [6, p. 68]. De acuerdo con Khan et al. [7], el ruido del tráfico proviene principalmente de los motores de los vehículos, los sistemas de escape, los neumáticos y la interacción de los conductores en las calles; en la mayoría de los casos, estas fuentes sonoras sobrepasan los límites permisibles de las normativas tanto nacionales como internacionales.

El crecimiento de la urbanización y la incesante que la acompaña requieren, en consecuencia de una planificación constructiva deliberada, que contemple aspectos desde el emplazamiento del proyecto hasta la edificación y el consumo energético, con el fin de brindar recomendaciones orientadas a mejorar el desempeño ambiental. Como señala Flores en su artículo [8], varios países de la región —entre ellos Argentina, Chile, México, Colombia, Guatemala, Costa Rica— se han incorporado a estas políticas públicas. No obstante, advierte también que:

> La construcción sostenible en Latinoamérica no ha avanzado al mismo ritmo. Un ejemplo son las escasas iniciativas de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). En cuanto al sector construcción, se han limitado al desarrollo de soluciones puntuales, tales como cerramientos, tabiquería liviana, aislantes térmicos, entre otros; dejando de lado propuestas más trascendentes como son las de tipo estructural. [8, p. 167]

Dentro de este panorama, entre los diversos factores contaminantes es que debe considerarse la contaminación acústica como uno de los agravantes del deterioro ambiental, cuya incidencia aumenta en relación a la urbanización y afecta a los habitantes. Como afirman Stankov y Stepančev [9], el ruido constituye un estresor ambiental general para el sistema neuroendocrino, lo que conduce a la activación del sistema simpático-adrenal-medular, al aumento de los niveles plasmáticos de cortisol y catecolaminas, a la vasoconstricción, al incremento de la presión arterial y, en consecuencia, al desarrollo de enfermedades cardiovasculares. En esta línea, Figueroa Garzón [10] sostiene que “la comprensión de esta dinámica acústica se torna fundamental para abordar con eficacia los desafíos

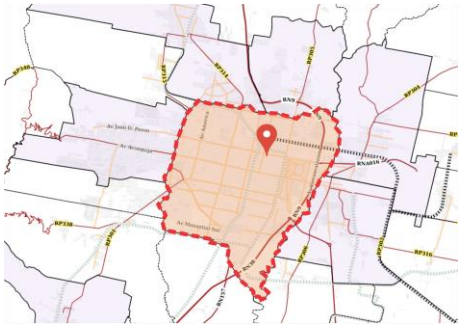
asociados al ruido tanto en entornos urbanos como rurales, buscando establecer un equilibrio entre el desarrollo socioeconómico y la preservación del entorno sonoro".

Teniendo en cuenta que las viviendas siguen siendo los principales espacios habitados, donde se desenvuelve la vida cotidiana, y que en los últimos tiempos han pasado a funcionar como contenedores de diversas actividades —tanto laborales como recreativas—, resulta pertinente revalorizarlas para este estúdio.

En este marco, en el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento de la envolvente acústica en dos viviendas pertenecientes a dos edificios vecinos adyacentes, ubicadas en los contrafrentes y expuestas a condiciones acústicas similares, en la ciudad de San Miguel de Tucumán, en la provincia de Tucumán, Argentina. Este centro urbano es uno de los principales del noroeste argentino, reconocido por su relevancia histórica y potencial desarrollo, así como su primacía urbana en el país, siendo uno de los núcleos poblacionales más poblados de la región del noroeste argentino. De esta manera, se busca comprender como se manifiesta el fenómeno acústico en la región, en la construcción tradicional de la región.

3. METODOLOGÍA

Las unidades de vivienda estudiadas se encuentran en el municipio de San Miguel de Tucumán, situadas en el consolidado barrio Norte. Como se muestra en la Figura 1, ambos casos se ubican sobre la calle Santa Fe 800, siendo unidades habitacionales de diferentes edificios, contiguos entre sí, que comparten como principal característica su localización en el contrafrente del terreno, con vistas al corazón de manzana. El frente de ambos edificios da a la Subdirección de Deportes, institución que ocupa la totalidad de la manzana, y se encuentran próximos al cinturón de hierro de la ciudad, la Estación de Trenes y Depósitos Fiscales.



(a) Ubicación de los casos en el Municipio de San Miguel de Tucumán.

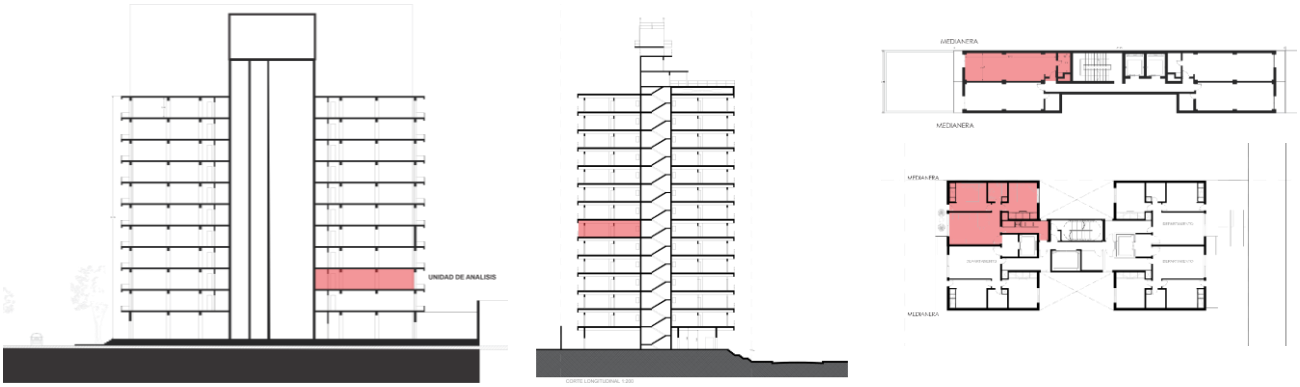
(b) Ubicación de ambos casos de estudio vecinos.

(c) Perfil 3D adaptado de Google Maps.

Figura 1: Presentación de los casos de Estudio.

Actualmente, Barrio Norte es una de las zonas con crecientes construcciones de edificios en altura destinados a diversas funciones. Se caracteriza principalmente por ser un sector mixto. Con una fuerte presencia comercial y numerosos servicios de salud. Sobre la misma calle se destacan edificios como el Colegio Nacional Bartolomé Mitre, la Subsecretaria de Deportes, la Policía, oficinas administrativas (Novedades Salariales), una gran sucursal de la cadena de supermercados Vea, la Prensa Social, el Seminario Mayor Arquidiocesano Nuestra Señora de la Merced y San José, el edificio de la Ex Legislatura de Tucumán.

Los dos casos analizados corresponden a edificios vecinos emplazados sobre la calle colectora Santa Fe, con tráfico vehicular principalmente particular. Por esta calle circulan además las líneas de colectivos urbanos 1 e interurbana 100 y 101. Sobre la Avenida Salta circulan la línea urbana 8, 9, 17 e interurbana 130; lo cual incrementa la densidad de tránsito en la zona. La proximidad a estas avenidas, la Avenida Salta y la Avenida Sarmiento que constituyen ejes estructurantes de la ciudad, potencia la circulación tanto peatonal como vehicular, contribuyendo de manera significativa a los niveles de ruido urbano, a pesar de que el área mantiene un carácter predominantemente residencial.



(a) Corte del Caso 1. (b) Corte del Caso 2. (c) Plantas del edificio del Caso 1 (superior) y el caso 2 (inferior)

Figura 2: Planimetría y ubicación de los casos de estudio.

En la Figura 2 se presenta la ubicación y distribución de las unidades en ambos edificios. Las diferencias en los programas arquitectónicos resultan notorias: el Caso 1 corresponde a un monoambiente, es decir, un solo espacio amplio que unifica cocina-comedor y dormitorio, con una división virtual de los ambientes, por separado mantiene el baño único. En cambio, el Caso 2 corresponde a un departamento de dos dormitorios con living-comedor, baño y cocina separadas, que cuenta con dos accesos (principal y secundario).

Para desarrollar la comparación entre los casos analizados, este estudio de la calidad acústica se centró en el relevamiento exterior como en los espacios interiores de los departamentos seleccionados. El enfoque metodológico se estructuró en distintas etapas de carácter cuantitativo. Para la evaluación de los indicadores de ruido ambiental se emplearon los métodos analítico y deductivo. En primer lugar, se realizaron mediciones de niveles sonoros empleando un Sonómetro Digital Integral marca Lutron (Integrating Sound Level Meter SL-4035SD) de clase 2 y un Calibrador multifunción B&K (Bruel & Kjaer) Tipo 4226, según las recomendaciones de la NORMA IRAM 4113: “Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental”:

- IRAM 4113-1/2009: Parte 1 - Magnitudes básicas y métodos de evaluación. [11]
- IRAM 4113-2/2010: Parte 2 - Determinación de niveles de ruido ambiental. [12]

Las mediciones, se realizaron de acuerdo a los siguientes parámetros acústicos, según la Norma IRAM 4113:

- Nivel Sonoro Continuo Equivalente (LAeq): indicador que permite describir la contaminación acústica en una ubicación específica, representando el nivel de ruido acumulado durante un período estandarizado para dicho intervalo. Su cálculo se expresa en la siguiente fórmula (1):

$$L_{Aeq.T} = 10 \cdot lg \left[\frac{1}{T} \int_{f1}^{f_2} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 \cdot dt \right] \quad (1)$$

Donde T es el tiempo de observación durante el cual el nivel sonoro es Li ± 2,5 dB(A).

- Niveles Percentiles L10 y L90: expresan el nivel de ruido superado durante un determinado porcentaje del tiempo de medición. Cuanto menor sea el porcentaje del tiempo, más elevado será el nivel sonoro a superar. El percentil L90 define al nivel sonoro superado durante el 90% del tiempo de medición y suele utilizarse para la medición de los niveles de ruido de fondo. En cambio, el valor de L10 es el nivel que se excede durante el 10% del tiempo y considera los molestos picos de ruido.

Además, se aplicó la Norma IRAM 4043-1/2003 [13], “Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1 - Aislamiento al ruido aéreo”. En ella, los datos de aislamiento se expresan mediante el Índice de Reducción Sonora Compensado” (Rw). Aunque no existen valores de Rw aconsejados para una fachada, en la Norma IRAM 4044(4) [14], “Protección contra el ruido en edificios. Requisitos de aislamiento acústico mínimo. Método de medición y clasificación. Cerramientos y aberturas, verticales y horizontales” establece valores mínimos recomendados para muros divisorios y medianeros.

Para contrastar con valores admisibles en vivienda, se adoptaron los parámetros recomendados en la norma IRAM 4062 (2016) “Ruidos Molestos al Vecindario”, que establece límites según franjas horarias. [15]

Asimismo, se efectuaron mediciones de Tiempos de Reverberación, siguiendo las recomendaciones de las Normas IRAM 4109, adaptada de las normas ISO 3382. El instrumental utilizado incluyó: Micrófono de Medición Behringer ECM8000; Tipo: Condensador; Patrón polar: Omnidireccional; Impedancia: 200 ohms; Sensibilidad: 70 dB; Respuesta de frecuencia: 20 Hz - 20 kHz. Una Placa de Sonido Externa Line 6. Software de análisis de Tiempo de Reverberación "Aurora" de Angelo Fariña como plugin para Audacity.

Además, se adoptaron los siguientes parámetros:

- Respuesta (al) impulso: Gráfico del Nivel de Presión Sonora en función del tiempo como resultado de excitar el recinto con una función delta de Dirac.
- Tiempo de reverberación: Es el tiempo, expresado en segundos, que requeriría el nivel de presión sonora para decaer en 60 dB, a una tasa de decaimiento obtenida por una regresión lineal de mínimos cuadrados, de la curva de decaimiento medida desde un nivel 5 dB por debajo del nivel inicial hasta 35 dB por debajo.

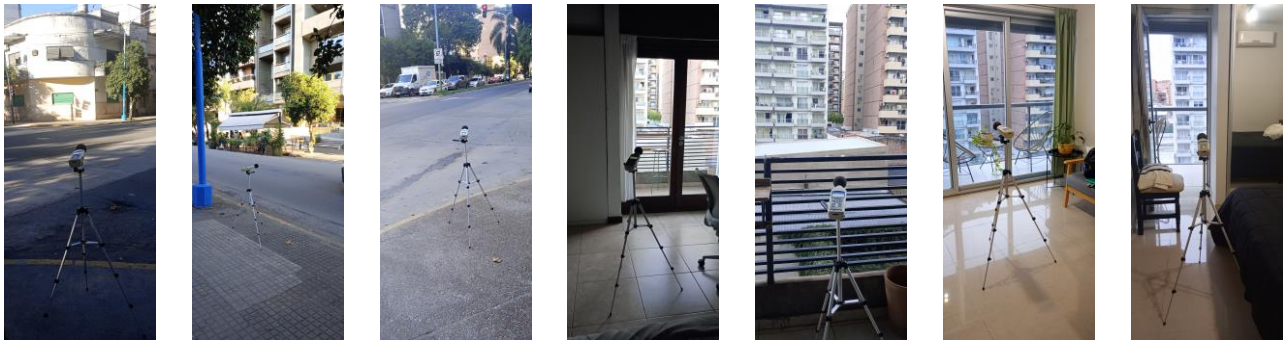
Las mediciones de Tiempo de Reverberación (TR60) se realizaron utilizando el método de respuesta por impulso. Los tiempos normalizados adoptados para la comparación corresponden con el rango de 1,2 a 1,5 segundos, establecidos para salas polivalentes según la Norma IRAM 4065.

Debido a las dimensiones reducidas del departamento, se ubicó el micrófono en el centro de cada habitación. Para cada espacio se tomaron mediciones a partir de dos fuentes sonoras, con el objetivo de generar una fuente sonora superior en 60 dB(A) del ruido de fondo.

4. RESULTADOS

4.1 Mediciones sonoras en espacios exteriores

Las mediciones exteriores se realizaron en tres puntos de la vereda frente a la fachada de los edificios analizados. En la figura 3 se presentan las condiciones de medición con el instrumental utilizado.

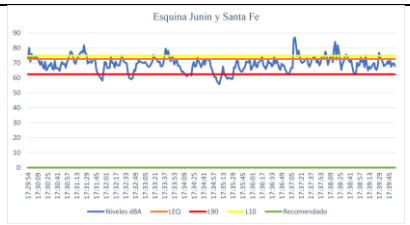
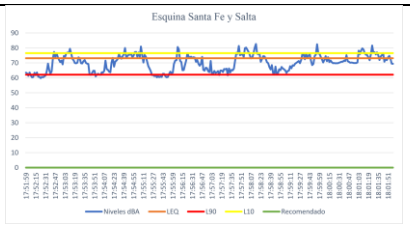
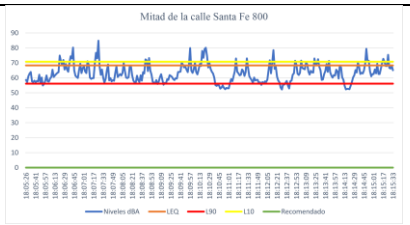


(a) Fotos del relevamiento exterior. (b) Fotos del relevamiento interior en ambos casos.

Figura 3: Fotos del Relevamiento.

En la Tabla 1 se consignan los resultados obtenidos durante las horas pico de la tarde (entre 17:00 a las 19:00 horas), considerando puntos de medición en las esquinas y en mitad de la vereda del sitio de estudio.

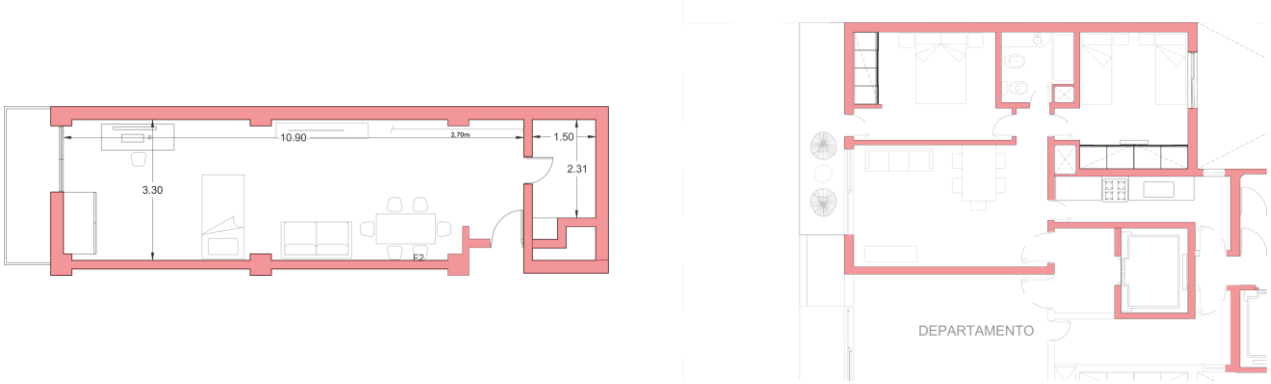
Tabla 1: comparación de los resultados de las mediciones exteriores.

Esquina Junin y Santa Fe			Mitad de la Cuadra			Esquina Santa Fe y Salta		
								
Leq: 72,6 dB(A)	L10: 74,7 dB(A)	L90: 62,4 dB(A)	Leq: 73,1 dB(A)	L10: 76,5 dB(A)	L90: 62,1 dB(A)	Leq: 68,3 dB(A)	L10: 70,8 dB(A)	L90: 56,1 dB(A)

Los resultados muestran niveles que superan los valores máximos recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para espacios exteriores, establecidos en 55 dB(A). En los tres puntos medidos se registraron valores percentiles en la mayoría de los casos por encima de 70 dB(A).

4.2 Mediciones sonoras en espacios interiores

Las mediciones interiores se efectuaron en los locales habitables de cada unidad, así como en los espacios comunes de uso exclusivo y de uso público (distribuidores de las Plantas Tipo y la Planta Baja). La distribución de ambas unidades habitacionales se muestra en la Figura 4.



(a) Planta del Caso 1. (b) Planta del Caso 2.

Figura 4: Planimetría en planta de los casos de estudio.

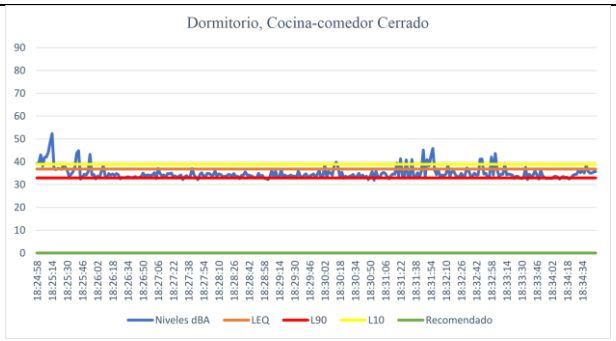
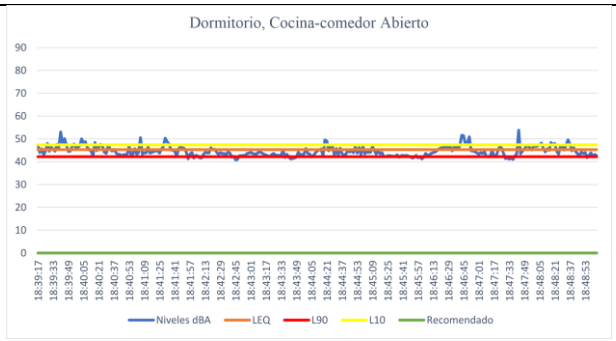
En el caso 1, se trata de un monoambiente en un edificio de estructura en esqueleto de hormigón armado con cerramientos de ladrillo hueco revocado en ambas caras. Los muros de cerramiento poseen una terminación de enlucido con pintura látex blanca, la unidad carece de cielorraso, dejando la terminación de la losa a la vista, así como también la estructura.

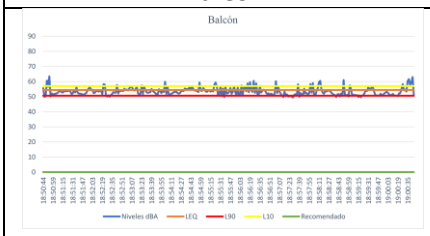
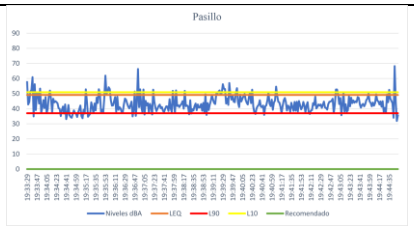
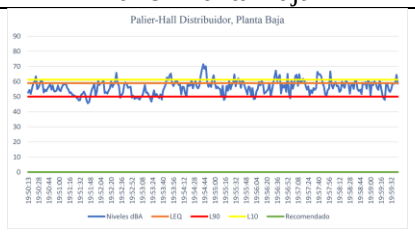
En el caso 2, la unidad cuenta con un programa más amplio, con dos dormitorios, un estar-comedor con cocina separada y un solo núcleo sanitario. Los cerramientos están revocados con látex blanco en todas las terminaciones.

4.2.1 Caso 1 – Resultados

Una vez registrado el relevamiento con instrumental normado, se calcularon los distintos indicadores acústicos en los puntos seleccionados y se trasladaron a gráficos de niveles sonoros, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: comparación de los resultados de las mediciones interiores y espacios comunes.

Dormitorio-Cocina-Comedor Cerrado			Dormitorio-Cocina-Comedor Abierto		
					
Leq: 36,8 dB(A)	L10: 38,9 dB(A)	L90: 32,9 dB(A)	Leq: 45,3 dB(A)	L10: 47,4 dB(A)	L90: 42,2 dB(A)

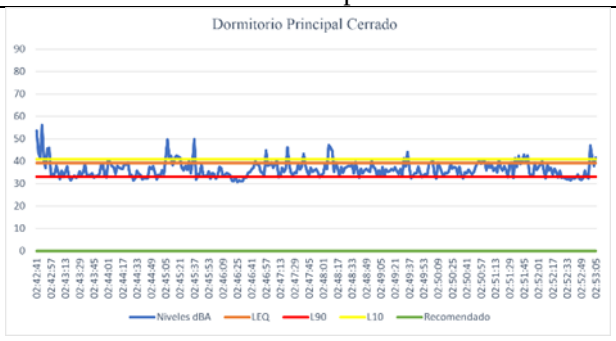
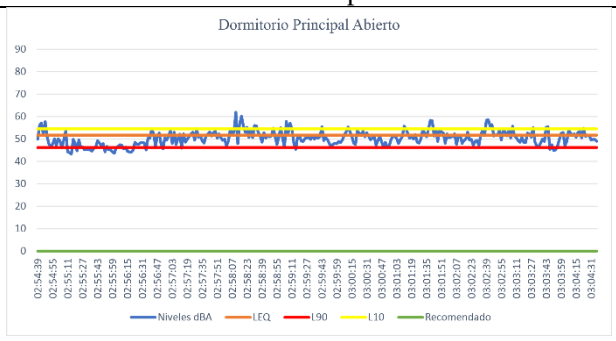
Balcón			Palier			Palier Planta Baja		
								
Leq: 54,4 dB(A)	L10: 57,0 dB(A)	L90: 50,6 dB(A)	Leq: 49,1 dB(A)	L10: 50,9 dB(A)	L90: 37,0 dB(A)	Leq: 58,9 dB(A)	L10: 61,2 dB(A)	L90: 50,0 dB(A)

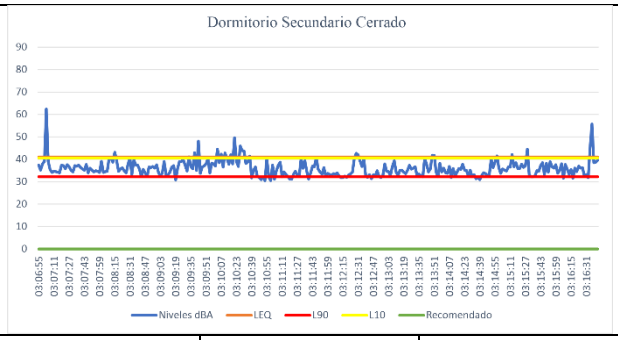
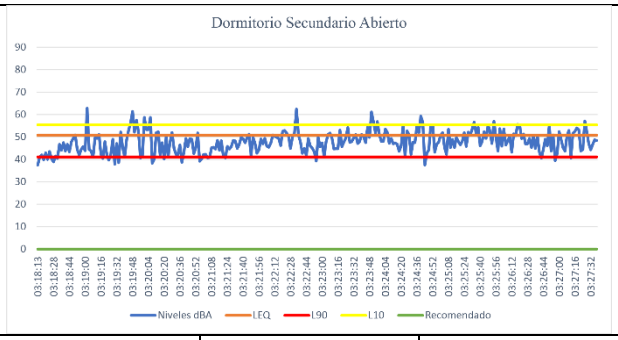
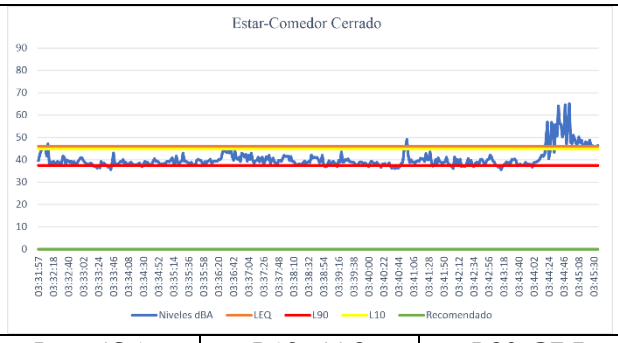
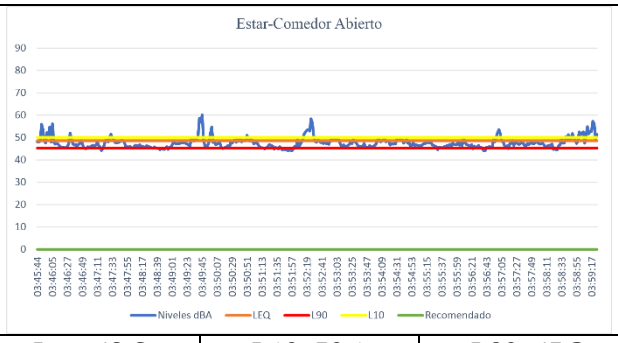
De acuerdo a la norma IRAM 4070, para espacios interiores en zonas urbanas se recomiendan valores de referencia entre 30 a 40 dB. Las mediciones registradas durante la tarde exceden los valores recomendados, registrando entre 36 a 58 dB (A).

4.2.2 Caso 2 – Resultados

En este caso se midieron las tres habitaciones principales: Dormitorio 1, Dormitorio 2 y Estar-Comedor. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: comparación de los resultados de las mediciones interiores.

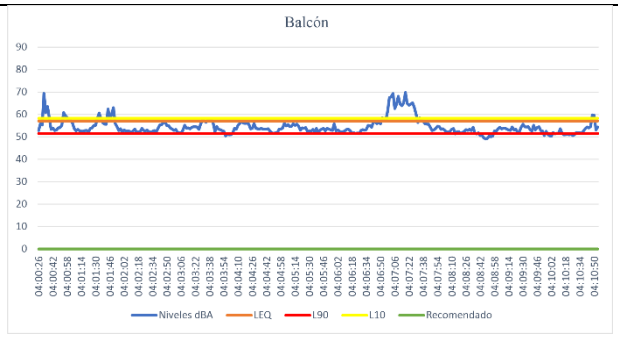
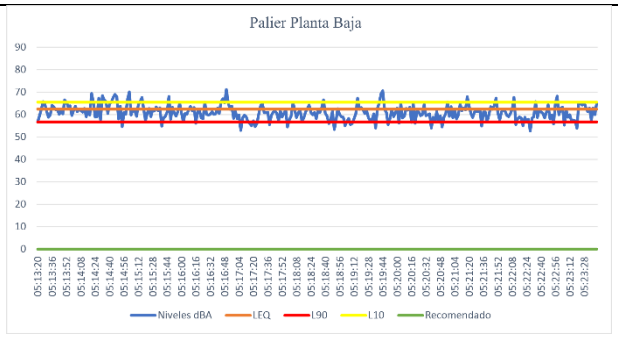
Dormitorio Principal Cerrado			Dormitorio Principal Abierto		
					
Leq: 39,2 dB(A)	L10: 40,9 dB(A)	L90: 33,1 dB(A)	Leq: 51,7 dB(A)	L10: 54,5 dB(A)	L90: 46,2 dB(A)
Dormitorio Secundario Cerrado			Dormitorio Secundario Abierto		

					
Leq: 41,0 dB(A)	L10: 40,6 dB(A)	L90: 32,2 dB(A)	Leq: 50,8 dB(A)	L10: 55,4 dB(A)	L90: 41,2 dB(A)
Estar-Comedor Cerrado			Estar-Comedor Abierto		
					
Leq: 46,1 dB(A)	L10: 44,9 dB(A)	L90: 37,5 dB(A)	Leq: 48,6 dB(A)	L10: 50,1 dB(A)	L90: 45,3 dB(A)

Los resultados se mantuvieron por encima de los valores recomendado, registrando valores que oscilan entre los 39 dB(A) y los 50 dB(A).

En los espacios comunes de uso público los valores se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: comparación de los resultados de las mediciones en espacios comunes – Caso 2.

Balcón			Palier		
					
Leq: 57,1 dB(A)	L10: 58,3 dB(A)	L90: 51,5 dB(A)	Leq: 62,4 dB(A)	L10: 65,5 dB(A)	L90: 56,7 dB(A)

Al igual que en el Caso 1, se evidencia que los percentiles registrados superan los valores recomendados para ambientes interiores en contextos urbanos.

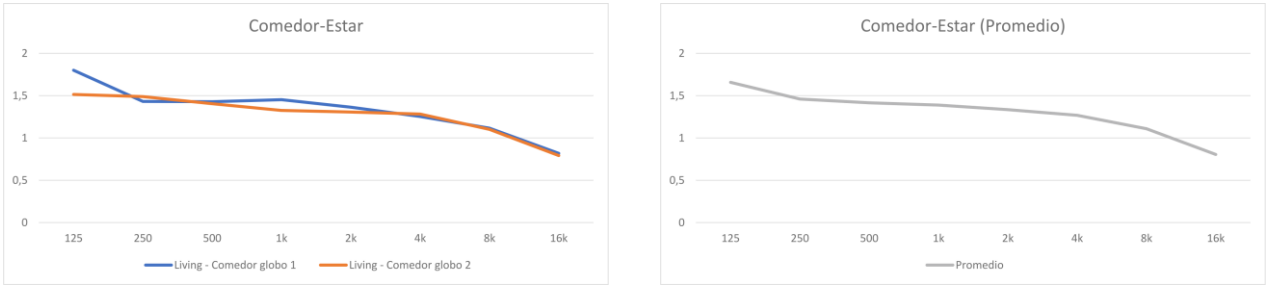
4.3 Determinación del Tiempo de Reverberación, TR60

4.3.1 Caso 1 – Resultados

Las mediciones se iniciaron en el sector de la cocina-comedor y posteriormente en los dormitorios. Los datos correspondientes a este primer ambiente se presentan en la Tabla 5 y su representación gráfica en la Figura 5.

Tabla 5: Comparación de los resultados de TR60 en Living - Comedor

	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Living - Comedor globo 1	1,8	1,432	1,428	1,452	1,364	1,254	1,116	0,818
Living - Comedor globo 2	1,514	1,488	1,404	1,326	1,306	1,282	1,102	0,792
Promedio	**1,657**	**1,46**	**1,416**	**1,389**	**1,335**	**1,268**	**1,109**	**0,805**



(a) Mediciones de TR60 en el Comerdor-Estar

(b) Promedios de mediciones de TR60 en el Comerdor-Estar

Figura 5: Medición de TR60 en el caso 1.

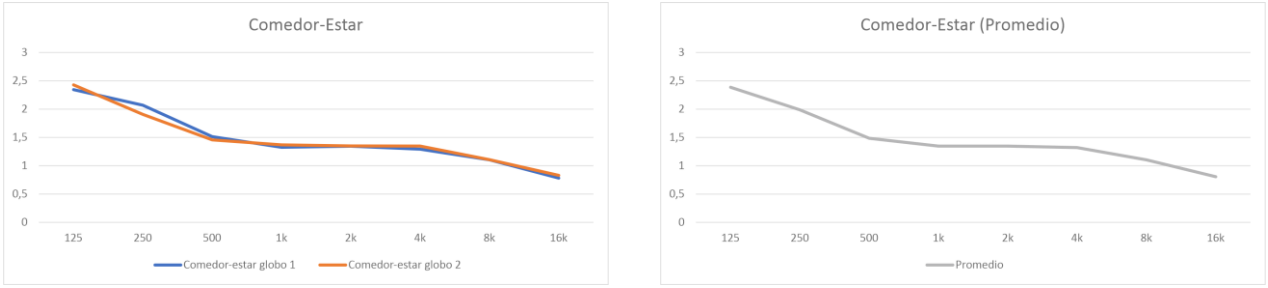
Los resultados muestran valores cercanos al rango de referencia de 1,2 a 1,5 s. Sin embargo, en la frecuencia de 125 Hz se observa un resultado promedio de 1,6 s, que excede el límite superior. En las frecuencias alta (8000 Hz. y 16000 Hz) los tiempos caen por debajo del rango adoptado. En conjunto, le promedio global se ubica dentro del rango de confort en la mayoría de las frecuencias.

4.3.2 Caso 2 – Resultados

En este caso se evaluaron los tres espacios habitables principales del departamento; Comedor-Estar, Dormitorio 1 y Dormitorio 2. Los resultados obtenidos figuran en la Tabla 6 y su representación gráfica en la Figura 6.

Tabla 6: comparación de los resultados de Comedor-estar

	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Comedor-estar globo 1	2,344	2,068	1,514	1,326	1,344	1,292	1,104	0,782
Comedor-estar globo 2	2,428	1,906	1,458	1,368	1,35	1,348	1,106	0,83
Promedio	**2,386**	**1,987**	**1,486**	**1,347**	**1,347**	**1,32**	**1,105**	**0,806**



(a) Mediciones de TR60 en el Comerdor-Estar

(b) Promedios de mediciones de TR60 en el Comerdor-Estar

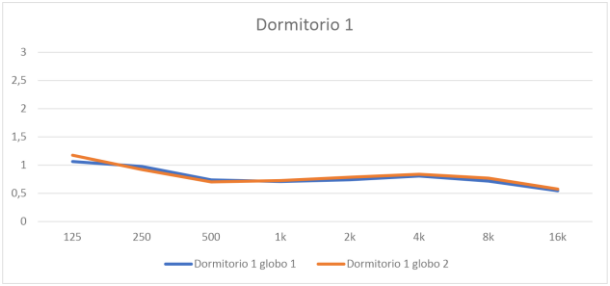
Figura 6: Medición de TR60 en el caso 2.

Los resultados superan los valores recomendados en las frecuencias bajas: 125 Hz (2,3 s) y 250 Hz (1,9 s). En las frecuencias medias (500 Hz a 4.000 Hz) los tiempos se mantienen dentro del rango, mientras que en las altas (8.000 Hz y 16.000 Hz) caen por debajo del mínimo de referencia.

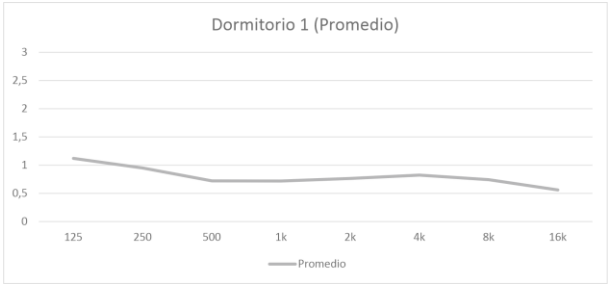
Posteriormente se midieron los dormitorios, donde la presencia de materiales absorbentes superficiales (ej. acolchados) pudo haber incidido en los resultados. Como se muestran en la Tabla 7 y Figura 7.

Tabla 7: comparación de los resultados de Dormitorio 1

	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Dormitorio 1 globo 1	1,064	0,976	0,74	0,71	0,742	0,808	0,718	0,546
Dormitorio 1 globo 2	1,176	0,922	0,704	0,726	0,786	0,84	0,77	0,576
Promedio	**1,12**	**0,949**	**0,722**	**0,718**	**0,764**	**0,824**	**0,744**	**0,561**



(a) Mediciones de TR60 en el sector de Dormitorio.



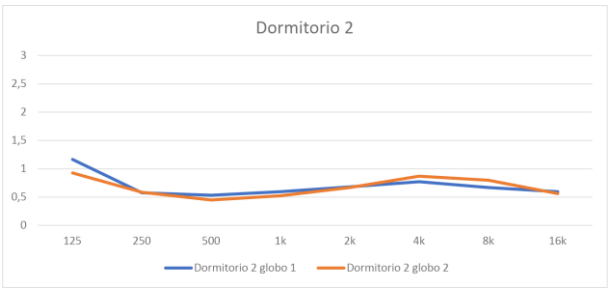
(b) Promedio de mediciones de TR60 en el sector de Dormitorio.

Figura 7: Medición de TR60 en el caso 2.

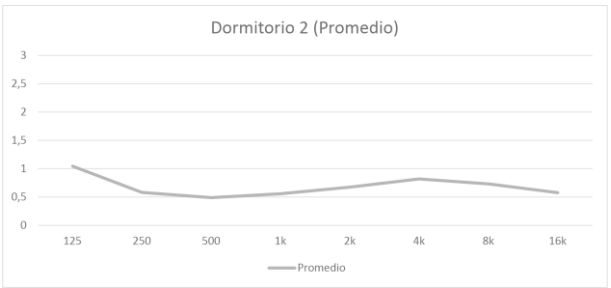
Los valores se encuentran por debajo del rango de 1,2 a 1,5 s en todas las frecuencias. Como se muestran en la Tabla 8 y Figura 8.

Tabla 8: comparación de los resultados de Dormitorio 2

	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Dormitorio 2 globo 1	1,164	0,576	0,532	0,594	0,68	0,77	0,668	0,594
Dormitorio 2 globo 2	0,926	0,586	0,448	0,524	0,668	0,868	0,796	0,562
Promedio	**1,045**	**0,581**	**0,49**	**0,559**	**0,674**	**0,819**	**0,732**	**0,578**



(a) Mediciones de TR60 en el sector de Dormitorio.



(b) Promedio de mediciones de TR60 en el sector de Dormitorio.

Figura 8: Medición de TR60 en el caso 2.

Los promedios obtenidos en todas las frecuencias se sitúan por debajo del rango recomendado de 1,2 a 1,5 s, confirmando condiciones acústicas con tiempos de reverberación reducidos.

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS, PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en el entorno exterior registran niveles sonoros diurnos superiores a los valores recomendados por la OMS para espacios exteriores (55 dB durante el día). La zona bajo estudio puede clasificarse como ruidosa, siendo la calle y sus actividades diarias la principal fuente de ruido.

En el interior de las viviendas, se identificó que la principal fuente de ruido proviene de las actividades de los vecinos circundantes. Ambas tipologías analizadas poseen comunicación directa con los patios internos del edificio, lo que favorece la incidencia sonora. En los dormitorios con contacto directo con dichos patios, los niveles registrados fueron menores a 40 dB(A), pero aun así superan los valores máximos recomendados por la norma IRAM 4044, que establece 30 dB para espacios interiores habitables.

Respecto de las mediciones de Tiempo de Reverberación (TR60), en líneas generales los resultados se encuentran dentro o por debajo del rango adoptado, lo que se atribuye a las terminaciones superficiales y al volumen de los recintos analizados.

5.1 Recomendaciones preliminares

Se proponen las siguientes estrategias para mejorar el confort acústico de los recintos estudiados. Cabe destacar que constituyen sugerencias preliminares con respaldo teórico y científico, pero cuya validación cuantitativa precisa corresponde a etapas posteriores del estudio:

- Espacios sociales (estar-comedor, cocina, balcones y palieres):
  - Incrementar el aislamiento acústico de los muros, especialmente aquellos con aberturas hacia los patios internos, aumentando el espesor de cerramientos.
  - Incorporar tabiques con aislamiento acústico de lana de vidrio o lana de roca de 2 pulgadas.
  - Reducir los tiempos de reverberación mediante cortinas de telas pesadas.
  - Sustituir solados cerámicos por alfombras u otras terminaciones menos reflectantes (ej. madera, mobiliario absorbente).
- Dormitorios:
  - Mejorar el paquete de muro y la carpintería exterior, incorporando tabiques tipo “sándwich” con relleno de lana de vidrio o de roca.
  - Optimizar las superficies vidriadas mediante la instalación de vidrios laminados en las aberturas que comunican con el exterior.

7. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la ubicación de la unidad dentro del edificio **y** la distribución de los espacios interiores son determinantes en la percepción acústica.

A pesar de que ambos casos de estudio se ubican en la contra fachada, los resultados de NIA obtenidos superan los valores recomendados, si bien son menores a los registrados sobre la calle, lo que puede impactar negativamente en el bienestar y el desempeño cotidiano de los ocupantes. En ambos departamentos la comunicación directa con patios internos y el corazón de manzana favoreció una disminución de los niveles medidos. Los tiempos de reverberación bajos se explican por la presencia de materiales absorbentes y los volúmenes reducidos de los recintos. Esta condición incide tanto en los resultados instrumentales como en la percepción acústica diaria, en el bienestar de sus ocupantes y el desarrollo de sus tareas.

En síntesis, los dos casos analizados evidencian que la ubicación dentro de la construcción, las soluciones constructivas y las decisiones de diseño arquitectónico influyen de manera directa en los niveles sonoros interiores y, en consecuencia, en la calidad de vida de los habitantes.

9. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las personas que cedieron su tiempo y permitieron el ingreso en sus hogares a medir y relevar.

REFERENCIAS

[1] S. Ajanovic, R. Varo, M. Gaioli, P. de Prado, M. Vrijheid, P. Dadvand, L. Gómez, A. Aranbarri, C. Villanueva, M. Lanaspa, A. Curto, N. Ortega, C. Tonne, L. Thierry-Chef, E. Cardis, M. Pérez-Peña, M. del R. Pérez, J. J. Rodríguez, U. Fresán, … M. Neira, *El ambiente y su impacto en la salud materno infantil: ¿a qué nos enfrentamos? Un llamamiento a la reflexión y a la sensibilización*. A. Bosque y P. Cañal. Ed. Barcelona, España: Sant Joan de Déu, 2022.URL: https://ddd.uab.cat/pub/caplli/2022/43ef3cb3e9f0/13_Informe_Faros_ESP_juliol2022_.pdf#page=149

[2] A. R. Morrongiello, “La contaminación acústica y su influencia en la salud de la población. El caso de la Ruta Provincial 4, partidos de Lomas de Zamora, Almirante Brown y Esteban Echeverría.” Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UNLZ, Buenos Aires, Argentina, 2020. URL: https://repositorio.unlz.edu.ar//handle/123456789/424

[3] L. Montesinos-Valencia y P. Montesinos-Valencia, “CORRELACIÓN ENTRE LOS NIVELES DE CORTISOL Y CONTAMINACIÓN SONORA”, *Veritas*, vol. 22, no. 1, pp. 75-81, Noviembre 2021. DOI: https://doi.org/10.35286/veritas.v22i1.297

[4] T. A. C. Tambo, “Impacto de la contaminación acústica en el estrés laboral según el modelo de carga alostática”, *Wani*, vol. 2, no. 81, pp. 1-14, Noviembre 2024. DOI: https://doi.org/10.5377/WANI.V1I81.19206

[5] C. Freire-Vinueza, K. Meneses, G. Cuesta, C. Freire-Vinueza, K. Meneses y G. Cuesta, “América Latina: ¿Un paraíso de la contaminación ambiental?” *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 2, no. 55, pp. 1-18, Julio 2021. DOI: https://doi.org/10.15359/rca.55-2.1

[6] M. F. Romero-Villacrés, M. F. Rivera-Velásquez, C. R. Cisneros-Vaca, Á. A. Naranjo-Polo, M. F. Romero-Villacrés, M. F. Rivera-Velásquez, C. R. Cisneros-Vaca y Á. A. Naranjo-Polo, “Determinación y monitoreo de puntos críticos de ruido urbano considerando múltiples factores in situ”, Digital Novasinergia, vol. 1, no. 7, pp. 67-87, Enero 2024. DOI: https://doi.org/10.37135/ns.01.13.04

[7] J. Khan, M. Ketzel, K. Kakosimos, M. Sørensen y S.S. Jensen, “Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques”, *Science of the Total Environment*, vol. 634, pp. 661–676, Septiembre 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.374

[8] P. Flores, “La construcción sostenible en Latinoamérica”, *Limaq*, vol. 1, no. 7, pp. 161-173. Junio 2021. DOI: https://doi.org/10.26439/limaq2021.n007.5183

[9] S. Stankov y B. Stepančev, “Noise and its influence on human health”, *Medicinski časopis*, vol. 2, no. 56, pp 77-83. 2022. DOI: https://doi.org/10.5937/mckg56-38021

[10] J. A. Figueroa Garzón, “Facultad del GAD Municipal de Santa Elena en materia Ambiental: Control de Ruido, Sector Calle Comercio”, Tesis de Grado, Facultad de Ciencias Sociales y de la Salud Carrera de Derecho, UPSE, La Libertad, Ecuador, 2023. URL: https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/10291

[11] *Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 1—Magnitudes básicas y métodos de evaluación.* IRAM 4113-1. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2009.

[12] *Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2—Determinación de niveles de ruido ambiental*. IRAM 4113-2. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2010.

[13] *Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento al ruido aéreo.* IRAM 4043 -1. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2003.

[14] *Protección contra el ruido en edificios. Aislamiento acústico mínimo de tabiques y muros.* IRAM 4044. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2015.

[15] *Ruidos molestos al vecindario. Método de medición y calificación.* IRAM 4062:2016. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2016.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Optimización de modos de resonancia en salas de mezcla utilizando FEM y algoritmos genéticos

Di Bernardo, M. E.[†,1]**; Vereertbrugghen, M.**[†,2]

[†] Universidad Nacional de Tres de Febrero
[1] matias.di.bernardo@hotmail.com, [2] veree@gmail.com

RESUMEN AMPLIADO

Resumen Este trabajo presenta una solución computacional para optimizar modos de resonancia en salas pequeñas de mezcla y mastering. Se combina un generador paramétrico de geometrías con un algoritmo genético que maximiza figuras de mérito acústicas, considerando la posición de fuente y receptor, para minimizar la coloración espectral y mejorar la uniformidad en bajas frecuencias. El desempeño de cada configuración se evalúa mediante simulaciones numéricas de elementos finitos (FEM) en el dominio temporal, obteniendo respuestas al impulso en el rango modal (20–200 Hz). De estas respuestas se derivan figuras de mérito del desvío promedio de la respuesta en frecuencia (Magnitude Deviation) y su respectiva varianza espacial alrededor del sweet spot (Spatial Deviation). Los resultados demuestran que el método identifica configuraciones no convencionales que superan las relaciones dimensionales clásicas, logrando mejoras de hasta 5 dB en las figuras de mérito, mejorando la respuesta en frecuencias y su homogeneidad en el espacio. Esta herramienta ofrece una solución eficaz en fases tempranas del diseño arquitectónico, integrando criterios espaciales y acústicos para optimizar la calidad sonora en estudios de control.

Palabras claves: acústica de recintos, optimización modal, métodos de elementos finitos, algoritmos genéticos.

1. Introducción

En el diseño de espacios de escucha crítica, como las salas de control, la respuesta en bajas frecuencias es un factor determinante para la fidelidad de la reproducción sonora. Las dimensiones del recinto definen su comportamiento modal, y una distribución inadecuada de los modos propios puede generar coloraciones y una respuesta en frecuencia irregular, comprometiendo la neutralidad acústica requerida para la toma de decisiones en la mezcla y masterización [1]. Históricamente, se han propuesto diversos criterios de proporciones geométricas (ej. Bolt [2], Louden [3]) para mitigar este problema en salas paralelepípedas [4]. Sin embargo, estos enfoques no suelen considerar la influencia conjunta de geometrías complejas ni la ubicación específica de la fuente y el receptor, factores cruciales en la respuesta percibida.

Los avances que en el campo de la acústica computacional propulsados por la accesibilidad del hardware esta impulsando el desarrollo de sistemas mas avanzados para poder predecir y optimizar geometrías no paralelepípedos, como el novedoso software de optimizacion [5]. que utiliza métodos numéricos para modelar el comportamiento de las ondas en bajas frecuencias.

Este trabajo presenta una herramienta de software de código abierto [6] diseñada para la optimización geométrica de recintos pequeños. El objetivo principal es identificar dimensiones y contornos de sala que minimicen las irregularidades modales para una configuración de fuente y receptor predefinida por el usuario. En la metodología de probaron soluciones por algoritmos genéticos y por fuerza bruta, siendo este último método el mas fiable a pesar de tener mayor costo computacional, evaluando el mérito acústico de cada geometría candidata mediante simulaciones numéricas con el Método de Elementos Finitos (FEM) en el dominio de la frecuencia. La contribución clave del estudio es un sistema automatizado que explora geometrías no convencionales y demuestra mejoras cuantificables en la uniformidad del campo sonoro en comparación con diseños rectangulares, incluso aquellos basados en criterios clásicos.

2. Metodología

El núcleo de la aplicación consiste en un bucle de optimización que genera, simula y evalúa sistemáticamente un gran número de geometrías de sala para encontrar aquella que ofrezca el mejor rendimiento acústico. A continuación, se describen los componentes clave de esta metodología.

2.1 Generador de Geometrías

El generador crea automáticamente contornos de sala complejos y simétricos. A partir de una grilla de vértices potenciales, el algoritmo selecciona puntos para definir la mitad del contorno, que luego se refleja para generar la planta completa (Figura 5 en el Anexo). Cada geometría resultante es validada para asegurar que respete los límites de diseño, produciendo así un diverso conjunto de formas para su posterior simulación.

2.2 Implementación y Validación del Modelo Numérico (FEM)

Para predecir la respuesta acústica de cada geometría, se debe resolver el problema físico de la propagación de ondas sonoras en un dominio tridimensional cerrado. Para ello, se implementó un modelo numérico basado en el Método de Elementos Finitos (FEM), utilizando el framework de código abierto FEniCSx a través de su interfaz de programación en Python [7]. Se optó por un análisis en el dominio de la frecuencia (FD-FEM), que resuelve la ecuación de Helmholtz para obtener la respuesta en estado estacionario del recinto.

Un paso crítico, es la discretización del volumen de la sala en una malla de elementos finitos. Para asegurar la precisión, la densidad de esta malla debe ser suficiente para representar adecuadamente la longitud de onda más corta, por lo que se adoptó un criterio de 6 a 10 elementos por longitud de onda utilizando elementos tetraédricos de primer orden. La generación de la malla se realizó con la librería Gmsh [8], que emplea el algoritmo Netgen-3D [9], y permite una resolución variable para densificar los elementos en zonas de alta complejidad geométrica como la superficie de la fuente sonora (Figura 1).

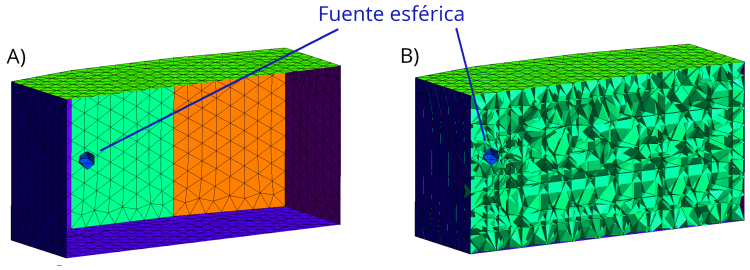


Figura 1: Proceso de modelado: A) Entidades geométricas de la sala y la fuente. B) Vista en corte de la malla de elementos finitos, mostrando mayor densidad cerca de la fuente.

La excitación del campo sonoro se modela mediante una fuente esférica pulsante, implementada numéricamente como una condición de contorno de tipo Neumann no homogénea sobre la superficie de la esfera. Esta condición impone un flujo de velocidad normal y constante ($\hat{U}_n$), actuando como la excitación del sistema. Para aislar la respuesta propia del recinto, los resultados de la simulación son post-procesados: la presión compleja obtenida en el receptor se divide por la respuesta en frecuencia analítica de la esfera pulsante radiando en campo libre. Este proceso de deconvolución compensa los efectos de radiación de la fuente, permitiendo obtener la función de transferencia de la sala como si hubiese sido excitada por una fuente ideal con respuesta en frecuencia plana.

La fiabilidad del modelo numérico fue verificada mediante un proceso de validación. Se comparó la respuesta en frecuencia simulada por el modelo FD-FEM con la solución semi-analítica obtenida por superposición modal para un paralelepípedo de paredes rígidas, un caso cuya solución es bien conocida [10]. Como se observa en la Figura 2, los resultados del modelo FD-FEM muestran una excelente concordancia con la referencia analítica, tanto en las frecuencias de resonancia como en sus amplitudes relativas. Esta correspondencia valida la correcta implementación del modelo y confirma su idoneidad para predecir con precisión la respuesta acústica de las geometrías complejas evaluadas durante la optimización. Aunque también se desarrolló y validó un modelo en el dominio del tiempo (TD-FEM), se seleccionó el FD-FEM para la optimización final debido a su mayor estabilidad y consistencia espectral.

2.3 Figura de Mérito

Para guiar la optimización se definió una única Figura de Mérito: la Desviación Media del Campo Sonoro (MSFD). Esta métrica, calculada sobre un área de escucha, combina la Desviación de Magnitud (MD), que cuantifica cuan plana es la respuesta en frecuencia para minimizar la coloración modal, y la Desviación Espacial (SD), que mide la consistencia de dicha respuesta para asegurar un *sweet spot* homogéneo. El algoritmo busca minimizar el valor MSFD, cuya formulación matemática se detalla en las referencias [4], para encontrar así la geometría con la respuesta más neutra y especialmente uniforme.

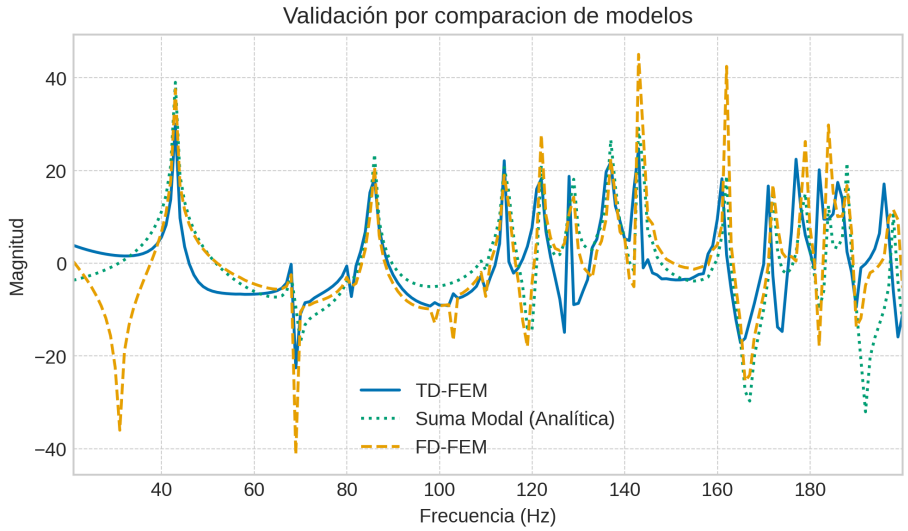


Figura 2: Validación de los modelos numéricos contra la solución analítica (Superposición Modal) para un recinto paralelepípedo. El modelo FD-FEM demuestra una alta precisión.

2.4 Optimización

Se probaron 2 métodos de optimización. El primero, por fuerza bruta, donde se itera por un número definido de salas y se ordenan según el factor de mérito. La segunda opción, es optimizar con algoritmos genéticos, esta opción itera sobre generaciones, donde se va cambiando los parámetros de la cantidad de salas y precisión del solucionar para encontrar un cuarto óptimo. Si bien el algoritmo genético es mas rápido en encontrar salas con un mérito aceptable, los resultados en la versión actual muestra que el algoritmo por fuerza bruta encuentra de forma mas consistente cuartos óptimos. Esto indica que se necesita mejorar el desarrollo del algoritmo genético para garantizar una convergencia y que no tienda a mínimo locales.

3. Resultados

La herramienta se evaluó en tres casos de estudio con diferentes volúmenes y márgenes de optimización. En todos los casos, el software logró encontrar geometrías que mejoraron significativamente el rendimiento acústico respecto a la sala base rectangular. La Tabla 1 resume los resultados para dos de las salas evaluadas, mostrando la mejora en la figura de mérito (MSFD).

Tabla 1: Resultados de MSFD (dB) para la geometría base, la optimización simple (paralelepípedo) y la compleja.

Configuración	MSFD (dB)	MD (dB)	SD (dB)
Sala 1 ($16{,}5\,m^3$)			
Sala Base	15.31	11.92	3.35
Sala Simple	13.86	11.08	2.78
Sala Compleja	**12.60**	**10.28**	**2.34**
Sala 2 ($30{,}2\,m^3$)			
Sala Base	19.14	14.75	4.39
Sala Simple	19.04	15.08	3.97
Sala Compleja	**14.26**	**11.16**	**3.10**

Para la Sala 1, se logró una mejora total de 2.7 dB. Es destacable el caso de la Sala 2, donde la optimización simple no ofreció una mejora sustancial, pero la exploración de geometrías complejas permitió una reducción drástica de casi 5 dB en el MSFD. Esto subraya la limitación de los diseños puramente paralelepípedos y el potencial de los contornos no convencionales.

También se exploró la generación de geometrías con diferentes configuraciones, como puede ser el número de paredes (Figura 3) o variando la cantidad de iteraciones (Figura 6 Anexo). También se presenta en el Anexo la (Figura 7) donde se comparan el cambio de la respuesta en frecuencia, antes y después de optimizar.

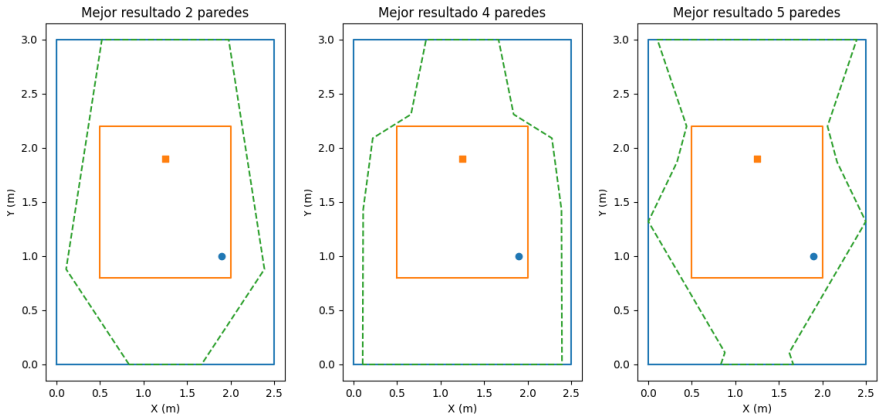


Figura 3: Diferentes resultados de salas óptimas variando la cantidad de paredes.

Además, se comparó una de las geometrías complejas optimizadas con salas paralelepípedas del mismo volumen diseñadas según los criterios de Bolt, Louden y Cox. Como muestra la Figura 4, la geometría optimizada por la herramienta obtuvo el valor más bajo de MSFD. Este resultado sugiere que, al incorporar la posición de la fuente y el receptor en el proceso, es posible superar a los criterios clásicos que se centran únicamente en la distribución de las frecuencias modales.

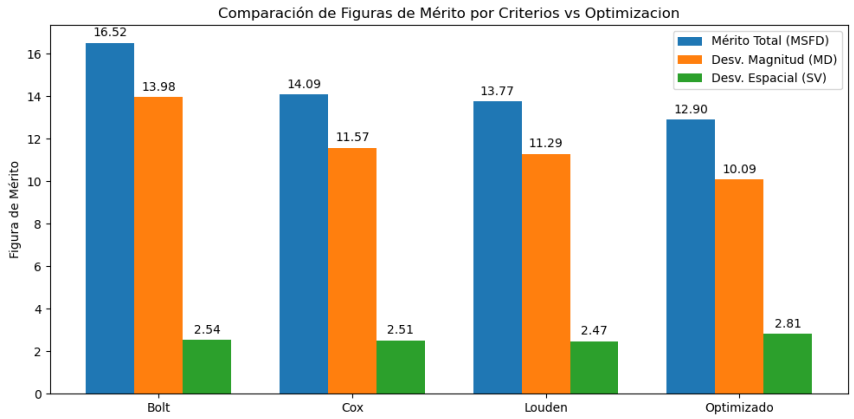


Figura 4: Comparación de MSFD para salas de igual volumen ($V = 11{,}28\ m^3$). La geometría compleja optimizada supera a las diseñadas con criterios tradicionales.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado y validado una herramienta de software capaz de optimizar la geometría de salas de escucha crítica para mejorar su respuesta modal. Los resultados demuestran que la metodología, que combina una búsqueda por fuerza bruta con simulaciones FD-FEM, es eficaz para encontrar geometría tanto simples como complejas, que reducen significativamente las irregularidades en el campo sonoro de baja frecuencia, siendo las segundas superiores de manera consistente.

La principal contribución del trabajo es demostrar que la optimización de contornos no paralelepípedos, considerando explícitamente la ubicación de la fuente y el receptor, permite obtener soluciones acústicas superiores a las de los diseños rectangulares basados en criterios tradicionales. Se lograron mejoras de hasta 5 dB en la métrica MSFD.

Los algoritmos genéticos demostraron mejoras respecto a la condiciones iniciales, pero todavía requiere mejoras en el diseño de las generaciones, ya que los resultados demostraron que variar la resolución no es efectivo por efectos de aliasing. La búsqueda por fuerza bruta demostró ser efectiva, a costa de un consto computacional elevado.

En un futuro se buscara validar las simulaciones con mediciones reales. Asimismo, se planea extender el modelo para incorporar la impedancia acústica de las superficies, permitiendo así la simulación y optimización de escenarios más realistas que incluyan tratamiento acústico. Ademas, para el desarrollo eficiente es indispensable optimizar las simulaciones mediante computación paralela con múltiples núcleos.

Referencias

[1] M. Wankling y B. Fazenda, «The Optimization of Modal Spacing within Small Rooms,» *School of Computing and Engineering Researchers' Conference*, págs. 117-124, 2008.

[2] R. H. Bolt, «Note on The Normal Frequency Statistics in Rectangular Rooms,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 18, n.º 1, págs. 130-133, 1946.

[3] M. M. Louden, «Dimension Ratios of Rectangular Rooms with Good Distribution of Eigentones,» *Acustica*, vol. 24, págs. 101-104, 1971.

[4] T. J. Cox y P. D'Antonio, «Determining Optimum Room Dimensions for Critical Listening Environments: A New Methodology,» *Journal of the Audio Engineering Society*, 2015.

[5] A. Petrolli y P. D'Antonio, «NIRO^{TM}: A New Non-Cuboid Iterative Room Optimization Process,» en *Audio Engineering Society Convention 121*, San Francisco, CA, USA, oct. de 2006.

[6] A. Di Bernardo Vereetbrugghen, *Acoustic Modal Response Optimizer*, https://github.com/MatiasDiBernardo/Acoustic-Modal-Response-Optimizer, GitHub repository, 2025.

[7] M. S. Alnæs, J. Blechta, J. Hake et al., «The FEniCS Project Version 1.5,» *Archive of Numerical Software*, vol. 3, n.º 100, págs. 1-9, 2015. DOI: 10.11588/ans.2015.100.20553.

[8] C. Geuzaine y J.-F. Remacle, «Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities,» *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 79, n.º 11, págs. 1309-1331, 2009. DOI: 10.1002/nme.2579.

[9] J. Schöberl, «NETGEN: An advancing front 2D/3D-mesh generator based on abstract rules,» *Computing and Visualization in Science*, vol. 1, n.º 1, págs. 41-52, 1997. DOI: 10.1007/s007910050004.

[10] T. J. Cox, P. D'Antonio y M. R. Avis, «Room Sizing and Optimization at Low Frequencies,» *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 52, n.º 6, págs. 640-651, 2004.

5. ANEXO

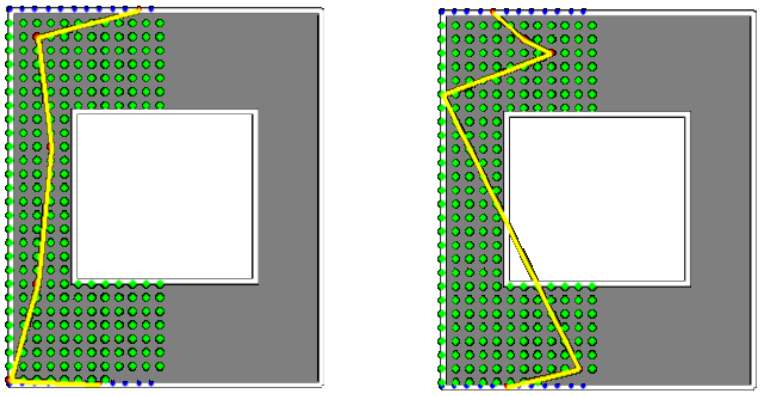


Figura 5: Referencia visual del generador de geometría.

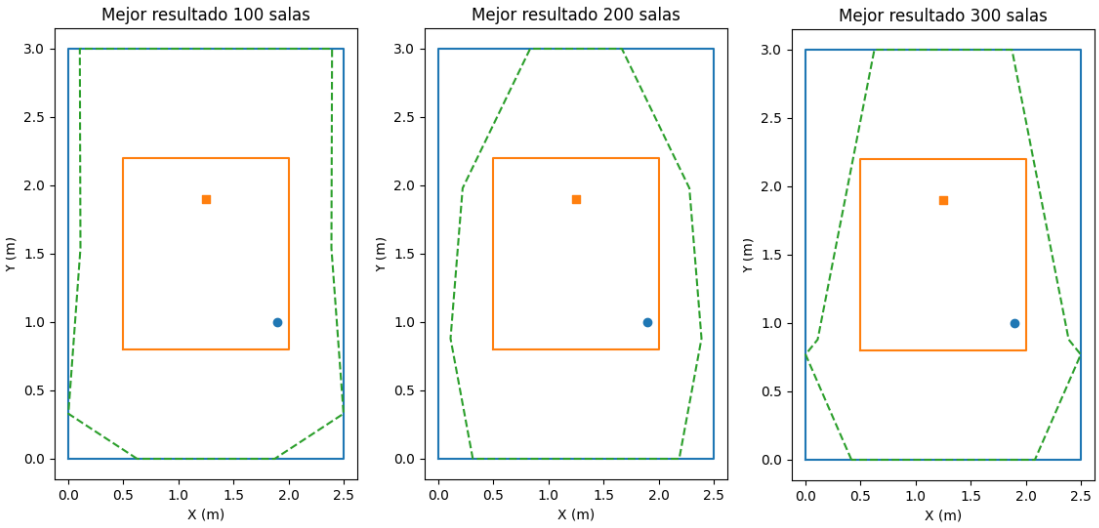


Figura 6: Diferentes resultados de salas óptimas variando la cantidad de iteraciones.

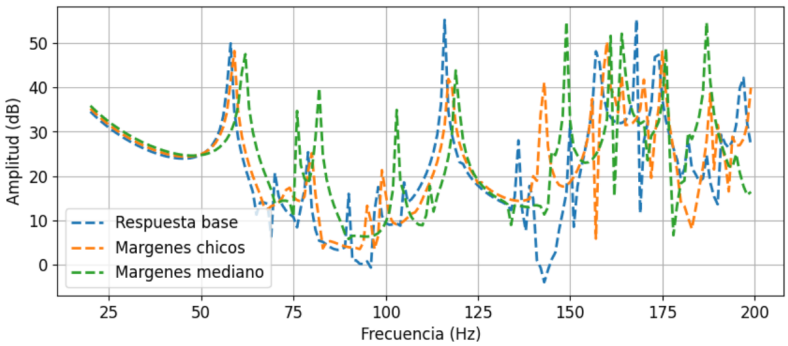


Figura 7: Comparación de respuesta en frecuencia después de optimizar.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Acústica de salas con tipología en abanico y diseño arquitectónico

Farina, M. A. [†, ‡, 1]; **Basso, G.** [†, 2]

[†] Instituto de Investigación en Producción y Enseñanza del Arte Argentino y Latinoamericano (IPEAL). Facultad de Artes, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires

[‡] Programa: Sistemas y espacialidad en el arte sonoro (SEAS). Escuela Universitaria de Artes. Universidad Nacional de Quilmes, Buenos Aires

[1] mandreafarina@gmail.com, [2] gusjbasso@gmail.com

Resumen La calidad acústica de una sala para música se puede inferir a partir de su forma arquitectónica básica –caja de zapatos, abanico, arena y herradura– si se cumplen determinadas condiciones. En un teatro con planta en forma de abanico, el sonido directo llega al espectador con facilidad, pero el que proviene de las reflexiones en las paredes laterales se dirige hacia atrás. Al haber muy poca energía lateral, la audiencia no recibe la información espacial necesaria como para experimentar la sensación de inmersión. En este trabajo se presenta una estrategia proyectual reciente puesta en práctica en una sala de esta tipología concebida con el objeto de que alcance la máxima prestación acústica: el Teatro Manuel Belgrano del Colegio de Graduados en Ciencias Económicas de la provincia de Tucumán en Argentina.

Palabras clave: acústica arquitectónica, abanico, Teatro Manuel Belgrano.

Abstract The acoustic quality of a concert hall can often be anticipated from its plan form –shoebox, fan, arena, or horseshoe– provided certain conditions are met. In fan-shaped halls, direct sound reaches the audience readily, but side-wall reflections are directed rearward, reducing lateral energy and, consequently, spatial impression and envelopment. This paper presents a design strategy recently implemented in a fan-plan venue to address this limitation and to maximise acoustic performance: the Manuel Belgrano Theater at the College of Graduates in Economic Sciences, Tucumán, Argentina. The geometric and material interventions used to restore early lateral reflections are described, and their acoustic outcomes are discussed.

Keywords: architectural acoustics, fan-shaped hall, Manuel Belgrano Theater.

1. INTRODUCCIÓN

El Teatro Manuel Belgrano fue inaugurado en abril de 2023. Las tareas de acústica en la obra comenzaron cuando algunos aspectos relevantes ya habían sido definidos: el aforo debía ser de aproximadamente 500 personas, la sala tenía que poder albergar una amplia variedad de actividades y no era posible modificar la forma arquitectónica de base –un abanico– ni el volumen del recinto. En la Figura 1 se presenta el diseño original.

La geometría básica de la planta seleccionada para este proyecto provoca que solo el sonido directo llegue al público, mientras que el sonido que proviene de las reflexiones en las paredes laterales se dirige hacia el fondo de la sala. En esta tipología no le llega energía acústica lateral al oyente (Figura 2). Cuando se tiene únicamente sonido frontal que proviene de las fuentes en el escenario, se percibe la fuente acústica adelante y separada del oyente. El sonido suena fuera del espacio que le corresponde al espectador, quien no experimenta la sensación de inmersión. Por el contrario, cuando gran parte del sonido llega lateralmente, el oyente percibe estar rodeado por la música, y que él y la fuente comparten el mismo espacio. En la tipología de abanico propuesta por el estudio de arquitectura, el factor de espacialidad resulta muy bajo y el resto de los parámetros acústicos que evalúan un recinto muestran un déficit de energía en la zona central de la platea.

Figura 1: Planta y corte del proyecto original

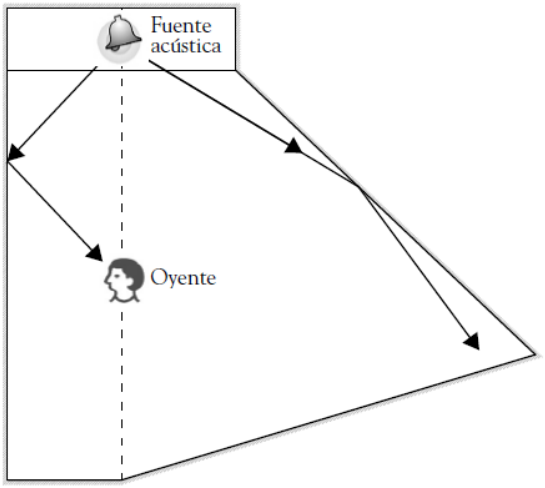


Figura 2: Esquema que muestra el comportamiento de las reflexiones en una sala de planta rectangular y en una sala en abanico [1]

El diseño interior se centró en varias premisas: lograr un campo sonoro envolvente con gran claridad sonora, conseguir un sonido homogéneo para toda la audiencia y alcanzar un TR adecuado. Para cumplir con la primera condición era necesario revertir los efectos típicos de un abanico que no distribuye la cantidad de energía lateral necesaria para proyectar una sala de calidad. Se buscaba un campo acústico temprano con una buena textura. Además, era importante no producir ecos, coloraciones espectrales ni cambios perceptibles en la ubicación de las fuentes [2] [3]. La segunda condición requería una combinación adecuada de superficies reflectantes y difusoras. Una difusión excesiva habría impedido las reflexiones necesarias para lograr un campo sonoro inmersivo y una difusión insuficiente o mal distribuida habría imposibilitado la distribución homogénea de la energía acústica [4] [5]. La tercera condición implicaba una sala con una reverberación correcta y, simultáneamente, una buena claridad.

2. PROCESO PROYECTUAL

2.1 Adecuación de la forma de base y selección de las superficies interiores

Para el desarrollo del proyecto definitivo se optó por una sala adaptable a partir de dos configuraciones límite: teatro de prosa y música no amplificada, por un lado, y música amplificada, por el otro. Se elaboró un primer modelo digital y se analizaron las reflexiones tempranas en varios pares fuente-receptor mediante el software Catt-Acoustic. Se pudo concluir que el espacio, en su

configuración original iba a tener una muy baja calidad acústica en gran parte de la platea. La causa era la ausencia de reflexiones desde las paredes laterales hacia la audiencia.

Para superar esta situación se propuso utilizar superficies reflectoras curvas (denominadas *cannoli* junto al equipo de arquitectura) en posiciones cuidadosamente estudiadas que aporten energía lateral temprana y, el agregado de superficies difusoras –en la parte baja de las paredes laterales, en la pared trasera y en la cámara de orquesta– que devuelvan la energía sonora de modo parejo en todas las direcciones posibles.

Luego de un extenso proceso iterativo con el equipo de proyecto se logró el diseño geométrico final (Figura 3). Se determinó la forma y tamaño de la envolvente interna de la sala, y se estableció la altura del cielorraso con la intención de alcanzar el máximo volumen interior. La proporción y ubicación de las superficies reflectantes, difusoras y absorbentes fueron factores clave en el diseño. Las superficies interiores lisas se dispusieron de tal manera que la secuencia de reflexiones tempranas lograra un patrón de reflexiones adecuado para lograr un campo sonoro inmersivo y maximizar la energía lateral no correlacionada. La difusión de la energía acústica permitió lograr un teatro espacialmente parejo. La absorción quedó limitada al área ocupada por el público.

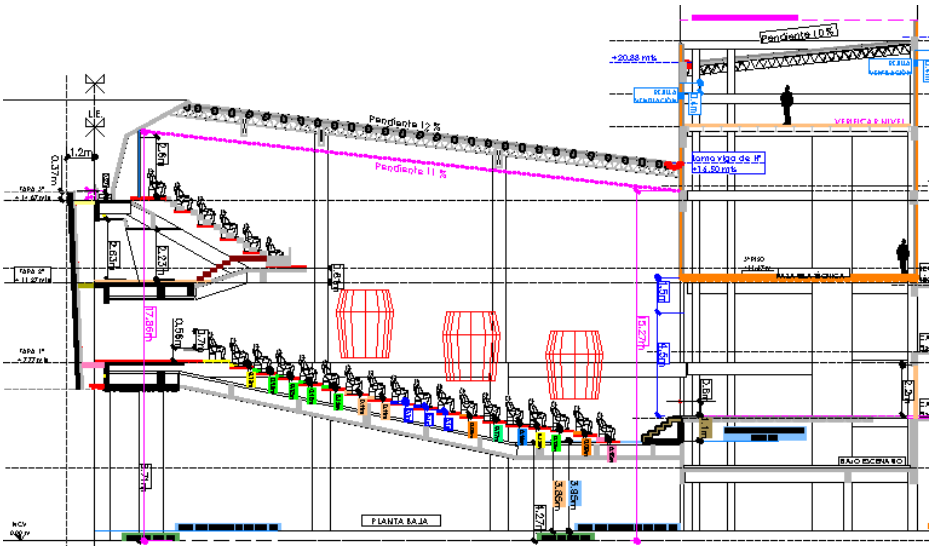


Figura 3: Corte con el sistema de reflectores laterales propuestos

Para optimizar el comportamiento del escenario no simétrico y favorecer las visuales, se propuso proyectar una cámara de recitales y conciertos en la caja escénica y aumentar la altura de la boca de escena (Figura 4). El ensamble y el balance instrumental se trabajó con la instalación de la cámara. La acústica del escenario se propuso variable: un sistema de textiles permite adecuar el campo sonoro para las representaciones que lo requieran.

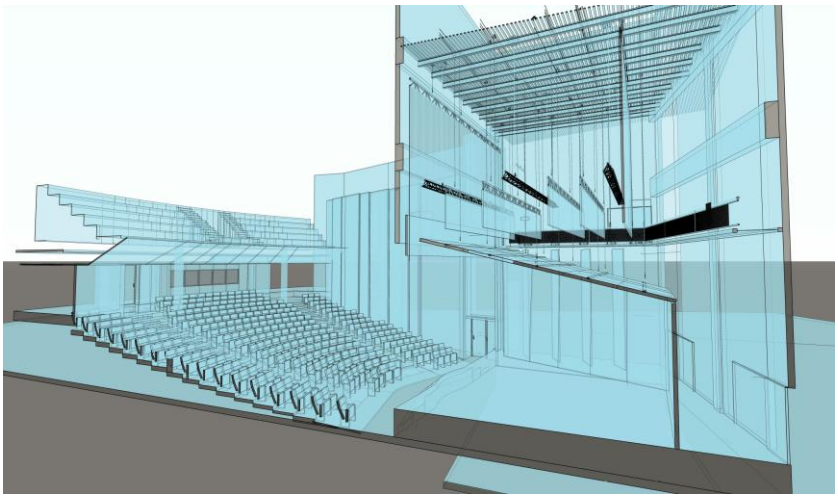


Figura 4: Cámara de escenario (modelo 3D elaborado por el Ing. Oli Alonso)

Otro factor clave en el diseño fue obtener una curva de reverberación correcta. Una vez establecida la forma general y dispuestas las superficies difusoras y reflectantes, se optó por un tiempo de reverberación T30 de 1,2 s a frecuencias medias. Debido al escaso volumen de la construcción se propuso evitar todas las superficies que vibren y absorban energía acústica: la absorción se redujo a lo estrictamente necesario –solo la proporcionada por el público sentado y las butacas vacías–.

2.2 Resultados de la simulación digital

Tras la última simulación, el espacio se consideró satisfactorio en relación con los valores de los parámetros definidos por la norma ISO-3382 y de acuerdo a las premisas determinadas al inicio del proceso proyectual.

Respecto al campo temprano, las figuras 5 y 6 muestran algunos de los resultados obtenidos: la figura 5 muestra la textura de reflexiones tempranas que aparecen en un asiento en la platea en una de las primeras simulaciones y en la versión final. La figura 6 muestra la distribución espacial de la Fracción de energía lateral.

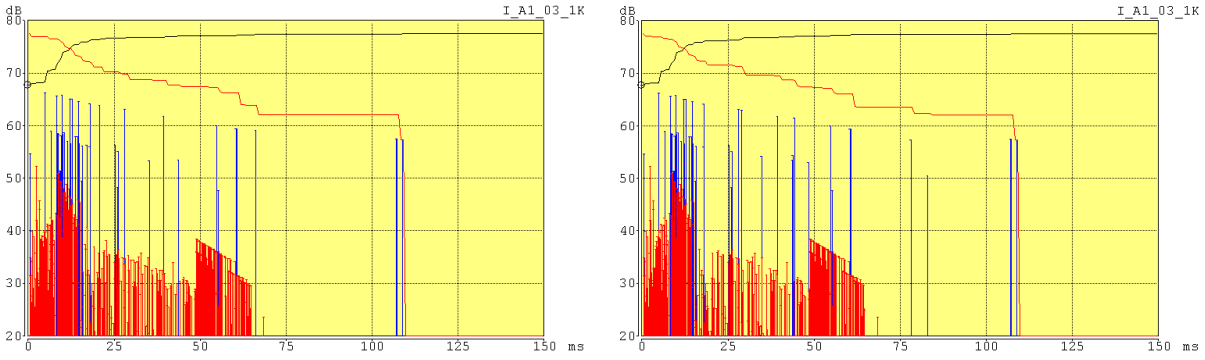


Figura 5: Reflectogramas del par Fuente A1- Butaca 3 en 1000 Hz.

Izquierda: proyecto original. Derecha: versión final

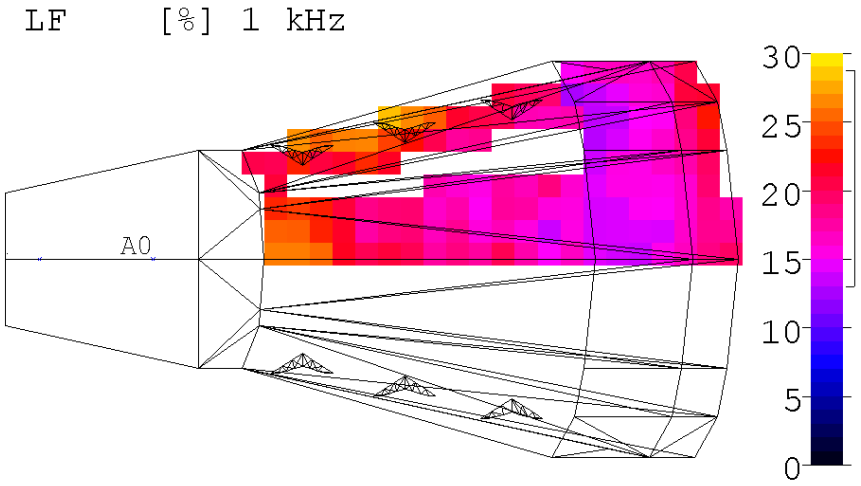


Figura 6: Valores de Fracción de energía lateral para la versión final obtenidos con una fuente omnidireccional en el escenario

3. CONSTRUCCIÓN Y MEDICIONES

Durante la construcción todos los materiales y detalles relevantes se controlaron acústicamente. Se prestó especial atención para evitar la absorción adicional de bajas frecuencias causada por las estructuras de montaje. La absorción de las butacas se midió en un laboratorio certificado. También se realizaron mediciones acústicas parciales para comprobar la eficacia de las predicciones realizadas durante el proceso de diseño.

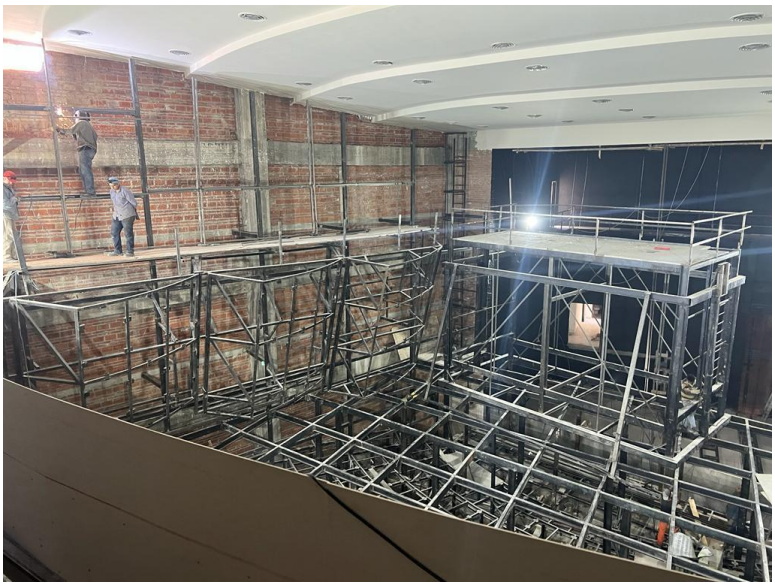


Figura 7: Fotografía del interior de la sala durante su construcción (enero 2023)

Figura 8: Fotografía del interior de la sala durante su construcción (marzo 2023)

3.1 Mediciones acústicas según la norma ISO-3382

Durante marzo de 2023 –previo a la inauguración de la sala y con algunos elementos pendientes en la construcción (figura 8)– y en septiembre de 2024, se realizaron un conjunto completo de mediciones basadas en la norma ISO-3382 [6]. La fuente omnidireccional y los micrófonos se colocaron en los mismos lugares que se habían utilizado en el modelo digital. En la última medición, el escenario estaba preparado para música electroacústica con el sistema completo de telones colocado. En la figura 9 se muestran los valores de TR obtenidos. En la obra se pudo constatar que el excelente montaje de todos los elementos interiores permitió obtener los TR previstos al inicio de la etapa proyectual.

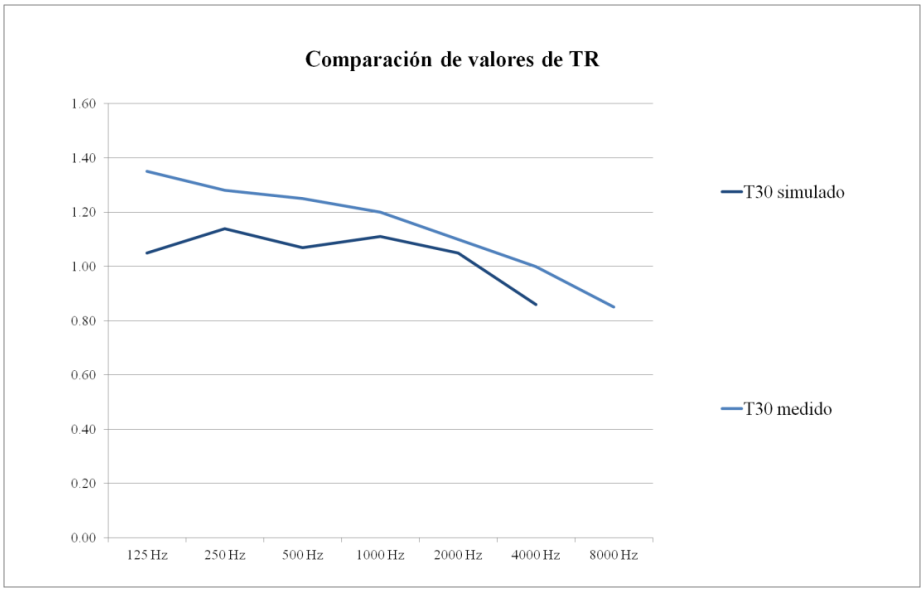


Figura 9: Valores de tiempo de reverberación medidos en 2024 y los simulados durante el proceso de diseño

Figura 10: Vista de la sala desde el escenario

Figura 11: Vista de la sala desde uno de los accesos

4. CONCLUSIONES

Este artículo muestra el proceso aplicado en el diseño del Teatro Manuel Belgrano. La tipología elegida y los condicionantes de la obra de arquitectura determinaron el trabajo sobre el campo acústico temprano. La estrategia proyectual desarrollada permitió revertir los problemas clásicos de la forma en abanico, optimizada para alcanzar tres objetivos acústicos simultáneos: lograr un campo sonoro envolvente, alcanzar una reverberación adecuada y distribuir la energía acústica de forma uniforme. Este resultado fue posible gracias a la predisposición y flexibilidad del equipo de arquitectura. Las mediciones realizadas según la norma ISO-3382 en la sala no mostraron desviaciones significativas respecto a las predicciones. El teatro se inauguró a principios de 2023 y posee una programación plena de actividades.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Colegio de Graduados en Ciencias Económicas de la provincia de Tucumán y a los estudios Atrio Arquitectura y LumiAR.

REFERENCIAS

[1] Farina, M. A. *Tipologías arquitectónicas y calidad acústica de salas para música*. Colección Música y Ciencia, Universidad Nacional de Quilmes, 2019.

[2] Kahle, E. "Halls without qualities - or the effect of acoustic diffusion". Proceedings of the Institute of Acoustics: Auditorium Acoustics, Hamburg, Germany, October (2018), 4-6.

[3] Pätynen, J., Tervo, S., Robinson, P., and Lokki, T. "Concert halls with strong lateral reflections enhance musical dynamics". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111(12) (2014), 4409-4414.

[4] Green, E., and Kahle, E. "Dynamic spatial responsiveness in concert halls". Proceedings of the Institute of Acoustics: Auditorium Acoustics, Hamburg, Germany, October (2018), 4-6.

[5] Blauert, J. "Conceptual Aspects Regarding the Qualification of Spaces for Aural Performances". Acta Acustica united with Acustica 99 (2013), 1-13.DOI:10.1142/S2591728520500218. eprint: https://doi.org/10.1142/S2591728520500218.

[6] ISO 3382-1:2009. Acoustics - Measurement of Room Acoustic Parameters–Part 1: Performance Spaces, Intl. Org. for Standardization, ISO, Geneva, Switzerland (2009).

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Parámetros espaciales en salas de control para música

Farina, M. A. [†, ‡, 1]; **Gauvron, I.** [§, ⋆, 2]; **Gonzalez, S. G.** [§, 3]; **Kosiner Blanco, E.** [§, ⋇, 4]; **Rodríguez, L. E.** [♣, 5]

[†] Instituto de Investigación en Producción y Enseñanza del Arte Argentino y Latinoamericano (IPEAL). Facultad de Artes, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires

[‡] Programa: Sistemas y espacialidad en el arte sonoro (SEAS). Escuela Universitaria de Artes. Universidad Nacional de Quilmes, Buenos Aires

[§] AES Argentina

[⋆] Instituto de sonido ECOS, Avellaneda

[⋇] Departamento de Artes Musicales y Sonoras (DAMUS). Universidad Nacional de las Artes (UNA), CABA

[♣] Becario CONICET con lugar de trabajo SEAS-EUDA-UNQ

[1] mandreafarina@gmail.com, [2] in_dio_ar@yahoo.com.ar, [3] sgustavogonzalez@gmail.com, [4] ezekb3@gmail.com, [5] leandroerodriguez@gmail.com

Resumen El trabajo en una sala de control para música deja de manifiesto la relevancia de la sensación espacial y de la perspectiva acústica en estos recintos determinada por la distancia y la profundidad de las fuentes, la ubicación espacial de los instrumentos dentro del orgánico y el balance espectral. Las normas ISO 3382 e IRAM 4109 sólo consideran el análisis de parámetros espaciales en grandes salas de concierto. Tampoco existe, en la bibliografía, un análisis espacial aplicado a las salas de control, salvo algunas referencias sobre la difusión sonora tratada de manera estadística. El objetivo final de esta investigación es obtener parámetros, físicos y perceptuales, que cuantifiquen el comportamiento espacial de las salas de control para música y sirvan de guía para su diseño. En este trabajo mostraremos los resultados obtenidos a la fecha a partir de las mediciones acústicas realizadas de parámetros espaciales en salas de control.

Palabras clave: acústica, estudios de grabación, LF, IACC.

Abstract The work in a music control room highlights the importance of spatial perception and acoustic perspective in these venues, determined by the distance and depth of the sources, the spatial arrangement of the instruments, and the spectral balance. ISO 3382 and IRAM 4109 standards only consider the analysis of spatial parameters in large concert halls. There is also no spatial analysis applied to control rooms in the literature, except for a few references to statistically sound diffusion. The ultimate goal of this study is to find physical and perceptual criteria that measure the spatial behavior of music control rooms and act as a design guide. In this paper, we present the results obtained from acoustic measurements of spatial parameters in control rooms.

Keywords: acoustics, music recordings studios, LF, IACC.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se diseña o realiza un análisis acústico de una sala de control, para un estudio de grabación de música, es común abordar, dependiendo del criterio de diseño, el posicionamiento de los monitores y el oyente, el tiempo de integración, el mobiliario y los materiales para el control de reflexiones, junto con los modos de resonancia y el tiempo de reverberación, entre otros aspectos. No existen estudios relacionados con parámetros espaciales específicos para salas de control, ni bibliografía que se refiera a cualidades cuantificables en estos recintos. Sin embargo, hay mucho escrito sobre salas de concierto [1] - [6].

2. PARÁMETROS A ANALIZAR

En la ya conocida y amplia bibliografía respecto de Eficiencia lateral (LE), Fracción de energía lateral (LF) y Correlación Interaural Cruzada (IACC) se establecen diferentes límites en las integrales de los impulsos. Autores, dedicados a grandes salas, como Jordan [2], Barron y Marshall [3], Kleiner [4] y Schroeder [6] aportan sus enfoques con las ecuaciones 1 a 5:

$$LE = \left[\frac{\int_{0,025}^{0,08} {h_8}^2\,(t)\,dt}{\int_0^{0,08} {h_0}^2\,(t)\,dt}\right] \quad (1)$$

$$LF = \left[\frac{\int_{0,005}^{0,08} {h_8}^2\,(t)\,dt}{\int_0^{0,08} {h_0}^2\,(t)\,dt}\right] \quad (2)$$

$$LFC = \left[\frac{\int_{0,005}^{0,08} \left| h_8\,(t) h_0\,(t) \right| dt}{\int_0^{0,08} {h_0}^2\,(t)\,dt}\right] \quad (3)$$

Para el caso del IACC, a partir de la función de correlación cruzada $\Phi_{d,i}(\tau)$ entre las señales que llegan a ambos oídos de un oyente:

$$\Phi_{d,i}(\tau) = \frac{\int_0^t h_d(t) h_i(t+\tau)\,dt}{\left\{\int_0^t {h_d}^2(t)\,dt \int_0^t {h_i}^2(t)\,dt\right\}^{1/2}} \quad (4)$$

en la que $h(t)_d$ es la respuesta al impulso en el oído derecho y $h(t)_i$ es la respuesta al impulso en el oído izquierdo. Se define el parámetro por medio de la siguiente expresión:

$$\text{IACC} = \text{máximo } \Phi_{d,i}(\tau) \text{ para } |\tau| \leq 1 \text{ ms} \quad (5)$$

Además de los parámetros físicos, existen rasgos perceptuales como el ancho aparente de la fuente (*Apparent Source Width* ASW) y la sensación de inmersión del oyente (*Listener Envelopment* LEV). Estos parámetros califican la respuesta de los oyentes ante un estímulo físico en un espacio acústico [7]. El ASW [8] se define como el ancho o la amplitud horizontal del evento sonoro. Se lo relaciona con la textura lateral y la sensación de estar inmerso en el campo sonoro. El LEV [9], también llamado espacialidad, sensación de espacialidad o impresión espacial, es la sensación que experimenta un oyente de estar rodeado o de ser envuelto por el sonido.

2. METODOLOGÍA

Dados los cortos tiempos de integración típicos de las salas de control (de 9 ms a 30 ms), se descartaron para este trabajo, a partir del análisis y evaluación de las primeras experiencias realizadas, los siguientes parámetros: Eficiencia Lateral (LE) y Coeficiente de Fracción de Energía Lateral (LFC), como así también $IACC_A$ (0 ms y 500 ms a 2000 ms) e $IACC_L$ (80 ms y 500 ms a 2000 ms), por tener límites en sus integrales extremadamente grandes.

Para esta investigación, se propone una modificación al modelo original de LF que utiliza 5 ms como el límite inicial de la integral en la respuesta al impulso (IR) del micrófono bidireccional, con el objetivo de quitar todo el remanente de energía que pueda llegar al micrófono en ese tiempo. El cambio sugerido considera tomar la señal desde el comienzo [10]. Este comienzo se establece no desde el pico máximo del impulso, sino 20 dB por debajo antes del mismo.

Por ende, este trabajo consistirá inicialmente en el relevamiento y análisis de los parámetros: LF (con ambos límites para las integrales, 5 ms y 0 ms) e $IACC_E$ (early).

2.1 Equipamiento

- Micrófonos: omnidireccional THE TT3M y bidireccional PBM R1 (medición de LF), DMCIC[1] (medición de IACC); con un soporte especialmente fabricado para cada mensura, forzando que las capturas se realicen siempre de la misma manera. Esto último es relevante dado que el trabajo se basa en la comparación de diferentes salas de control y no con valores absolutos relevados de manera independiente.
- Interfaces utilizadas: M-Audio Fast Track Pro, Zoom H4, SSL2+
- Medidor de nivel de presión sonora: Rion NL27
- Software utilizado: SciLab, Excel, SpectraPlus, ARTA, Smaart, Aurora

Para obtener las respuestas al impulso necesarias se utilizó un sistema propio constituido por un mínimo de dos y un máximo de cinco computadoras con sus respectivas interfaces de dos canales, recibiendo las señales necesarias de los sistemas (micrófonos con preamplificadores y generador de ruido) a través de dos divisores óctuples. Cada computadora utilizó un software distinto para obtener la respuesta en tiempo real, con fines de verificación y redundancia posterior. En la figura 1 puede observarse un esquema del sistema mencionado, y en la figura 2, fotos del uso del sistema.

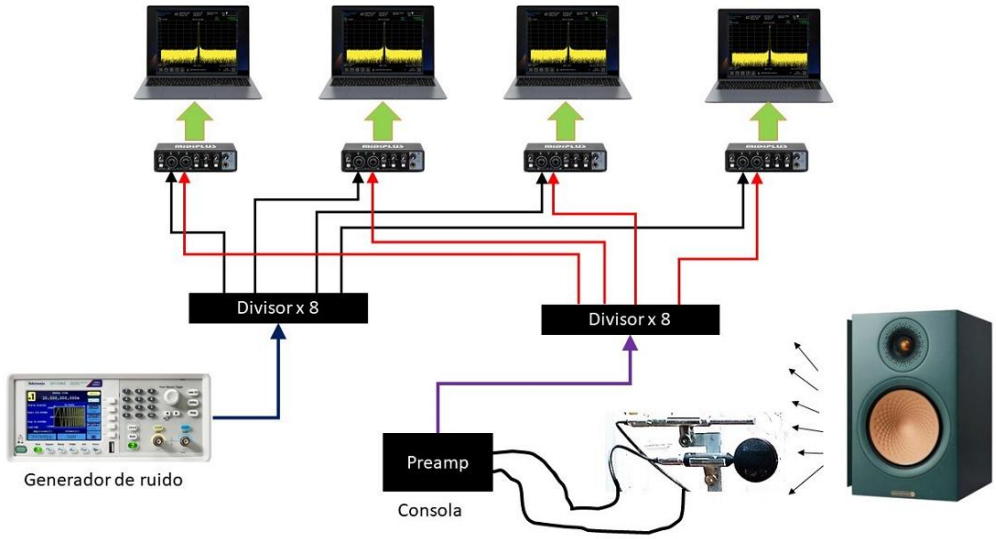


Figura 1: Sistema de medición.

[1] DMCIC (Dispositivo Medidor de Correlación Interaural Cruzada) compuesto por un par de "orejas de madera con forma de disco" (MDF de 3 mm de espesor) y un soporte desvinculado con elásticos. El sistema completo es desarmable y se puede actualizar y/o modificar a voluntad si se requiere. Utiliza cápsulas Audio-Technica MB 4K apareadas en el espectro.

Figura 2: Sistema de medición en dos de los estudios de grabación estudiados

2.2 Protocolo de medición

Toda medición debe comenzar con una calibración, en especial cuando existe más de un micrófono involucrado y van a compararse sus energías.

Mediante el uso de ruido rosa con un solo monitor emitiendo la señal a una distancia de campo directo (62 cm), con la cápsula del micrófono omnidireccional orientada al centro de radiación del monitor en cuestión se releva su espectro (con ventana Hann de 16384 puntos). Con esa respuesta almacenada en memoria, se coloca en el mismo lugar el micrófono bidireccional con su cara positiva orientada en la misma posición, modificando la ganancia hasta que el espectro, en el rango de interés (125 Hz a 4000 Hz), se asemeje lo suficiente. Podemos ver en la figura 3 el espectro con las ganancias apareadas de ambos micrófonos.

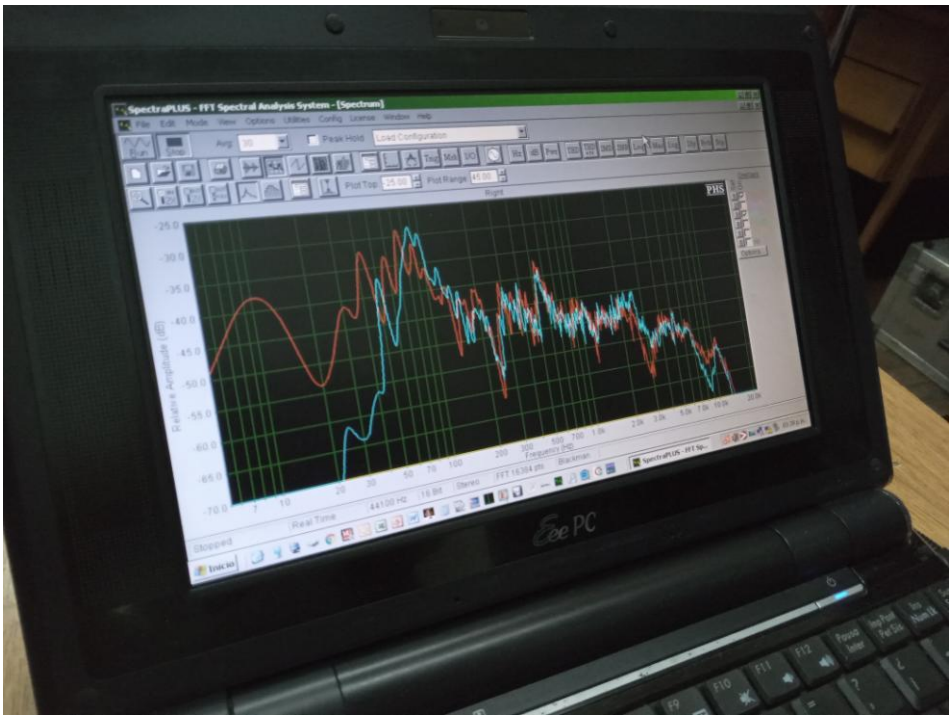


Figura 3: Espectros de los micrófonos.

Del mismo modo, utilizando el dispositivo DMCIC se coloca la cápsula derecha orientada al centro de radiación del monitor y se releva su espectro, y luego, con esa respuesta almacenada en memoria, se ubica en el mismo lugar la capsula izquierda orientada en la misma posición, modificando la ganancia

hasta que el espectro se asemeje lo suficiente en el rango de interés. Podemos ver en la figura 4 un resumen visual de este procedimiento en particular.

Figura 4: Sistema de medición.

Posteriormente se releva el nivel y espectro del piso de ruido acústico existente para verificar condiciones óptimas de trabajo. En todos los casos las diferencias superaron los 45 dBC, en un rango espectral aún más extenso que el de interés. Una vez calibrado el sistema con estas condiciones, se comienza con las capturas de respuesta al impulso.

En búsqueda de satisfacer uno de los principales objetivos específicos de esta investigación: obtener parámetros, físicos y perceptuales que cuantifiquen el comportamiento espacial de las salas de control para música; ampliamos el parámetro fracción de energía lateral (latF) a fracción de energía longitudinal (lonF) y fracción de energía vertical (verF). A su vez, la misma extensión se aplicó a la correlación cruzada interaural, renombrándola a correlación cruzada lateral (CClat), y adicionando la correlación cruzada longitudinal (CClon) y la correlación cruzada vertical (CCver).

3. SOFTWARE PROPIO

Para el procesamiento de las IR de cada micrófono se programó software propio que contemple los límites de las integrales en los valores ya descriptos en la metodología y se le sumaron nuevos límites superiores. Estos límites se establecieron en: 40 ms, 30 ms, 20 ms y 10 ms. Existen antecedentes a este respecto, con el trabajo en controles de estudios sobre alineamiento y Claridad [11]. Para el filtrado de las IR se empleó convolución directamente en el dominio del tiempo, y utilizando en cada filtro de octava la ecuación de la respuesta al impulso ($h(t)$) determinada por sus frecuencias superior e inferior [12]. La duración de la $h(t)$ se fijó en 90,57 ms, equivalente a 3994 muestras en 44100 Hz. Además se utilizaron filtros por FFT. El resultado obtiene las IR filtradas por cada banda de octavas. Todo el desarrollo del software está basado en VBA y SciLab.

4. ANÁLISIS

Tal como se menciona en el apartado anterior, se determinó desde el inicio la necesidad de modificar los límites de las integrales a valores que tengan sentido físico en una sala de control.

Una de las primeras pruebas consistió en cotejar los resultados del parámetro LF obtenidos con diferentes software comerciales con el propuesto, utilizando las mismas IR. El resultado fue satisfactorio, tal como se observa en la figura 5.

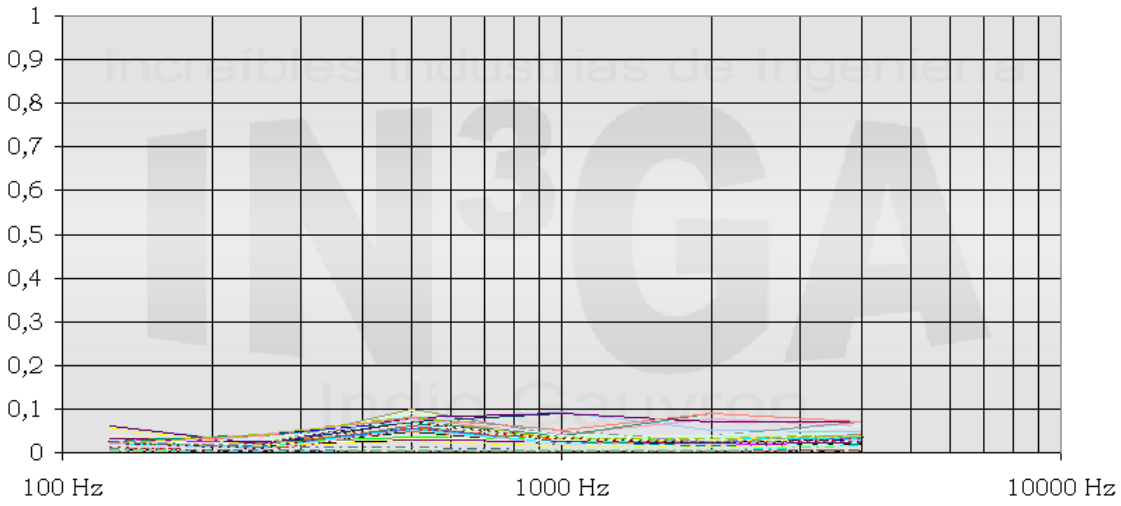


Figura 5: Curvas (80) correspondientes a LF de software comercial y propuesto en salas de control de cinco estudios de grabación.

Las diferencias entre las distintas curvas tienen que ver con cada sala de control en particular. El grado de discrepancia entre el software comercial y propuesto no es significativo dado que se halla en el orden de 10^{-4}.

Se puede apreciar que los valores son todos extremadamente bajos, más aún que los sugeridos por Barron y Mashall para salas de conciertos (0,1 a 0,25). Esta fue una de las razones que determinó los límites para las integrales en: 40 ms, 30 ms, 20 ms y 10 ms y que permite evaluar comparativamente los resultados de LF en un auditorio. En la figura 6 se muestran las curvas de tres salas de control para estos nuevos límites. En la figura 7 se observa la comparación con el rango de valores propuesto para salas de concierto.

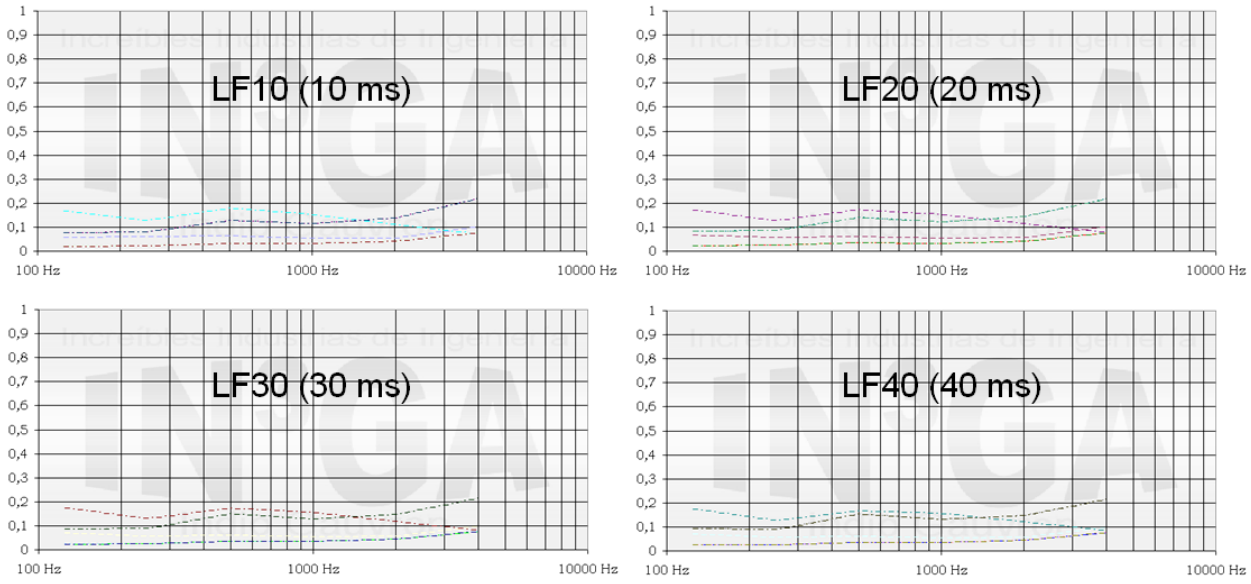


Figura 6: LF de software propuesto.

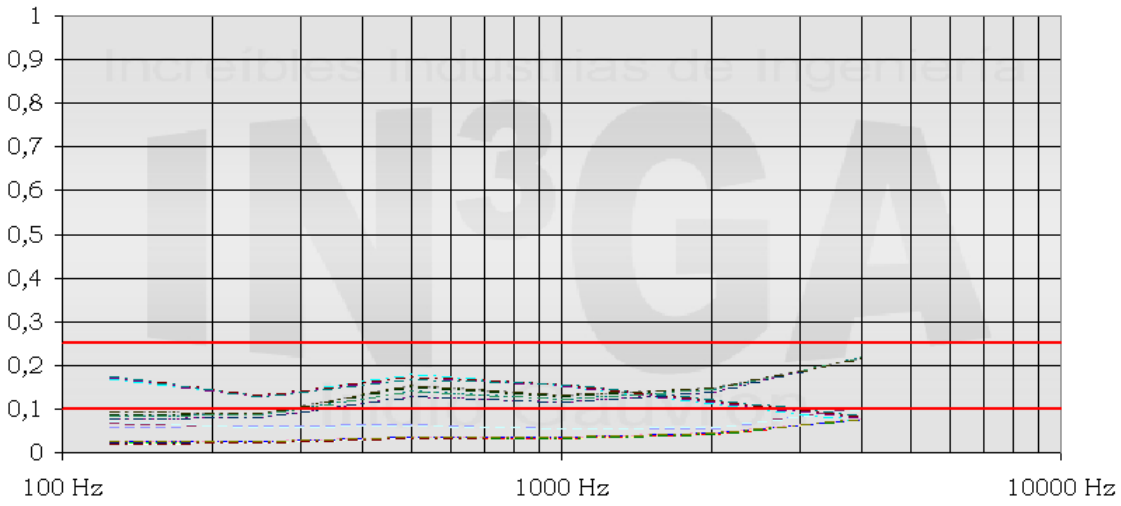


Figura 7: LF de salas de control y rango que se espera en salas de concierto.

Uno de los principales motivos por el cual se esperaba hallar valores cercanos a las salas de concierto era por la posibilidad de emplear los modelos matemáticos de ASW que proponen Morimoto y Iida [8] y Marshall y Barron [13]. A partir de las pruebas realizadas y los valores de ASW, surgieron nuevos parámetros a contemplar de forma tal que se puedan compensar las diferencias entre dos entornos acústicos marcadamente diferentes.

Respecto de la fracción de energía longitudinal (lonF) y la fracción de energía vertical (verF) los resultados han demostrado que no hay diferencias muy significativas, comparadas con las laterales. Si se puede deducir –principalmente con la fracción de energía vertical– la incidencia del tratamiento interno del control y cuán necesario se hace un relevamiento de más parámetros, se podrían obtener conclusiones que acompañen a la percepción de entornos. En los controles medidos se observaron tratamientos acústicos específicos con distintos enfoques respecto de las reflexiones tempranas (trampas absorbentes suspendidas en el cielorraso o placas difusoras de muy alta frecuencia, escritorios calculados para evitar las interferencias o mesa grande).

En relación con el IACC se evaluó el 1 – $IACC_E$ [14], conocido como Factor de Espacialidad. Los valores obtenidos son bajos, esperables según la relación 1- $IACC_E$ que podría determinar LEV [15] en una sala de control. En estos recintos la sensación de inmersión del oyente debería ser provista por la señal que reproducen los monitores y no necesariamente por el entorno acústico. En una sala de concierto el LEV debe ser alto y se evalúa a partir del rango completo ($IACC_A$) o el tardío ($IACC_L$). En un control de estudio la sensación de inmersión del oyente se logra con la energía temprana, por eso se utiliza $IACC_E$.

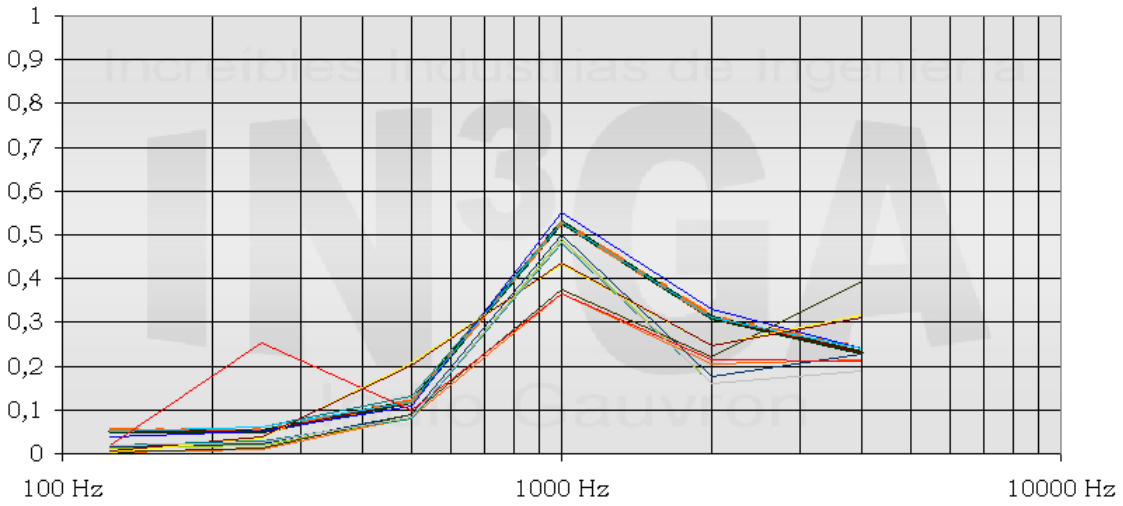


Figura 8: 1 - IACC (lateral) de cuatro controles diferentes.

En la figura 9 se observa el 1 – $IACC_E$ longitudinal con una tendencia creciente bien pronunciada desde baja a alta frecuencia. Sin embargo haciendo un análisis de correlación cruzada, para evaluar los tiempos de integración (debemos aclarar que todos los controles relevados están basados en el criterio LEDE de Davis [16]; en mayor o menor grado), surgieron indicios de cómo, espectralmente, se comportan estos aportes de energía trasera.

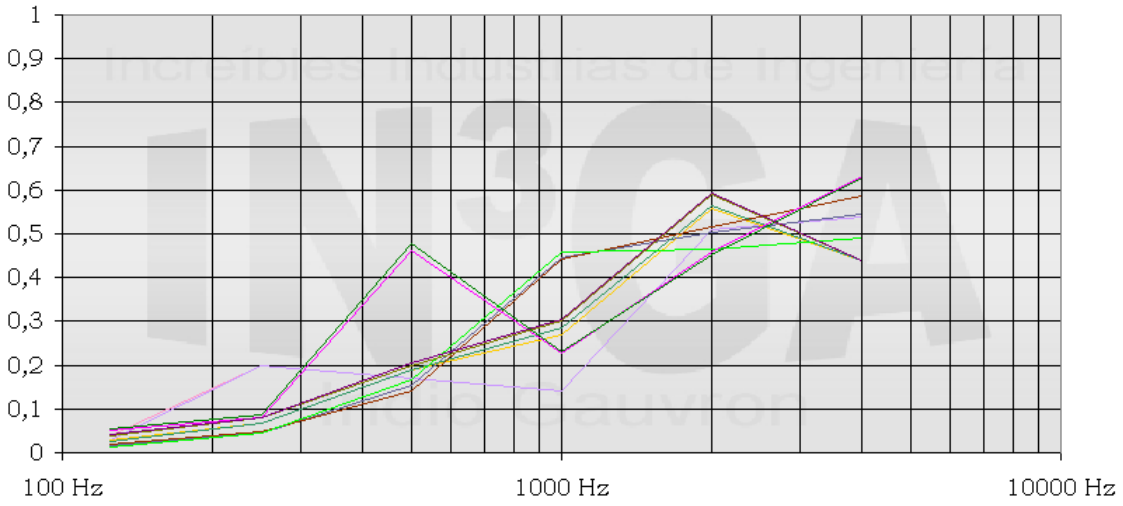


Figura 9: 1 - IACC (longitudinal) de cuatro controles diferentes.

En el análisis con 1 – $IACC_E$ vertical no hay un patrón que identifique la forma en que los diferentes tratamientos acústicos de cada cielorraso aporte alguna diferencia sustancial (figura 10).

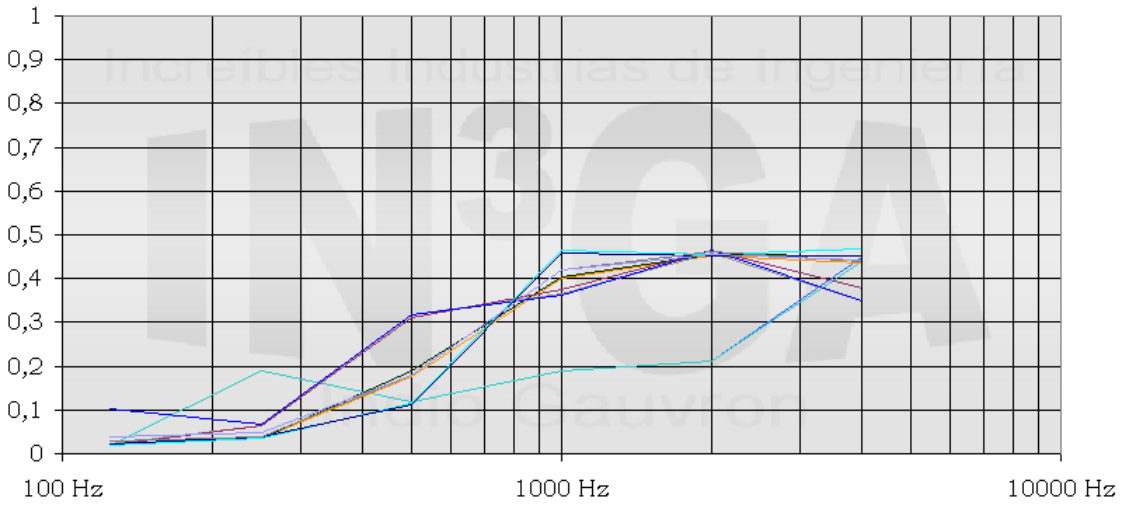


Figura 10: 1 - IACC (vertical) de cuatro controles diferentes.

5. CONCLUSIONES

A partir de estos resultados se propone un índice de Calidad Acústica para Salas de Control ICAC[2], que requiere de nuevos parámetros a considerar, medir y/o procesar.

En función de los avances de la investigación a la fecha, se proponen los siguientes:

1) Tm [17] y ΔTm (delta Tm): diferencia entre TR medido (a partir de las capturas omnidireccionales en el punto de escucha "pe") y el Tm teórico.
2) Evolución de la Claridad (C10 a C100) con la IR omnidireccional en el "pe" y distancia (en dB) respecto de la bidireccional en:
   a) latF
   b) lonF
   c) verF
3) Distancia crítica (DC) a partir de los datos relevados de:
   a) Factor de direccionalidad Q del monitor
   b) Tiempo de reverberación TR medido a partir de la captura omnidireccional en "pe" (s)
   c) Volumen del control (m^3)
   d) Con esta DC en metros, a partir de su curva podemos calcular:
4) Distancia Energética (DE): se trata de la diferencia en dB entre el sonido directo y el campo reverberante. Este valor nos dice, de alguna manera, cuán "inmersos" dentro o fuera del control estamos respecto de los monitores. El cálculo permite ponderar las distancias del oyente respecto del resto de los parámetros relevados en función de su grado de inmersión (figura 11).

[2] Otros autores han propuesto índices de este tipo aplicados a salas de concierto, por ejemplo, el Acoustical Quality Index (AQI) de Beranek.

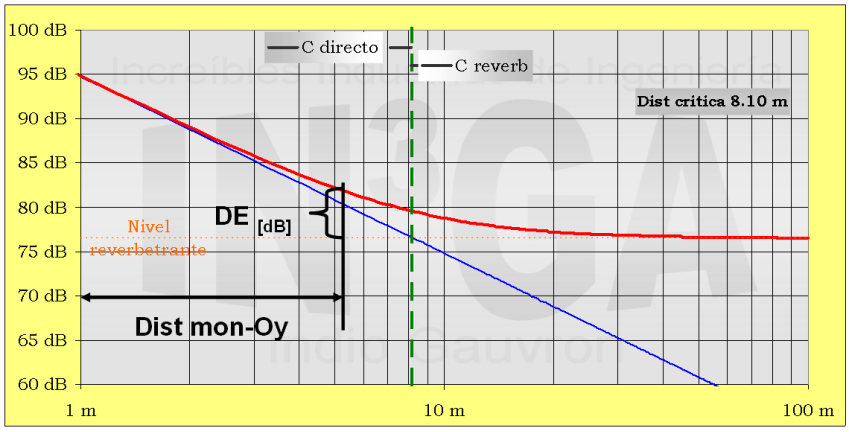


Figura 11: Distancia energética.

5) Correlación Cruzada "larga" CC, principalmente con CClon usando el DMCIC para evaluar con las IR filtradas, el tiempo de integración de las reflexiones tardías traseras, si existiesen, y evaluar en qué bandas de octava a partir de los valores de CC poseen energía relevante.

6) Análisis de los ecogramas de cada impulso, normalizando el nivel máximo de cada micrófono y evaluando las diferencias temporales y energéticas producto del mobiliario cercano. Desde este enfoque se puede determinar la contribución del tratamiento acústico y los objetos alrededor de la zona de escucha.

7) Trabajar con los modelos matemáticos clásicos de ASW y LEV, pero ponderarlos con esta nueva serie de parámetros específicos.

En el mediano plazo, con futuras mediciones de una mayor cantidad de salas de control de estudios de grabación y su posterior procesamiento, se pretende validar este nuevo índice (ICAC) propuesto.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Sonido ECOS y a los estudios de grabación de música: Puesto a Tierra, Titanio, Syntagma, Telechanski y Libres por prestar sus espacios para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

[1] M. Barron, *Auditorium acoustics and architectural design*, Spon Press, 2009.
[2] V. L. Jordan, *Acoustical design of concert halls and theatres*, London: Applied Science Publishers, 1980.
[3] M. Barron , A. H. Marshall, "Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure". *Journal of sound and Vibration*, 77(2):211-32, 1981.
[4] M. Kleiner, "A new way of measuring the lateral energy fraction". *Applied Acoustics*, 27(4):321-7, 1989.
[5] L. Beranek, "Aspects of Concert hall acoustics", *Architectural Science Review*, 54(1):5-14, 2011.
[6] M. R. Schroeder, D. Gottlob, K. F. Siebrasse, "Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56(4):1195-201, 1974.
[7] M. A. Farina. *Tipologías arquitectónicas y calidad acústica de salas para música*. Colección Música y Ciencia, Universidad Nacional de Quilmes, 2019.
[8] M. Morimoto, K. Iida, "A practical evaluation method of auditory source width in concert halls". *Journal of the Acoustical Society of Japan* (E), 1995.
[9] J. S. Bradley, G. A. Soulodre, "Objective measures of listener envelopment, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5):2590-7, 1995.
[10] M. Frank, "Source width of frontal phantom sources: Perception, measurement, and modeling", *Archives of Acoustics*, 38(3):311-9, 2013.
[11] I. Gauvron I, M. A. Farina, "Alineamiento y claridad: el alineamiento del subwoofer en un estudio y su

incidencia con parámetros acústicos de claridad", *Actas XVI Congreso Argentino de Acústica (AdAA 2018)*, Buenos Aires, 2018. https://adaa.org.ar/wp-content/uploads/2021/04/adaa2018-035.pdf

[12] F. Miyara, *Software-based acoustical measurements*, Springer International Publishing, 2017.

[13] A.H. Marshall, M. Barron. "Spatial responsiveness in concert halls and the origins of spatial impression". *Applied Acoustics*, 2001

[14] L. Beranek, "Acoustics and musical qualities". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(5):2647-52, 1996

[15] H. Lee, "Apparent source width and listener envelopment in relation to source-listener distance". *In AES 52nd international conference: Sound field control-engineering and perception. Audio Engineering Society*, 2013.

[16] D. Davis, C. Davis, "The-Lede-Concept for the Control of Acoustic and Psdychoacoustic Parameters in Recording Control Rooms", *In AES Convention 63 Audio Engineering Society*, 1979.

[17] I. Gauvron, "Nuevo modelo matemático del Tm (tiempo de reverberación nominal) para el cálculo del tiempo de reverberación final en controles de estudios de grabación de música". *En XVI Congreso Argentino de Acústica (AdAA 2018)*. Buenos Aires, 2018. https://adaa.org.ar/wp-content/uploads/2021/04/adaa2018-005.pdf

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Caracterización de mantos densos de lana rústica de ovejas como aislantes de ruido de impactos

Federico Iasi [*, 1]; Nilda Vechiatti [*, 2]; Germán Galarza [*, 3]; Daniel Tomeo [*, 4]; Alejandro Armas [*, 5]; Alejandra Núñez Berté [#, 6]

[*] Laboratorio de Acústica y Luminotecnia, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires

[#] Maestría SAU - FADU - UBA

[1] fedeiasi@yahoo.com, [2] nildavec@gmail.com, [3] gerzgalar@gmail.com, [4] d_tomeo@yahoo.com, [5] ale_armas@yahoo.com, [6] anunezberte@gmail.com

Resumen Este trabajo da continuidad a una línea de investigación desarrollada en el Laboratorio LAL-CIC, orientada a la caracterización acústica de mantos de lana rústica de oveja. Estos materiales se alinean con los principios de la economía circular, ya que se elaboran a partir de lana de descarte, un subproducto que de otro modo constituye un residuo. En períodos previos, se evaluaron sus propiedades fonoabsorbentes, así como su desempeño como parte de sistemas constructivos livianos destinados al aislamiento acústico en tabiques de construcción en seco. En esta nueva etapa, el enfoque se orientó al análisis de su comportamiento frente al ruido de impactos, presentándose los resultados de ensayos realizados en cámaras de transmisión vertical. Se estudió la influencia del espesor de los mantos, a partir de la colocación de una o más capas entre elementos rígidos de particiones horizontales, para dos montajes de ensayo diferentes. Los resultados obtenidos permiten avanzar en la comprensión del potencial de estos materiales como soluciones acústicas sustentables para aplicaciones en pisos o entrepisos, especialmente en sistemas constructivos de bajo impacto ambiental.

Palabras clave: aislamiento acústico, ruido de impactos, lana de oveja.

Abstract This work continues a line of research developed at the LAL-CIC Laboratory, focused on the acoustic characterization of rustic sheep wool mats. These materials are aligned with the principles of the circular economy, as they are made from discarded wool, a by-product that otherwise constitutes waste. Previous studies evaluated their sound-absorbing properties and their performance as part of lightweight construction systems intended for acoustic insulation in drywall partitions. In this new stage, the focus was on analysing their behaviour against impact noise, presenting the results of tests conducted in vertical transmission chambers. The influence of mat thickness was studied, based on the placement of one or more layers between rigid elements of horizontal partitions, for two different test setups. The results obtained allow us to advance our understanding of the potential of these materials as sustainable acoustic solutions for applications in floors or mezzanines, especially in low-environmental-impact construction systems.

Keywords: acoustic isolation, impact noise, wool sheep.

1. INTRODUCCIÓN

La crisis climática actual impulsa la búsqueda de soluciones sostenibles que integren los principios de la economía circular y reduzcan la huella ambiental a lo largo del ciclo de vida de los materiales. En este contexto, el sector de la construcción —responsable de un alto consumo de recursos y energía, así como de una fracción significativa de las emisiones globales de carbono— enfrenta el desafío de adoptar materiales y sistemas que minimicen su impacto ambiental.

Los materiales biobasados, de origen natural o derivados de residuos agroindustriales, se presentan como alternativas prometedoras para avanzar hacia una arquitectura ambientalmente consciente. Su empleo permite disminuir las emisiones asociadas a la producción de materiales convencionales y aprovechar de manera más sostenible los recursos naturales. Entre ellos, la lana de oveja destaca por sus propiedades térmicas y acústicas, su carácter renovable y reducida huella ambiental.

En la provincia de Buenos Aires, la lana rústica o gruesa proveniente de razas destinadas al consumo de carne constituye un residuo sin valor textil que requiere ser gestionado. La transformación de este subproducto en mantos aislantes representa una oportunidad dentro de la economía circular, al reincorporar un desecho en un nuevo ciclo productivo con valor agregado.

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar el desempeño acústico de mantos densos de lana rústica de oveja utilizados como aislantes de ruido de impactos en sistemas constructivos, contribuyendo al desarrollo de materiales sostenibles para la arquitectura.

2. ENSAYOS DE AISLAMIENTO A RUIDO DE IMPACTOS

Para la caracterización de los mantos de lana de oveja como aislantes de ruido de impactos, siguiendo procedimientos normalizados, se realizaron ensayos en el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (LAL-CIC).

2.1. Instrumental utilizado

- Cámaras de transmisión vertical del Laboratorio LAL-CIC
- Máquina de impactos normalizada, marca Brüel & Kjaer, modelo 3204
- Medidor de nivel sonoro y analizador de espectros en tiempo real, marca Brüel & Kjaer, modelo 2250, Nº serie: 3008977
- Fuente acústica de referencia, marca Brüel & Kjaer, modelo 4231, Nº serie: 2524659
- Fuente emisora de sonido (caja acústica de tres vías, con amplificador de audiofrecuencias).

2.2. Cámaras de transmisión utilizadas

Para la realización de estos ensayos se utilizaron las cámaras de transmisión vertical para ensayo de revestimientos de pisos, que son dos recintos superpuestos, separados horizontalmente por una partición de hormigón de 50 cm de espesor, en cuyo centro se encuentra el “piso de referencia” sobre el que se coloca el material a ensayar. En la Figura 1 se muestra un esquema de las mencionadas cámaras.

El volumen de la cámara emisora (cámara superior derecha), es de 99 m^3; y el de la cámara receptora (cámara inferior derecha), es de 112 m^3.

Para medir la mejora del aislamiento acústico al ruido de impactos mediante recubrimientos de piso, la norma de aplicación define dos tipos de elementos de referencia normalizados:

- Piso de referencia pesado
- Pisos de referencia livianos (4 tipos diferentes)

En las cámaras de transmisión vertical del LAL-CIC, el piso de referencia pesado está constituido por una losa de hormigón armado de 12 cm de espesor. Para el piso de referencia liviano se incorpora un piso simulado de madera (Anexo G de la IRAM-ISO 10140-5), que consiste en un piso superior liviano montado sobre el piso de referencia pesado. El piso superior liviano utilizado en este caso fue una placa de madera aglomerada tipo OSB, de 2 m de largo, 1,22 m de ancho y 25 mm de espesor, montada sobre pies de madera (atornillados y encolados a la placa), con una altura de 200 mm y una sección transversal de 50 mm x 50 mm, separados 600 mm entre centros, estando los pies exteriores situados a 100 mm de los bordes de la placa. Además, el piso de referencia liviano se coloca sobre el piso de referencia pesado intercalando una capa delgada de material elástico.

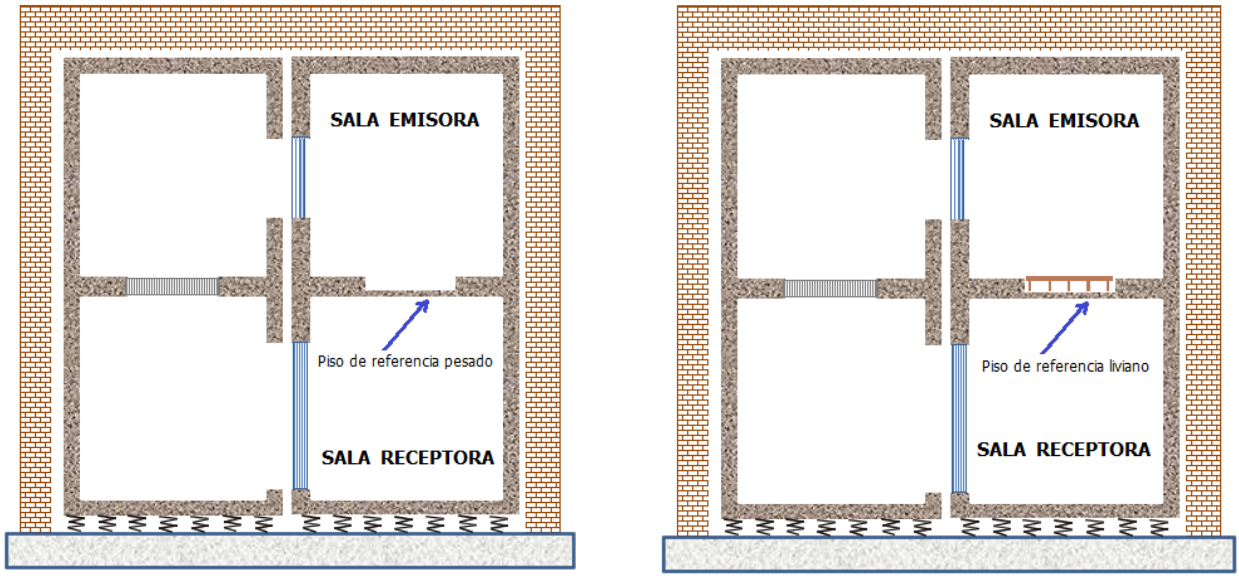


Figura 1: Corte esquemático de las cámaras de transmisión del LAL-CIC

2.3. Descripción de las muestras estudiadas

Para caracterizar el comportamiento como aislante de ruido de impactos de la lana de oveja, se utilizó un manto de lana rústica fabricado con un proceso de doble punzonado mecánico en seco (sin vapor, ni calor), que produce que las escamas de las fibras de la lana se traben entre sí y mantengan la forma del material. En promedio, el manto tuvo un espesor de 11 mm y una densidad volumétrica de 44 kg/m^3. En la Figura 2 se muestra una fotografía del material.

Figura 2: Manto de lana rústica de ovejas

Se ensayaron dos tipos de montaje:

- Montaje 1: “loseta” de hormigón armado, de 110 kg de peso, 8 cm de espesor y 0,62 m^2 de área, apoyada sobre la “losa” (piso de referencia pesado), con el material elástico intercalado entre ambas, simulando una losa flotante.
- Montaje 2: “tabla” de madera tipo OSB, de 34 kg de peso, 22 mm de espesor, y 2,44 m^2 de área apoyada sobre el “piso de referencia liviano”, con el material elástico intercalado entre ambos. La norma de aplicación establece este montaje para la simulación de un piso liviano, como por ejemplo entrepisos.

En la Figura 3 se pueden apreciar fotografías de los montajes de ensayo.

3a: Montaje 1 3b: Montaje 2

Figura 3: Montajes de ensayo

Con el objeto de evaluar la influencia del espesor, se ensayaron ambos montajes con 1, 2 y 4 capas de mantos de lana, dando lugar a seis tipos distintos de revestimientos:

- Revestimiento 1: Loseta + 1 capa de lana (11 mm)
- Revestimiento 2: Loseta + 2 capas de lana (22 mm)
- Revestimiento 3: Loseta + 4 capas de lana (44 mm)
- Revestimiento 4: Tabla + 1 capa de lana (11 mm)
- Revestimiento 5: Tabla + 2 capas de lana (22 mm)
- Revestimiento 6: Tabla + 4 capas de lana (44 mm)

2.4. Metodología de ensayo

Para evaluar el aislamiento a ruido de impactos, se realizaron ensayos siguiendo los lineamientos de la norma IRAM-ISO 10140 (equivalente a la ISO 10140 y sus respectivas adendas).

Se utilizó una máquina normalizada para generar ruido de impactos en la cámara emisora, accionándola directamente sobre el piso de referencia correspondiente, y luego sobre el recubrimiento para pisos sometido a ensayo.

En ambas cámaras se registró el nivel sonoro continuo equivalente para las bandas de tercios de octava con frecuencias centrales comprendidas entre 100 Hz y 5 000 Hz, para distintas posiciones de micrófono y de la máquina de impactos. A los niveles sonoros medidos en el local receptor se les aplicó la corrección por ruido de fondo, y por el ruido aéreo transmitido desde la cámara emisora generado por el funcionamiento de la máquina de impactos. Además, en la cámara receptora se midieron los tiempos de reverberación para diferentes posiciones de micrófono y de fuente emisora de sonido, lo que permitió obtener el nivel sonoro normalizado respecto de un área equivalente de absorción sonora de 10 m^2 (establecida en la norma).

Como resultado de este ensayo se obtuvieron:

- L_{n0}: nivel de presión sonora de ruido de impactos normalizado transmitido a través del piso de referencia sin el recubrimiento bajo ensayo (en dB)
- L_{n1}: nivel de presión sonora de ruido de impactos normalizado transmitido a través del piso de referencia con el recubrimiento bajo ensayo (en dB)
- ΔL: mejora del aislamiento a ruido de impactos ($\Delta L = L_{n0} - L_{n1}$, en dB)

A partir de los niveles L_{n0} y L_{n1}, siguiendo el procedimiento definido en la Norma IRAM-ISO 717-2 (equivalente a ISO 717-2), se calcularon magnitudes globales que caracterizan el comportamiento acústico de los materiales ensayados:

a) Para el ruido generado a través del piso de referencia sin recubrimiento L_{n0}:

- $L_{n0,w}$: nivel normalizado ponderado de la presión sonora de ruido de impactos correspondiente al espectro L_{n0} (en dB)
- C_{I0}: coeficiente de adaptación espectral del nivel de ruido de impactos correspondiente al espectro L_{n0} (en dB)

b) Para el ruido generado a través del piso de referencia con recubrimiento L_{n1}:

- $L_{n1,w}$: nivel normalizado ponderado de la presión sonora de impactos correspondiente al espectro L_{n1} (en dB).
- C_{I1}: coeficiente de adaptación espectral del nivel de ruido de impactos correspondiente al espectro L_{n1} (en dB).

Para ΔL, la mejora del aislamiento de cada recubrimiento de piso, empleando el nivel normalizado de presión sonora de impacto del piso de referencia L_{nr0}, definido en la mencionada norma, se obtuvieron:

- $L_{nr,w}$: nivel normalizado ponderado de la presión sonora calculada para L_{nr0} con la atenuación lograda mediante el recubrimiento (en dB).
- C_{Ir}: coeficiente de adaptación espectral para L_{nr0} con la atenuación lograda mediante el recubrimiento (en dB).
- ΔL_w: Reducción ponderada del nivel de presión sonora de impactos con el recubrimiento (en dB).
- $C_{I\Delta}$: Coeficiente de adaptación espectral para la reducción ponderada del ruido de impactos con el recubrimiento (en dB).
- ΔL_{lin}: Reducción basada en el nivel de presión sonora de ruido de impactos lineal (no ponderado) (en dB)

3. RESULTADOS OBTENIDOS

3.1. Montaje 1:

En la Figura 4 y en la Tabla 1, se muestran los valores obtenidos para los tres revestimientos ensayados con el Montaje 1. En la Tabla 2 se muestran los correspondientes valores de las magnitudes globales y sus coeficientes de adaptación espectral.

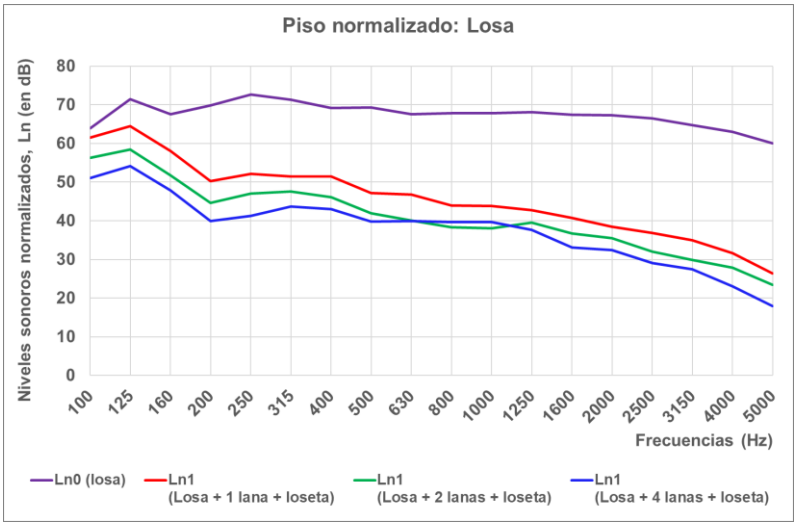


Figura 4: Niveles sonoros normalizados para el Montaje 1

Tabla 1: Niveles sonoros normalizados para el Montaje 1

Frecuencia (Hz)	**Piso de referencia pesado** ("losa")	**Revestimiento 1** en **Montaje 1** (losa + 1 lana + loseta)		**Revestimiento 2** en **Montaje 1** (losa + 2 lanas + loseta)		**Revestimiento 3** en **Montaje 1** (losa + 4 lanas + loseta)	
	L_{n0} (dB)	L_{n1} (dB)	ΔL_1 (dB)	L_{n1} (dB)	ΔL_1 (dB)	L_{n1} (dB)	ΔL_1 (dB)
100	63,9	61,5	2,3	56,3	7,5	51,1	12,8
125	71,4	64,5	6,9	58,5	12,9	54,2	17,2
160	67,5	58,1	9,5	51,7	15,8	47,8	19,7
200	69,8	50,3	19,6	44,6	25,2	40,0	29,8
250	72,7	52,2	20,5	47,0	25,6	41,3	31,3
315	71,3	51,4	19,9	47,6	23,7	43,7	27,6
400	69,2	51,4	17,7	46,1	23,1	43,0	26,2
500	69,3	47,1	22,1	41,9	27,4	39,9	29,4
630	67,5	46,8	20,7	40,0	27,4	40,0	27,5
800	67,9	43,9	23,9	38,4	29,5	39,7	28,1
1000	67,8	43,9	23,9	38,1	29,7	39,7	28,1
1250	68,1	42,7	25,4	39,6	28,6	37,6	30,5
1600	67,5	40,7	26,8	36,7	30,7	33,1	34,4
2000	67,3	38,5	28,8	35,5	31,8	32,4	34,8
2500	66,5	36,9	29,6	32,1	34,4	29,1	37,4
3150	64,7	34,9	29,8	29,9	34,9	27,5	37,2
4000	63,0	31,6	31,4	27,9	35,1	23,0	40,1
5000	60,0	26,4	33,6	23,5	36,6	17,9	42,1

Tabla 2: Parámetros globales para los 3 revestimientos ensayados con Montaje 1

Parámetros globales (dB)	**Revestimiento 1** en **Montaje 1** (losa + 1 lana + loseta)	**Revestimiento 2** en **Montaje 1** (losa + 2 lanas + loseta)	**Revestimiento 3** en **Montaje 1** (losa + 4 lanas + loseta)
$L_{n0,w}$	73	73	73
C_{I0}	-7	-7	-7
$L_{n1,w}$	51	46	42
C_{I1}	1	1	1
$L_{nr,w}$	54	49	46
C_{Ir}	-2	-2	-3
ΔL_W	24	29	32
$C_{I\Delta}$	-9	-9	-8
ΔL_{lin}	15	20	24

3.2. Montaje 2:

Para los ensayos realizados con el Montaje 2 no se pudieron calcular los niveles sonoros normalizados, dado que se detectó que no se cumplió la condición establecida en la norma en cuanto a que el ruido transmitido desde la cámara emisora hacia la receptora debe tener una componente de ruido aéreo al menos 10 dB inferior a la componente de ruido de impactos.

En la Figura 5 se presentan comparativamente los niveles sonoros:

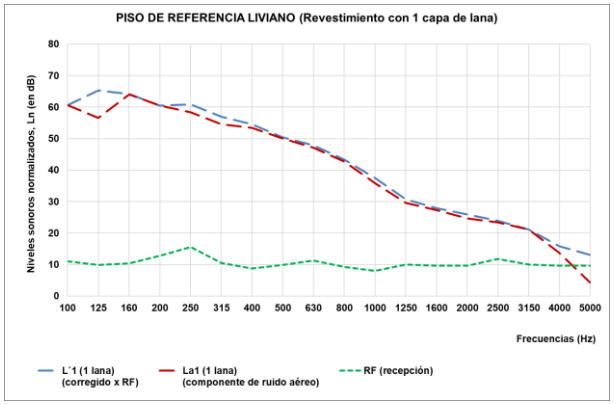
- L´1: medido en la cámara receptora, y corregido por ruido de fondo
- La1: componente de ruido aéreo transmitido hacia la cámara receptora
- RF: ruido de fondo

donde se aprecia que la componente de ruido aéreo transmitida desde la sala emisora hacia la sala receptora durante la realización de los ensayos, tuvo niveles similares a los del ruido total. Esto significa que en la cámara receptora, el ruido de impactos quedó enmascarados por el ruido aéreo.

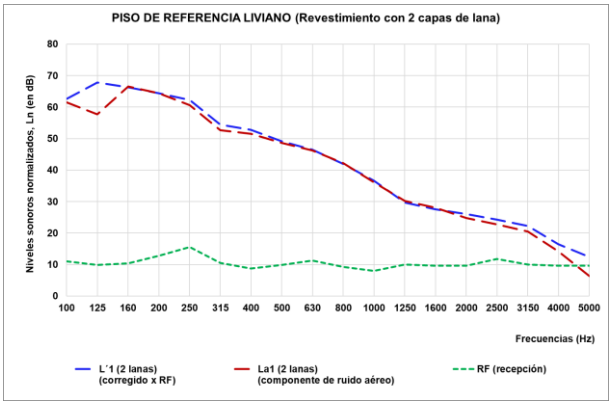
Analizando las posibles causas del enmascaramiento del ruido de impactos transmitido, se compararon los valores medidos con ambos montajes y se encontró que con la utilización del Montaje 2:

- se redujo la transmisión de ruido de impactos, lo que causó que a la cámara receptora se transmitieran niveles de ruido de impactos más bajos que los generados con el Montaje 1,
- en la cámara emisora aumentaron los niveles de la componente de ruido aéreo (“ensayo más ruidoso”), motivo por el cual en la cámara receptora aumentaron los niveles de ruido aéreo transmitido.

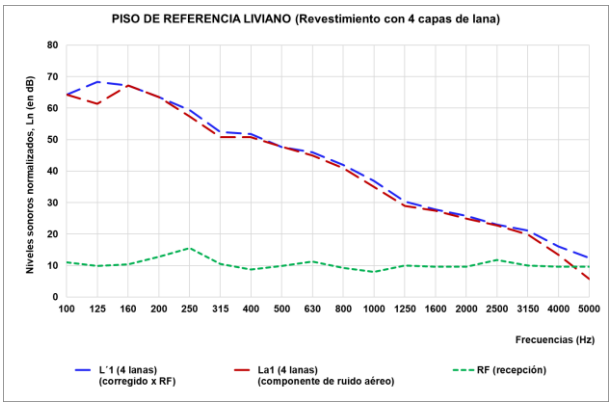
La conjunción de ambas características del montaje derivó en que no se pudiera medir el ruido de impactos transmitido, por lo que tampoco se pudo calcular el ruido de impactos normalizado.



5a



5b



5c

Figura 5: Comparación de niveles sonoros medidos para Montaje 2

4. CONCLUSIONES

Los mantos densos de lana rústica de oveja pueden ser incorporados en revestimientos de pisos dado que presentan un buen desempeño como aislantes del ruido de impactos.

En lo que respecta al comportamiento acústico, se evidenció que el aumento del espesor de los mantos tuvo aparejado una significativa mejora del aislamiento al ruido de impactos. Esto puede apreciarse al observar las curvas de la Figura 4, y los valores de parámetros globales de la Tabla 2. Podemos ver que

con cada duplicación del espesor del manto denso (11 mm, 22 mm, 44 mm), disminuye el valor de los parámetros de niveles sonoros ($L_{n1,w}$ y $L_{nr,w}$), al mismo tiempo que aumenta la mejora del aislamiento (ΔL_w).

En cuanto a los montajes utilizados, aquellos ensayos que se llevaron a cabo con procedimientos normalizados tradicionales (piso de referencia pesado), dieron resultados válidos. Mientras que los ensayos realizados con el montaje que incluyó el piso de referencia liviano, no permitieron obtener los niveles de ruido de impactos. Es necesario analizar este segundo montaje, y ver cómo se lo puede mejorar para futuras aplicaciones.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires por el apoyo económico que ha brindado para la realización de este trabajo a través del subsidio Ideas-Proyectos de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Soluciones Científico-Tecnológicas para Áreas de Gobierno Provincial (EX-2024-14685687-GDEBA-DSTYADCIC – Convocatoria 2024).

REFERENCIAS

1. IRAM-ISO 717-2:2023 – Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 2 - Aislamiento al ruido de impactos
2. IRAM-ISO 10140:2023 - “Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción.
   - Parte 1: Reglas de aplicación para productos específicos (ISO 10140-1:2016, IDT)
   - Parte 2: Medición del aislamiento acústico a ruido aéreo (ISO 10140:2010, IDT)
   - Parte 3: Medición del aislamiento acústico a ruido de impactos (ISO 10140-3:2010 + ISO 10140-3:2010 /ADM1:2015, IDT)
   - Parte 4: Procedimientos y requisitos de medición (ISO 10140-3:2010, IDT)
   - Parte 5: Requisitos para instalaciones y equipos de ensayo (ISO 10140-5:2010 + AMD1:2014, IDT)
3. ISO 717-2:2020 – Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2 - Impact sound insulation
4. ISO 10140: Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements
   - Part 1:2010 - Application rules for specific products
   - Part 2: Measurement of airborne sound insulation
   - Part 3:2010 - Measurement of impact sound insulation
   - Part 3:2010 - Measurement of impact sound insulation. Amendment 1:2015
   - Part 4:2010 - Measurement procedures and requirements
   - Part 5:2010 - Requirements for test facilities and equipment
   - Part 5:2010 - Requirements for test facilities and equipment. Amendment 1:2015 - Rainfall sound

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Desarrollo de absorbentes acústicos basados en bagazo cervecero

Bacigalupo, F. [†, 1]; Vechiatti, N. [‡, 2]; Iasi, F. [‡, 3]; Galarza, G. [‡, 4]; Rossi, L. [§, 5]; Ciannamea, E. [§, 6]; Stefani, P. [§ 7]; Farina, M. A. [†, ⋆, 8]

[†] Programa: Sistemas y espacialidad en el arte sonoro (SEAS). Escuela Universitaria de Artes. Universidad Nacional de Quilmes, Buenos Aires

‡ Laboratorio de Acústica y Luminotecnia, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires

[§] Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Universidad Nacional de Mar del Plata, Buenos Aires

⋆ Instituto de Investigación en Producción y Enseñanza del Arte Argentino y Latinoamericano (IPEAL). Facultad de Artes, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires

[1] fernando.bacigalupo@gmail.com, [2] nildavec@gmail.com, [3] fedeiasi@yahoo.com, [4] gerzgalar@gmail.com, [5] luciarossig@gmail.com, [6] emilianociannamea@gmail.com, [7] pmstefan@fi.mdp.edu.ar, [8] mandreafarina@gmail.com

Resumen El uso de los materiales clásicos de construcción deja una huella ecológica importante en el planeta. En la actualidad, existe una necesidad a nivel mundial de reutilizar residuos industriales. El residuo sólido que resulta de la producción de cerveza (bagazo cervecero) presenta desafíos ambientales, logísticos y económicos, que hoy en día se descarta o se usa como alimento para el ganado. Una propuesta atractiva que permitiría procesar un alto volumen de bagazo a escala industrial, es la fabricación de tableros aglomerados. En el grupo Materiales Sostenibles del Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA), se diseñaron paneles aglomerados de alta densidad a partir de ese bagazo, los que debido a sus características, pueden ser utilizados como material de base en el diseño de fonoabsorbentes perforados. En este trabajo se presentan algunos modelos posibles y los resultados obtenidos a partir de mediciones de coeficiente de absorción sonora realizadas en tubo de impedancia basado en la función de transferencia.

Palabras clave: acústica, fonoabsorción, tableros, bagazo cervecero.

Abstract The use of traditional construction materials leaves a significant ecological footprint on the planet. Currently, there is a global need to reuse industrial waste. The solid waste resulting from beer production (bagasse) presents environmental, logistical, and economic challenges and is currently discarded or used as livestock feed. An attractive proposal that would allow processing a large volume of bagasse on an industrial scale is the manufacture of particleboard. In the Sustainable Materials group at the Institute for Research in Materials Science and Technology (INTEMA) high-density particleboard panels were designed from bagasse. Due to their characteristics, these panels can be used as a base material in the design of perforated sound absorbers. This paper presents some possible models and the results obtained from sound absorption coefficient measurements performed in an impedance tube based on the transfer function.

Keywords: acoustics, sound absorption, particleboards, brewer's spent grain.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de materiales de construcción genera un impacto ambiental significativo, debido al uso intensivo de recursos naturales y a las emisiones contaminantes derivadas de sus procesos de fabricación (Almusaed *et al*., 2024). En este contexto, se plantea la necesidad de desarrollar materiales de construcción sostenibles que incorporen residuos o subproductos como insumos en las cadenas productivas. El paradigma contemporáneo de la construcción sostenible se orienta hacia el diseño de materiales con bajo impacto ambiental y con propiedades funcionales específicas tales como resistencia mecánica, durabilidad, capacidad de aislamiento térmico y absorción acústica, ajustadas a

las exigencias de cada aplicación (Vechiatti *et al.*, 2023; Ferrandez-Villena *et al.*, 2022). Los paneles de madera aglomerada pueden ser utilizados como materiales con buena prestación acústica si se trabajan con un diseño de manera correcta. Se producen por prensado en caliente, combinando partículas de madera con adhesivos poliméricos (Ciannamea *et al.*, 2017). Según la FAO, la producción mundial de tableros aglomerados alcanzó unos 117 millones de m³ en 2023, con un crecimiento del 40% en la última década (FAO, 2023). Este incremento sostenido en la demanda de madera ha impulsado la utilización de materiales lignocelulósicos alternativos para reducir la presión sobre los recursos forestales (Chalapud *et al.*, 2020). En este marco, se han desarrollado tableros a partir de distintas biomasas, como tallos de arroz (Yang *et al.*, 2003), fibras de coco (Zulkifly *et al.*, 2009), bambú (Karlinasari *et al.*, 2012), cáscara de arroz (Chalapud *et al.*, 2020) y yute (Fatima *et al.*, 2011), (Ferrandez-Villena *et al.*, 2022), entre otras. Recientemente, el Grupo de Materiales Sostenibles del Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA), diseñó tableros aglomerados basados en el residuo sólido de la producción de cerveza (bagazo). Este residuo se genera a una tasa de 20 kg por cada 100 litros de cerveza elaborada (Rossi *et al.*, 2024). Los paneles de bagazo obtenidos presentaron propiedades mecánicas competitivas frente a los tableros de madera convencionales. Además, su resistencia al agua los hizo viables para aplicaciones en ambiente exterior con mojado ocasional. En el ámbito acústico, los paneles de alta densidad de bagazo cervecero podrían sustituir a los tableros aglomerados tradicionales de madera cultivada comúnmente utilizados en el diseño de absorbentes acústicos perforados. Estos dispositivos, están concebidos para atenuar frecuencias específicas, y son especialmente útiles en entornos donde se requiere controlar bandas de frecuencia determinadas.

El objetivo del presente trabajo es analizar las propiedades acústicas de fonoabsorbentes perforados desarrollados a partir de paneles sostenibles elaborados con bagazo cervecero.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales de partida

Se obtuvieron tableros aglomerados por prensado en caliente de mezclas de partículas de bagazo cervecero (malta Pilsen, provisto por cervecerías de la ciudad de Mar del Plata) y un adhesivo fenólico (Industria Química Ltda., Paraná, Brasil), siguiendo el mismo procedimiento informado previamente por el grupo en Rossi *et al*. (2024). Los tableros presentaron una densidad de 1000 kg/m³ y un contenido de componentes biobasados del 88%. Se fabricaron un total de ocho tableros de 250 mm × 250 mm × 5 mm, (ver figura 1) los cuales fueron posteriormente mecanizados según patrones específicos utilizando un equipo de control numérico computarizado (CNC).

Figura 1: Imagen de los tableros producidos a partir de bagazo cervecero

2.2 Diseño de los paneles acústicos

En el diseño acústico de las muestras a ensayar se consideraron los aspectos que definen un fonoabsorbente perforado: la cantidad, la distribución y la geometría de las perforaciones. Para un funcionamiento óptimo como resonador se tomó en cuenta la relación entre el espesor del tablero (limitado a 5 mm) y el diámetro de los agujeros. Otro factor que se estudió fue el índice de transparencia del resonador basado en la cantidad de perforaciones.

A partir de los tableros aglomerados de bagazo cervecero de 5 mm de espesor promedio, se confeccionaron muestras circulares de 99 y 29 mm de diámetro a las que se les practicaron diferentes configuraciones de perforación utilizando un equipo de control numérico por computadora (CNC):

- Muestra 1: Diámetro agujeros: 3 mm – Separación entre ejes de agujeros: 12 mm
- Muestra 2: Diámetro agujeros: 2,5 mm – Separación entre ejes de agujeros: 16 mm
- Muestra 3: Diámetro agujeros: 2 mm – Separación entre ejes de agujeros: 14 mm

En las Figuras 2a a 2c pueden apreciarse las muestras ensayadas. En la Figura 2d se muestra la lana rústica de oveja que se colocó en la cavidad de los resonadores en algunas de las configuraciones.

2a: M1

2b: M2

2c: M3

2d: Lana rústica de oveja

Figura 2: Muestras ensayadas (M1 a M3), y material fonoabsorbente

2.3 Ensayos de absorción sonora

En el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, LAL-CIC, se realizó la medición del coeficiente de absorción sonora para incidencia normal del sonido empleando un tubo de impedancia basado en la función de transferencia.

2.3.1 Instrumental utilizado

Sistema de tubos de impedancia con software de procesamiento de señal basado en la función de transferencia (TF), marca LAL-CIC, modelo GAG001, que incluye:

- Tubo grande (diámetro interior: 100 mm)
- Tubo chico (diámetro interior: 30 mm)

2.3.2 Metodología de las mediciones

Para la realización de las mediciones con el tubo TF, también conocido como sistema de tubos de impedancia de dos micrófonos, se siguieron los lineamientos generales descriptos en las normas:

- ISO 10534-2 “Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes, Part 2: Transfer-function method”
- ASTM E 1050 “Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system”

Generando ruido de banda ancha, se midieron los coeficientes de absorción sonora para incidencia normal del sonido (α_N), en el rango de tercios de octava con frecuencias centrales comprendidas entre 100 Hz y 2 500 Hz. Para las frecuencias comprendidas entre 100 Hz y 1 600 Hz se empleó el tubo grande, por lo que se ensayaron 5 probetas de 99 mm de diámetro; mientras que para las frecuencias comprendidas entre 800 Hz y 2 500 Hz se empleó el tubo chico, por lo que se midieron 5 probetas de 29 mm de diámetro. En todos los casos, como se observa en la Figura 3a, las probetas estuvieron colocadas en el borde externo del porta-muestras (al ras de la superficie), dando lugar a la formación de una cámara de aire de 45 mm de profundidad detrás de cada probeta ensayada.

Los resultados se obtuvieron como promedio aritmético de las mediciones realizadas a las probetas de cada muestra ensayada, destacándose que:

- 100 Hz a 800 Hz: se promediaron los valores obtenidos con el tubo grande,
- 800 Hz a 1 600 Hz: se promediaron los valores obtenidos con ambos tubos,
- 1 600 Hz a 2 500 Hz: se promediaron los valores obtenidos con el tubo chico.

3a 3b

Figura 3: Porta-muestras

Además, se analizó la influencia de incorporar un material fonoabsorbente fibroso en la cámara posterior. Para ello, se colocó en el fondo de la cavidad un manto de lana rústica de oveja de 35 mm de espesor, apoyado sobre la superficie metálica del porta-muestras (véase la Figura 3b). A diferencia de lo realizado para el caso en que la cavidad posterior contenía sólo aire, para esta condición de montaje se ensayó una sola probeta por tamaño y por tipo de muestra, comparándose su comportamiento acústico con y sin el agregado de lana.

A los fines de comparar resultados, los montajes ensayados fueron denominados:

- AIRE: cámara posterior sin agregado de material fibroso (45 mm de aire)
- AIRE + LANA: cámara posterior con aire y con lana rústica de oveja (10 mm de aire + 35 mm de lana)

3. RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 1 se presentan los valores del coeficiente de absorción para incidencia normal del sonido (α_N, adimensional), medidos para las tres muestras de tableros perforados, para ambas condiciones de cámara posterior (AIRE, y AIRE+LANA).

En la Figura 4 se presentan comparativamente los valores del coeficiente de absorción α_N de las tres muestras ensayadas, para la condición de cámara posterior: "AIRE".

En la Figura 5 se presenta una comparación de los valores del coeficiente de absorción α_N de las tres muestras, para la condición de cámara posterior: "AIRE + LANA".

En las Figuras 6a, 6b y 6c se presenta los valores de absorción de cada muestra, mostrando la influencia de agregar un material fonoabsorbente fibroso en la cámara posterior de los resonadores perforados.

Tabla 1: Coeficientes de absorción para incidencia normal del sonido (α_N, adimensional)

Frecuencia (Hz)	MUESTRA 1 Diámetro agujeros: 3 mm Separación: 12 mm p: 4,9%		MUESTRA 2 Diámetro agujeros: 2,5 mm Separación: 16 mm p: 1,9%		MUESTRA 3 Diámetro agujeros: 2 mm Separación: 14 mm p: 1,6%	
	M1 (AIRE)	M1 (AIRE+LANA)	M2 (AIRE)	M2 (AIRE+LANA)	M3 (AIRE)	M3 (AIRE+LANA)
100	0,04	0,07	0,04	0,07	0,05	0,08
125	0,04	0,07	0,04	0,08	0,05	0,09
160	0,03	0,08	0,04	0,10	0,05	0,13
200	0,04	0,10	0,07	0,16	0,09	0,21
250	0,06	0,14	0,15	0,26	0,18	0,38
315	0,10	0,21	0,29	0,40	0,50	0,78
400	0,13	0,33	0,58	0,78	0,86	0,93
500	0,26	0,47	0,82	0,92	0,76	0,79
630	0,43	0,72	0,56	0,62	0,52	0,42
800	0,48	0,62	0,36	0,44	0,25	0,33
1000	0,35	0,44	0,23	0,28	0,16	0,20
1250	0,23	0,28	0,17	0,20	0,12	0,15
1600	0,17	0,21	0,15	0,17	0,12	0,14
2000	0,16	0,19	0,15	0,17	0,12	0,14
2500	0,16	0,19	0,15	0,16	0,13	0,14

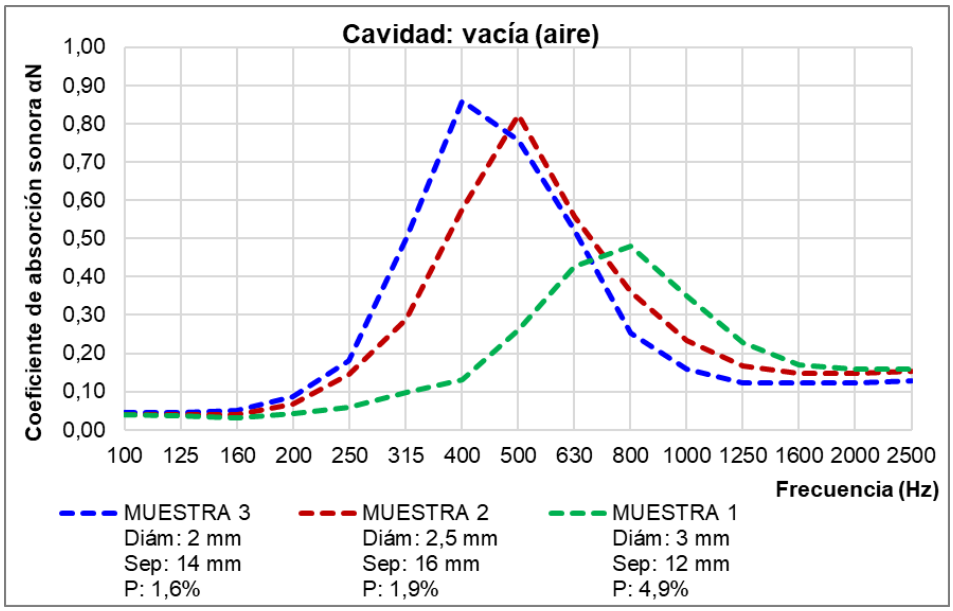


Figura 4: Comparación de la absorción sonora para cámara posterior con "AIRE"

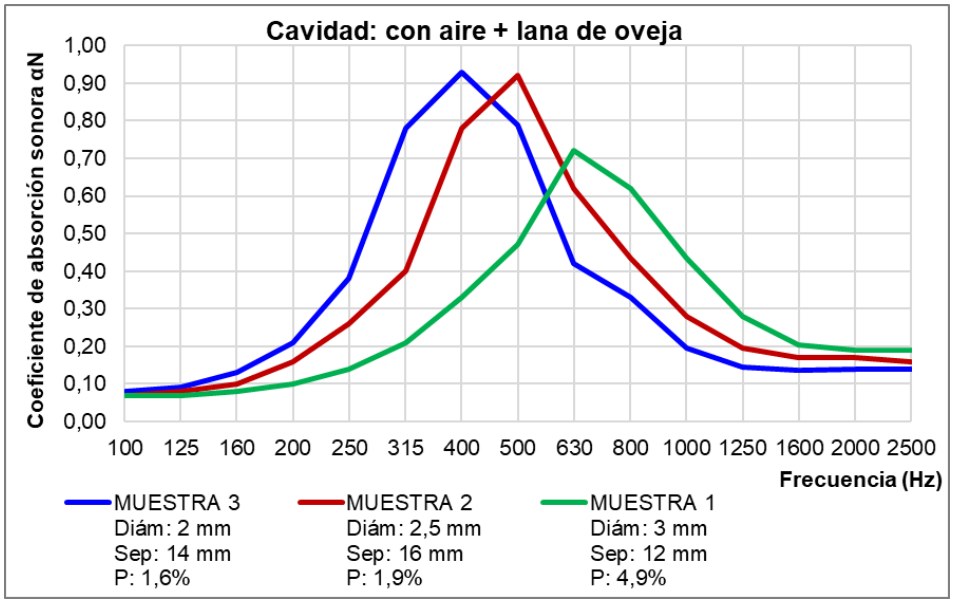
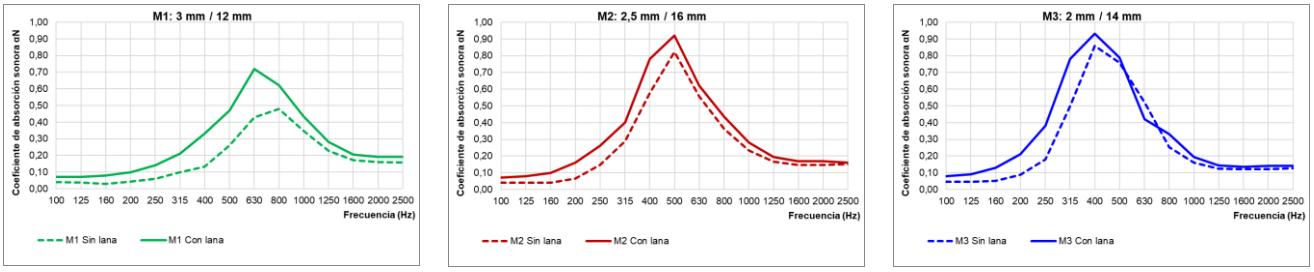


Figura 5: Comparación de la absorción sonora para cámara posterior con "AIRE + LANA"



6a 6b 6c

Figura 6: Variación de la absorción sonora por el agregado de material fibroso en la cámara posterior

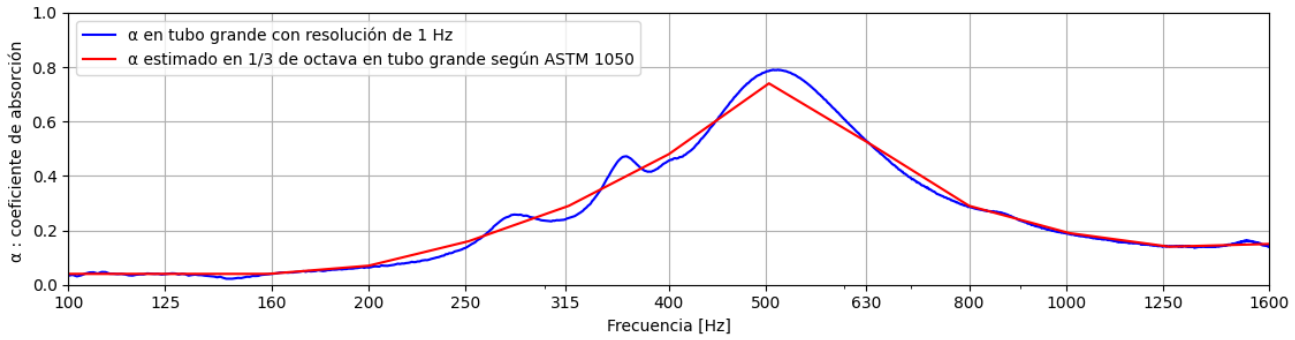
3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados, evidencian que las distintas configuraciones de perforación realizadas en los tableros de aglomerado de bagazo cervecero, montados con cámara posterior —tanto vacía como con material fibroso—, presentan un comportamiento característico de los absorbentes perforados.

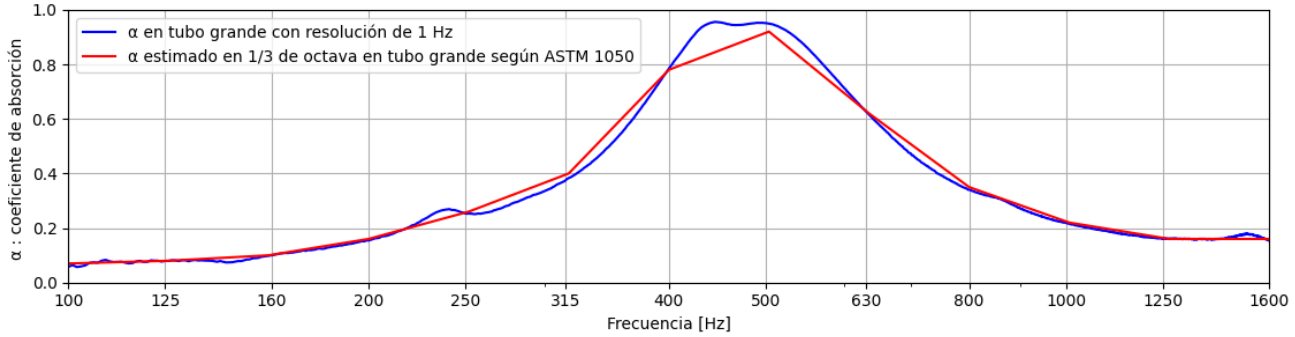
Las modificaciones del patrón de perforación (diámetro y separación entre los centros de los orificios, porcentaje de superficie perforada), mostraron variación de la frecuencia de máxima absorción sonora y del ancho de banda. Se puede apreciar un efecto menos pronunciado en el tablero con perforaciones de menor diámetro (2 mm, Muestra 3).

En cuanto a la incorporación de material fibroso en la cavidad posterior, los resultados medidos para la Muestra M1 corroboran una disminución de la frecuencia de resonancia, y un aumento del coeficiente de absorción en la mayoría de las frecuencias, con el consiguiente aumento del ancho de banda del resonador sintonizado (Figura 6a). Sin embargo, en principio, para las muestras M2 y M3 solamente se evidenció el aumento del ancho de banda, pero no así la disminución de la frecuencia de resonancia (Figuras 6b y 6c), por lo que se procedió a realizar un análisis más detallado de los valores medidos.

El algoritmo del Sistema de Tubos empleado, permite visualizar los valores del coeficiente α_N con mayor resolución que en bandas de tercios de octava, que es la utilizada normalmente en los ensayos normalizados. Empleando este recurso, se analizaron los valores medidos con resolución de 1 Hz, y se pudo comprobar que la premisa del cambio de frecuencia de resonancia se cumplió para las 3 muestras. A modo de ejemplo, en la Figura 7 se puede apreciar que para el tablero M2 (agujeros de 2,5 mm de diámetro, con separación de 16 mm entre centros), la frecuencia de resonancia disminuye y el ancho de banda aumenta.



7a: M2, cavidad con “AIRE”



7b: M2, cavidad con “AIRE + LANA”

Figuras 7: Medición de probetas de 99 mm de M2 (ϕ = 2,5mm; separación: 16 mm)

4. CONCLUSIONES

Utilizando como materia prima el residuo sólido del proceso de malteado en la producción de cerveza (bagazo cervecero), se fabricaron tableros aglomerados que fueron aprovechados para el diseño de fonoabsorbentes.

Los ensayos que se llevaron a cabo utilizando un tubo de impedancia basado en la función de transferencia, han permitido caracterizar las muestras con diferentes configuraciones de perforación en dos montajes diferentes (cámara posterior vacía, o con material fibroso), y determinar que se comportan como fonoabsorbentes perforados.

Para todas las muestras, se pudo observar la frecuencia de resonancia y el ancho de banda en el que son efectivos. El agregado de material fibroso en la cavidad posterior aumentó el coeficiente de absorción y el ancho de banda, así como produjo una disminución de la frecuencia de máxima absorción.

A los fines de realizar cálculos de tratamientos acústicos para control de la reverberación, en general es suficiente con disponer de datos informados en bandas de tercios de octava, tal como suele requerirse en los procedimientos normalizados de ensayos acústicos. Pero el análisis con mayor resolución demostró que la expresión de resultados en bandas no permite conocer con precisión la frecuencia de resonancia de este tipo de paneles.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) (PIP 11220200100926CO), a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) (PICT 2020-1003) y a la Universidad Nacional de Mar del Plata (PDTS 2024 UNMdP), por el financiamiento recibido.

REFERENCIAS

1. Almusaed, A.; Yitmen, I.; Myhren, J.A.; Almssad, A. Assessing the Impact of Recycled Building Materials on Environmental Sustainability and Energy Efficiency: A Comprehensive Framework for Reducing Greenhouse Gas Emissions. Buildings 2024, 14, 1566. https://doi.org/10.3390/buildings14061566
2. ASTM D1037: Standard Test Method for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials
3. ASTM E 1050 “Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system”
4. ASTM C384-04 (Reapproved 2016): Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method.
5. M. Chalapud, M. Herdt, E. Nicolao, E. Ciannamea, R. Ruseckaite, P.M. Stefani, Biobased particleboards based on rice husk and soy proteins: Effect of the impregnation with tung oil on the physical and mechanical behavior, Construction and Building Materials, 230 (2020) 116996
6. E.M. Ciannamea; D. Marin Quintero; R.A. Ruseckaite; P.M. Stefani. Particleboard Based on Rice Husk: Effect of Binder Content and Processing Conditions. Journal of renewable materials. 5 (2017) 356-362
7. Fatima, S.; Mohanty, A.R. Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. Appl. Acoust. 2011, 72, 108–114.
8. Ferrandez-Villena, M.; Ferrandez-Garcia, A.; Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, M.T. Acoustic and Thermal Properties of Particleboards Made from Mulberry Wood (Morus alba L.) Pruning Residues. Agronomy 2022, 12, 1803. https://doi.org/10.3390/agronomy12081803
9. ISO 10534-1:1996 - Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: Method using standing wave ratio (Last review: 2022)
10. ISO 10534-2 “Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes, Part 2: Transfer-function method”
11. Karlinasari, L.; Hermawan, D.; Maddu, A.; Bagus, M.; Lucky, I.K.; Nugroho, N.; Hadi, Y.S. Acoustical

properties of particleboards made from betung bamboo (Dendrocalamus asper) as building construction material. Bioresources 2012, 7, 5700–5709.

12. Rossi L., Wechsler L., Peltzer M. A., Ciannamea E. M., Ruseckaite R. A., Stefani P. M., (2023). Sustainable Particleboards Based on Brewer's Spent Grains. Polymers 2024, 16, 59.
13. Vechiatti, N., Iasi, F., Tomeo, D., Núñez Berté, A. (2023). Propiedades acústicas de mantos de lana de oveja de descarte, CAA-AdAA2023-037.
14. Yang, H.S.; Kim, D.J.; Kim, H.J. Rice straw—Wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. Bioresour. Technol. 2003, 86, 117–121.
15. Zulkifli, R.; Nor, M.M.; Ismail, A.R.; Nuawi, M.Z.; Tahir, M.M. Effect of perforated size and air gap thickness on acoustic properties of coir fibre sound absorption panels. Eur. J. Sci. Res. 2009, 28, 242–252.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Modelización eficiente de reflexiones parciales para acústica de recintos con el método pseudoespectral en el dominio del tiempo

Petrosino, J.[†, ‡, 1]; **Lizaso, G.** [†,2]; **Accolti, E.** [§,3]

[†] Centro de Estudios y Producción Sonora y Audiovisual, Universidad Nacional de Lanús, Remedios de Escalada

‡ Ingeniería de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero, Caseros

[§] Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan, CONICET, San Juan

[1] jpetrosino@untref.edu.ar, [2] glizaso@unla.edu.ar, [3] eaccolti@inaut.unsj.edu.ar

RESUMEN AMPLIADO

Resumen El método pseudo-espectral en el dominio del tiempo (PSTD) es una técnica numérica precisa para simular la propagación de ondas con grandes ventajas, pero con uso limitado en acústica de recintos. El PSTD supera en precisión al de diferencias finitas (FDTD). Este último presenta anisotropía y dispersión numérica que exigen una malla extremadamente fina para mitigarlas, incrementando el costo computacional. Por el contrario, el PSTD es isotrópico y exhibe una dispersión numérica muy baja, incluso nula bajo ciertas condiciones. Aunque requiere aplicar transformadas de Fourier en cada iteración, su capacidad de lograr alta precisión con tan solo dos puntos por longitud de onda compensa el procesamiento adicional. Una limitación crítica del PSTD en acústica radica en la implementación de condiciones de contorno no periódicas y superficies reflectantes. Si bien las capas perfectamente adaptadas (PML) resuelven eficientemente las condiciones de contorno periódicas, la modelización eficiente de superficies parcialmente reflectantes dentro del dominio de simulación sigue siendo un desafío. En este trabajo, presentamos una propuesta para abordar la representación de superficies parcialmente reflectantes en PSTD. Esta solución muestra resultados prometedores para materiales de reacción local y coeficientes de absorción independientes de la frecuencia, marcando un avance hacia aplicaciones del PSTD en acústica.

Palabras clave: modelos numéricos, PSTD, coeficiente de reflexión.

1. CONTEXTOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA EN ACÚSTICA

La simulación numérica en acústica de recintos se aplica en dos contextos fundamentales, a menudo complementarios, pero con objetivos diferenciados:

1. Contexto Aplicado (Eficiencia): Se centra en la solución eficiente de casos de uso prácticos, priorizando un compromiso entre complejidad computacional y precisión de resultados. En la acústica arquitectónica, donde los plazos son un factor, se resigna cierta fidelidad del modelo físico en favor de la velocidad. Aquí predominan los métodos basados en modelos geométricos, complementados con correcciones para mitigar sus debilidades en la simulación de fenómenos ondulatorios como la interferencia y la difracción.
2. Contexto Epistémico (Precisión): Se orienta a la investigación, buscando validar o desafiar modelos físico-matemáticos y teorías que son difíciles de evaluar analíticamente. Como ejemplos pueden considerarse la puesta a prueba de modelos de campo reverberante o el comportamiento acústico de metamateriales. Para esta clase de uso, la fidelidad y precisión del modelo ondulatorio son primordiales, con la eficiencia de cómputo pasando a un segundo plano. Este contexto se basa en métodos ondulatorios en el dominio del tiempo.

1.1 Modelos ondulatorios en el dominio del tiempo

Para el contexto epistémico, los modelos ondulatorios, como el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), ofrecen una visión completa, causal y de banda ancha del fenómeno

acústico. Al simular la onda en su forma más pura y dinámica, FDTD permite una fidelidad superior a los métodos de estado estacionario (como son el de elementos finitos FEM y el de contornos finitos BEM). El resurgimiento de FDTD en la acústica de recintos en los últimos tiempos se debe al constante aumento de la capacidad de cómputo.

Si bien el FDTD es un avance sobre los modelos geométricos, presenta dificultades que limitan su precisión en simulaciones a largo plazo (como al registrar la respuesta al impulso de un recinto):

- Dispersión Numérica: La velocidad de propagación simulada depende de la frecuencia, un fenómeno no físico para las ondas sonoras.
- Anisotropía Numérica: La velocidad de propagación varía según la dirección.

Ambos defectos son acumulativos y solo se mitigan con un incremento en el orden o en la resolución de la malla (extremadamente fina), lo que exige una potencia de cómputo desproporcionada.

El método pseudo-espectral en el dominio del tiempo (PSTD), menos común en acústica, comparte el enfoque temporal de FDTD pero ofrece una ventaja sustancial en precisión (Tabla 1)

Tabla 1: Comparación de características entre FDTD y PSTD

Característica	FDTD	PSTD
Dispersión y anisotropía	Presentes, requieren mallas finas.	Nulas/Muy bajas, permitiendo solo dos puntos por longitud de onda.
Cálculo de derivadas	Aproximación por diferencias finitas.	Solución espectral exacta para las derivadas espaciales.
Eficiencia computacional	Menos cómputo por iteración, con más iteraciones (malla densa).	Más cómputo por iteración (FFT), pero muchas menos iteraciones (malla dispersa).

A pesar de requerir transformadas de Fourier en cada paso temporal, la capacidad del PSTD de lograr alta precisión con una malla mucho más dispersa compensa el procesamiento adicional, resultando en un método potencialmente más eficiente en el largo plazo y con mayor fidelidad.

2. CONDICIONES DE CONTORNO Y REFLEXIONES PARCIALES EN PSTD

El principal obstáculo para la aplicación del PSTD en acústica de recintos es la implementación de condiciones de contorno (CC) no periódicas y superficies reflectantes [1] [2] [3].

Por su naturaleza espectral, el PSTD genera soluciones espacialmente periódicas, lo que implica que la onda que sale por un borde reaparece por el opuesto (un comportamiento que no se corresponde con la realidad física). Para superar esto:

- Las Capas Perfectamente Adaptadas (PML) son la solución estándar para generar un dominio de simulación "infinito" (equivalente a una cámara anecoica virtual) en ambos métodos. Esta técnica es robusta y adecuada para PSTD.
- La implementación de una Pared Rígida (Neumann), que es simple en FDTD, se vuelve conceptual y computacionalmente compleja en PSTD debido a la naturaleza global de los operadores espectrales, requiriendo modificaciones avanzadas. Aunque recientemente hemos propuesto una alternativa relativamente sencilla para este caso aunque limitada exclusivamente a paredes perpendiculares a los ejes cartesianos [4].

El mayor inconveniente se encuentra en la modelización de superficies con coeficientes de reflexión arbitrarios (reflexiones parciales), esenciales para simular materiales acústicos reales.

- En FDTD, la implementación de un coeficiente de reflexión real (sin fase) es simple y directa.

- En PSTD, no existen propuestas sencillas. Cualquier enfoque que intente simular la superficie mediante un cambio en la impedancia acústica, deteriora la ventaja fundamental de precisión del PSTD al modificar la velocidad de propagación en distintos puntos del dominio. Por otra parte, un cambio significativo en la densidad pondría en riesgo incluso la estabilidad numérica de la simulación. Esta dificultad para modelar superficies reflectantes eficientemente es, probablemente, el principal motivo de la escasa aplicación del PSTD en el campo de la acústica de recintos.

3. SUPERFICIE CON COEFICIENTE DE REFLEXIÓN ARBITRARIO

Nuestro aporte implementar superficies parcialmente reflectantes sin deteriorar la alta precisión del PSTD. Proponemos una solución que logra implementar superficies con coeficientes de reflexión constantes (caso simplificado de valor real e independiente de la frecuencia) sin alterar la densidad del medio de propagación dentro del dominio, ni la velocidad de propagación.

La solución se aplica sobre el PSTD que utiliza grillas intercaladas de presión y velocidad de partículas, y resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de primer orden que se muestra en la Ecuación (1),

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \dfrac{1}{\rho}\,\nabla p = -\boldsymbol{\xi} \odot \boldsymbol{u} \\ \dfrac{\partial p}{\partial t} + \rho\,\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \end{cases} \tag{1}$$

donde ξ es un coeficiente anisotrópico artificial de absorción con componentes en cada dimensión cartesiana[1], y que puede representarse como un vector perpendicular a la superficie reflectante a definir. Este coeficiente solamente tiene valores distintos de cero en regiones muy particulares del dominio. Sólo es distinto de cero si el punto de la grilla en consideración pertenece a una superficie reflectante o está incluido en una capa de PML. Esta clase de coeficiente $\boldsymbol{\alpha}$ es una adaptación de la propuesta original de Berenguer [4] que permitió incorporar a la simulación una capa de absorción perfectamente adaptada (PML) postulando un coeficiente anisotrópico artificial sin significado físico.

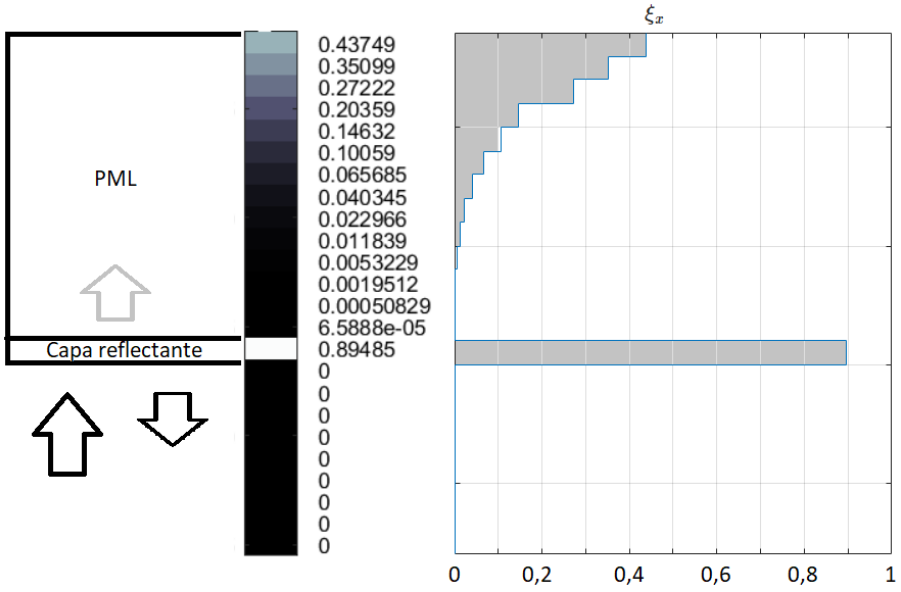


Figura 1: Implementación de capa reflectante. Del lado izquierdo se muestra un esquema donde las flechas representan una onda incidente (hacia arriba), una reflejada (hacia abajo) y una transmitida (en gris suave). Los niveles de gris, los números en columna y el gráfico lateral representan los valores del coeficiente ξx.

[1] En la bibliografía este coeficiente suele representarse con el símbolo α. Sin embargo, preferimos cambiar el símbolo por ξ para evitar toda confusión en el ámbito de acústica con el coeficiente de absorción de Sabine. Si bien al variar ξ en nuestra propuesta se modifican los valores de coeficiente de reflexión y por lo tanto el coeficiente de Sabine, son parámetros diferentes.

El símbolo $\odot$ se refiere a la multiplicación de Hadamard (o producto Shur), que al aplicarlo a dos vectores da por resultado un nuevo vector donde cada componente cartesiano es la multiplicación de los componentes correspondientes, como en la Ecuación (2)

$$\boldsymbol{\xi} \odot \boldsymbol{u} = \xi_x\, u_x\, \hat{x} + \xi_y\, u_y\, \hat{y} + \xi_z\, u_z\, \hat{z} \tag{2}$$

Por ejemplo, para implementar una superficie reflectante en un plano $x = x_0$ se define para todos los puntos de la superficie reflectante un vector $\boldsymbol{\xi} = \xi_{x0}\,\hat{x}$. El módulo del vector se obtiene a partir del coeficiente de reflexión deseado aplicando una relación que fue determinada en forma empírica. Esta capa solamente atenúa el valor de la componente normal a la superficie de la velocidad $\boldsymbol{u}$, provocando una onda reflejada y otra transmitida. La onda reflejada se corresponde con el coeficiente elegido. La onda transmitida no se corresponde con la realidad en esta implementación, por lo que se incorpora al modelo una capa de PML que la absorba por completo. Esta capa debe tener cierto espesor (lo sugerido es entre 10 y 14 puntos para lograr muy buenos resultados de absorción, manteniendo inalterada la reflexión especificada). La Figura 1 muestra un esquema de implementación de la capa reflectante y el PML asociado.

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La figura 2 muestra los resultados de simular una reflexión utilizando una onda plana cuya señal temporal corresponde a un impulso filtrado (Chebyshev tipo 2 para asegurar respuesta plana y fase prácticamente lineal, que en este ejemplo supera los 12 kHz).

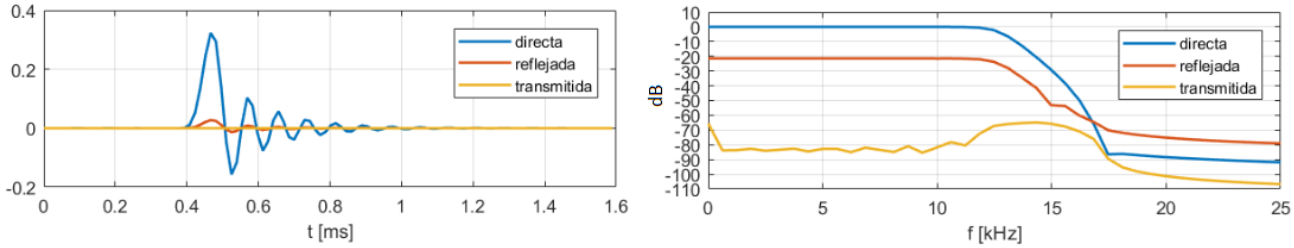


Figura 2. Simulación de reflexión de un impulso filtrado con incidencia normal a un plano reflectante con coeficiente de absorción (Sabine) α =0,99 que corresponde a un nivel de señal reflejada de -20 dB.

Los diagramas de la Figura 2 representan la señal captada por dos sensores. Uno ubicado a cada lado del bloque formado por la capa reflectante y el PML asociado. El sensor que capta la señal directa y la reflejada se encuentra suficientemente lejos como para poder separar por ventana temporal ambas señales. La señal transmitida que se muestra es la que termina atravesando todo el conjunto. Puede notarse en este ejemplo la asombrosa capacidad del método PSTD para mantener la señal del impulso filtrado prácticamente sin alteración al comparar la señal directa y la reflejada.

REFERENCIAS

[1] C. Spa, A. Garriga, y J. Escolano, “Impedance boundary conditions for pseudo-spectral time-domain methods in room acoustics,” *Applied Acoustics*, vol. 71, no. 5, pp. 402–410, 2010.

[2] Garriga, A., Spa, C., & Pozo, L. P. (2012). “Estudio comparativo de distintos modelos de condiciones de contorno de impedancia en problemas acústicos”. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 28(4), 214-224.

[3] E. S. Wise, J. Jaros, B. T. Cox y B. E. Treeby, «Pseudospectral Time-Domain (PSTD) Methods for the Wave Equation: Realizing Boundary Conditions with Discrete Sine and Cosine Transforms,» *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*, vol. 29, n.o 04, pág. 2 050 021, 2021. D O I: 10.1142/S2591728520500218. dirección: https://arxiv.org/pdf/2005.00322.

[4] G. Lizaso, J. Petrosino, J. Gimenez y E. Accolti (2024). "Simulación de superficies reflectantes ideales con el método pseudoespectral en el dominio del tiempo (PSTD)". *Actas del XIII Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2024*. 559–572.

[5] J. Berenger (1994). "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves". Journal of Computational Physics. 114 (2): 185–200.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Caracterización de un sistema de Losa Mixta y sus revestimientos a partir de mediciones *in situ* de aislamiento al ruido de impacto

Bevilacqua, Gaspar.[†1]

[†] Universidad Nacional de Tres de Febrero, Caseros

[†] Ingeniería y Soluciones Acústicas - ISA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires

[1] gasparbevilacqua@gmail.com

Resumen El estudio caracteriza el aislamiento al ruido de impacto de un sistema de losa mixta y sus revestimientos, incluyendo cielorraso y piso, de manera intercalada. Se realizaron mediciones *in situ* en cinco divisiones verticales, empleando distintas fuentes de impacto único, logrando cubrir gran parte del espectro frecuencial audible. La metodología de medición y cálculo se basa en la norma ISO 16283-2, considerando también los estándares japoneses JIS 1418-2 y JIS 1419-2. Los resultados se expresan en Nivel de Presión Sonora Máximo Estandarizado ($L'i_{Fmax,V,T}$) y valores únicos como L_{GLOBAL} y ΔL_{GLOBAL}. Se demuestra que el agregado de cielorraso de emplacado simple con lana de vidrio mejora el aislamiento al ruido de impacto en todo el rango frecuencial. Por otro lado, el revestimiento de piso de PVC clickeado mejora el aislamiento para frecuencias superiores a 800 Hz, y genera absorción sonora en 500 y 630 Hz debido a resonancia. Un análisis colateral de esta investigación ahonda en métodos no normados para la medición de aislamiento al ruido de impacto, presentando mediciones de laboratorio de Nivel de Impacto. Se demuestra que el nivel de aislamiento logrado depende de la combinación entre la fuente utilizada y el detalle constructivo analizado.

Palabras clave: Aislamiento al ruido de impacto, Steel Deck, losa mixta, fuentes de impacto livianas y pesadas, ISO 16283, JIS 1418, JIS 1419.

Abstract The study characterizes the impact sound insulation of a composite slab system and its coverings, including ceiling and floor. In-situ measurements were carried out in five vertical partitions, using different single impact sources, covering most of the audible frequency spectrum. The measurement and calculation methodology are based on the ISO 16283-2 standard, also considering the Japanese standards JIS 1418-2 and JIS 1419-2. The results are expressed as the Standardized Maximum Sound Pressure Level ($L'i_{Fmax,V,T}$) and single values such as L_{GLOBAL} y ΔL_{GLOBAL}. It was found that the addition of a single plasterboard ceiling with fiberglass wool significantly improves impact noise insulation across the entire frequency range. The clicked PVC floor covering improves insulation for frequencies above 800 Hz, and generates sound absorption in the 500 and 630 Hz bands due to resonance. A collateral analysis of this research delved into non-standardized methods for measuring impact noise insulation, presenting laboratory measurements of Impact Level. It was demonstrated that the achieved insulation level depends on the combination of the impact source used and the construction detail analyzed.

Keywords: Impact noise insulation, Steel Deck, composite slab, light and heavy impact sources, ISO 16283, JIS 1418, JIS 1419.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo busca aportar al ámbito de la acústica arquitectónica y de la construcción a partir del análisis de aislamiento de un sistema de entrepiso que ha ganado terreno de aplicación en las últimas décadas: la losa mixta. Se trata de un tipo de losa colaborante que permite utilizar menor cantidad de hormigón sin detrimento en términos estructurales, ya que el mismo se vierte sobre un encofrado perdido de láminas de acero, conocido como Steel Deck. El fundamento de la elección de esta temática se basa en que no existe, dentro de la literatura, gran cantidad de información sobre sus características acústicas, por lo que resulta de interés la calificación de este tipo de construcción.

En el marco de la investigación, se realizaron mediciones de aislamiento al ruido de impacto, a fin de analizar tres tipos de detalles constructivos de entrepiso. Gracias a la posibilidad de acceder a una obra en proceso de construcción, se caracteriza acústicamente un sistema de losa mixta, y distintas configuraciones en las que se agregan materiales que cubren ambas caras a modo de revestimiento de piso y de techo.

Se aplica el procedimiento y la metodología de cálculo de la Norma ISO 16283-2 [1]. Para ello, se toma como parámetro principal el Nivel de Presión Sonora Máximo Estandarizado al Ruido de Impacto $L'i_{Fmax,V,T}$, y se extiende el análisis a valores únicos como el Nivel de Presión Sonora Global L_{GLOBAL} y la mejora de aislamiento ΔL_{GLOBAL} en la comparación entre dos condiciones. A partir de los resultados obtenidos, se consideran diversas interrelaciones entre los tipos de entrepiso y las fuentes utilizadas.

Un análisis colateral de este trabajo busca contribuir a la comunidad científica explorando la posibilidad de utilizar fuentes alternativas para la medición del ruido de impacto, ya que todavía existen áreas sin estudiar y metodologías de medición que no resultan completamente aceptadas por la comunidad [2]. Se busca proponer el uso de metodologías de medición con fuentes alternativas que puedan ofrecer una representación más cercana a las situaciones de impacto cotidianas.

2. CONSIDERACIONES DE TRABAJOS PREVIOS

Scholl y Maysenhölder demuestran que, a la hora de mediciones prácticas, el impacto recibido por el suelo depende de la masa y la rigidez, tanto de la fuente como del piso [2]. Una combinación particular e individual se da entre ambos objetos, más aún cuando al piso se le aplica un tipo de cubierta elástica (piso flotante, clickeado de PVC, alfombra, entre otros) ya que se comporta de manera no lineal. Finalmente concluyen que, en general, es imposible predecir el ruido que podría generar un humano a partir de la máquina de impactos estandarizada. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que éste no es el propósito que indica la norma para este tipo de fuente.

Seung Yup Yoo y Jin Yong Jeon realizaron un estudio en el que se compara el agregado de distintos materiales, resilientes y amortiguantes, entre la losa y una capa de concreto liviano más carpeta cementicia [3]. En el caso de los materiales resilientes, el aislamiento presenta una mejoría en altas frecuencias, por lo que supone una posible solución para golpes generados por objetos livianos. Sin embargo, pueden generar una amplificación en frecuencias bajas debido a la resonancia que pudiera darse entre la capa de material aislante y la capa superior del piso. Estos máximos de vibración son generados por los esfuerzos de flexión de la estructura. Por el contrario, los materiales amortiguantes permiten un buen aislamiento en bajas frecuencias, ya que absorben las vibraciones de manera más eficiente.

En lo que respecta a las fuentes sonoras, una bola de goma rellena de arena genera nivel de impacto en un rango de frecuencias más aproximado al caminar de un humano [4]. Ésta ha sido comparada en caída libre junto con martillos de acero, martillos de goma y rueda de auto, todas a distintas alturas, frente al caminar, correr y saltar de personas entre 20 y 70 kg, a pasos de 5 kg. Además, se presenta a lo largo del estudio la variación del espectro frecuencial al modificar el peso de la bola resultando en que, a mayor peso, menor ancho de banda. Como conclusión, se determina que la pelota rellena de arena con peso de 3,55 kg tiene un comportamiento similar a la pisada humana.

A modo de resumen, puede decirse que los resultados obtenidos en cada investigación son altamente dependientes del detalle constructivo bajo análisis. A esto se le suma el tipo de fuente utilizado, la similitud de esta con los tipos de ruido que suelen darse en viviendas, y su relación con la percepción subjetiva. Por otra parte, si bien existen fuentes de impacto normadas como la máquina de martillos de impacto continuo, la bola de goma estandarizada (ISO 16283-2) y la “bang machine” (JIS 1418-2), se suele recurrir a otras alternativas para caracterizar de la manera más fiel posible una situación real. Finalmente, la bola rellena de arena se presenta como aceptable para caracterizar el ruido generado por la pisada de un humano.

3. DESCRIPTORES UTILIZADOS

3.1 Aislamiento al ruido de impacto en bandas frecuenciales de tercio de octava

La familia de normas ISO 16283 detallan el procedimiento de mediciones de campo del aislamiento sonoro en construcciones y de elementos de la construcción. En esta investigación se utiliza como referencia la Parte 2 de este conjunto, donde el eje central es el ruido de impacto [1]. Si bien las fuentes utilizadas en esta investigación no son las normadas, se mantiene el procedimiento de medición, incluyendo la cantidad y ubicación de las posiciones de fuente y micrófono, así como los niveles y datos a registrar, respetando además la metodología de cálculo para la obtención de los resultados finales.

A partir de mediciones realizadas *in situ*, se lleva a cabo la metodología de cálculo. Se utiliza el descriptor $L'i_{Fmax,V,T}$, definido en la Ecuación (1):

$$L'i_{Fmax,V,T} = Li_{Fmax} + 10\log\left(\frac{V}{V_0}\right) - 10log\left[\frac{1 - C_0^{-1}}{1 - C^{-1}}\left(\frac{C^{(1-C)^{-1}} - C^{-(1-C)^{-1}}}{C_0{}^{(1-C_0)^{-1}} - C_0{}^{-(1-C_0)^{-1}}}\right)\right] \quad (1)$$

con

$$C_0 = \frac{T_0}{1{,}7275} \quad (2)$$

$$C = \frac{T}{1{,}7275} \quad (3)$$

donde T es el tiempo de reverberación medido en el recinto receptor y T_0 es una referencia equivalente a 0,5 s en viviendas. El volumen del recinto receptor se denota como V, y V_0 es el volumen de referencia, equivalente a 50 m^3 para viviendas. El descriptor Li_{Fmax} se obtiene a partir del promedio energético de los niveles registrados para cada posición de fuente. Este cálculo se realiza para cada banda de tercio de octava desde 50 a 10.000 Hz. El subíndice *Fmax* indica que se realiza un ventaneo rápido (*Fast*) de 125 ms a partir del máximo medido.

Se tiene en cuenta el nivel de ruido de fondo Lb para realizar, en caso de ser necesario, una corrección a fin de obtener nivel de señal ajustado, tal como lo indica la norma en el apartado 9 [1].

3.2 Representación de aislamiento al ruido de impacto a partir de valores únicos

En este apartado se presentan descriptores que, a partir de valores únicos, permiten tener una representación rápida y general de los resultados.

Las Ecuaciones (4) y (5) representan el nivel global y el promedio energético, respectivamente.

$$L_{GLOBAL} = 10log\left(\sum_{j=1}^{n} 10^{\frac{L_j}{10}}\right) \quad (4)$$

$$L_{promedio} = 10log\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} 10^{\frac{L_j}{10}}\right) \quad (5)$$

A fin de caracterizar el aporte de cada revestimiento agregado sobre la losacero, se utiliza la diferencia de niveles ΔL_{GLOBAL}. La Ecuación (6) presenta la diferencia entre una condición C_n y otra C_k con mayor cantidad de capas en el detalle constructivo.

$$\Delta L_{GLOBAL} = \Delta C_{n-k} = L_{GLOBAL,Cn} - L_{GLOBAL,Ck} \quad (6)$$

4. DESARROLLO

En los subíndices siguientes se describe la el procedimiento de medición, y la locación en la cual se llevaron a cabo, junto con los distintos detalles constructivos bajo análisis. También se presentan las fuentes de impacto único utilizadas, y se ahonda en las mediciones de laboratorio realizadas para caracterizar dichas fuentes en relación al nivel de fuerza de impacto por frecuencia.

4.1 Procedimiento de medición

A partir de los impactos generados en el emisor, el objetivo final de las mediciones es obtener el nivel de presión sonora promedio máximo de los niveles registrados en el recinto receptor. Para ello se requiere su tiempo de reverberación, ruido de fondo captado y el registro de nivel de presión sonora ante los impulsos.

Se respetaron las ubicaciones relativas recomendadas por la norma de referencia para los puntos de emisión y captura. Se utiliza la técnica de micrófonos fijos, con un mínimo de 4, espaciados de manera tal que se cubra la mayor parte de la superficie de la planta inferior y sin tomas en el mismo plano relativo a los límites del cuarto. Con respecto a las fuentes, éstas se dejaron caer libremente, cumpliendo con las distancias mínimas de 0,5 m de cualquier pared. En todos los casos, cada tirada de fuente se repitió tres veces en el mismo lugar para luego obtener un promedio, reduciendo la incertidumbre.

Debido a la falta de un sonómetro, se realizaron grabaciones en el recinto receptor de los impactos generados en el emisor. Para ello se utilizaron dos micrófonos de medición Berhinger ECM 8000 [5] conectados a una interfaz de audio USB Zoom U44 [6]. Se grabaron tonos de calibración para cada micrófono y canal de la interfaz para tener una referencia de nivel de presión sonora y realizar posteriormente los cálculos análogos a un sonómetro. Para ello se utilizó un calibrador InLite CalPro Clase 1 [7].

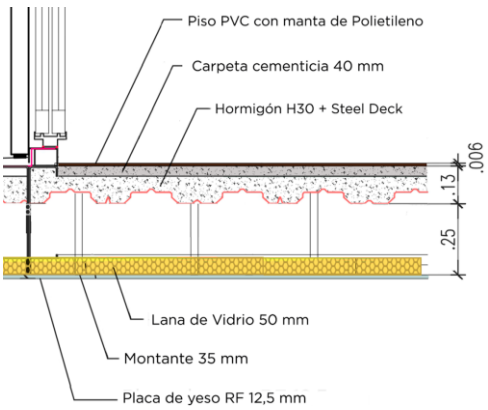
Para obtener el tiempo de reverberación de cada recinto se utilizaron globos debido a su practicidad, con un rango frecuencial útil que va desde los 50 Hz a los 10 kHz, aproximadamente. Las posiciones de fuente son 2 por recinto, y las ubicaciones de micrófono son las mismas que para el registro de ruido generado en la planta superior. Los impulsos se grabaron con el sistema previamente mencionado.

4.2 Locación y detalles constructivos

Las mediciones fueron realizadas entre durante el proceso de construcción de un edificio de media altura, donde la separación estructural entre cada nivel es de losa mixta. El mismo presenta irregularidades en la fachada que se traducen al interior de cada unidad funcional, debido a que cada nivel está diseñado con una planta completamente distinta a las demás, tal como se puede ver en la Figura 1.a. Esto puede suponer una complejidad en el análisis ya que, en cada caso, la partición común es distinta a la total.

El entrepiso final se encuentra compuesto principalmente por un revestimiento de piso clickeado de PVC con una manta de polietileno por debajo, sobre una losa mixta, desde la cual se coloca un cielorraso de placa simple con lana de vidrio en su interior. Este detalle constructivo se conocerá como Condición 3 (C3) a lo largo de todo el documento. En la Figura 1.b puede observarse un plano en corte del detalle constructivo final de entrepiso.

(a) Vista Oeste del edificio Fair Green.



(b) Detalle constructivo final.

Figura 1: Características del edificio de media altura donde se realizaron las mediciones.

La estructura principal del entrepiso es la losa mixta que separa el nivel superior del inferior. Esta está compuesta por placas metálicas colaborantes, hormigón tipo H30, y un acabado de carpeta cementicia de 4 cm. El tipo de hormigón utilizado presenta gran resistencia a las fuerzas de compresión. Su nombre proviene de la presión que soporta, en este caso 30 MPa. Presenta una densidad de 2400 kg/m^3 aproximadamente. En su interior se colocó una malla de refuerzo reticulada por celdas de 20 cm por 20 cm, fabricada de varillas de acero de 6 mm.

El revestimiento de techo es un cielorraso de emplacado simple de 12,5 mm, con una cavidad de aire de 25 cm. En el interior se colocó lana de vidrio de 50 mm, de 11 kg/m^3 de densidad, aproximadamente.

Las mediciones se realizaron combinando los detalles mencionados. Se analizan tres condiciones diferentes, siendo la Condición C1 solamente la losa mixta, Condición C2 la losa mixta con el agregado de cielorraso en la parte inferior, y Condición C3. Estos detalles constructivos se describen en la Tabla 1, tomando el orden de las capas desde el recinto emisor hacia el receptor.

Tabla 1: Características constructivas de las condiciones de entrepiso bajo análisis, descritas desde la capa superior hacia la inferior.

Nomenclatura	Detalle constructivo (desde emisor hacia receptor)	Espesor total
Condición 1 (C1)	Carpeta cementicia + Hormigón H30 + Placa metálica colaborante	13 cm
Condición 2 (C2)	C1 + Cavidad de aire + Lana de vidrio + Placa de yeso	48 cm
Condición 3 (C3)	Piso clickeado de PVC + Manta de polietileno + C1 + C2	48,5 cm

Se analiza un total de 5 particiones comunes. Solo en 3 de ellas se realizaron mediciones para las tres condiciones bajo análisis. Se las denota individualmente a lo largo del documento como M°, por ejemplo, M1.

4.3 Fuentes de impacto único utilizadas

Con la finalidad de cubrir un amplio rango frecuencial, a lo largo de este estudio se trabaja con cuatro fuentes distintas de caída libre y de impacto único, las cuales se presentan en la Figura 2.

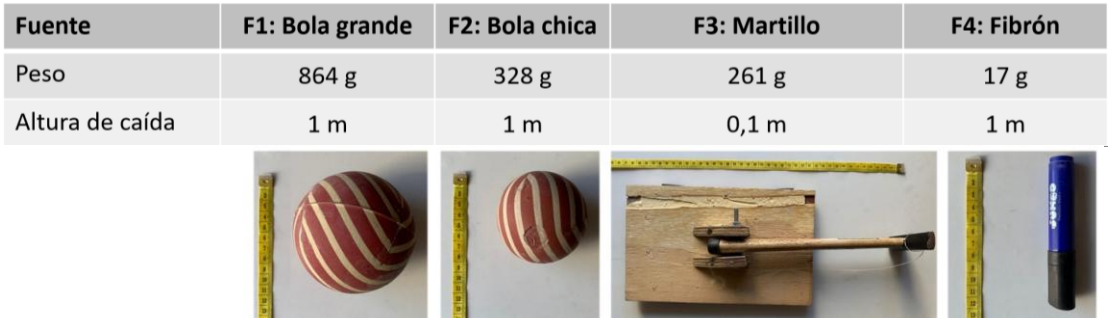


Figura 2: Características de las fuentes de impacto único utilizadas.

Para un rango frecuencial esperado entre 50 y 800 Hz se utilizaron dos pelotas de goma de aproximadamente 3 mm de espesor, rellenas de arena. La más grande tiene un diámetro de 0,098 m y un peso de 0,846 kg, y será denominada como Fuente F1 de aquí en adelante. La bola chica (F2) tiene un diámetro de 0,075 m y pesa 0,382 kg.

Para un rango frecuencial esperado comprendido entre 500 y 5000 Hz, se utilizó un sistema a modo de péndulo invertido empleando un martillo (F3) con un punto de anclaje en el extremo liviano. Para accionar el impacto, se levanta la punta metálica haciendo uso de una tanza y se deja caer libremente desde una altura de aproximadamente 10 cm.

A fin de caracterizar la caída de un objeto liviano común, se dejó caer un fibrón de 17 g (F4) de una altura aproximada de 1 m. El rango a cubrir para esta fuente es de frecuencias altas, aunque lo que se intenta es tener una referencia de un elemento de uso diario para representar una situación real.

4.2.1 Caracterización de laboratorio

A fin de obtener una caracterización certera de las fuentes utilizadas, se llevaron a cabo mediciones de fuerza de impacto. El sistema empleado consiste en un transductor de fuerza a partir de una celda de carga en una estructura tipo S, conectado a un sistema adquisidor que trabaja en conjunto con un software de medición y análisis. Sobre el sensor se deja caer la fuente libremente, registrando la amplitud de fuerza de impacto conforme avanza el tiempo.

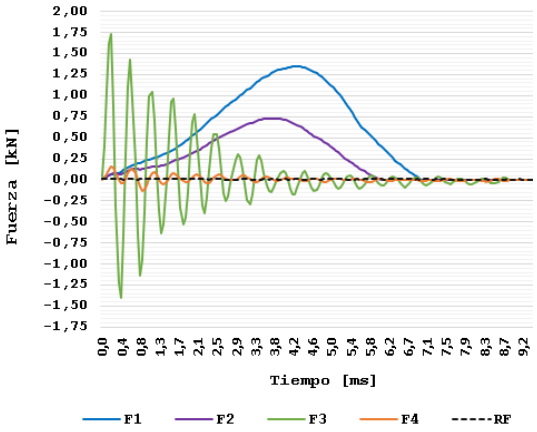
Figura 3: Sistema de medición de laboratorio. Se empleó un sensor tipo S para medir la fuerza de impacto.

La frecuencia de muestreo utilizada fue 19200 Hz. Sobre la base de este valor se logra una resolución de 0,052 ms. Por otra parte, para la representación frecuencial, se aplica la transformada rápida de Fourier (FFT), con ventana Hamming de 2048 muestras, logrando una resolución de 9,375 Hz. La representación en frecuencia se hizo a partir de los valores de fuerza pico F_{pico} con unidad en Newtons [N], seleccionando el intervalo necesario para cumplir con el ventaneo elegido. Estos valores se expresan en decibeles a partir de la siguiente Ecuación:

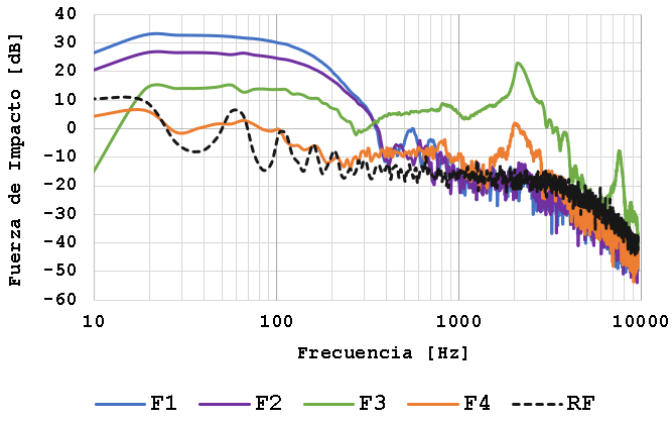
$$\boldsymbol{F = 20\log\left(F_{pico}\right)} \tag{7}$$

Se toma como referencia para dicho cálculo el procedimiento de [4]. Aunque la Norma JIS 1419-2 especifica los parámetros que debe cumplir la bola de impacto a utilizar, no detalla la metodología necesaria para garantizar dichas características [8]. Sin embargo, se toma como referencia para llevar a cabo el procedimiento de medición de laboratorio y caracterización de fuentes utilizadas.

Para cada fuente se registraron tres impactos, tomando el promediado entre ellos para obtener una única curva representativa, tanto de fuerza de impacto en kN por tiempo (ver Figura 4.a) como de nivel de fuerza por frecuencia (ver Figura 4.b).



(a) Representación temporal del impacto de cada fuente.



(b) Respuesta en frecuencia de cada fuente.

Figura 4: Resultados de mediciones de laboratorio para las fuentes de impacto

Para las fuentes F1 y F2 el contenido espectral preponderante se encuentra en un rango entre 10 y 400 Hz, y prácticamente niveles similares al piso de ruido RF en el rango de las frecuencias medias y altas. Este no es el caso para las fuentes F3 y F4.

El gráfico de respuesta en frecuencia permite deducir que los resultados se ven afectados por el propio sistema de medición. El hecho de que la fuente F3 presente contenido espectral en baja frecuencia, además del comportamiento subamortiguado que se observa en la respuesta temporal, permite deducir que el sensor registra vibraciones externas al impacto generado. Además, resulta destacable que para las fuentes F3 y F4 aumenta la fuerza de impacto en la zona de los 2000 Hz en ambos casos, lo que podría inferir una situación similar a la anterior, ya que el adaptador inferior presenta una resonancia cercana a este rango frecuencial.

Sin embargo, las mediciones de laboratorio realizadas permiten tener un acercamiento al espectro frecuencial de acción de cada fuente, donde queda evidenciado que las fuentes F1 y F2 presentan mayor contenido en bajas frecuencias, y que las fuentes F3 y F4 presentan contenido en frecuencias medias altas.

Resulta de interés comparar la fuente F1 con la bola de goma normada como fuente de impacto único, ya que es la que más se asemeja en peso y tamaño. Se compara el nivel de exposición a la fuerza de impacto L_{FE} a partir del procedimiento de cálculo descrito en el apartado A.2.1 de la Norma ISO 16283-2, mediante la siguiente ecuación:

$$L_{FE} = 10\log\left[\frac{1}{T_{ref}}\int_{t1}^{t2}\frac{F^2(t)}{F_0}dt\right] \tag{8}$$

donde F(t) es la fuerza instantânea que actua sobre la superfície de impacto, Tref es el intervalo de tempo de referencia equivalente a 1 s, t2 y t1 es el tempo em segundos que dura el impacto, y F0 es la fuerza de referencia equivalente a 1 N.

En la Tabla 2 se presentan los valores de L_{FE} obtenidos por bandas de octava en comparación con las especificaciones requeridas por la Norma. Es importante destacar que la mínima duración de F(t) para graficar la banda de 31,5 Hz debe ser de 31,7 ms para obtener al menos un ciclo de dicha frecuencia. Sin embargo, debe notarse que en ninguno de los dos casos (fuente normada y fuente alternativa), el intervalo temporal de impacto alcanza ese valor, por lo que se considera que la selección temporal aplicada en el cálculo es mayor.

Tabla 2: Comparativa de niveles de exposición a la fuerza de impacto entre la fuente normada y F1.

Banda de octava [Hz]	L_{FE} Fuente Normada [dB]	L_{FE} F1 [dB]	Diferencia [dB]
31,5	39,0 ± 1,0	28,2	10,8
63	31,0 ± 1,5	30,3	0,7
125	23,0 ± 1,5	29,4	-6,4
250	17,0 ± 2,0	21,2	-4,2
500	12,5 ± 2,0	8,1	4,4

Puede verse que la fuente estandarizada presenta un nivel considerablemente superior en la banda de 31,5 Hz. Para la banda de 63 Hz la diferencia es mínima, por lo que se puede deducir que la fuente alternativa es comparable con la fuente normada en este sentido. Sin embargo, presenta valores mayores para las bandas de 125 y 250 Hz, lo cual es esperable debido a la naturaleza de la bola de goma vacía.

Esta comparación permite concluir que existen diferencias considerables entre la bola de goma recomendada por la Norma y la fuente F1. Es por esto que sólo se podrían hacer comparaciones directas para la banda de 63 Hz entre este estudio y otros que se adapten a la recomendación.

5. RESULTADOS

5.1 Representación en bandas de frecuencia de tercio de octava

En la Figura 5 se presentan las curvas de $L'i_{Fmax,V,T}$ por bandas de tercio de octava para cada condición en relación a cada una de las fuentes utilizadas. Estas curvas son generales, y reúnen de manera energética el promedio de las mediciones de cada partición. Es por ello que el desvío estándar representa la variación de nivel entre los distintos espacios.

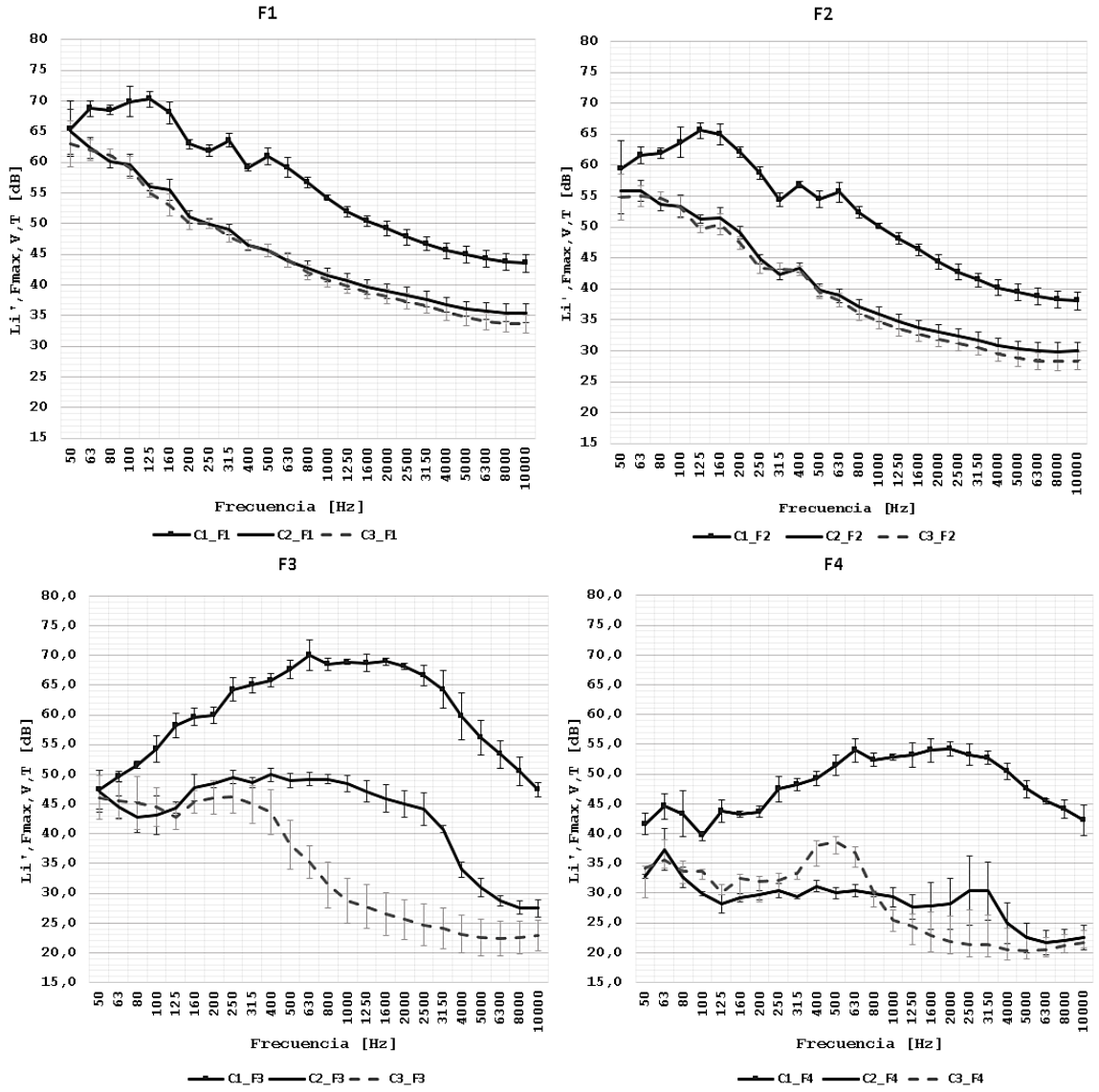


Figura 5: Valores de $L'i_{Fmax,V,T}$ para cada condición, agrupados por fuente.

Tanto en el caso de la fuente F1 como de F2 se observa que el agregado de cielorraso de emplacado simple con lana de vidrio en la cavidad de aire genera una reducción en el nivel obtenido en el recinto receptor en prácticamente todo el espectro, si bien no debe perderse de vista que estas fuentes intentan representar solamente el comportamiento en el rango de las frecuencias bajas.

Para la fuente F1, al comparar las condiciones C1 y C2, se observaron diferencias máximas de 14,4 dB en la banda de 125 Hz, y de 14,6 dB en la banda de 315 Hz. Mientras que para F2 se observa una reducción de 9,8 dB para la banda de 125 Hz frente a la misma comparación.

Es notorio que, para el rango frecuencial de excitación de estas fuentes, no se observan diferencias entre las condiciones C2 y C3, por lo que se puede deducir que el agregado de piso clickeado de PVC no representa una mejora en el aislamiento al ruido de impacto en bajas frecuencias.

En lo que respecta a la fuente F3, el espectro de excitación ocupa el rango de medias y altas. Al comparar las condiciones C1 y C2 se observa una disminución en el nivel en este rango, obteniendo una diferencia máxima de 25,8 dB en la banda de 4000 Hz. Esto puede deberse a las características de absorción sonora del material utilizado en la cavidad, además del aislamiento que proporciona el emplacado simple de yeso, y su conjunto. A su vez, puede verse una tendencia de reducción de 20 dB aproximadamente entre las bandas de 630 a 3150 Hz. De esta manera, puede deducirse que la condición C2 proporciona un grado de aislamiento considerable en frecuencias medias y altas. Un comportamiento similar se observa al comparar las condiciones C1 y C2 en el caso de la fuente F4, donde la reducción sonora es evidente prácticamente en todo el espectro.

A diferencia de lo visto para las fuentes F1 y F2, en el caso de la fuente F3 se presenta una mejora en el aislamiento al ruido de impacto al comparar las condiciones C2 y C3. Esto puede verse ya que el martillo logra excitar el rango frecuencial de interés. El agregado de piso clickeado de PVC presenta una reducción máxima de 19,7 dB para la banda de 1000 Hz en este análisis. De esta manera, se puede estimar que entre las condiciones C1 y C3 existe una atenuación de 40 ± 3 dB para un rango frecuencial entre 800 y 4000 Hz.

Para el caso de la fuente F4, se observa un fenómeno de aumento de nivel en el receptor para la banda de 500 Hz en favor de la condición C3 por sobre C2, lo cual pudiera resultar contraintuitivo luego de ver las curvas correspondientes a F3. Sin embargo, al analizar las curvas de tiempo de reverberación para la condición C3 se observa una disminución de este parámetro en la misma banda, tal como se presenta en la Figura 6. Esto se repite para todas las mediciones de recinto receptor, para las bandas de tercio de octava de 500 y 630 Hz. Puede inferirse que el arreglo de piso clickeado de PVC con manta de polietilieno sobre la losacero, genera una resonancia sintonizada en este rango. Esto provocaría una vibración mayor, logrando una disminución del aislamiento por el traspaso de energía.

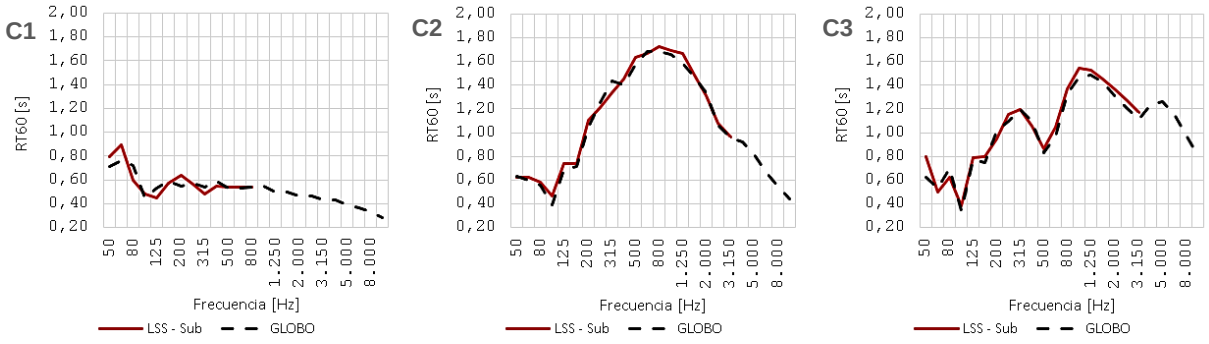


Figura 6: Mediciones de tempo de reverberación para cada condición, en una partición común.

Un interrogante puede ser por qué no se ve claramente un comportamiento similar al comparar las condiciones C2 y C3 para la fuente F3, pero debe tenerse en cuenta que el aislamiento al ruido de impacto es dependiente de la conjunción entre la fuente de impacto y la composición y detalle constructivo de la partición. Esto resulta consistente con el estudio mencionado anteriormente, realizado por Scholl y Maysenhölder, donde se indica que el impacto recibido por la partición depende de la masa y la rigidez tanto del piso como de la fuente, además de dejar de lado el comportamiento lineal en el caso en que se agregue un revestimiento elástico [2].

5.2 Representación en valores únicos

En la Tabla 3 se presentan, para las cuatro fuentes, los valores globales L_{GLOBAL} de cada medición, los cuales parten de aplicar la Ecuación (4) sobre los valores de $L'i_{Fmax,V,T}$ de todas las bandas de tercio de octava.

A su vez, se obtuvo el nivel global realizando el promedio energético entre las distintas mediciones, utilizando la Ecuación (5). Este valor permite acercar el nivel de aislamiento general para cada relación entre una fuente y una condición. Se detalla con el desvío estándar asociado, el cual representa las diferencias entre las mediciones de las distintas particiones. Este procedimiento es

equivalente a obtener el nivel global de la curva correspondiente a la comparativa entre cada y fuente y condición.

Por otra parte, haciendo uso de los descriptores mencionados anteriormente, se utiliza la Ecuación (6) para obtener el nivel de mejora que se puede lograr con el agregado de los distintos revestimientos.

Tabla 3: Representación de valores únicos, agrupados por fuente, para cada condición.

	F1						F2					
	C1	**C2**	**C3**	ΔC_{1-2}	ΔC_{1-3}	ΔC_{2-3}	**C1**	**C2**	**C3**	ΔC_{1-2}	ΔC_{1-3}	ΔC_{2-3}
$L_{GLOBAL}(L'i_{Fmax,V,T})$ **General [dB]**	**77,4**	**69,1**	**68,2**	**8,3**	**9,1**	**0,8**	**72,3**	**62,2**	**61,7**	**10,1**	**10,7**	**0,5**
Desvío Estándar [dB]	*0,3*	*2,1*	*2,2*	*0,8*	*2,0*	*1,2*	*0,6*	*0,7*	*1,7*	*1,3*	*2,1*	*0,8*
$L_{GLOBAL}(M1)$	77,0	68,1	69,0	8,9	8,0	-0,9	72,9	62,8	63,4	10,1	9,5	-0,6
$L_{GLOBAL}(M2)$	77,6	67,9	68,7	9,7	9,0	-0,8	73,5	62,3	62,3	11,2	11,2	0,0
$L_{GLOBAL}(M3b)$	-	-	65,3	-	-	-	-	-	59,7	-	-	-
$L_{GLOBAL}(M4)$	77,4	66,9	65,6	10,6	11,8	1,2	74,1	61,5	60,4	12,6	13,7	1,1
$L_{GLOBAL}(M5)$	-	71,7	70,3	-	-	1,3	-	-	-	-	-	-

	F3						F4					
	C1	**C2**	**C3**	ΔC_{1-2}	ΔC_{1-3}	ΔC_{2-3}	**C1**	**C2**	**C3**	ΔC_{1-2}	ΔC_{1-3}	ΔC_{2-3}
$L_{GLOBAL}(L'i_{Fmax,V,T})$ **General [dB]**	**78,7**	**60,1**	**55,4**	**18,6**	**23,3**	**4,7**	**63,9**	**43,9**	**46,0**	**20,0**	**17,9**	**-2,1**
Desvío Estándar [dB]	*1,0*	*1,2*	*2,8*	*1,6*	*2,4*	*1,5*	*1,3*	*0,3*	*1,9*	*1,1*	*2,3*	*2,0*
$L_{GLOBAL}(M1)$	77,5	60,0	57,5	17,5	20,0	2,5	62,5	44,9	47,0	17,6	15,5	-2,1
$L_{GLOBAL}(M2)$	79,4	60,6	54,8	18,7	24,6	5,9	65,1	45,3	46,7	19,8	18,4	-1,4
$L_{GLOBAL}(M3b)$	-	-	50,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$L_{GLOBAL}(M4)$	79,0	58,3	55,2	20,7	23,8	3,1	63,8	45,3	43,7	18,5	20,1	1,7
$L_{GLOBAL}(M5)$	-	61,0	56,3	-	-	4,6	-	-	-	-	-	-

A partir de los valores globales pueden hacerse varias observaciones. En principio, se puede ver que el nivel que genera cada fuente varía para cada condición, ya sea para las mediciones individuales o en términos generales. Nótese que las fuentes F1 y F3 presentan niveles similares en términos globales para la condición C1, rondando los 78 dB. A su vez, se muestra que existe una diferencia de 5,1 dB, 6,9 dB y 6,5 dB entre las fuentes F1 y F2 para las condiciones C1, C2 y C3, respectivamente. Esto indica, en términos generales, que el peso de la bola más grande (F1) genera mayor excitación sobre todas las particiones.

Al analizar los diferenciales globales entre las condiciones C1 y C3, a partir de ΔC_{1-3} los valores son mayores para las fuentes F3 y F4 que para las fuentes F1 y F2. Esto demuestra, en términos generales, que el detalle constructivo final presenta un mejor aislamiento en un rango de frecuencias medias y altas.

En la tabla correspondiente a la fuente F4, se evidencia nuevamente el empeoramiento que genera el agregado de piso clickeado cuando la fuente es un objeto común, en este caso un fibrón. Esto se refleja en el valor negativo para ΔC_{2-3}, comportamiento que se repite en dos de tres mediciones realizadas. Sin embargo, en el caso de la fuente F3 la condición C3 presenta una mejoría de 4,7 dB en términos generales frente a la condición C2.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A lo largo de esta investigación se logró caracterizar el aislamiento al ruido de impacto de entrepisos de losa mixta y sus revestimientos, tanto de piso como de cielorraso. Se realizaron comparativas entre diversas fuentes generadoras para distintos rangos frecuenciales, analizando también en términos generales, globales y a partir de descriptores de valor único. A continuación, se presenta una síntesis de los hallazgos principales:

- **Efecto del cielorraso:** En concordancia con el estado del arte, se obtuvo que el agregado de cielorraso de emplacado simple con lana de vidrio en interior mejora el aislamiento para todo el rango frecuencial comprendido entre 63 y 10000 Hz, expresado en tercios de banda de octava.

- **Efecto del revestimiento de Piso Clickeado de PVC:** En lo que respecta al agregado de piso clickeado de PVC sobre la losa mixta, se destaca la mejora de aislamiento en un rango frecuencial superior a 800 Hz. Esto pudo observarse claramente en la condición en que la fuente era el martillo en caída libre de 10 cm. Sin embargo, se verificó que este tipo de revestimiento de piso empeora la situación entre los 500 y 630 Hz, ya que presenta una resonancia en este rango. Este efecto fue comprobado a partir de las mediciones de tiempo de reverberación en los recintos receptores una vez instalada la terminación. Por otra parte, haciendo uso de dos bolas de goma rellenas de arena, pudo comprobarse que el agregado de este revestimiento de piso no presenta mejorías en el rango de las frecuencias bajas.
- **Comparativa entre detalles constructivos:** Comparando la condición C1 y C3 en términos globales, se pudo determinar que el detalle constructivo diseñado para el entrepiso del edificio presenta un mejor rendimiento para el rango de las frecuencias medias altas. Esto fue comprobado a partir del análisis de los valores globales de cada condición, asociado a la fuente utilizada para cada caso.
- **Dependencia de la relación fuente - detalle constructivo:** A partir de esta investigación se puede aseverar que la relación entre la fuente utilizada y la terminación de la superficie sobre la cual impacta, presenta una dependencia en el método, y por ende a los resultados. Esto quedó reflejado en las diferencias de $L'i_{Fmax,V,T}$ registradas entre las fuentes F1 y F2, como también la diferencia en el comportamiento de las fuentes F3 y F4 en el rango frecuencial de resonancia del piso clickeado. A su vez, se presentaron valores de aislamiento para la losa mixta como única capa de entrepiso. Cabe destacar que, al no haber realizado las mediciones con fuentes normadas, no es posible determinar los resultados de manera comparativa con otros estudios, a excepción de aquellos obtenidos con la fuente F1 para la banda octava de 63 Hz. Esto pudo corroborarse ya que se llevaron a cabo mediciones de laboratorio a fin de caracterizar el comportamiento temporal y frecuencial de cada fuente, en relación a la fuerza de impacto aplicada.

Además de realizar una caracterización de los detalles constructivos en cuestión, esta tesis intenta sentar un registro para una posible nueva metodología de medición de aislamiento acústico a partir de la combinación de dos fuentes de impacto único, una destinada a las frecuencias bajas y otra a las altas. Esta idea es producto de analizar las diferencias y desacuerdos de la comunidad a la hora de mensurar el aislamiento haciendo uso de diversas fuentes, además de la necesidad de representar situaciones cotidianas y reales, más allá de la metodología y la lógica propuesta por los estándares.

De manera adicional, se proponen los siguientes trabajos futuros para ampliar y complementar los hallazgos de esta investigación:

- **Estudio con fuente normada:** Si bien se logró caracterizar el aislamiento proporcionado por la losa mixta y sus revestimientos con fuentes alternativas de impacto único, sigue siendo de interés realizar un trabajo similar con una fuente normada. Esto no sólo será un aporte a la comunidad científica y de la construcción, ya que no se han encontrado estudios para este tipo de entrepiso particular con fuentes de impacto único, sino que dará la posibilidad de ser contrastado con los resultados de esta investigación.
- **Compatibilidad entre descriptores de aislamiento al ruido de impacto:** En concordancia con lo anterior, sería importante realizar un estudio sobre la compatibilidad entre los parámetros de aislamiento al impacto continuo $L'n_T$ y al impacto único $L'i_{Fmax,V,T}$. Se propone el desarrollo de un procedimiento que permita equiparar ambos descriptores, a fin de realizar una comparación o conversión entre ambos métodos.
- **Desarrollo de nueva metodología de medición utilizando fuentes diferenciadas:** Este trabajo ahonda en el uso de fuentes alternativas para caracterizar el aislamiento al ruido de impacto en edificios. Pretende sentar un precedente para el análisis de una nueva metodología que permita el uso de dos fuentes de impacto único. Se propone diferenciarlas por su rango frecuencial de acción en frecuencias bajas, medias y altas.

- **Utilización de fuentes representativas:** Siguiendo con el debate de los tipos de fuente a utilizar para mediciones de ruidos molestos entre unidades funcionales de edificios, resulta de interés el análisis de fuentes de arrastre, como pueden ser sillas con ruedas, o muebles, entre otros.
- **Disponibilidad de base de datos:** Por otra parte, quedan a disposición de la comunidad científica todas las mediciones procesadas, y respuestas al impacto obtenidas. Esta información sirve como punto de partida y base de datos para el desarrollo de esquemas de procesamiento predictivo para indicadores de aislamiento al ruido de impacto, tanto para detalles constructivos como los analizados a lo largo de esta investigación, como también de otro tipo.

Estos trabajos futuros no solo permitirían avanzar en la caracterización de sistemas de aislamiento al impacto, sino que también podrían contribuir al desarrollo de metodologías más precisas y representativas del entorno real en el contexto de la acústica arquitectónica.

REFERENCIAS

[1] International Organization for Standardization, *ISO 16283-2:2013: Acoustics—Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements—Part 2: Impact sound insulation*, ISO, 2018.

[2] W. Scholl and W. Maysenhölder, "Impact sound insulation of timber floors: Interaction between source, floor coverings, and load-bearing floor," *Building Acoustics*, vol. 6, no. 1, pp. 43–61, 1999.

[3] S. Y. Yoo and J. Y. Jeon, "Investigation of the effects of different types of interlayers on floor impact sound insulation in box-frame reinforced concrete structures," *Building and Environment*, vol. 76, pp. 105–112, 2014.

[4] W. Shi, C. Johansson, and U. Sundback, "An investigation of the characteristics of impact sound sources for impact sound insulation measurement," *Applied Acoustics*, vol. 51, no. 1, pp. K-108, 1997.

[5] Behringer, *Measurement Condenser Microphone ECM8000 Technical Specifications*. [Online]. Available: https://mediadl.musictribe.com/media/PLM/data/docs/P0118/ECM8000_P0118_S_EN.pdf

[6] Zoom Corporation, *Handy Audio Interface U44 – Manual de Instrucciones*. [Online]. Available: https://zoomcorp.com/media/documents/S_U-44_0.pdf

[7] InLite, *Manual CalPro InLine*. [Online]. Available: https://inlite.com.br/es/wp-content/uploads/sites/3/2023/06/manual-calpro-es.pdf

[8] Japanese Industrial Standards Committee, *JIS 1419-2: Acoustics—Rating of sound insulation in buildings and of building elements—Part 2: Floor impact sound insulation*, JISC, 2000.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Desarrollo de un sensor acústico remoto a partir de un medidor de nivel sonoro clase 2

Lopez, Lautaro. Matias.[†,‡,1]**; Zanardi, Esteban.** [†,‡,2]**; Caccia, Matias** [‡,3]

[†] Decibel Sudamericana S.A., Haedo

‡ Universidad Nacional de Tres de Febrero, Caseros

[1] lautarolopez.20@gmail.com, [2] zanardi.esteban@gmail.com, [3] matiascacciag@gmail.com

Resumen Este trabajo presenta el desarrollo de un sensor acústico para exteriores mediante la adaptación de un medidor de nivel sonoro clase 2 con capacidades de monitoreo remoto basado en Internet de las Cosas. El sistema se construyó a partir de un sonómetro CESVA SC102 y una Raspberry Pi 4, habilitando la comunicación serial y la transmisión de datos en tiempo real a un servidor central mediante protocolo MQTT. Uno de los aspectos clave fue el diseño y montaje de una carcasa protectora para el micrófono, pensada para resistir condiciones ambientales adversas sin comprometer la calidad de las mediciones.

Para asegurar la integridad de las mediciones, se llevó a cabo una caracterización detallada de distintos tipos de espumas antiviento. Se evaluaron espumas de diversas densidades y niveles de humedad, analizando su impacto sobre la respuesta en frecuencia del micrófono mediante pruebas de *popeo* y *sine sweeps* en todo el espectro audible. Se consideraron métricas como atenuación y tiempo de secado. Los resultados muestran que la espuma de alta densidad de 24 kg/m³ presenta el mejor rendimiento en la mayoría de los casos, aunque muestra limitaciones en condiciones de saturación.

Finalmente, el sistema fue instalado en un entorno urbano real, donde realizó mediciones continuas durante dos semanas. Esto permitió generar curvas de nivel sonoro equivalente a lo largo del día, identificar patrones de variación horaria y validar el funcionamiento sostenido del sistema bajo condiciones ambientales reales.

Palabras clave: monitoreo, IoT, sensor acústico, sonómetro, procesamiento de datos.

Abstract This paper presents the development of an outdoor acoustic sensor through the adaptation of a Class 2 sound level meter with remote monitoring capabilities based on Internet of Things technologies. The system was built using a CESVA SC102 sound level meter and a Raspberry Pi 4, enabling serial communication and real-time data transmission to a central server via the MQTT protocol. A key aspect of the project was the design and assembly of a protective enclosure for the microphone, intended to withstand harsh environmental conditions without compromising measurement quality.

To ensure the reliability of the measurements, a detailed characterization of various windscreen foams was conducted. Foams with different densities and moisture levels were evaluated, analyzing their impact on the microphone's frequency response through *pop tests* and *sine sweeps* across the audible spectrum. Metrics such as attenuation and drying time were considered. The results show that the high-density foam (24 kg/m³) performed best in most scenarios, although it exhibited limitations under saturated conditions.

Finally, the system was deployed in a real urban environment, where it conducted continuous measurements over two full weeks. This allowed the generation of equivalent sound level curves throughout the day, the identification of hourly variation patterns, and the validation of the system's long-term operation under real-world environmental conditions.

Palabras clave: monitoring, IoT, Acoustic Sensor, Sound level meter, Data processing.

1. INTRODUCCIÓN

El creciente avance tecnológico y la mayor conciencia sobre los impactos ambientales han impulsado la necesidad de herramientas especializadas para la medición acústica en condiciones reales de operación. En particular, los sonómetros convencionales presentan limitaciones al ser expuestos a factores ambientales como lluvia, viento o polvo, lo que restringe su aplicación en monitoreo continuo en exteriores.

En este trabajo se presenta la adaptación de un medidor de nivel sonoro (MNS) de clase 2 para su uso en ambientes exteriores. La propuesta contempla su impermeabilización y el diseño de un soporte especializado para el micrófono, orientados a garantizar la confiabilidad de las mediciones en condiciones climáticas adversas. Asimismo, se incorpora conectividad y transmisión de datos en tiempo real, lo que convierte al instrumento en un sensor acústico inteligente, con capacidad de supervisión remota a través de protocolos de comunicación y plataformas de visualización.

El desarrollo busca superar las limitaciones de los sonómetros tradicionales, optimizando la durabilidad, precisión y aplicabilidad del dispositivo en contextos reales de monitoreo ambiental. Además, la utilización de componentes estándar y de fabricación nacional contribuye a la reducción de costos y a la adecuación del sistema al mercado local

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan los conceptos fundamentales que enmarcan el desarrollo del prototipo. Primero se describen las características de los sonómetros y parámetros de medición, luego se aborda su integración en sistemas basados en IoT (*Internet of Things)* y, finalmente, se introducen las normativas más relevantes que guían este trabajo.

2.1 Estructura del medidor de nivel sonoro

La evaluación del nivel de presión sonora es esencial en ámbitos ambientales y laborales, donde el ruido constituye un factor de riesgo y una fuente de contaminación. El instrumento más utilizado para este fin es el MNS, que permite medir la presión acústica y caracterizar el ruido en distintos entornos.

Los sonómetros de clase 1 se emplean en aplicaciones de alta precisión (±0,2 dB), mientras que los de clase 2, con tolerancias más amplias (±0,5 dB), resultan adecuados para aplicaciones generales y de monitoreo en campo. En ambos casos, el componente crítico es el micrófono de condensador, que convierte las ondas sonoras en señales eléctricas con alta sensibilidad y bajo nivel de distorsión. La correcta calibración del instrumento, tanto en laboratorio como en campo mediante calibradores portátiles, asegura la confiabilidad de las mediciones.

En términos de parámetros de medición, los sonómetros calculan indicadores basados en la presión sonora ponderada en frecuencia y tiempo. La norma IEC 61672-1 [1] establece, entre otros, el nivel sonoro instantáneo con respuesta rápida o lenta, definido por la ecuación (1):

$$L_{S,F} = 20\log\frac{\sqrt{\frac{1}{\tau}\int_{-\infty}^{t} p_A^2(\varepsilon)\, e^{\frac{-t-\varepsilon}{\tau}}\, d\varepsilon}}{p_0} \tag{1}$$

En esta ecuación, $p_A(\varepsilon)$ representa la presión sonora instantánea ponderada A en pascales (Pa), p_0 es la presión de referencia (20 µPa), y τ es la constante que define la rapidez de repuesta del sistema (125 ms para la respuesta rápida y 1 s para la lenta)

Por otro lado, el nivel de presión sonora equivalente (L_τ) resume la exposición sonora de un período definido, tal como indica la ecuación (2):

$$L_{tau} = 10 \log \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \quad (2)$$

Aquí, $p(t)$ es la presión sonora instantánea, p_0 la referencia de 20 µPa y $T = t_2 - t_1$ la duración del intervalo de análisis. Esta magnitud sintetiza la variación temporal del sonido en un valor único expresado en decibelios (dB), proporcionando una representación más estable de la exposición que las mediciones instantáneas.

Estos indicadores constituyen la base para la caracterización del ruido ambiental y para la validación de las mediciones bajo estándares internacionales.

2.2 Sensores acústicos e Internet de las Cosas

El desarrollo de redes de sensores interconectados en el marco del IoT ha impulsado nuevas aplicaciones en monitoreo ambiental. En este contexto, las WASN (*Wireless Acoustic Sensor Networks*) integran múltiples nodos capaces de registrar y transmitir información sonora en tiempo real, favoreciendo la supervisión remota y la generación de bases de datos para la toma de decisiones. [2]

Diversos proyectos han demostrado la utilidad de estas redes para la gestión del ruido urbano y laboral. En Barcelona, por ejemplo, se han implementado plataformas abiertas como SENTILO [3], que permiten integrar datos acústicos y ambientales en sistemas de ciudad inteligente. Sin embargo, estas soluciones suelen estar asociadas a equipos de alto costo, lo que limita su implementación masiva.

Otros nodos, en cambio, son mas simples y económicos. Denominados de baja capacidad (Lo-Cap), donde su función se limita a la captura de parámetros básicos, como el nivel de presión sonora, sin realizar ningún tipo de análisis previo. En estos casos, los datos recolectados son enviados directamente a un nodo central o a la nube. Este enfoque constituye el marco en el cual se inserta el presente trabajo: la adaptación de un MNS comercial de clase 2 como sensor acústico inteligente, con transmisión de datos en tiempo real y operación en exteriores.

2.3 Normativas relevantes

El desarrollo de sistemas de medición acústica debe alinearse con estándares internacionales y nacionales que garantizan la validez de los resultados. Entre los más relevantes se encuentran la norma IEC 61672-1, que establece los requisitos técnicos y tolerancias para sonómetros de clase 1 y 2, y la norma internacional ISO 1996 [4], que define metodologías para la evaluación del ruido ambiental.

En Argentina, la IRAM 4062-2 [5] regula la medición y calificación del ruido en la vía pública y en áreas exteriores, mientras que la Ley N.° 1540 de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires [6] establece límites máximos de emisión sonora para actividades públicas y privadas. Estas normativas constituyen la base regulatoria que orienta tanto el diseño experimental como la futura aplicación del prototipo.

3. MATERIALES Y MÉTODO

Esta sección se centra en las características principales tanto del dispositivo como su estructura IoT, conexiones, hardware, software y su diseño de carcasa exterior. Se abordan los distintos materiales y herramientas utilizadas para lograr la exteriorización final.

3.1 Instrumento principal

Se utilizó un sonómetro CESVA SC102 de clase 2 [7], equipado con un micrófono de condensador de ½” modelo P-05, con sensibilidad nominal de 16,0 mV/Pa y capacidad para niveles de hasta 145 dB SPL. Para asegurar la precisión se empleó un calibrador acústico multifunción Brüel & Kjær modelo 4226.

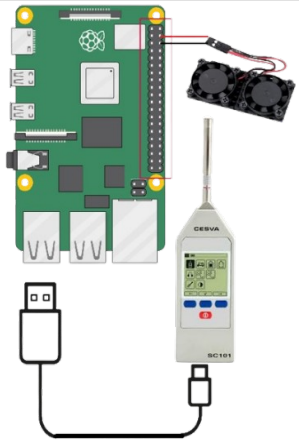
Figura 1: Sónometro utilizado

3.2 Módulo de conectividad

El sistema de transmisión se implementó sobre una Raspberry Pi 4 (8 GB RAM) con sistema operativo Raspbian y memoria de 32 GB. Este dispositivo actuó como puente entre el sonómetro y la red, gestionando los datos mediante conectividad Ethernet y Wi-Fi.

El software se desarrolló en Python 3, utilizando librerías como serial (comunicación RS-232/USB), pandas (procesamiento de datos), paho-mqtt (cliente MQTT) e InfluxDB para almacenamiento. Los registros se visualizaron con Grafana, permitiendo el monitoreo remoto en tiempo real. En la Figura 2 se puede observar tanto la placa ensamblada como el conexionado del instrumento a la placa de control.

(a) Raspberry con disipador y ventilador



(b) Conexionado eléctrico

Figura 2: Hardware conectado y ensamblado

3.3 Conexión y publicación de datos

El sonómetro transmite los registros hacia la Raspberry Pi mediante USB. Esta envía los datos al broker MQTT, que los redistribuye hacia los clientes suscritos. Los registros se almacenan en InfluxDB y se grafican en Grafana, donde se pueden configurar alertas y paneles personalizados. En la Figura 3 se observa el diagrama de bloques del proceso para crear gráficos en tiempo real en un servidor web.

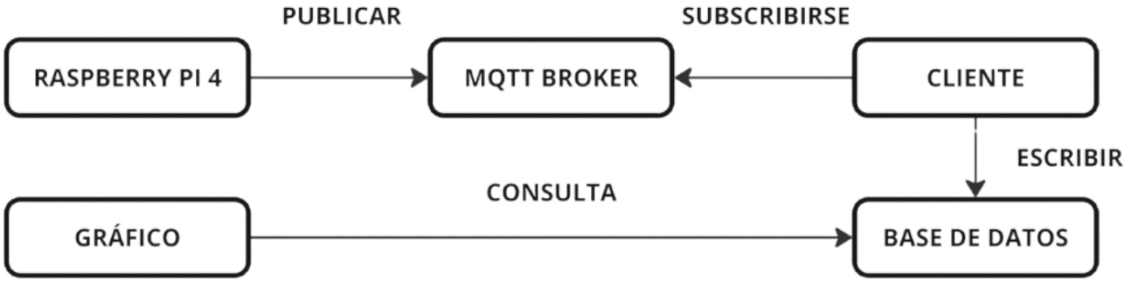


Figura 3: Proceso de publicación, almacenamiento y visualización de datos.

3.4 Sistema de protección y soporte

Para su instalación en exteriores, se adquirió una caja estanca estándar (25x15x9 cm) y un soporte metálico de acero inoxidable para el micrófono. Se tornea la entrerrosca y el tapón superior a fin de eliminar la forma cónica y lograr, además de una mejor terminación, que la media cupla enroques completamente sin dejar rosca expuesta. El sellado hermético previene de filtraciones de agua y polvo, mientras que un cono superior de 60° de aluminio evita el apoyo de aves.

Por último, se agrega una protección contra el polvo mediante goma espuma de celda cerrada, colocada sobre la capsula del transductor. En la Figura 4 se puede observar el soporte ensamblado, con el inserto de una varilla roscada de ¼" *whitworth*. En la Figura 5 se observa el dispositivo final ya ensamblado.

Figura 4: Soporte exterior finalizado con varilla roscada en la sección superior.

(a) Dispositivo finalizado

(b) Conexionado interior

Figura 5: Exterior e interior del modelo definitivo.

3.5 Caracterización de filtros anti-pop

El micrófono requiere protección frente al viento; por ello se ensayaron seis cubiertas de goma espuma de diferentes densidades y dos tipo de estructura (soft y alta densidad) tanto en condiciones secas como húmedas. Se evaluó su influencia en baja frecuencia mediante el método de *Pop Attenuation Global* (PAG) [8] y en alta frecuencia se caracterizó a través de 10 barridos logarítmicos de 30 segundos [9]. Se seleccionó la malla protectora que presentó la menor alteración en la respuesta en frecuencia al micrófono sin protección. Con el objeto de determinar el nivel de humedad de cada espuma, se utiliza una balanza especifica para medir su peso. Cada nivel de humedad se define como un aumento de al menos 2 gramos respecto al filtro seco.

Las pruebas se llevaron a cabo con un sonómetro modelo SC250 de CESVA, acompañado de un calibrador acústico CB011 de la misma empresa, empleado para referenciar el instrumento a 94 dB SPL a 1 kHz. Ambos equipos cuentan con certificados de calibración emitidos el 10/2023.

La caracterización en bajas frecuencias toma como referencia la metodología empleada según la norma IEC 60268-4 [10]. Este estándar busca medir la sensibilidad de los micrófonos frente a consonantes explosivas como /p/, /t/ y /k/, y que afectan la calidad de las grabaciones.

En esta investigación se utiliza una caja de aislamiento que cumpla con dicha , tal como se detalla en la Figura 6, a fin de asegurar que las mediciones se realicen bajo condiciones controladas y reproducibles.

Figura 6: Caja de aislamiento acústico utilizada para mediciones según la norma EN 60268-4

Adicionalmente, se incorpora un orificio de ½" a 30 mm sobre la cuadrícula, para permitir la calibración del subwoofer en campo cercano como lo indica la norma. El valor final de presión sonora alcanzado fue de 130 dB SPL en la banda de 40 Hz a fin de dañar lo menos posible el equipo. Aunque la normativa específica que esta superficie debería ser metálica con el objeto de minimizar vibraciones, se opta por usar el lado restante de la caja de madera dadas las circunstancias.

A fin de lograr un cierre más hermético y mayor control en las mediciones, se procede a colocar unos ganchos de capot zincado regulables para sellar la tapa. Es fundamental que el altavoz genere un nivel de presión sonora superior a 94 dB SPL, asegurando que las mediciones capturen adecuadamente la atenuación del popeo y se alejen del piso de ruido. En la Figura 7 se puede observar la estructura implementada y los orificios perforados en la parte delantera del subwoofer

(a) Subwoofer integrado

(b) Orificios de la cara frontal

Figura 7: Sistema final y orificios en la parte frontal del subwoofer.

Para la caracterización en altas frecuencias se abarcan las frecuencias de interés entre 250 Hz y 6300 Hz y se elimina la caja de aislamiento. Se utilizan soportes especiales para un parlante de 3 vías KRK Rokit 6 Gen3, evitando cualquier desplazamiento indeseado de la fuente sonora. Se emplean dos trípode distintos: uno con el objetivo de sostener el sonómetro y otro para el soporte del filtro a caracterizar. En la Figura 8 se puede observar la configuración para la medición del micrófono y del filtro respectivamente.

Figura 8: Medición del micrófono y de uno de los filtros respectivamente.

Para ambos procedimientos se repite variando las espumas y aplicándoles agua hasta alcanzar su punto de saturación.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En esta sección, se analiza el comportamiento acústico de varios filtros bajo diferentes niveles de humedad, a partir de las mediciones previamente detalladas. Se examina la relación señal/ruido en el entorno de medición y se estudian los efectos de la absorción de agua en la respuesta de cada espuma. Para ello, se implementan pruebas en condiciones controladas, aplicando métodos de comparación por sustitución, ponderación A y Z, de acuerdo con las normas IEC. Finalmente, se realiza un estudio en

alta frecuencia a fin de identificar posibles reflexiones internas, lo cual permite entender mejor las amplificaciones no deseadas del sistema en determinadas frecuencias.

4.2 Clasificación de las espumas

Para organizar y facilitar la identificación de los distintos conjuntos de datos obtenidos durante los ensayos, se utiliza una nomenclatura específica. En la Tabla 1 se presenta el nombre asignado a cada condición experimental y su correspondiente codificación utilizada en los archivos de datos. En este caso, X representa la condición de humedad aplicada al material durante la medición, y puede tomar los valores de seco, ligeramente húmedo, medianamente húmedo, húmedo y saturado desde 0 a 4. Por otro lado, el primer dígito indica la condición inicial del material: 0 cuando no estuvo en contacto con agua (ensayo en seco) y 1 cuando ya fue sometido a humedad.

Tabla 1: Valores obtenidos a lo largo de la medición

Código	Tipo de espuma	Densidad [kg/m³]	Condición
01_x	Espuma Soft	21	$X = 0$ a 4
02_x	Espuma Soft	24	*X = 0 a 4*
03_x	Espuma Soft	28	$X = 0$ a 4
04_x	Espuma Alta Densidad	19	*X = 0 a 4*
05_x	Espuma Alta Densidad	24	$X = 0$ a 4
06_x	Espuma Alta Densidad	28	*X = 0 a 4*
07_x	Filtro CESVA	No especificado	Seco únicamente

4.2 Bajas frecuencias

Se calculan valores globales en ponderación Z, siguiendo el Anexo C de la norma IEC 60268-4. Aunque esta norma recomienda la ponderación A, el uso de ponderación Z resultó adecuado debido al nivel elevado en bajas frecuencias (130 dB SPL en campo cercano y aproximadamente 112.8 dB SPL a 50 mm), lo cual disminuye el impacto de la corrección A en los resultados. En la Tabla 2 se observa las mediciones con las distintas espumas todas las condiciones, ponderado en Z.

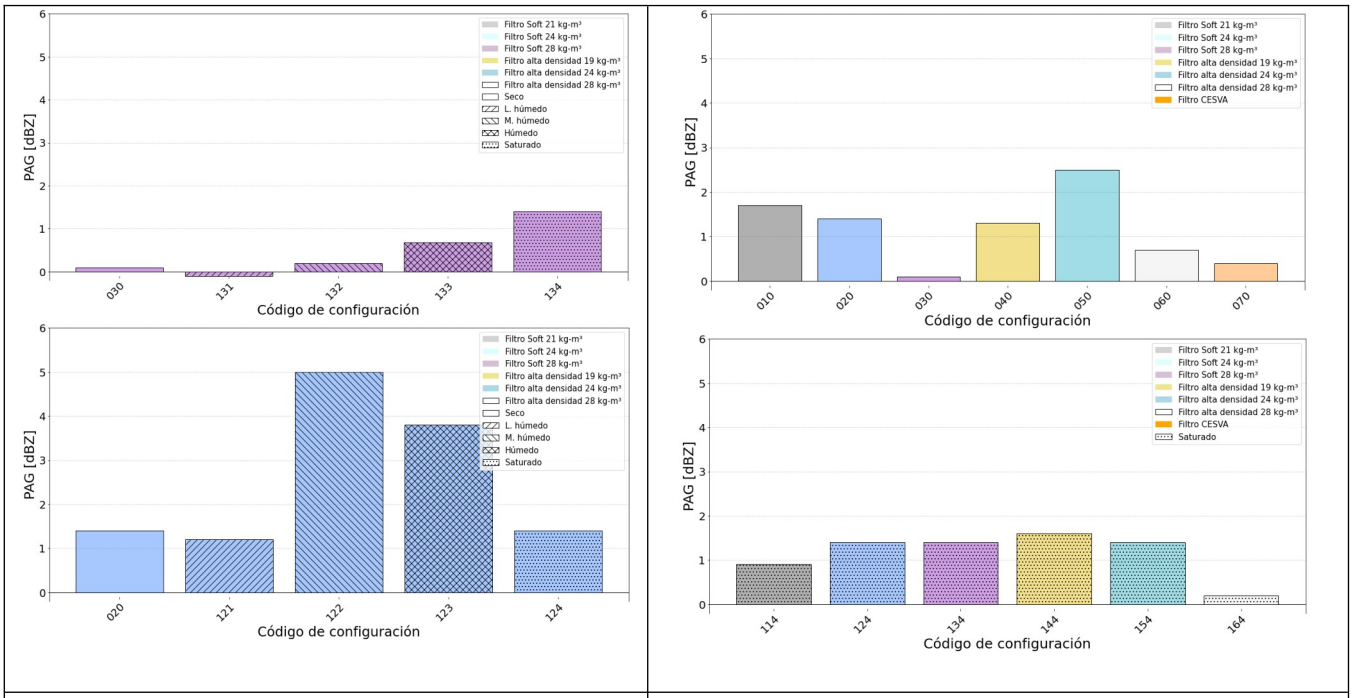
Tabla 2: Valores obtenidos a lo largo de la medición de baja frecuencia.

Índice	40 Hz [dBZ]	Índice	40 Hz [dBZ]	Índice	40 Hz [dBZ]	Índice	40 Hz [dBZ]	Índice	40 Hz [dBZ]
000	112.8	**111**	112.5	**112**	107.0	**113**	111.1	**114**	111.9
010	111.1	**121**	111.6	**122**	107.8	**123**	109.0	**124**	111.4
020	111.4	**131**	112.9	**132**	112.6	**133**	112.1	**134**	111.4
030	112.7	**141**	112.0	**142**	111.6	**143**	111.7	**144**	111.2
040	111.5	**151**	111.5	**152**	109.7	**153**	112.0	**154**	111.4
050	110.3	**161**	111.9	**162**	112.5	**163**	112.4	**164**	111.8
060	112.1								
070	112.4								

Se comparó la atenuación global promedio de distintas espumas frente a un micrófono de referencia bajo condiciones de humedad creciente. Los resultados muestran que las espumas de alta densidad (28

kg/m³, referencias 040 y 060) presentan el mejor desempeño, con valores bajos y estables incluso en saturación, lo que evidencia una mayor resistencia a la variabilidad inducida por la humedad. En contraste, las espumas de menor densidad (24 kg/m³, 010 y 020) resultaron altamente inestables, con picos y fluctuaciones pronunciadas que sugieren una estructura interna más sensible a la absorción de agua.

Dentro del rango intermedio, la espuma Soft 030 mostró un comportamiento aceptable, aunque con caída de rendimiento en estado saturado (≈1.4 dB SPL). Por otro lado, la 050, aun siendo de mayor densidad, presentó menor consistencia que sus pares. En la Figura 9 se observa la evolución de las espumas respecto a su humedad (a) y comparándolas entre ellas (b).



(a) Evolución de las espumas 030 y 050 en 40 Hz respectivamente.

(b) Comparación de los filtros secos y saturados.

Figura 9: Comparación entre los distintos resultados de la medición en bajas frecuencias.

En general, las etapas de humedad media y saturación fueron críticas para la mayoría de los materiales. Adicionalmente, se considera que la irrigación no uniforme durante las pruebas pudo haber generado variaciones en la absorción y, por ende, en los resultados.

4.2 Altas frecuencias

Se evaluó la respuesta en altas frecuencias mediante un sistema de tres vías mediante 10 sine sweeps de 30 segundos por medicion. En la configuración inicial (Soft 21 kg/m³ y malla CESVA en seco) se observaron picos inusuales en torno a 2 kHz, persistentes incluso sin espuma, lo que indica resonancias asociadas al soporte del micrófono. Esta resonancia presente en el rango de 2 – 4 kHz se observa en la Figura 10.

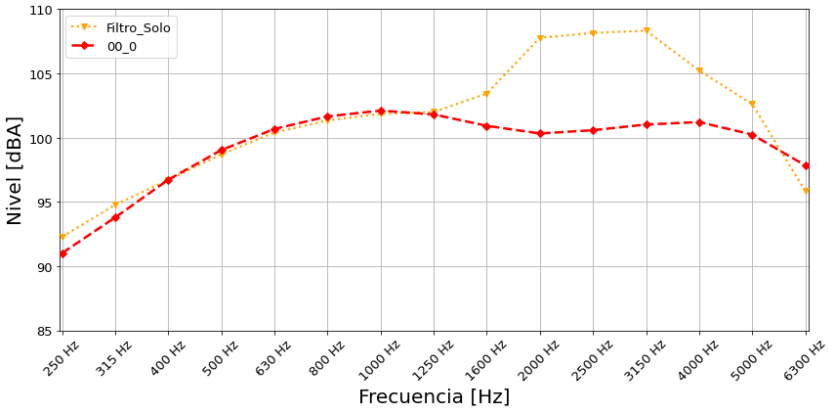
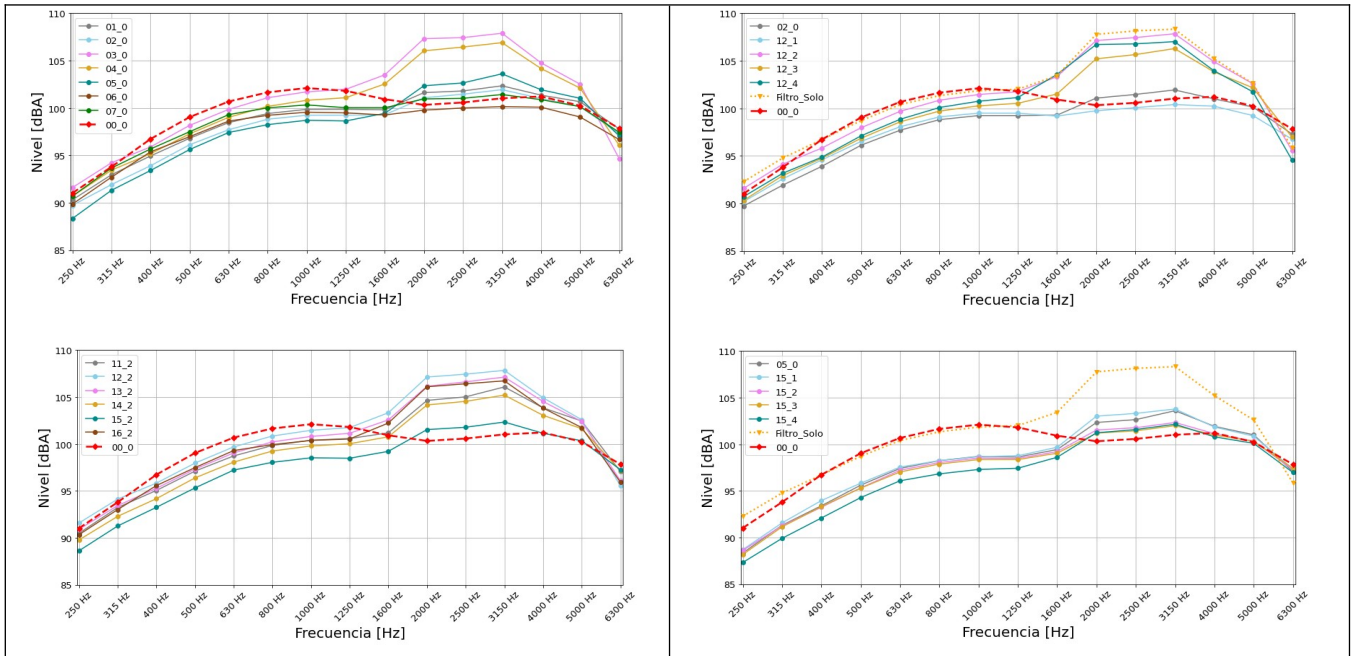


Figura 10: Comparación de medición entre el micrófono y el filtro sin espuma.

Al comparar distintas pantallas bajo condiciones seca y húmeda, se constató que la presencia de mallas acústicas atenúa las amplificaciones del soporte, mejorando la coherencia de los resultados. Entre los filtros ensayados, el 060 (alta densidad, 28 kg/m³) mostró la curva más lineal, aunque sobreatenuada respecto al micrófono; el 050 (alta densidad, 24 kg/m³) presentó el comportamiento más equilibrado; mientras que el 020 ofreció la peor respuesta. La evolución de cada espuma desde la condición seca hasta ligeramente húmeda (a) y la comparación de las espumas 020 y 050 (b) se ilustra en los gráficos de la Figura 11.



(a) Evolución de humedad en seco vs ligeramente húmedo

(b) Comparación de la espuma 020 vs 050

Figura 11: Resultados obtenidos de cada pantalla acústica.

El análisis de evolución con humedad permitió identificar dos patrones: por un lado el grupo 1 (030, 040, 050) presentando baja atenuación en seco pero mejora progresiva con humedad. Por otro lado, el grupo 2 (010, 020, 060) demostró una alta atenuación en seco que disminuye con humedad, aunque mejora nuevamente en saturación.

Se destaca que los filtros 020 y 030 presentaron incrementos inesperados de atenuación en humedad intermedia, en algunos casos superando la respuesta del micrófono de referencia.

Se realizó una prueba complementaria para analizar el proceso de secado de las espumas. Los resultados muestran un comportamiento aproximadamente lineal, ajustable a un modelo de tipo ln(h(t)), donde *t* corresponde al tiempo de secado. Esto se puede visualizar en la Figura 12.

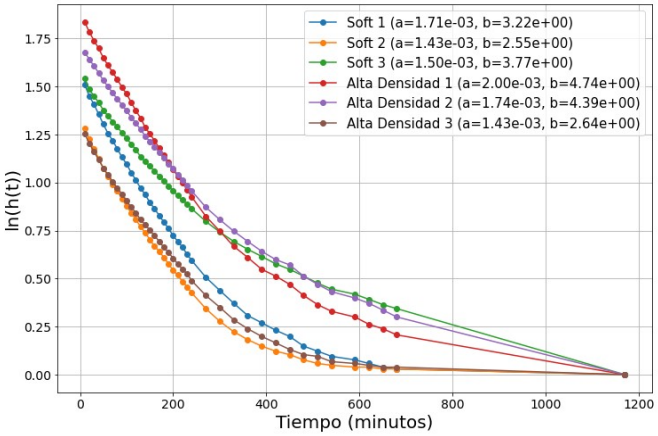


Figura 12: Comparación entre los distintos tiempos de secado.

Se confirmó el patrón observado previamente: las espumas 010, 020 y 060, con menor capacidad de absorción, alcanzaron el secado completo en menor tiempo. En contraste, las espumas 030, 040 y 050 presentaron mayor absorción y, en consecuencia, tiempos de secado más prolongados

4.3 Monitoreo urbano al aire libre

Para estudiar el comportamiento sonoro en entornos urbanos, se instala el sistema de medición en el balcón de un edificio, a una altura aproximada de 4,5 metros y a 10 centímetros de la pared a través de un soporte hecho a medida. Esta disposición se adoptó por limitaciones físicas del emplazamiento y se enmarca en las condiciones definidas en la ISO 1996-2:2017, Anexo B.5 [11], en las cuales el micrófono se ubica próximo a una superficie reflectante, pero no empotrado. Según la norma, en esta condición el nivel medido corresponde a posición de fachada y resulta nominalmente 3 dB SPL superior al nivel en campo libre, debido a la contribución de la reflexión. Por lo tanto, para estimar el nivel equivalente en campo libre se aplica una corrección de −3 dB SPL a los valores registrados.

Cabe aclarar que la pared utilizada es plana y rígida, lo que cumple con los requisitos geométricos de la norma, y que eventuales fuentes cercanas, como el compresor del sistema de aire acondicionado, fueron controladas para no influir en las mediciones, evitando así que interfieran en los resultados.

A fin de reducir carga en la Raspberry Pi, se ensayó un esquema alternativo de LeqA cada 15 min (promedio de 900 muestras/intervalo), que preserva la tendencia diaria con menor costo computacional. La comparación entre resoluciones de 1 min y 15 min muestra concordancia global y mayor suavizado en la de 15 min. En la Figura 13 se presenta esta curva: la línea roja indica el valor promedio en cada minuto del día, mientras que las zonas sombreadas representan los rangos de variación delimitados por los valores máximos y mínimos registrados en ese horario. Se puede observar unos 15 dB SPL de rango aproximado entre hora pico y la noche acústica.

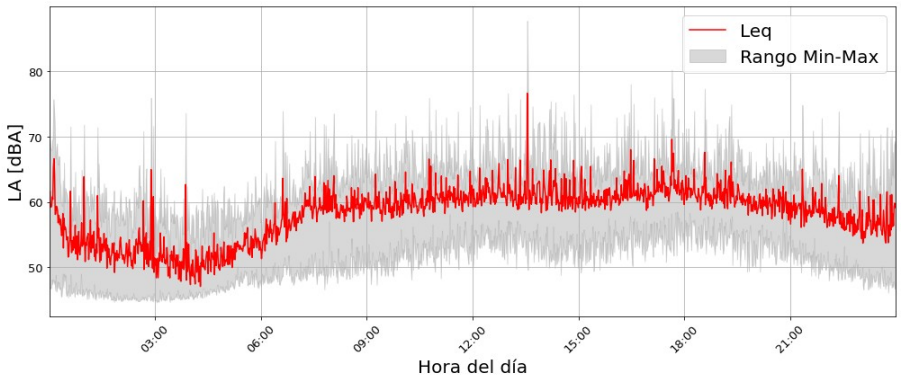


Figura 13: Nivel sonoro equivalente horario (L_{eqA}) y rango dinámico diario (mínimo-máximo) en dBA.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sensor acústico urbano basado en Raspberry Pi 4 y sonómetro clase 2, capaz de realizar monitoreo continuo y autónomo del ruido ambiental. El sistema cumple con la norma IEC 61672-1 y demostró confiabilidad en campo, operando durante dos semanas con mínima pérdida de datos aun en condiciones climáticas adversas.

Los registros obtenidos permitieron construir curvas horarias de ruido ambiental, con un rango dinámico de ~15 dB SPL entre horas pico y nocturnas. El análisis de filtros acústicos mostró que las diferencias en bajas frecuencias son poco relevantes, mientras que en el rango de 2–4 kHz se identificaron amplificaciones debidas a resonancias internas del soporte.

En este contexto, el filtro de alta densidad 24 kg/m³ (050) se destacó como la alternativa más consistente, con respuesta cercana al micrófono de referencia, estabilidad frente a la humedad y reducción de amplificaciones no deseadas. En contraste, espumas de menor densidad y el filtro 060 presentaron mayor variabilidad y secado más rápido, pero con desempeño acústico menos confiable.

En general, se identificaron dos patrones frente a la humedad: (i) espumas cuya atenuación aumenta progresivamente con el contenido de agua y (ii) espumas que reducen su eficacia con humedad intermedia pero recuperan parcialmente en saturación. Asimismo, se confirmó que espumas de mayor absorción (030, 040, 050) presentan tiempos de secado prolongados.

En conclusión, el filtro 050 emerge como la opción más adecuada para aplicaciones de monitoreo ambiental, al combinar confiabilidad acústica y estabilidad frente a variaciones de humedad.

6. AGRADECIMIENTOS

Asimismo, agradezco a *Decibel S.A.* por haber facilitado el equipamiento base que hizo posible el desarrollo del sistema, así como por brindar un entorno de trabajo adecuado para su experimentación y validación.

REFERENCIAS

[1] International Electrotechnical Commission, *Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications*, IEC 61672-1, Geneva, 2013.

[2] F. Alías and R. M. Alsina-Pagès, “Review of wireless acoustic sensor networks for environmental noise monitoring in smart cities,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2019, Article ID 7634860, 16 pages, May 2019.

[3] J. Camps Farrés, “Barcelona noise monitoring network,” *Ajuntament de Barcelona*, Barcelona, Spain, n.d.

[4] International Organization for Standardization, *Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of sound pressure levels*, ISO 1996-2:2020, Geneva, 2020.

[5] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, *Método de medición y calificación en la vía pública y en exteriores linderos con la vía pública*, IRAM 4062-2, Buenos Aires, 2016.

[6] Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, “Ley 1540/04 y Decreto Reglamentario N° 740/07 de la CABA,” Buenos Aires, 2004.

[7] CESVA Instruments S.L., *Manual de usuario del sonómetro SC250*, Barcelona, 2023, p. 106.

[8] M. Blass and M. Pirolt, “Pop sound protection and reduction for small microphone enclosures,” Bachelor’s thesis, Signal Processing and Speech Communication Laboratory, Graz University of Technology, Graz, 2014.

[9] A. Farina, “Advancements in impulse response measurements by sine sweeps,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 55, no. 6, pp. 454–471, 2007.

[10] International Electrotechnical Commission, *Sound system equipment – Part 4: Microphones*, IEC 60268-4, Geneva, 2014.

[11] International Organization for Standardization, *Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of sound pressure levels*, ISO 1996-2:2017, Geneva, 2017.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Confort acústico adaptativo: Variables subjetivas y contextuales en la evaluación de espacios interiores

Maristany, Arturo Raúl[†,1]; Abadía, Leandra[‡,2]; Arrieta, Gabriela [‡,3]

[†] †Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas – CIAL, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

[1] amaristany@unc.edu.ar, [2] leandra.abadia@unc.edu.ar, [3] g.arrieta@unc.edu.ar

Resumen El confort percibido por los ocupantes de un edificio no depende únicamente de las condiciones ambientales internas, sino de una interacción compleja entre factores individuales, contextuales y culturales, que deben abordarse desde una perspectiva específica y local. El confort acústico adaptativo parte de la premisa de que las personas desarrollan mecanismos de ajuste frente a entornos sonoros cambiantes, según condiciones externas y necesidades particulares. Esta percepción está influida por variables acústicas y no acústicas. En paralelo, la teoría del confort térmico adaptativo —ampliamente estudiada— sostiene que una mayor apertura e interacción con el entorno exterior favorece la adaptación térmica en espacios construidos. No obstante, los efectos de esta apertura sobre la percepción acústica han sido poco explorados. Esta ponencia se propone aportar a esa discusión, mediante un análisis cualitativo de cómo la adaptación térmica interior incide en la percepción subjetiva de las condiciones acústicas, en contextos sonoros diversos. Se presenta una metodología de análisis que permite identificar entornos acústicos percibidos como positivos o negativos, así como estrategias para la recolección y evaluación de datos que integren ambas dimensiones del confort ambiental.

Palabras clave: Confort acústico adaptativo, factores acústicos, factores no acústicos.

Abstract The comfort perceived by a building's occupants depends not only on internal environmental conditions but also on a complex interaction between individual, contextual, and cultural factors, which must be addressed from a specific and local perspective. Adaptive acoustic comfort is based on the premise that people develop adjustment mechanisms to changing sound environments, depending on external conditions and particular needs. This perception is influenced by acoustic and non-acoustic variables. In parallel, the widely studied theory of adaptive thermal comfort maintains that greater openness and interaction with the external environment favors thermal adaptation in built spaces. However, the effects of this openness on acoustic perception have been little explored. This paper aims to contribute to this discussion through a qualitative analysis of how indoor thermal adaptation affects the subjective perception of acoustic conditions in diverse sound contexts. An analysis methodology is presented that allows for the identification of acoustic environments perceived as positive or negative, as well as strategies for collecting and evaluating data that integrate both dimensions of environmental comfort.

Keywords: Adaptive acoustic comfort, acoustic factors, non-acoustic factors.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace algunos años, se ha estudiado intensivamente el confort de los espacios construidos. Los estudios se centran principalmente en el concepto de confort térmico, aunque en los últimos años, se ha empezado a considerar el confort como un concepto integral, donde intervienen condicionantes térmicos, acústicos y lumínicos. Los principales enfoques en los estudios sobre confort, son el modelo analítico y el modelo adaptativo. En paralelo se desarrollan las normativas vigentes, que no siempre son de aplicación obligatoria pero que se toman como referencia en la investigación y en la construcción.

El modelo analítico considera los aspectos objetivos que intervienen en la sensación de confort. En cambio, el modelo adaptativo, involucra aspectos subjetivos que los modelos analíticos no consideraban, demostrando que aspectos psicológicos, biológicos y sociológicos inciden fuertemente en la sensación de confort.

En los últimos años algunos trabajos, como el de Torresin et al [1], S. Y. Dicle, A., S. Kang [2], K. Herranz-Pascual et al [3], Rachman et al [4], K. Herranz-Pascual, I. García, I. Diez, A. Santander y I. Aspuru [5], R. Zhang et al [6], entre otros, introducen el concepto de confort acústico adaptativo, inspirado en el modelo de confort térmico adaptativo. La investigación explora cómo las percepciones acústicas de los ocupantes no dependen solo de los niveles de ruido, sino también de factores contextuales, ambientales y personales, lo que permitiría definir criterios más flexibles para el diseño de edificios.

El confort acústico adaptativo se relacionaría con la satisfacción de las personas en el ambiente sonoro en el que se encuentran. La investigación en confort acústico adaptativo buscaría comprender cómo las personas se adaptan a diferentes niveles de ruido, vibraciones y otros factores acústicos en su entorno.

La relación entre el confort acústico y el ruido urbano es compleja y depende de varios factores, tales como las características del entorno residencial, la percepción y la actitud de las personas, las medidas de protección y prevención del medio ambiente acústico, etc. Algunos estudios han analizado esta relación desde un enfoque psicosocial, utilizando índices de confort acústico y de molestia por ruido para evaluar el impacto del ruido urbano en diferentes casuísticas [5]. Otros estudios han propuesto nuevos enfoques como respuesta al ruido urbano, como el análisis dinámico urbano, que consiste en un estudio multidisciplinario de la relación entre la estructura estática de la ciudad y los fenómenos asociados a ella que exhiben variaciones temporales reconocibles [7].

El confort acústico adaptativo sugiere una mayor tolerancia al ingreso de ruido ambiental cuando los ocupantes utilizan ventanas abiertas para mitigar el sobrecalentamiento por un corto tiempo. Finalmente, Torresin et al [1] retoma el concepto en el marco del paisaje sonoro interior. La importancia de un enfoque frente a un contexto sonoro se hace evidente al considerar la hipótesis adaptativa, postula que los factores contextuales y las experiencias pasadas dan forma a las expectativas y preferencias (térmicas) de los ocupantes del edificio. En la figura 1 se muestra un esquema referido al confort acústico adaptativo.

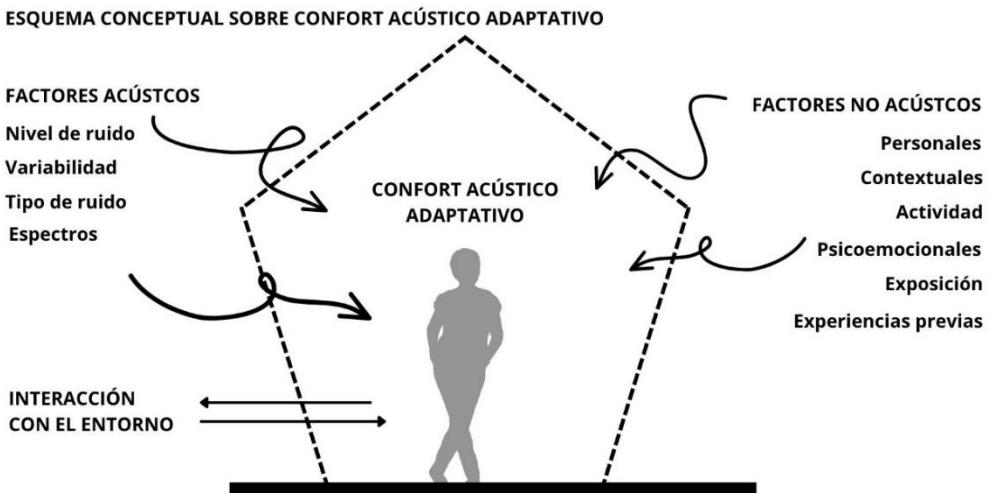


Figura 1: esquema referido al confort acústico adaptativo

El aumento de los niveles admisibles de ruido de fondo para entornos con ventilación natural en comparación con los ventilados mecánicamente se incluye en algunas normas o directrices, pero no está respaldado por evidencia científica sobre las diferencias en la sensibilidad de las personas según la estrategia de ventilación.

2. ANTECEDENTES

2.1. Factores no acústicos que influyen en la percepción del ambiente sonoro

Se desarrolló una recopilación de trabajos publicados donde se relacionan explícita o implícitamente factores no-acústicos con aspectos de confort acústico, prestando especial atención a obras que trabajan la idea de confort acústico adaptativo.

La metodología de Torresin et al [1] se basó en un grupo focal con ocho expertos internacionales en acústica, psicoacústica, confort térmico, diseño sostenible y soundscape. Los expertos expusieron sus enfoques, y las discusiones fueron transcritas y analizadas mediante un enfoque cualitativo de análisis temático inductivo, identificando patrones y categorías emergentes. Los resultados de la investigación destacan: (1) una definición preliminar del confort acústico adaptativo como un estado influido por la relación entre condiciones interiores y exteriores, modulada por factores de control, expectativas y experiencias previas; (2) la relevancia de variables como la sensibilidad individual al ruido, la posibilidad de abrir ventanas, la interacción con otros dominios ambientales y el tipo de entorno sonoro; y (3) las analogías y diferencias respecto al confort térmico, donde la adaptación acústica se concibe principalmente como un proceso psicológico.

La investigación de Torresin, se trata de un trabajo teórico-empírico que propone un modelo de confort acústico adaptativo, “adaptive acoustic comfort”, identificando factores acústicos y no-acústicos (como son el contexto, actividad, control/percepción) que modulan la evaluación del confort. La búsqueda de confort acústico adaptativo está relacionada con diferentes factores. En la figura 2 se muestran los factores que influyen en el factor acústico adaptativo.

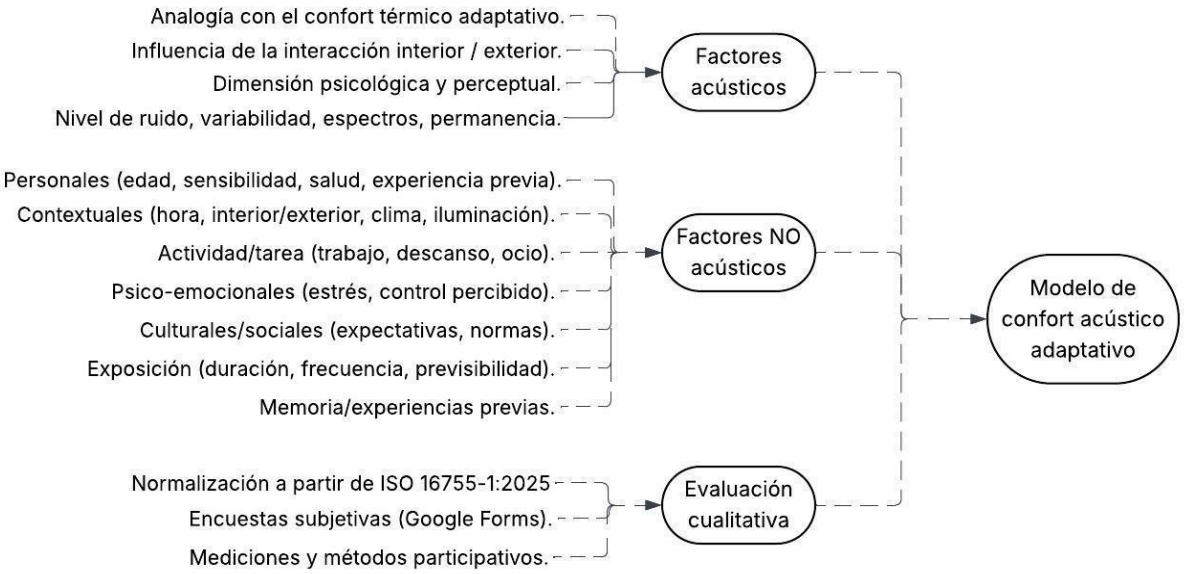


Figura 2: Factores que influyen en el confort acústico adaptativo

En la revisión y marco conceptual realizado por de S. Y. Dicle, F. Aletta., J. Kang [2] se examinan factores no-acústicos tales como ventilación, control, expectativas, actividades que afectan el confort acústico en interiores, pretendiendo construir un marco conceptual para el desarrollo de un modelo de confort acústico adaptativo. Al igual que lo desarrollado sobre el confort térmico adaptativo, el objetivo es el de identificar qué variables, indicadores y métodos hacen falta para evaluar cómo las personas se adaptan a ambientes acústicos, considerando tanto factores acústicos como no acústicos. Se evalúa el confort desde una perspectiva adaptativa y se propone estudiar el confort acústico interior en función de las condiciones exteriores combinando datos reales con estudios de laboratorio donde se usen indicadores específicos. Se hace referencia al papel de marcos conceptuales recientes (incluyendo la familia de normas sobre non-acoustic factors / soundscape). Se especifica la utilidad de aplicar ISO 16755-1 al diseño de edificios y estrategias de gestión.

El estudio empírico elaborado por K. Herranz-Pascual et al [5], cuantifica la importancia relativa de múltiples factores no-acústicos sobre la valoración del paisaje sonoro y el confort acústico urbano. Aunque es anterior a la norma ISO 16755-1 [8], sus categorías y métodos han sido usados como insumo en el desarrollo de la misma. En el estudio se analizaron cómo, factores acústicos y no acústicos (contexto visual, social, ambiental) afectan la percepción del paisaje sonoro urbano en la localidad de Bilbao. Se realizaron evaluaciones en lugares urbanos, combinando mediciones de sonido con cuestionarios sobre percepción y contexto urbano. Se obtuvieron resultados relacionados con la percepción del contexto “no acústico” tales como vegetación, agua, seguridad, congruencia visual-sonora, etc, y de cómo espacios con sonidos fuertes pueden ser agradables si el entorno es coherente y positivo. Dichas evaluaciones desde lo perceptivo demostraron que el confort acústico no sólo es evaluable desde lo objetivo (obtención de datos de niveles sonoros) sino también desde los factores ambientales y sociales, generando un enfoque más integral para el diseño urbano. El estudio tuvo limitaciones relacionadas con la variabilidad de personas encuestadas y la dificultad para medir subjetividades como la congruencia visual- sonora.

En la revisión de Rachman et al [4], sobre evaluación de confort acústico en oficinas; se resalta la importancia de variables no-acústicas (cómo la actividad, privacidad, expectativas, control) para la medida del confort y su compatibilidad con marcos normativos como ISO 16755. Los autores revisan métodos para evaluar el paisaje sonoro en oficinas, analizando 41 estudios que combinan mediciones acústicas, cuestionarios subjetivos y tareas cognitivas. Destacan la gran variedad de métodos y factores considerados (acústicos y no acústicos, como privacidad del habla o sensibilidad al ruido), pero señalan la falta de estandarización y la poca investigación sobre adaptación a largo plazo. Proponen avanzar hacia protocolos integrales y sólidos para evaluar el confort acústico interior en oficinas.

En los estudios de K. Herranz-Pascual, I. García, I. Diez, A. Santander y I. Aspuru [5], se identificaron cuáles son las variables que mejor explican el confort acústico y la molestia por ruido en distintos tipos de entornos urbanos. Se realizaron encuestas a residentes, recogiendo datos perceptuales, y se analizaron diversas variables contextuales como el tipo de barrio, el nivel de ruido ambiental, entre otras, que podrían influir en la percepción del sonido. Se observó que el confort acústico en la ciudad no puede evaluarse únicamente con mediciones objetivas del ruido siendo fundamental tener en cuenta factores perceptuales y contextuales. Los resultados mostraron que en barrios rurales o con menor densidad de población, los modelos que predicen el confort acústico son más precisos. Se observó que las variables que explican el confort no siempre son las mismas que explican la molestia, ya que esto depende del tipo de entorno urbano.

La investigación de R. Zhang et al [6], en torno a la calidad acústica ha avanzado hacia una comprensión más profunda de cómo se perciben los entornos acústicos, argumentando que esta experiencia no se limita únicamente al sonido en sí, sino que está profundamente influenciada por factores contextuales tales como el entorno físico, la cultura, o la actividad que se está realizando los que influyen directamente en cómo se producen, perciben e interpretan los sonidos. Se considera el contexto como un elemento clave en la percepción del confort acústico, mediante una relación recíproca y dinámica entre el contexto y el paisaje sonoro, considerando que los factores que forman parte de una escena sonora, tales como el entorno físico, la cultura o las actividades que se realizan influyen en la percepción de los sonidos.

Por otro lado, considera que, el paisaje sonoro influye en el contexto, ya que, la experiencia sonora puede modificar la percepción del contexto, alterando las emociones, interacción con el entorno, así como transformar las expectativas de un entorno determinado. Se hace referencia a que los factores que conforman el contexto son de tipo espaciales y físicos de gran escala (disposición urbana, planificación territorial, etc.), escala media (factores más específicos del entorno, tales como edificios, agua, vegetación, etc.), de menor escala (iluminación, olores, temperatura, materiales, etc.). También se consideran factores socio- culturales, los cuales son difíciles de cuantificar por su variabilidad subjetiva y cultural (creencias, normas y uso de las personas que interactúan con el espacio. La percepción del confort acústico no puede ser entendida únicamente desde una perspectiva física del sonido. Requiere considerar el entorno completo en el que ocurre la experiencia, integrando dimensiones espaciales, sensoriales y sociales.

En la revisión de C. Clark, J. Kang, L. Lavia et al [9], se analizaron los efectos del aislamiento sobre el confort acústico y la salud, destacando la importancia de considerar no sólo los factores acústicos, sino también los no-acústicos, como el control percibido, la privacidad y las expectativas de los residentes. Se analizaron estudios previos que evaluaban la efectividad de distintas estrategias, no solo desde una perspectiva técnica, sino también desde la percepción de los usuarios y sus efectos sobre la salud y la calidad de vida. Se encontró que el aislamiento acústico puede tener efectos positivos significativos en la vida de las personas, tales como la mejora del bienestar psicológico y físico. Se concluye que el aislamiento acústico, junto con un diseño sensible al entorno sonoro, puede contribuir significativamente al bienestar integral de las personas. Además, resalta la necesidad de considerar factores no-acústicos en las estrategias de mitigación del ruido, ya que estos influyen de forma directa en cómo se perciben y se viven los entornos sonoros en el ámbito doméstico.

Radicchi y Henckel [10], han desarrollado el concepto de caminatas, mediante la aplicación de una metodología que integra la percepción sonora y lumínica para evaluar cómo se experimentan los espacios públicos durante caminatas nocturnas en entornos urbanos. El enfoque permite analizar cómo la interacción entre el sonido y la luz influye en la experiencia sensorial de los ciudadanos, especialmente en contextos históricos urbanos, donde las características del entorno tienen un fuerte componente cultural, estético y simbólico. También se han llevado a cabo evaluaciones multisensoriales que incorporan el sentido del olfato integrando estímulos visuales, auditivos y olfativos, haciendo uso de estas herramientas para comprender de manera más rica y profunda cómo las personas perciben los espacios urbanos, considerando no solo lo que ven o escuchan, sino también lo que huelen y sienten. El uso de estas herramientas favorece una mejor calidad de vida urbana, diseñar espacios públicos más inclusivos, agradables y saludables creando entornos más seguros y acogedores, promoviendo el bienestar y la apropiación del espacio público.

En las conclusiones de los expertos, se señala el potencial del concepto para mejorar la salud y el bienestar de los ocupantes y para impulsar estrategias de diseño sostenible, permitiendo la ampliación del uso de ventilación natural. Como paso siguiente, se propone la creación de una base de datos global de confort acústico, similar a la desarrollada por ASHRAE en el ámbito térmico, que posibilite validar y operacionalizar este nuevo marco conceptual.

2.2. Caracterización de la ISO/TS 16755-1:2025

Este documento proporciona una definición, un marco conceptual y un marco de categorización para los factores no acústicos o también llamados “contextuales” que influyen en la percepción del confort acústico. Identifica los atributos relevantes para su medición y evaluación de resultados atribuibles a estudios de ruido urbano y entorno sonoro. La norma “ISO/TS 16755-1:2025” (“Acoustics — Non-acoustic factors influencing the perception, interpretation and response to environmental sounds — Part 1: Definition and conceptual framework”), y en particular las “categorías” de factores no acústicos que considera.

2.2.1 Principales aspectos de la norma

La norma ISO: 16755-1:2025 define lo que se entiende por factores “no acústicos” en el contexto de sonidos ambientales: como aquellos elementos que no tienen que ver con propiedades físicas del sonido (nivel sonoro, frecuencia, etc.), pero que influyen fuertemente en cómo se perciben, interpretan y responden los sonidos.

Establece un marco conceptual que relaciona los sonidos ambientales, los factores acústicos, los factores no acústicos, y los resultados en términos de percepción, interpretación subjetiva, efectos en salud, molestias, etc.

Incluye un marco de categorización de los factores no acústicos, con atributos relevantes, para que los estudios (sobre salud, molestia, diseño de entorno sonoro, intervenciones) los midan, reporten y gestionen de forma sistemática.

2.2.2 Categorías de factores no acústicos en la norma

La norma propone varias categorías para agrupar los factores no acústicos relevantes, estas son algunas de las categorías principales de factores no acústicos contempladas:

1. Características de la persona / individuo
   - Datos demográficos (edad, sexo, etc.)
   - Características personales (experiencia previa con el sonido, sensibilidad al sonido)
   - Salud física y mental del individuo
   - Expectativas individuales con respecto al sonido (qué espera la persona o qué considera aceptable)
2. Situación / contexto inmediato
   - Circunstancias del momento de la exposición sonora (actividad que realiza, Si está descansando / trabajando, desplazándose, relajándose / activa)
   - Momento del día, horario (mañana, tarde, noche)
   - Localización espacial (interior / exterior; proximidad al sonido; si hay barreras, si está dentro de un vehículo, etc.)
   - Ambiente físico (condiciones luminosas, clima, temperatura, visibilidad)
3. Propósito, actividad o tarea
   - Actividad al momento de percibir el sonido (requerimiento de concentración, comunicación, descanso, ocio)
   - Interferencia del sonido con la actividad
   - Si la tarea es voluntaria o impuesta
4. Relación con el entorno construido, social o cultural
   - Expectativas sobre el sonido en ese entorno
   - Normas sociales, costumbres, percepciones culturales acerca de qué sonidos son aceptables o molestos
   - Costumbres culturales, valores relacionados con el sonido, expectativas comunitarias
5. Factores psicoemocionales, de salud y estado psicológico
   - Estado de ánimo, estrés, ansiedad, fatiga, salud física y mental

- Sensaciones o posibilidad de control / falta de control sobre el sonido
- Vulnerabilidades de salud previa que puedan hacer que el sonido tenga efectos mayores

6. Factores de exposición
   - Duración de exposición al sonido
   - Frecuencia de exposición (cuántas veces ocurre el evento sonoro)
   - Variabilidad temporal del sonido (constante / intermitente o inesperado)
   - Variabilidad temporal, fluctuaciones del sonido
7. Percepción previa y memoria
   - Experiencias pasadas con sonidos similares (molestias anteriores)
   - Memoria de molestias anteriores, expectativas formadas por esas experiencias.
   - Comparaciones con expectativas basadas en experiencias anteriores

3. DESARROLLO

3.1. Categorías de factores no-acústicos en relación a estudios seleccionados.

A partir de un estudio detallado de las investigaciones seleccionadas y descritas anteriormente, se elaboró un mapa cruzado que relaciona las categorías de factores no-acústicos establecidos por la norma (según el marco de ISO 16755-1) con los abordados en los estudios seleccionados. Para cada trabajo se indica qué categorías no-acústicas consideraron, cómo las relevaron (métodos) y los hallazgos principales en relación con el confort acústico, con énfasis en evidencias sobre confort adaptativo. En la Tabla Nº 1 se muestran para distintos estudios realizados las categorías ISO, los métodos y hallazgos encontrados.

Las categorías derivadas de la ISO 16755-1 que se usa en la tabla son:

A. Factores personales / demográficos
B. Situación / contexto inmediato (hora, interior/exterior, condiciones físicas)
C. Actividad / propósito / tarea
D. Factores psico-emocionales / salud / control percibido
E. Factores sociales / culturales / normas
F. Factores de exposición (duración, frecuencia, previsibilidad)
G. Memoria / experiencias previas

El estudio desarrollado por Torresin, S. “Towards developing a model of adaptive acoustic comfort” [1], considera las categorías A, B, C, D, F, G. Las mediciones se realizaron mediante un estudio cualitativo con expertos, más una revisión conceptual donde se discutieron variables relevantes para el modelo de confort adaptativo. Los hallazgos encontrados, proponen un modelo donde la búsqueda de confort interior se relaciona con condiciones exteriores y es moderado por factores personales y contextuales (actividad, posibilidad de control, expectativas). Se hace hincapié en que la “tolerancia” y la “adaptación” dependen fuertemente de la previsibilidad y del sentido de control del usuario, recomendando incluir medidas no-acústicas explícitas en modelos predictivos de confort.

En la investigación llevada a cabo por Dicle, S.Y., Aletta, F., Kang, J. “A framework for developing adaptive acoustic comfort” [2], considera las categorías A, B, C, D, E, F. Las mediciones se realizaron mediante entrevistas a expertos y análisis de marcos teóricos. Se elaboró un marco conceptual y checklist de factores para evaluación empírica. En los hallazgos encontrados se formaliza el concepto de “confort acústico adaptativo” (adaptive acoustic comfort) como una relación interior- exterior moderada por factores contextuales. Se identifican factores clave para medir la adaptación, tales como: actividad, previsibilidad, control percibido y expectativas culturales. Se recomienda combinar datos acústicos con encuestas sobre experiencia y control percibido.

Tabla 1: Estudios- Categorías según ISO 16755-1, métodos y hallazgos

Estudio	Año	Categorías presentes	Método	Hallazgos
Torresin, S. — Towards developing a model of adaptive acoustic comfort	2024	A, B, C, D, F, G	Focus groups con expertos + revisión conceptual	Modelo de confort adaptativo; tolerancia depende de previsibilidad y control percibido.
Dicle, S.Y., Aletta, F., Kang, J. — A framework for developing adaptive acoustic comfort	2025	A, B, C, D, E, F	Entrevistas a expertos + análisis conceptual	Define marco de confort adaptativo; actividad, control y expectativas culturales son claves.
Herranz-Pascual, K. et al — Analysis of field data on urban soundscapes	2017	A, B, C, E, F, G	Soundwalks y encuestas in situ; análisis multivariante	Contexto de uso y factores sociales explican más que indicadores acústicos; apoya la idea de adaptación.
Rachman, Z.; Aletta, F.; Kang, J. — Soundscape assessment in offices	2024	A, B, C, D, F (+E, G en estudios revisados)	Revisión sistemática (41 estudios); análisis de métodos	Tarea, privacidad, control percibido y expectativas influyen en confort adaptativo en oficinas.
Clark, C.; Kang, J.; Lavia, L. — Review on soundproofing and wellbeing	2023	A, B, C, D, F, E	Revisión de evidencia científica sobre intervenciones	Los efectos dependen del control, preferencias y uso; soluciones deben ser adaptativas/personalizables.
Chen, K. — Healthy indoor acoustic environments (PhD)	2023	A, B, C, D, F	Estudio mixto (encuestas + mediciones) en viviendas	Salud y estrés modulan tolerancia; confort mejora con estrategias de control (ej. ventilación).
Radicchi, A.; Henckel, D. — Soundwalks & lightwalks	2016–2019	B, C, E, G (A/D según participantes)	Soundwalks y métodos participativos multisensoriales	Contexto visual/lumínico modula percepción; apoya adaptación multisensorial del confort.

Herranz-Pascual, K. et al desarrollan su estudio “Analysis of field data to describe the effect of context (acoustic and non-acoustic factors) on urban soundscapes” [5], donde consideran las categorías A, B, C, E, F, G. Las mediciones se realizaron a través de campañas de campo (soundwalks / encuestas in situ) en la localidad de Bilbao. Además, se realizó un análisis estadístico multivariante cruzando variables acústicas y no-acústicas. Los hallazgos encontrados sobre el confort acústico adaptativo demuestran que el “contexto de uso” y los factores sociales explican gran parte de la valoración del entorno sonoro, a veces más que los indicadores acústicos. Esto apoya la idea de adaptación considerando que la misma señal sonora puede evaluarse muy diferente según la finalidad del lugar y expectativas locales.

El estudio desarrollado por Rachman, Z.; Aletta, F.; Kang, J."Exploring Soundscape Assessment Methods in Office Environments: A Systematic Review" [4], considera las categorías A, B, C, D, F (con mención a E y G en varios estudios revisados). Las mediciones se realizaron mediante una revisión sistemática, identificándose los métodos usados en 41 estudios (principalmente cuestionarios, en menor medida entrevistas y medidas ambientales). Los hallazgos sobre confort en oficinas, afirman que variables como: tipo de tarea, privacidad, control percibido (por ej: posibilidad de cerrar una puerta, control de volumen de fuentes), y expectativas, influyen fuertemente en la percepción del confort. Se concluye que, medir adaptabilidad, requiere instrumentos subjetivos estandarizados además de métricas físicas.

Clark, C.; Kang, J.; Lavia, L. et al en su investigación "Evidence review for effects of soundproofing on residents' wellbeing" [9], consideran las categorías A, B, C, D, F, E. En su caso, las mediciones se realizaron mediante una revisión sistemática y una síntesis de estudios, que incluyen evidencia cualitativa y cuantitativa. Los hallazgos se refieren a las intervenciones (por ej. aislamiento), reducción de niveles o variabilidad sonora, haciéndose referencia a que los efectos sobre bienestar dependen de factores no-acústicos tales como: percepción de control, preferencias por sonidos externos (por ej. naturaleza) y uso del espacio. El estudio señala riesgos de soluciones que eliminan sonidos deseados y sugiere enfoques adaptativos/personalizables.

Chen, K. — en su artículo "Evaluation of healthy indoor acoustic environments in residential buildings by the occupants: a mixed-method approach" [11], considera las categorías A, B, C, D, F. Las mediciones se llevaron a cabo mediante un estudio mixto a través de encuestas a ocupantes y mediciones ambientales en viviendas. Se realizó un análisis de relaciones entre estado de salud/estrés y evaluación del ambiente acústico. Los hallazgos muestran que, las vulnerabilidades de salud y el estrés, modulan la tolerancia al ruido. Se sugiere que el diseño acústico debe contemplar la adaptación individual y dar soluciones que permitan el control (por ej. estrategias de zonificación, ventilación que no obligue a abrir ventanas ruidosas).

Radicchi, A. & Henckel, D. en su investigación "Soundwalks / Combined sound- & lightwalks" desarrolla métodos y aplicaciones en varias publicaciones desde el 2016 al 2019, considera las categorías B, C, E, G (y A/D cuando se recogen participantes). . Las mediciones se realizaron mediante métodos participativos (soundwalks, lightwalks) que registran respuestas cualitativas y sensoriales mientras los participantes caminan en el entorno; combinan observación, entrevistas breves y registro ambiental [9]. Los hallazgos muestran que "información multisensorial" (visual, lumínica) y el "contexto temporal" transforman la evaluación acústica (por ej. Los sonidos idénticos son evaluados mejor cuando la escena visual es agradable. Esto refuerza la idea de adaptación multisensorial y de que el confort acústico no es exclusivamente físico.

3.2. Variables no acústicas específicas

A partir del análisis comparativo de tres de los estudios seleccionados [1], [2], [5], se pueden identificar un conjunto de variables no acústicas y aproximaciones metodológicas que resultan de particular interés para la construcción de un marco de referencia referido al confort acústico adaptativo.

Se observa que la "agradabilidad (pleasantness)" del entorno sonoro se utiliza como indicador global de confort, medida a través de encuestas aplicadas in situ. A partir de los datos reportados, se pueden reconocer como variables relevantes la congruencia entre el entorno visual y el sonoro, la percepción de sonidos específicos (agua, tráfico, voces humanas), el uso y la funcionalidad del espacio y la presencia de elementos naturales (vegetación, fuentes de agua, sombras). Los resultados sugieren que, más allá de los niveles sonoros absolutos, el confort percibido depende de la coherencia entre estímulos visuales y auditivos, así como de la adecuación de los sonidos al contexto funcional del espacio.

Por otro lado, se puede constatar que en los trabajos donde no se aplicaron cuestionarios estandarizados a usuarios, los grupos focales de expertos permitieron reconocer variables esenciales para futuros instrumentos de análisis. Entre ellas se destacan la exposición acústica reciente ("recent past acoustic

exposure"), los factores ambientales (luz, ventilación, vistas), las características personales (edad, sensibilidad, experiencias previas), las expectativas acústicas dependientes del contexto y la percepción de control sobre los sonidos. De este modo, se confirma que la adaptación no se explica únicamente por la exposición acústica actual, sino también por la historia de exposición y las expectativas previas del usuario.

Tabla 2: Cuestionario mixto en función de las categorías propuestas por la ISO 16755-1

Ítem / pregunta propuesta	Escala propuesta	Categoría adaptada de ISO 16755-1 asociada
¿Qué tan agradable le resulta el entorno sonoro en este lugar?	Escala de valoración subjetiva de agradabilidad (escala de clasificación de 5-7 puntos)	C. ambientales del entorno D. Factores contextuales, evaluación de confort
Indique la presencia de sonidos específicos (agua, tráfico, voces).	Escala de intensidad percibida. (escala de clasificación de 5-7 puntos)	B. Características de la fuente. D. Factores contextuales.
¿Considera apropiado el sonido en relación al entorno visual y funcional del espacio?	Escala de valoración: apropiado–inapropiado	C. Factores ambientales del entorno.
Evalúe la congruencia entre el entorno visual y el entorno sonoro	Escala de valoración: Congruente–incongruente.	Factor multisensorial.
¿Cuál ha sido la exposición sonora reciente de la persona?	Escala de frecuencia / intensidad.	F. Factores temporales. Condiciones de exposición previas
¿En qué medida la persona siente que tiene control sobre los sonidos de su entorno?	Escala de percepción de control. Se propone escala 1-5	G. Factores personales. Percepción de control
¿Qué expectativas tiene la persona sobre el nivel sonoro en este contexto?	Escala de valoración: inferior–superior a lo esperado	D. Factores contextuales G. Factores personales.
¿Cómo influyen las condiciones ambientales (ventilación, vistas, luz) en la experiencia sonora?	Escala cualitativa de valoración	Interacción multisensorial
¿Qué actividad realiza la persona en el espacio (descanso, concentración, comunicación, ocio)?	Selección de categorías (tipo de actividad)	D. Factores contextuales. Actividad / uso del espacio
¿En qué grado siente control sobre el ambiente acústico (ej. abrir ventanas, modificar fuente)?	Escala de percepción de control - Se propone escala 1-5	G. Factores personales. Percepción de control
¿En qué medida los sonidos presentes coinciden con lo que culturalmente espera de este lugar?	Escala de valoración: esperado–inesperado.	F. Factores temporales D. Factores contextuales.
¿Qué nivel de previsibilidad tienen los sonidos que percibe?	Escala de valoración: previsible–sorpresivo	Previsibilidad sonora

Finalmente, se identifican como variables centrales la actividad desarrollada en el espacio (descanso, concentración, comunicación), el control percibido sobre el ambiente acústico, las expectativas culturales, la previsibilidad de los sonidos y la experiencia previa de exposición. Si bien los estudios en general no aportan ítems textuales aplicados a usuarios, las entrevistas con expertos resaltan la utilidad de escalas de clasificación extremas (agradable–desagradable, esperado–inesperado, perturbador–no perturbador) para obtener dimensiones clave de la percepción subjetiva.

En conjunto, los resultados muestran que los estudios convergen en destacar el rol modulador de los factores no acústicos en la percepción de confort. Esta convergencia refuerza la hipótesis de que un modelo de confort acústico adaptativo debe integrar, además de las métricas físicas, indicadores subjetivos vinculados al contexto espacial, las expectativas, el control percibido y la experiencia previa de los usuarios.

En función de las categorías establecidas por la ISO 16755-1 y presentadas anteriormente (A: personales; B: situación/contexto; C: actividad; D: psico-emocionales/salud/control; E: sociales/culturales; F: exposición; G: memoria/experiencia previa), se presenta un mapeo sugerido de los ítems y preguntas a considerar en la elaboración de una futura encuesta.

La sistematización de ítems, escalas y categorías, ordenadas en la tabla 2, provenientes de los tres estudios constituye una base posible para el diseño de un futuro cuestionario orientado a evaluar el confort acústico adaptativo en distintos entornos construidos. Los ítems permiten incorporar preguntas estandarizadas sobre la agradabilidad del entorno sonoro, la presencia y predominancia de determinadas fuentes y la congruencia entre entorno visual y auditivo, que podrían formularse mediante escalas de 5 o 7 puntos. Las propuestas aportan la necesidad de integrar dimensiones relacionadas con expectativas, control percibido y exposición sonora reciente, abriendo la posibilidad de diseñar preguntas que capturen la experiencia acústica previa del usuario y su percepción del entorno, aspectos clave para un modelo adaptativo.

Finalmente, las sugerencias orientan a incluir ítems vinculados con la actividad en curso, las expectativas culturales y la previsibilidad de los sonidos, utilizando escalas de clasificación extrema que complementen las de tipo ordinal. En conjunto, estas contribuciones permiten delinear un cuestionario mixto -estructurado en torno a las categorías de la ISO 16755-1- (Tabla 2), que combine mediciones de contexto físico, condiciones personales y percepciones subjetivas, ofreciendo un instrumento integral para la investigación aplicada del confort acústico adaptativo.

4. CONCLUSIONES

La mayoría de trabajos coinciden en que las variables no-acústicas (actividad, control percibido, expectativas, contexto visual/social, exposición temporal) influyen de manera representativa y consistente en la valoración y evaluación de confort de los usuarios, incluso a veces más que los índices cuantitativos.

El concepto de confort acústico adaptativo se configura como un marco prometedor para diseñar intervenciones de los espacios construidos, tales como aislamiento, diseño de paisaje sonoro, entre otros, que no solo reduzcan los niveles sonoros, sino que aumenten la “tolerancia” mediante la previsibilidad, la posibilidad de control y la coherencia con el contexto. Diversas publicaciones recientes están formalizando este marco, conjuntamente con el marco normativo específico establecido por la Norma ISO.

Los hallazgos a partir de la evidencia empírica sugieren que incorporar factores no-acústicos mejora la predicción del confort acústico. La adaptación se manifiesta como una mayor tolerancia cuando hay posibilidad de control, previsibilidad y cuando el sonido es coherente con la expectativa del lugar o con experiencias positivas previas.

Desde el punto de vista metodológico se recomienda combinar mediciones acústicas con cuestionarios estandarizados, entrevistas cualitativas y registros contextuales (hora, uso, visibilidad) como una práctica superadora para estudiar el confort acústico adaptativo.

Se destaca la necesidad de desarrollar bases de datos globales con métricas acústicas específicas (niveles, espectros, variabilidad temporal) y datos contextuales para construir modelos predictivos y operativos. El enfoque puede transformar los estándares acústicos, integrando la percepción y adaptabilidad humana en el diseño y la normativa. Actualmente, el modelo es conceptual y requiere validación empírica.

REFERENCIAS

[1] Torresin, S., Aletta, F., Dicle, S., Albatici, R., de Dear, R., Hasegawa, Y., … Cabrera, D. (2024). Towards developing a model of adaptive acoustic comfort in the built environment: A thematic analysis from an expert focus group. Building and Environment, 266(112074), 12. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112074

[2] Dicle, S. Y., Aletta, F., & Kang, J. (2025). A framework for developing adaptive acoustic comfort: Insights from expert interviews. Applied Acoustics, 235(110642), 19. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110642

[3] Herranz-Pascual K, Aspuru I, Iraurgi I, Santander Á, Eguiguren JL, García I. Going beyond Quietness: Determining the Emotionally Restorative Effect of Acoustic Environments in Urban Open Public Spaces. Int J Environ Res Public Health. 2019 Apr 10;16(7):1284. doi: 10.3390/ijerph16071284. PMID: 30974811; PMCID: PMC6479382.

[4] Rachman, Z., Aletta, F., & Kang, J. (2024). Exploring Soundscape Assessment Methods in Office Environments: A Systematic Review. Buildings, 14(14113408). https://doi.org/10.3390/buildings14113408

[5] Herranz-Pascual, K., García, I., Diez, I., Santander, A., & Aspuru, I. (2017). Analysis of field data to describe the effect of context (acoustic and non-acoustic factors) on urban soundscapes. Applied Sciences (Switzerland), 7, 18. https://doi.org/10.3390/app7020173

[6] Zhang, R., Ma, H., Wang, C., Zhang, J.,(2025). Soundscape and its context: A framework based on a systematic review. J Acoust Soc Am. 2025 Jun 1;157(6):4417-4436. doi: 10.1121/10.0036882. PMID: 40525832.

[7] Rall, J. C., & Miyara, F. (2000). Análisis dinámico urbano: nuevos enfoques para actuar contra el ruido. Tecni Acústica, 1–6.

[8] ISO 16755-1:2025. Acoustics — Non acoustic factors influencing the perception, interpretation and response to environmental sounds —

[9] Clark, C., Kang, J., Lavia, L., Rogers, P., Lamacraft, A., Jones, N., Willis, K., Marcus, E., Notley, H., Reynolds, C., McVay, M. (2023). Evidence review for effectis of soundproofing on residents' wellbeing & alternative designs. Doi:10.25144/16578

[10] Radicchi, A., Henckel, D.,(2016) Combined sound-and lightwalks /“Soundscapes and Lightscapes of the Night”

[11] Kai C., Jian K., Hui M.,(2023). Evaluation of healthy indoor acoustic environments in residential buildings by the occupants: a mixed-method approach. Building and Environment. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110950

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Evaluación del impacto acústico de eventos industriales con base en la norma IRAM 4062

Sequeira, M.[†,1]; Di Giorgio, L.[†‡,2]; Azzurro, A.[†,3]; Girón, P.[§,4]

[†] Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca

[‡] Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca

[§] Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca

[1] martins@frbb.utn.edu.ar, [2] ldigiorgio@frbb.utn.edu.ar, [3] azzurro@frbb.utn.edu.ar, [4] pgiron@frbb.utn.edu.ar

Resumen En este trabajo se evalúa el impacto sonoro generado por eventos industriales en la zona residencial de Ingeniero White de la ciudad de Bahía Blanca. La evaluación se realiza aplicando la metodología establecida por la norma IRAM 4062, a partir de registros obtenidos por estaciones de monitoreo continuo. Se analiza el grado de exposición sonora en función de la ubicación de las fuentes emisoras y de los puntos receptores, considerando además las características geográficas de los caminos de propagación. Finalmente, se examina la adecuación del método de caracterización del ruido propuesto por la norma en los casos de estudio.

Palabras clave: impacto sonoro, ruido industrial, IRAM 4062, ISO 9613-2.

Abstract This study evaluates the acoustic impact of industrial events on the residential area of Ingeniero White, located in the city of Bahía Blanca. The assessment is conducted by applying the methodology prescribed in the IRAM 4062 standard, using data collected from continuous monitoring stations. The analysis focuses on the degree of noise exposure in relation to the spatial distribution of emission sources and receiver locations, while also accounting for the geographical characteristics of the propagation paths. Finally, the study examines the applicability and suitability of the noise characterization method proposed by the standard within the context of the case studies.

Palabras clave: noise impact, industrial noise, IRAM 4062, ISO 9613-2.

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de ruido en entornos urbanos está vinculada con la actividad humana, especialmente con los sistemas de transporte y, en algunos casos, con procesos industriales. La ciudad de Bahía Blanca, ubicada al sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), refleja esta problemática, en particular en la localidad de Ingeniero White. Esta zona, ubicada a pocos kilómetros del centro de la ciudad, combina un puerto de gran actividad con un complejo petroquímico que agrupa numerosas instalaciones industriales. Las operaciones de estas plantas afectan acústicamente los barrios cercanos, impactando a la población local. Con el fin de controlar la propagación sonora generada por la actividad industrial, el municipio de Bahía Blanca, a través del Comité Técnico Ejecutivo (CTE), ha implementado un sistema de vigilancia mediante tres Estaciones de Monitoreo Acústico continuo (EMAC), ubicadas en el área urbana. Estas estaciones registran en tiempo real los eventos sonoros industriales, lo que facilita su detección y el análisis de sus características. La Figura 1 muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo EMAC 1, 2 y 3 (sonómetros B&K 2270 clase I, instalados a una altura de 5 m), así como el límite entre la zona urbana e industrial. Se observa, además, las ubicaciones de las dos plantas de procesos continuos (rectángulos blancos, S1 y S2) que dieron origen a los eventos analizados.

Este estudio tiene como objetivo evaluar las características de los eventos sonoros industriales a partir de los lineamientos establecidos por la norma IRAM 4062 [1]. En particular, se abordan situaciones correspondientes a condiciones operativas no habituales dentro de las instalaciones industriales. A

partir de los registros sonoros, se cuantifica el impacto generado mediante la estimación de la atenuación espectral relativa entre las estaciones de monitoreo y su comparación con las atenuaciones calculadas según el modelo de propagación sonora de la norma ISO 9613-2 [2]. Este análisis permite identificar y ponderar las discrepancias entre la atenuación observada y la estimada por el modelo, con el fin de valorar la incertidumbre asociada a los distintos caminos de propagación sonora.

Este trabajo da continuidad a una publicación previa de los autores [3] y se enmarca en un proyecto de investigación orientado a la caracterización del ambiente sonoro de la zona en estudio, con especial atención al aporte de origen industrial.

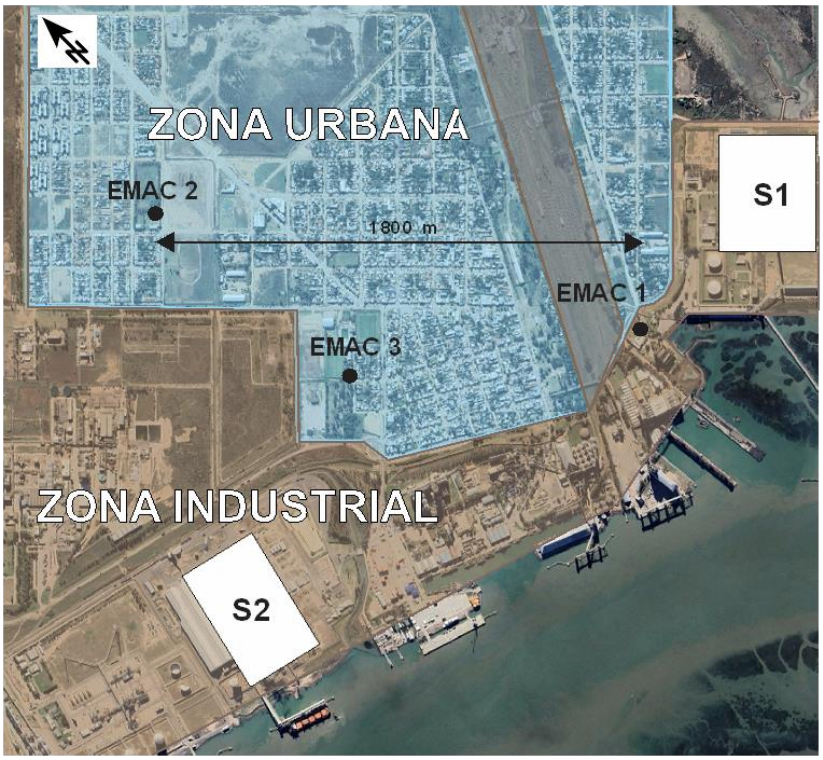


Figura 1: Zona de estudio, ubicación de las estaciones de monitoreo y fuentes industriales.

2. ANÁLISIS DE EVENTOS SEGÚN IRAM 4062/2016 [1]

Se seleccionaron tres eventos sonoros para su evaluación, cada uno vinculado a situaciones operativas anómalas en las dos plantas industriales (S1 y S2). El evento 1 está asociado a desperfectos técnicos en una caldera, el evento 2 corresponde a la despresurización repentina de un equipo con apertura de válvulas de seguridad, y el evento 3 se originó por la apertura de una válvula de seguridad debido a una variación en un cabezal de alta presión, en el contexto de una parada no programada de la planta S2. Aunque los tres eventos se originaron en contextos operativos diferentes, todos están asociados a la liberación repentina de presión en sistemas presurizados mediante válvulas de seguridad, lo que sugiere un mecanismo físico común de generación sonora basado en flujos de alta presión a través de aberturas. La Tabla 1 presenta un resumen de los eventos y datos asociados.

Las estaciones de monitoreo se encuentran instaladas en patios o terrazas internas de propiedades privadas ubicadas dentro del área urbana. En consecuencia, para el nivel residual calculado L_c se consideró una zona residencial urbana tipo 4 (exteriores) y el periodo horario de cada caso. La evaluación de la molestia se realizó en la estación más cercana a la fuente emisora de cada evento: los eventos 1 y 2 se analizaron en la EMAC 1, mientras que el evento 3 se evaluó en la EMAC 3. Para obtener el ruido total (L_M) y el de fondo (L_f), se contempló un tiempo de integración de 15 min., de manera tal de considerar una parte representativa del ruido presuntamente molesto, según los lineamientos de la norma.

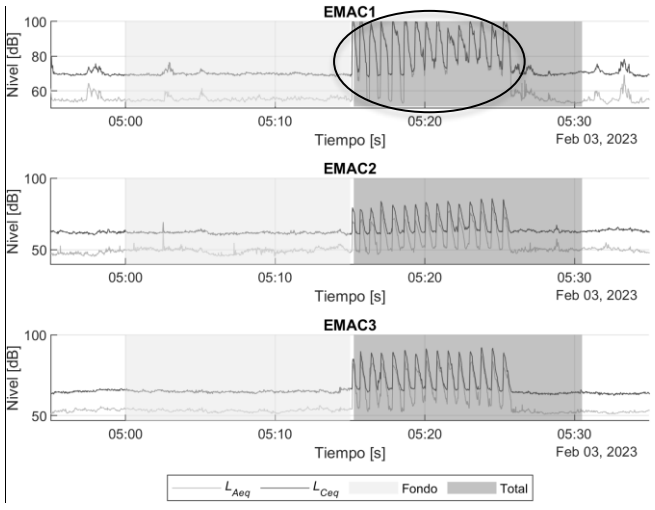
Tabla 1: Características de los eventos y datos complementarios.

Evento	Fuente de origen	Fecha (día)	Hora inicio (Duración evento)	Horario de referencia (s/IRAM 4062)	Vel. viento promedio (Dirección)	Temperatura promedio	Humedad promedio
1	S1	03-02-2023 (viernes)	05:15 h (12 min.)	nocturno	0,5 m/s (E)	16 °C	87 %
2	S1	26-11-2023 (domingo)	15:15 h (2 min.)	descanso	1,2 m/s (SE)	24,5 °C	32 %
3	S2	10-08-2024 (sábado)	18:00 h (5 min.)	descanso	3,3 m/s (SO)	11,6 °C	59 %

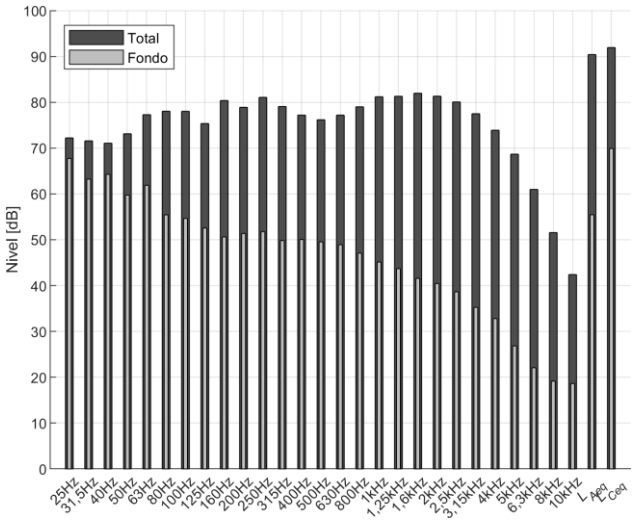
En las Figuras 2(a), 3(a) y 4(a) se muestran las series temporales (1 s) de los niveles globales L_{Aeq} y L_{Ceq} registrados en cada EMAC y las franjas temporales (15 min.) utilizadas para cuantificar cada evento a partir del ruido total y el fondo medido asociado. En círculos negros se muestra cada evento en la estación de monitoreo más cercana a la fuente que lo genera. En cada caso, se puede observar la influencia de éstos en las estaciones más alejadas. Las Figuras 2(b), 3(b) y 4(b) presentan los niveles totales y de fondo (para un tiempo de integración de 15 min.) en bandas de tercios de octava. Esta información se utilizó para evaluar la presencia de características tonales y de contenido de baja frecuencia según la norma [1].

Los resultados no evidencian la presencia de componentes tonales ni un predominio de baja frecuencia en los eventos analizados. Asimismo, no se identificaron características de impulsividad. Aun considerando un tiempo mínimo de integración de cinco ciclos característicos, tal como lo permite la norma, dichas características tampoco se manifestaron [1].

Finalmente, la Tabla 2 exhibe la clasificación lograda de los eventos. Se observa que todos ellos se clasifican como “molestos”. Es importante resaltar que el ruido de evaluación se califica como “molesto” en todos los casos bajo la condición de penalización automática ($L_{ASmax} - L_M \geq 15$ dB, en horario diurno o $L_{ASmax} - L_M \geq 10$ dB, en horario nocturno o de descanso).

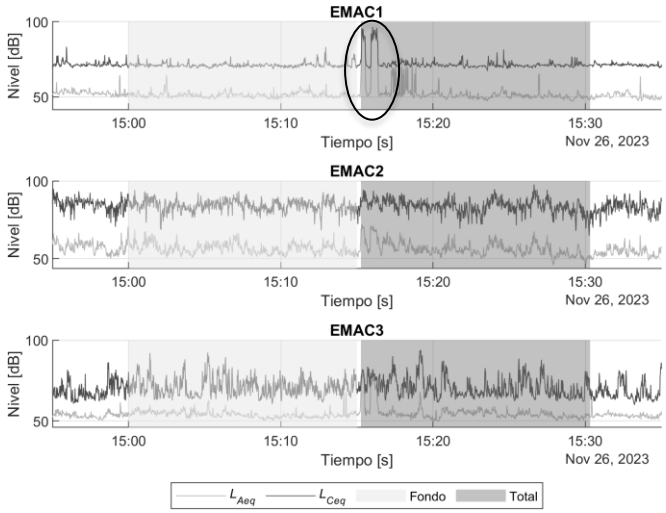


(a) Serie temporal (1 s) de niveles globales y franjas de 15 min. para ruido total y fondo en cada EMAC.

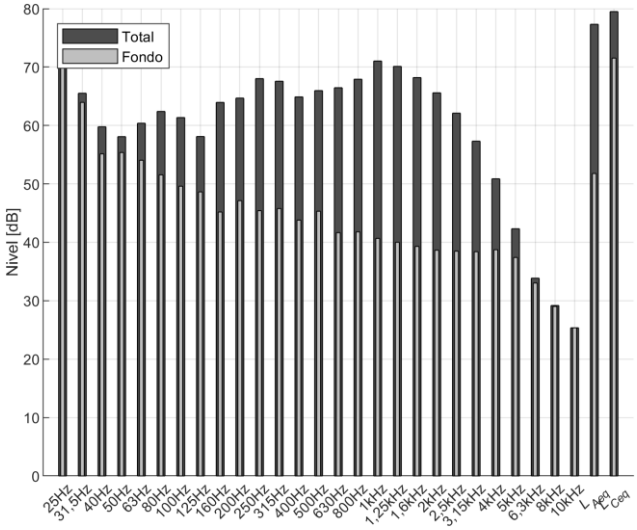


(b) Niveles totales y de fondo en bandas de tercio de octava (EMAC 1).

Figura 2: Características temporales y espectrales del evento 1.

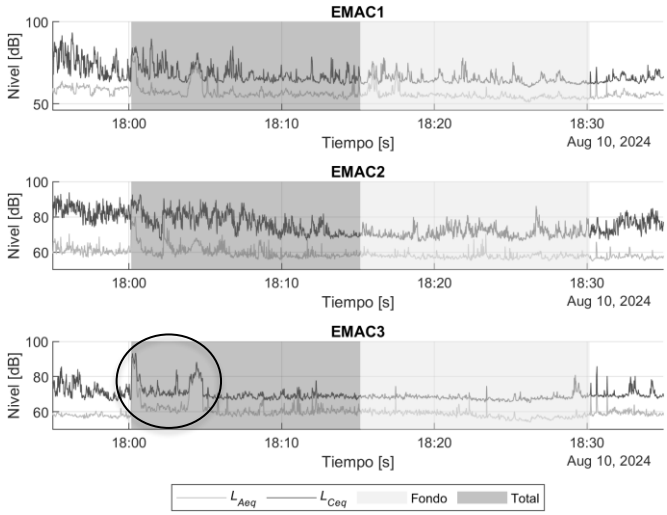


(a) Serie temporal (1 s) de niveles globales y franjas de 15 min. para ruido total y fondo en cada EMAC.

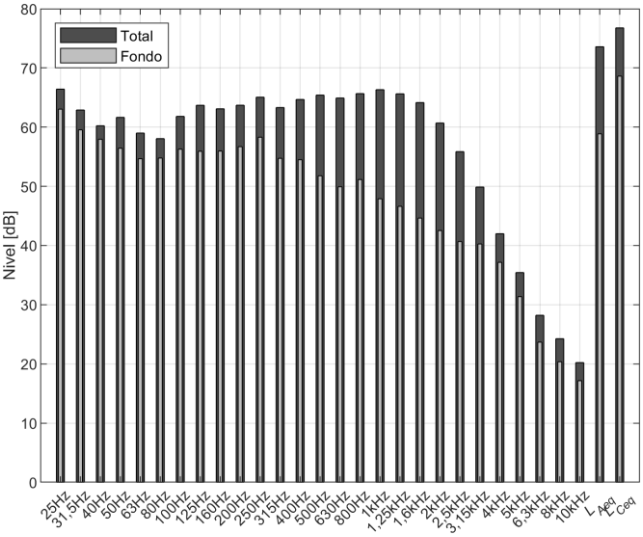


(b) Niveles totales y de fondo en bandas de tercio de octava (EMAC 1).

Figura 3: Características temporales y espectrales del evento 2.



(a) Serie temporal (1 s) de niveles globales y franjas de 15 min. para ruido total y fondo en cada EMAC.



(b) Niveles totales y de fondo en bandas de tercio de octava (EMAC 3).

Figura 4: Características temporales y espectrales del evento 3.

Tabla 2: Calificación de eventos según IRAM 4062 (todos los términos se expresan en dB) [1].

Evento	L_M ($L_{Aeq,15\ min}$)	L_f	L_c	Nivel de evaluación $L_E = L_M + K$	Calificación	
1	90,4	55,4	50	90,4 + 0	$L_E - L_f$ = 35,0 dBA $L_E - L_c$ = 40,4 dBA	Molesto
2	77,3	51,8	55	77,3 + 0	$L_E - L_f$ = 25,5 dBA $L_E - L_c$ = 22,3 dBA	Molesto
3	73,6	58,9	55	73,6 + 0	$L_E - L_f$ = 14,7 dBA $L_E - L_c$ = 18,6 dBA	Molesto

3. ATENUACIÓN RELATIVA ENTRE ESTACIONES DE MEDICIÓN: COMPARACIÓN CON EL MODELO ISO 9613-2

El objetivo de esta sección es evaluar la propagación de los eventos sonoros entre las estaciones de monitoreo, determinado la atenuación espectral a lo largo del trayecto. Para ello, se consideró la duración exacta de cada evento (ver Tabla 1).

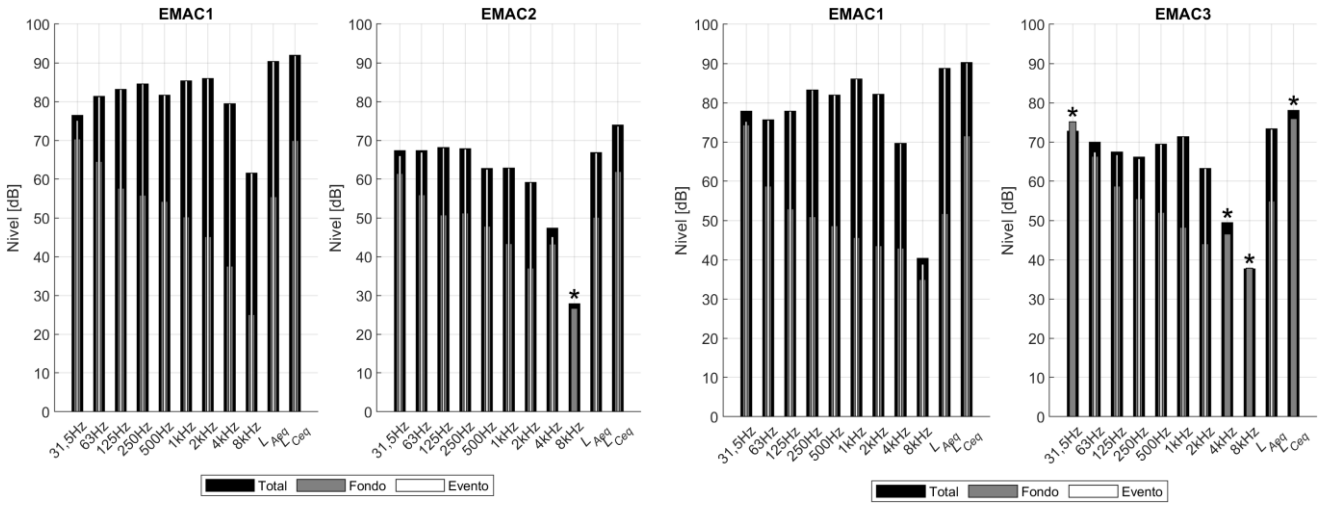
Inicialmente, se seleccionaron las bandas de frecuencia relevantes, descartando aquellas donde el evento no presenta una contribución clara. Para cada evento, se examinaron los niveles espectrales en bandas de octava en cada estación, diferenciando entre el nivel total, de fondo y del evento (este último obtenido mediante sustracción energética). Cuando el nivel total no se distinguió del fondo (L_M - L_f < 3 dB) o el fondo lo superó, la banda fue descartada. Esto permitió enfocar el análisis en las frecuencias donde la propagación podía evaluarse con mayor precisión.

Definidas las bandas útiles, la atenuación relativa medida entre estaciones se obtuvo como la diferencia energética de los niveles del evento en cada banda. Este valor refleja el efecto acumulado de todos los mecanismos de propagación. La atenuación resultante se contrastó con un valor de referencia estimado mediante el modelo de la norma ISO 9613-2, en el que se consideraron tres componentes principales: divergencia geométrica, absorción atmosférica y efecto de suelo. Las expresiones correspondientes a cada término pueden consultarse en la citada norma [2]. El efecto de suelo depende del parámetro G, que representa las propiedades acústicas del terreno en el trayecto fuente-receptor. Dicho parámetro varía entre 0 (suelo duro/reflectante) y 1 (suelo completamente poroso/absorbente). La norma distingue tres regiones para su aplicación: cercana a la fuente, cercana al receptor y una zona intermedia, permitiendo representar condiciones distintas a lo largo del camino de propagación. Para ajustar la correspondencia entre las atenuaciones medidas y simuladas, se desarrolló un algoritmo de búsqueda exhaustiva que optimizó los valores de G considerando restricciones basadas en la geometría del sitio y las características del terreno en cada tramo del trayecto fuente-receptor. Se fijó $G = 0$ para la región cercana a la fuente (suelo duro), y se permitió variar entre 0 y 0,7 en las demás regiones, reflejando la mayor variabilidad del tipo de suelo. Este ajuste mejora la correlación con los datos, incorporando de manera implícita efectos adicionales (obstáculos, irregularidades) no contemplados por el modelo.

En las Figuras 5 y 6 se presentan los niveles totales, de fondo y del evento por bandas de octava (y para los niveles globales L_{Aeq} y L_{Ceq}) del evento 1 registrado simultáneamente en la EMAC 1 y 2; del evento 2 registrado simultáneamente en la EMAC 1 y 3; y del evento 3 registrado simultáneamente en la EMAC 1, 2 y 3. En todos los casos, las bandas descartadas (indicadas con un asterisco) se corresponden con frecuencias extremas del evento, donde energéticamente es despreciable.

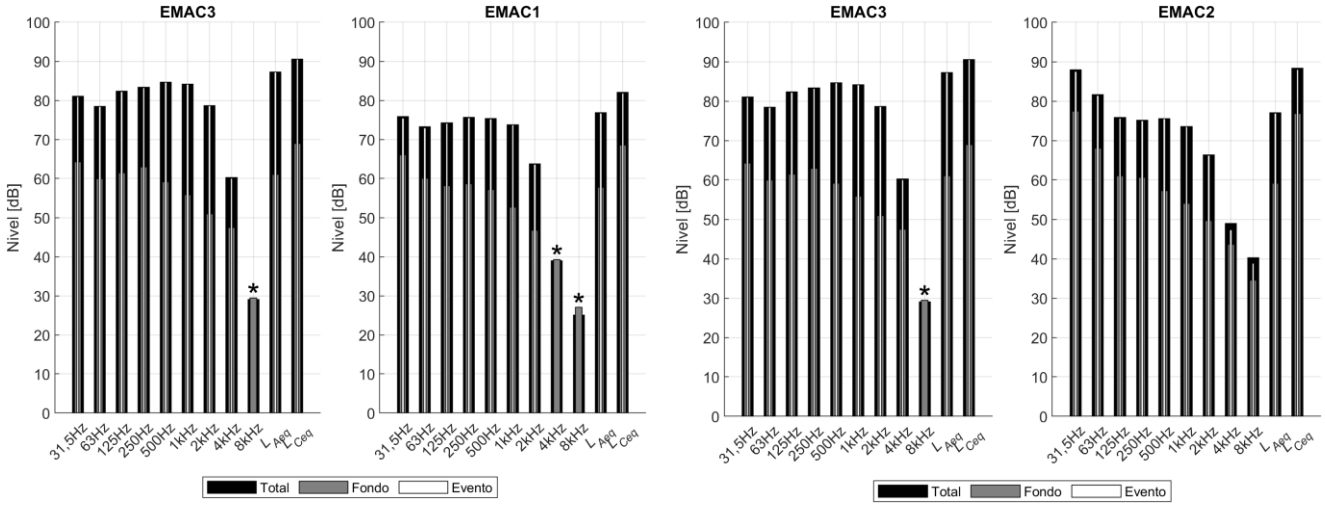
Las Figuras 7(a) y 7(b) muestran las atenuaciones relativas (ΔL) medidas y estimadas (modelo ISO) entre las estaciones EMAC1 y EMAC2 para el evento 1 y entre las estaciones EMAC1 y EMAC3 para el evento 2. Los valores ajustados del parámetro G para los caminos de propagación entre la fuente S1 y los receptores son: $G_{(S1\text{-}EMAC1)} = [0; 0,2; 0,2]$, $G_{(S1\text{-}EMAC2)} = [0; 0,5; 0,5]$ y $G_{(S1\text{-}EMAC3)} = [0; 0,4; 0,2]$. De manera análoga, las Figuras 7(c) y 7(d) exhiben las atenuaciones relativas entre las estaciones EMAC3 y EMAC1; y EMAC3 y EMAC2 para el evento 3. Los valores ajustados del parámetro G para los caminos de propagación entre la fuente S2 y los receptores son: $G_{(S2\text{-}EMAC1)} = [0; 0,3; 0,2]$, $G_{(S2\text{-}EMAC2)} = [0; 0,7; 0,5]$ y $G_{(S2\text{-}EMAC3)} = [0; 0,1; 0,2]$. En todos los casos, se muestra la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre los valores medidos y estimados.

A partir de la Figura 7 se observa, en términos generales, una subestimación del modelo ISO respecto de la atenuación real, lo que implica una tendencia a sobrestimar los niveles sonoros. En particular, durante el evento 2, la banda de 250 Hz muestra una atenuación relativa medida significativamente mayor que la simulada. Este comportamiento podría estar asociado a la presencia de algún obstáculo que actúe como barrera en el trayecto de propagación. Dicho aspecto debería analizarse con mayor detalle mediante un relevamiento específico en el lugar.



(a) Evento 1. EMAC1 y EMAC2. (b) Evento 2. EMAC 1 y EMAC 3.

Figura 5: Niveles medidos globales y en bandas de octava totales, de fondo y evento.



(a) Evento 3. EMAC 3 y EMAC 1. (b) Evento 3. EMAC3 y EMAC2.

Figura 6: Niveles medidos globales y en bandas de octava totales, de fondo y evento.

4. CONCLUSIONES

Se describen los principales resultados del estudio.

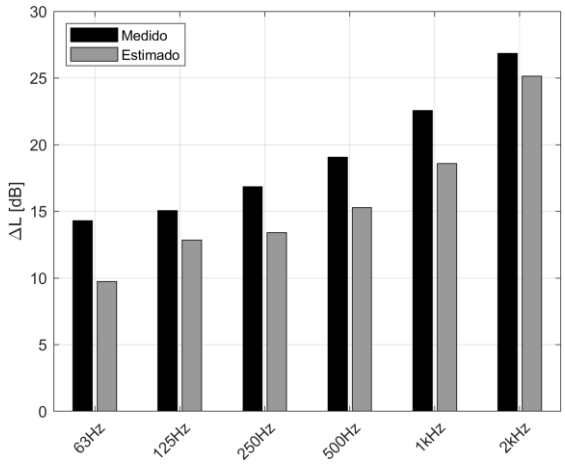
Respecto a la evaluación de molestia según IRAM 4062:

- Todos los eventos fueron clasificados como molestos y ninguno presentó características tonales, impulsivas ni un contenido significativo de baja frecuencia. Esto se debe a que los incrementos sonoros observados corresponden a un aumento de la energía acústica de banda ancha, particularmente en el rango de frecuencias medias y altas (ver Figuras 2 a 4). Si bien es posible que algunas de estas características (tonalidad, baja frecuencia o impulsividad) se perciban en las proximidades de las fuentes, en los casos analizados (con distancias fuente - receptor entre 680 y 2300 m) tales efectos tienden a disiparse.
- El nivel residual calculado (L_c) por periodo horario es: 60 dBA (diurno), 55 dBA (descanso) y 50 dBA (nocturno). Estos valores se encuentran próximos a los niveles medidos en campo en condiciones normales de operación de las plantas. Cabe destacar que, a partir de los 60 dBA, suelen reportarse manifestaciones subjetivas de molestia en la población expuesta, lo cual refuerza la percepción de malestar acústico incluso en ausencia de eventos notorios cuando se supera dicho umbral. Esta última información fue proporcionada por personal del CTE.

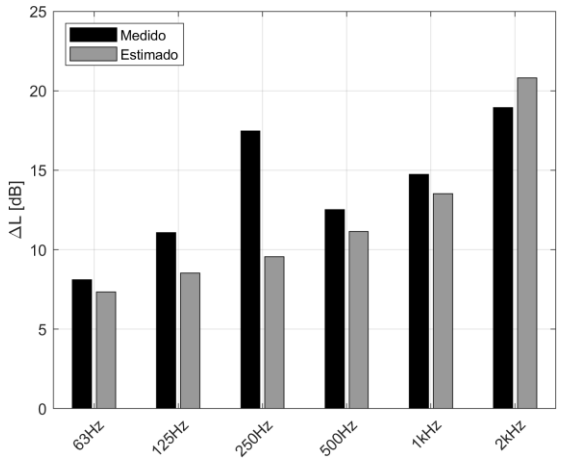
Respecto a la comparación de la atenuación relativa real y simulada a partir del modelo ISO 9613-2:

- En la mayoría de las bandas de frecuencia, la atenuación calculada con el modelo ISO resulta menor que la medida en campo, lo que implica que el modelo tiende a sobreestimar los niveles sonoros en el receptor. Este comportamiento puede interpretarse como conservador. Además, evidencia la existencia de mecanismos de atenuación adicionales, por ejemplo, difracción sobre obstáculos, dispersión por irregularidades del terreno, etc., que no son representados explícitamente por la formulación. Asimismo, otros fenómenos relevantes, como las reflexiones múltiples en entornos complejos, tampoco son considerados. Estos efectos adicionales podrían considerarse mediante el empleo de modelos de propagación más avanzados como, por ejemplo, la técnica de trazado de rayos.

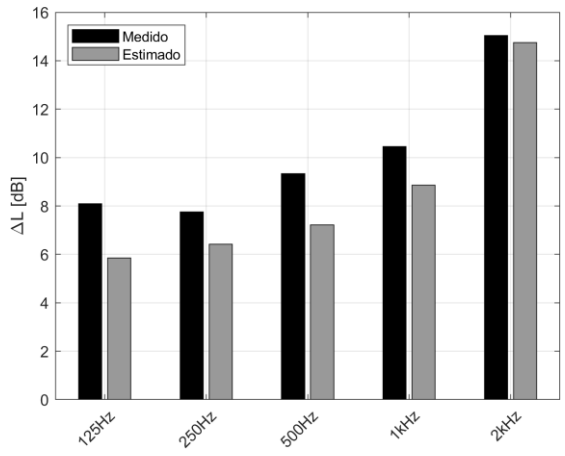
- La metodología aplicada ajusta valores de G por cada tramo a partir de mediciones reales, lo que constituye un avance respecto de la aplicación empírica de la norma. No obstante, una opción futura sería emplear valores promedio de G que integren de forma continua la heterogeneidad del terreno entre los diferentes trayectos de manera de capturar la variabilidad espacial. Para ello, sería necesario realizar relevamientos adiciones en la zona de estudio.



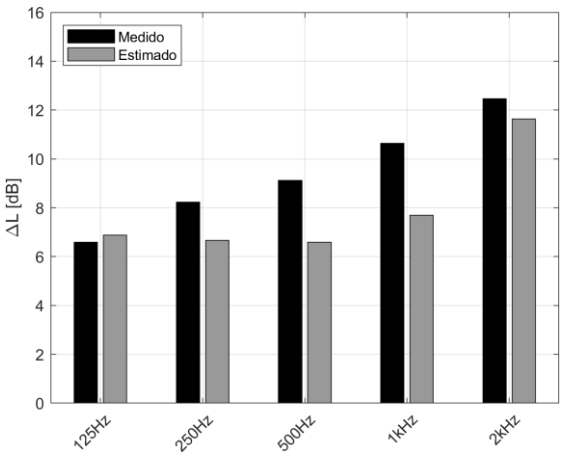
(a) Evento 1. EMAC1/EMAC2 (RMSE = 3,4 dB).



(b) Evento 2. EMAC 1/EMAC 3 (RMSE = 3,5 dB).



(c) Evento 3. EMAC3/EMAC 1 (RMSE = 1,5 dB).



(d) Evento 3. EMAC3/EMAC2 (RMSE = 1,7 dB).

Figura 7: Atenuación relativa medida vs. estimada.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional, así como la colaboración del personal del Comité Técnico Ejecutivo de la

Municipalidad de Bahía Blanca, por el suministro de los registros sonoros, información referente a los eventos e intercambio de experiencias.

REFERENCIAS

[1] IRAM, Ruido ambiental – Parte 1: Método de medición, Norma IRAM 4062-1, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2016.

[2] ISO, Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation, ISO 9613-2, International Organization for Standardization, 1996.

[3] M. Sequeira, L. Di Giorgio, A. Azzurro, y V. Cortínez, “Análisis del ruido ambiental en una zona residencial lindera a un parque industrial en la ciudad de Bahía Blanca,” en *XVIII Congreso Argentino de Acústica* (*AdAA 2023*), *Universidad Nacional de Quilmes, 6 y 7 de diciembre*, 2023.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Aislamiento acústico de motor mediante panel fonoabsorbente inteligente con resonadores de Helmholtz

Talarico, J. A.[†,1]

[†] Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires

[1] jonitalarico88@gmail.com

Resumen El trabajo se basa en el aislamiento acústico para motores de combustión interna utilizando un revestimiento de paneles fonoabsorbentes inteligentes basados en resonadores de Helmholtz, dispositivos capaces de atenuar bandas estrechas de frecuencia mediante fenómenos de resonancia acústica. El objetivo es atenuar tonos dominantes en bajas frecuencias. Pero su diseño convencional presenta una limitación: la frecuencia de resonancia queda determinada por parámetros estructurales fijos, como el volumen de la cavidad, la longitud y el área del cuello. Para ello, se propone un diseño con diafragmas variables en el cuello de cada resonador que permiten ajustar la apertura efectiva y, con ello, la impedancia acústica y el acoplamiento con la onda incidente logrando una atenuación selectiva y adaptable frente a distintos regímenes de funcionamiento del motor. La idea es colocar un sensor de frecuencia, que mida las RPM (revoluciones por minuto) del motor, luego esa información procesarla a través de un circuito regulador o controlador digital que envíe una señal de salida a ciertos actuadores (servomecanismos) y por ultimo éstos se encarguen de abrir o cerrar los diafragmas y así modificar el área efectiva de cada cuello, "fuente de sonido (motor) => sensor => circuito regulador o controlador => actuador => diafragma".

Palabras clave: frecuencia, resonancia, motor, servomecanismos, diafragmas.

Abstract This work focuses on acoustic insulation for internal combustion engines using a cladding of smart sound-absorbing panels based on Helmholtz resonators, devices capable of attenuating narrow frequency bands through acoustic resonance phenomena. The objective is to attenuate dominant tones at low frequencies. However, their conventional design has a limitation: the resonance frequency is determined by fixed structural parameters, such as cavity volume, length, and neck area. To achieve this, a design with variable diaphragms in the neck of each resonator is proposed. This allows for adjusting the effective aperture and, consequently, the acoustic impedance and coupling with the incident wave, achieving selective and adaptable attenuation under different engine operating regimes. The idea is to place a frequency sensor, which measures the RPM (revolutions per minute) of the engine, then process that information through a digital regulator or controller circuit that sends an output signal to certain actuators (servomechanisms) and finally these are responsible for opening or closing the diaphragms and thus modifying the effective area of each neck, "sound source (engine) => sensor => regulator or controller circuit => actuator => diaphragm".

Palabras clave: frequency, resonance, engine, servomechanisms, diaphragms.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta una estrategia de aislamiento acústico para motores de combustión interna basada en el uso de resonadores de *Helmholtz* [1]-[3] acoplados a paneles fonoabsorbentes inteligentes. El objetivo es atenuar tonos dominantes en bajas frecuencias, sin modificar la geometría de la cavidad resonante. Para ello, se propone un diseño con diafragmas variables en el cuello del resonador que permiten ajustar la apertura efectiva y, con ello, la impedancia acústica y el acoplamiento con la onda incidente. Se analizan tres variantes de implementación: diafragmas perforados con obturadores, membranas flexibles y mecanismos de control activo [4]. Estas configuraciones permiten una respuesta

adaptable frente a diferentes condiciones de funcionamiento del motor. A través de un ejemplo de cálculo, se muestra que pequeñas variaciones en el área de apertura permiten cubrir un amplio rango de frecuencias (10 a 50 Hz). El diseño propuesto ofrece una solución pasiva, compacta y ajustable para la mitigación de ruido en entornos automotrices, con potencial de aplicación en sistemas inteligentes de control sonoro.

El ruido generado por motores de combustión interna representa un desafío importante tanto en la industria automotriz como en aplicaciones industriales, debido a su impacto en el confort acústico, la salud auditiva y el cumplimiento de normativas ambientales. En particular, los tonos dominantes que surgen en rangos de baja frecuencia son difíciles de mitigar mediante técnicas tradicionales de aislamiento pasivo, como recubrimientos absorbentes o encapsulados masivos. Una alternativa eficaz y compacta es el uso de resonadores de *Helmholtz* [1]-[3], dispositivos capaces de atenuar bandas estrechas de frecuencia mediante fenómenos de resonancia acústica. No obstante, su diseño convencional presenta una limitación: la frecuencia de resonancia queda determinada por parámetros estructurales fijos, como el volumen de la cavidad, la longitud y el área del cuello [1]. En este contexto, el presente trabajo propone una solución que incorpora un panel fonoabsorbente inteligente, mediante el diseño de diafragmas variables que modifican la apertura efectiva del cuello del resonador. Esta modificación permite ajustar la impedancia acústica del sistema y su grado de acoplamiento con la onda incidente, sin alterar la frecuencia de resonancia teórica, pero logrando una atenuación selectiva y adaptable frente a distintos regímenes de funcionamiento del motor.

2. MARCO TEÓRICO

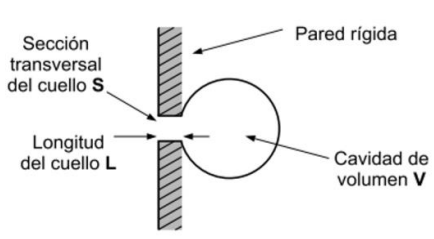
Un resonador de *Helmholtz* es un dispositivo acústico que consta de una cavidad cerrada conectada al exterior mediante un cuello [1]. Su principio de funcionamiento se basa en la resonancia de aire en el interior del sistema, lo cual permite atenuar frecuencias acústicas específicas. La frecuencia de resonancia f_o de un resonador de *Helmholtz* está dada por la Ecuación (1):

$$f_o = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{A}{VL_{ef}}} \tag{1}$$

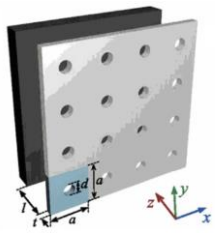
donde:

1. c: velocidad del sonido en el aire.
2. A: área de la sección transversal del cuello.
3. V: volumen de la cavidad.
4. L_{ef}: longitud efectiva del cuello.

En la Figura 1 se observa un esquema del resonador de *Helmholtz*.



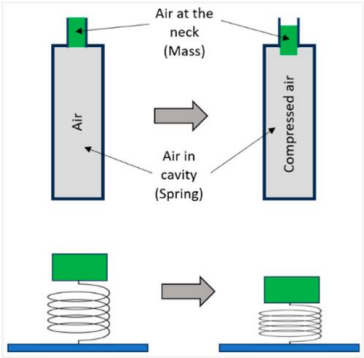
(a) Esquema básico de un resonador de *Helmholtz* (adaptado de Gimenez Arranz [3])



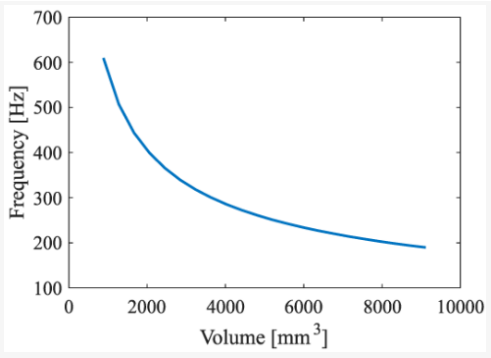
(b) Material de alto coeficiente de Absorción (adaptado de Honeycutt [1])

Figura 1: Resonador de *Helmholtz*

La Figura 2 muestra el fenómeno físico producido por un resonador comparado con el sistema masa resorte [4].



(a) Fenómeno de resonancia de *Helmholtz* donde el aire dentro de la cavidad se modela como un sistema de masa de resorte (adaptado de Hedayati [4])



(b) Diferentes volúmenes de cavidad y sus frecuencias correspondientes (adaptado de Hedayati [4])

Figura 2: Funcionamiento básico de un resonador.

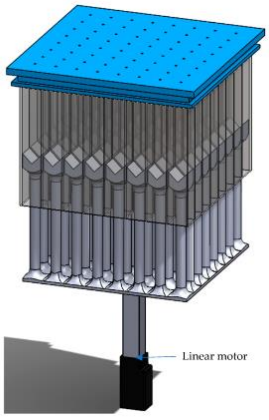
3. DISEÑO DE DIAFRAGMAS VARIABLES

La propuesta consiste en mantener fijos los parámetros estructurales (A, L, V) y modificar sólo la apertura efectiva del cuello mediante un diafragma variable. Se proponen tres opciones:

1. Diafragma con múltiples orificios y obturadores: permite cerrar parcialmente el paso del sonido usando láminas de caucho o metal delgado.
2. Membrana flexible: actúa como un filtro de banda estrecha, similar a un parlante pasivo, que oscila cerca de f_o.
3. Control mecánico o electrónico: sistemas con servomecanismos o actuadores que ajustan el área en tiempo real.

3.1 Sistema basado en resonadores activos

Basado en el mecanismo diseñado por Hedayati y Lakshmanan [4], donde evalúa la variación del volumen V, se propone análogamente variar el área efectiva del cuello A en vez del volumen V. En la Figura 3 se puede observar un material fonoabsorbente basado en resonadores de *Helmholtz* activos, utilizando cámaras variables accionadas por servomecanismos.



(a) Esquema del modelo activo que contiene las bases de las cavidades, deslizándose gracias a la acción del motor lineal fijado a la base (adaptado de Hedayati [4])

(a) Placa de control (adaptado de Hedayati [4])

(c) Actuador lineal en sus estados completamente contraído y extendido (adaptado de Hedayati [4])

Figura 3: Material acústico activo basado en resonadores de *Helmholtz*.

Para llevar a cabo este mecanismo se utilizan servomotores que accionan actuadores lineales [4], [5] lo cual transforman el movimiento lineal a rotatorio que hacen girar los diafragmas ubicados en la entrada del cuello de cada resonador. En la Figura 4 se puede observar un diagrama de flujo pasando por todos los procesos hasta llegar al control final.

Figura 4: Diagrama de flujo.

3.2 Diseño del resonador con diafragma variable

En esta sección se muestra un solo resonador con cámara y cuello de forma cilíndrica, el área de la sección del cuello es de 2 cm^2, en la Figura 5 se muestran diferentes vistas donde el disco verde representa el diafragma u obturador.

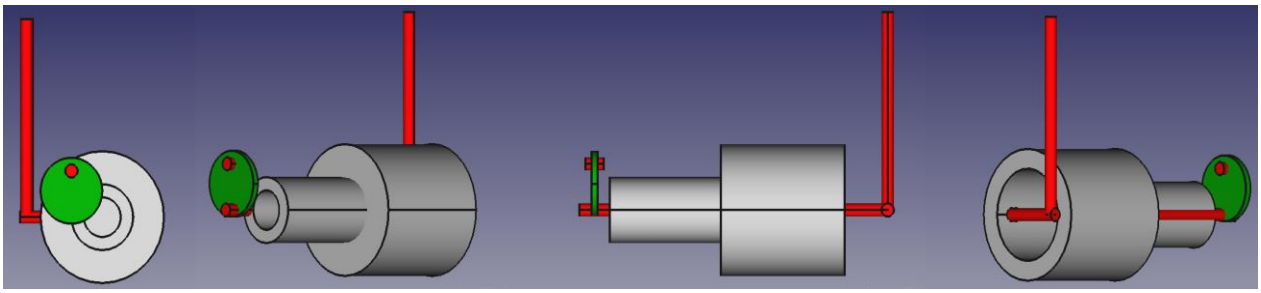


Figura 5: Diseño de un resonador cilíndrico

Cada resonador forma parte de una red, todos insertados en una superficie plana, integrando el panel fonoabsorbente inteligente como muestra la Figura 6. En ella se puede observar una gran cantidad de resonadores, todas las varillas de color rojo van conectadas a un solo servomotor [5], el cual es accionado a través de un circuito de control mediante sensores [6].

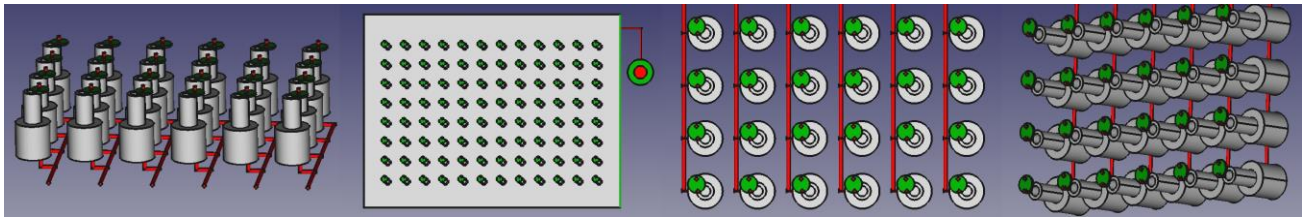


Figura 6: Panel fonoabsorbente inteligente.

3.3 Diseño de cavidad y encapsulado del motor

Una vez obtenido el panel fonoabsorbente inteligente, se realizan varias réplicas y con ellos se construye una cavidad, en principio cúbica como indica la Figura 7 y 8, cuyo tamaño va a depender de la aplicación que se quiera dar. Allí se coloca el motor, la forma dependerá del chasis del vehículo, se puede aplicar a maquinarias de la construcción, medios de transporte público o cargas, ya sea, camiones, motoniveladoras, grúas, grupos electrógenos o motores de taladros neumáticos que emiten un alto nivel sonoro superando los niveles estándares regidos por las normas.

Este método no cambia la frecuencia de resonancia en teoría (ya que no cambia los parámetros estructurales), pero sí puede atenuar la transmisión de ciertas frecuencias al variar el acoplamiento y

filtrar selectivamente ciertas bandas mediante impedancia acústica variable, ya que el área libre efectiva disminuye, aumentando la resistencia acústica.

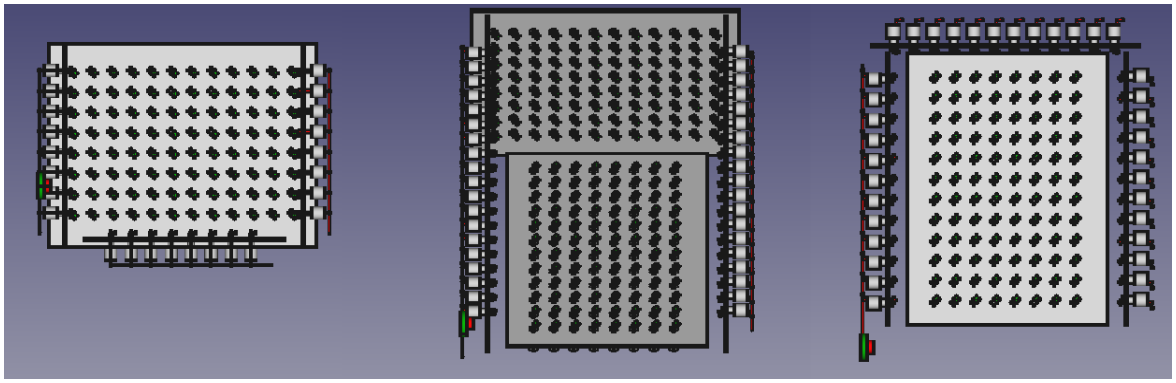


Figura 7: Diferentes vistas del diseño de la cavidad acústica vacía.

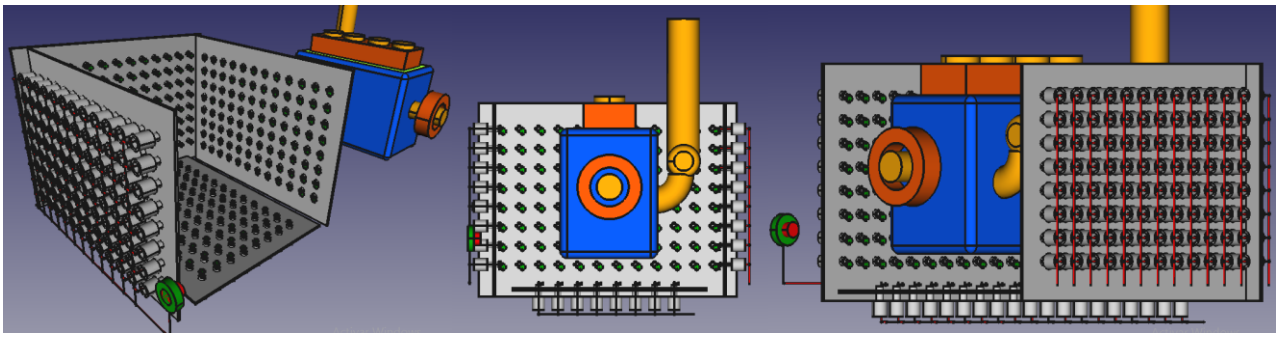


Figura 8: Diferentes vistas del diseño de la cavidad con el motor incluido.

4. EJEMPLO Y CÁLCULOS

Consideremos un resonador de *Helmholtz* con los siguientes parámetros fijos:

1. Longitud del cuello: $L = 0{,}02$ m (2 cm).
2. Área máxima del cuello (100 % de apertura): $A_o = 2 \times 10^{-4}$ m² (2 cm²).
3. Volumen de la cavidad: $V = 1 \times 10^{-3}$ m³ (1 litro).
4. Velocidad del sonido en el aire: $c = 343$ m/s.

Aplicando la Ecuación (1) y reemplazando por los parámetros de interés se obtiene la frecuencia de resonancia con apertura máxima como indica la Ecuación (2):

$$f_o = \frac{343 \text{ m/s}}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \,.\, 0{,}02 \text{ m}}} = 172{,}63 \text{ Hz} \qquad (2)$$

Si reducimos el área de paso efectiva, podemos ajustar la respuesta del sistema para suprimir otras frecuencias sin modificar el volumen ni la longitud del cuello.

A continuación se muestra una tabla con la relación entre la frecuencia deseada y el área efectiva requerida (en m² y cm²), así como el porcentaje de apertura relativo, y una equivalencia aproximada en RPM de un motor de combustión.

En la Tabla 1 se reflejan los resultados del área efectiva del cuello en cm² en función de las RPM (revoluciones por minuto) del motor.

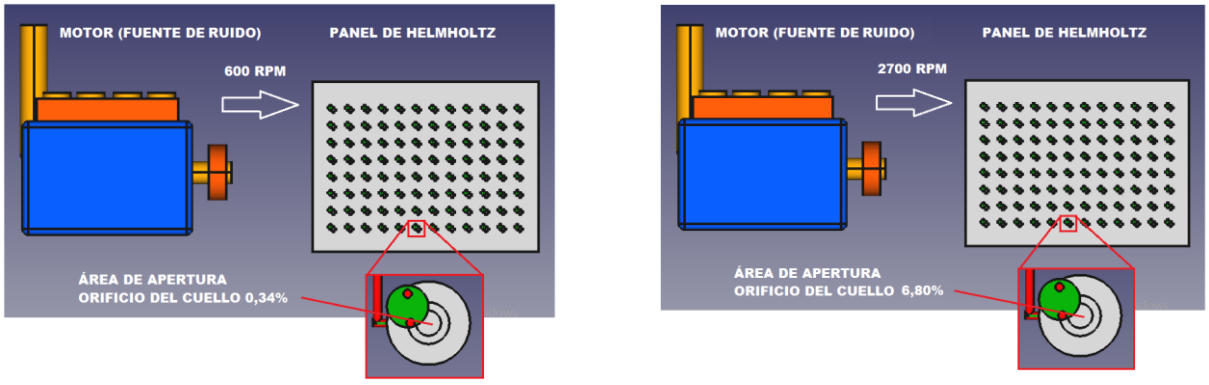
En la vida real se puede considerar el chasis y la carrocería que envuelve al motor como una cámara anecoica o semianecoica, segúsn el modelo y diseño del vehículo, esto también permite saber cómo revestir con panel de resonadores de *Helmholtz* toda la estructura y aprovechar al máximo el espacio. El mismo principio estudiado anteriormente [1]-[4], también puede ser utilizado en el sistema de transmisión y escape del vehículo, ya que los mismos también emiten ruido.

En este caso se puede revestir el sistema desde motor, caja de velocidades, cardan y diferencial, en tal caso que haya.

Tabla 1: Área de apertura en función de las RMP del motor.

f_o (Hz)	Área requerida (cm²)	% Apertura	Equivalencia en RPM
10	0,0067	0,34	600
15	0,0151	0,76	900
20	0,0268	1,34	1200
25	0,0419	2,10	1500
30	0,0603	3,02	1800
35	0,0822	4,11	2100
40	0,1070	5,35	2400
45	0,1360	6,80	2700

Más adelante se muestra el funcionamiento del mecanismo donde se observa la respuesta de los resonadores del panel a la frecuencia en RPM del sonido emitido por el motor. Cada porcentaje de apertura del cuello está atado a la frecuencia del sonido emitido. Por ejemplo, para 600 RPM, equivalente a 10 Hz, el diafragma del cuello se abre un 0,34% del total del área (equivalente a 2 cm^2), para 2700 RPM, equivalente a 45 Hz, el diafragma se abre un 6,8%. En la Figura 9 se muestra dicho proceso. Para llevar a cabo este mecanismo se utilizan servomotores que accionan actuadores lineales. Para ello es muy importante tener en cuenta el diseño, calibración y puesta en marcha el sensor de frecuencia, ya que debe responder en tiempo real [6].



(a) Área de apertura del cuello del resonador representada en porcentaje a la mínima frecuencia de interés.

(b) Área de apertura del cuello del resonador representada en porcentaje a la máxima frecuencia de interés.

Figura 9: Porcentaje de apertura de cuello en función a las RPM del motor.

En principio, son valores mínimos y máximos en RPM del motor estudiado en este ejemplo. Pero pueden existir valores superiores a 2700 RPM que en tal caso deberán ser estudiados y extenderse la tabla que relaciona la frecuencia y el área afectiva del cuello del resonador.

Con respecto a los sensores hay varios tipos que se detallan más adelante.

Los sensores de RPM inductivos y de efecto *Hall* en los vehículos actuales [6] se utilizan principalmente para medir las RPM y determinar la posición del cigüeñal o del árbol de levas en los sistemas de gestión del motor.

El sensor inductivo, también conocido como sensor de captación magnética, durante su funcionamiento, como resultado del efecto inductivo, produce en su bobina una tensión oscilante, como resultado de este cambio, se induce una tensión en la bobina proporcional a la intensidad y la velocidad de cambio del campo magnético. Por medio de éste método se puede medir la frecuencia en Hz del motor.

En la Figura 10 se muestra un sensor de efecto *Hall*, donde: 1-carcasa del sensor, 2-cables de salida (+Vcc, -Vcc y señal), 3-electrónica integrada, 4-imán permanente, 5-dispositivo de efecto Hall, 6-rueda de activación, G-entrehierro.

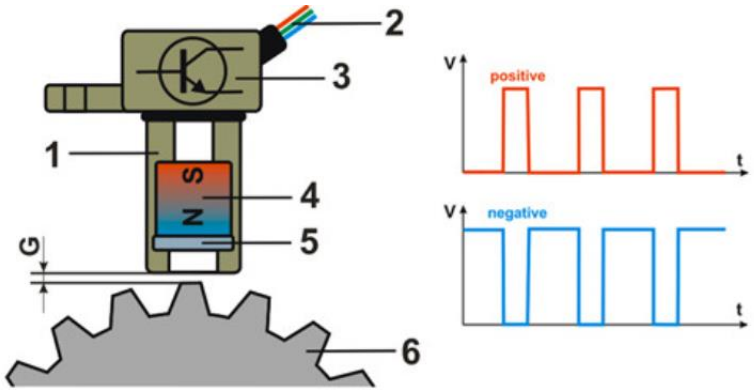


Figura 10: Principio de funcionamiento y especificaciones del sensor inductivo (adaptado de Mucevski [6])

5. RECOMENDACIONES PRÁCTICAS

1. Orientar el cuello del resonador hacia la fuente de ruido (ej. cárter).
2. Usar materiales resistentes al calor.
3. Implementar grupos de resonadores para bandas múltiples.
4. Validar el comportamiento con mediciones FFT o espectrogramas.

6. CONCLUSIONES

La implementación de diafragmas variables permite un control fino del aislamiento acústico sin alterar la frecuencia natural del resonador. Pequeños ajustes en la apertura resultan suficientes para cubrir un amplio espectro de bajas frecuencias. Esta metodología abre posibilidades para sistemas adaptativos, de bajo costo y fácil integración en entornos vehiculares o industriales. Como trabajo futuro, se propone explorar el control automático del diafragma según RPM del motor. También es importante destacar que no solo puede ser aplicado al motor, sino a todo el conjunto de transmisión y escape, atenuando el ruido en toda la vía sonora desde la generación del mismo hasta su liberación al ambiente externo. Esta idea se puede utilizar en vehículos de transporte público, tales como trenes y colectivos. Puede ser usado en máquinas industriales, camiones, maquinaria de la construcción o como parte de un sistema

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de Buenos Aires y a la carrera de Ingeniería Electrónica por la formación recibida por sus docentes, la difusión del evento y el marco académico que posibilitó la realización de este trabajo. Se reconoce el acompañamiento y las sugerencias durante la cursada, que fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Finalmente, se agradece a la AdAA por el espacio de difusión, fomentar la investigación y brindar la posibilidad de difundir este aporte en el ámbito de la acústica.

REFERENCIAS

[1] R. Honeycutt, “Sound Control: The Ubiquitous Helmholtz Resonator”, *Advancing The Evolution of Audio Technology*, 2023.

[2] D. Fernández, I. F. Sánchez y L. G. Gilberto, “Análisis, diseño y aplicación de resonadores acústicos”, *Cátedra Fundamentos de Acústica y Electroacústica (Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba)*, pp. 1-8, 2011.

[3] G. Jiménez Arranz, “Estudio y diseño de sistemas para el acondicionamiento acústico”, *Máster en Ingeniería Acústica de la Edificación y el Medio Ambiente (Universidad politécnica de Madrid)*, pp. 226-288, 2013.

[4] R. Hedayati y S. P. Lakshmanan, “Active Acoustic Metamaterial Based on Helmholtz Resonators to Absorb Broadband Low-Frequency Noise”, *MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute)*, vol. 17, no. 04, 2024.
eprint: https://doi.org/10.3390/ma17040962

[5] C. Emerson, “Servo motion controllers and motors provide excellent automation integration, accuracy, performance, and reliability”, *International Society of Automation*, 2020

[6] K. Mucevski, “Inductive and Hall Effect RPM Sensors Explained”, 2015.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Cámara aislante

Talarico, J. A.[†,1]

[†] Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires

[1] jonitalarico88@gmail.com

Resumen Este trabajo se basa en una cámara aislante o anti acústica. Se trata de dos cámaras, una interna y otra externa, la idea es que el ruido generado en la cámara interna no se transmita hacia el exterior, se busca que entre ambas cámaras haya vacío. El objetivo es diseñar una cámara rígida en el interior de otra, separadas entre sí algunos centímetros, por ejemplo 1cm. La idea es que la cámara interna no esté en contacto con la cámara externa. Pero presenta una limitación ¿Cómo se sostiene la cámara interna sin que esté en contacto con la externa? Utilizando vínculos de apoyo se podría transmitir algo de sonido, por lo tanto, la solución es usar amortiguadores magnéticos, basados en la levitación magnética de los trenes MAGLEV *(Magnetic Levitation)*, esto hace que no haya contacto físico entre ambas cámaras. Entonces, se busca construir dos cámaras: la cámara interna con un sistema de presurización y recambio de aire simulando la presión atmosférica, apoyadas sobre amortiguadores magnéticos, y la cámara externa con bombas que generen vacío en la cavidad existente entre ambas. Esta cámara aislante puede tener aplicación en salas de ensayo o en laboratorios experimentales donde hay fuentes que emiten ruido a altas presiones sonoras.

Palabras clave: acústica, vacío, amortiguadores, presurización, levitación.

Abstract This work is based on an insulating or anti-acoustic chamber. It consists of two chambers, one internal and one external. The idea is that the noise generated in the internal chamber is not transmitted to the outside; the goal is to have a vacuum between both chambers. The objective is to design a rigid chamber inside another, separated from each other by a few centimeters, for example 1 cm. The idea is that the internal chamber is not in contact with the external chamber. However, it presents a limitation: How is the internal chamber supported without being in contact with the external one? Using support links could transmit some sound, therefore, the solution is to use magnetic dampers, based on the magnetic levitation of MAGLEV *(Magnetic Levitation)* trains, this means that there is no physical contact between both chambers. Therefore, the goal is to build two chambers: the internal chamber with a pressurization and air exchange system simulating atmospheric pressure, supported by magnetic dampers, and the external chamber with pumps that generate a vacuum in the cavity between them. This isolation chamber can be used in test rooms or experimental laboratories where noise sources emit high sound pressures.

Palabras clave: acoustics, vacuum, dampers, pressurization, levitation.

1. INTRODUCCIÓN

El control del ruido y la vibración es un desafío constante en el diseño de dispositivos y entornos donde se requiere un alto nivel de aislamiento acústico. Una solución innovadora es la construcción de una cámara aislante basada en un sistema de vacío [1] y levitación magnética [2], capaz de minimizar tanto la transmisión de sonido a través del aire como la propagación de vibraciones por contacto [3]. El presente trabajo describe los componentes, materiales y procesos necesarios para el diseño y la fabricación de una cámara de doble contención, en la que una cámara interna se encuentra suspendida dentro de otra cámara externa mediante un sistema de levitación magnética activa [2]. Con este enfoque se busca lograr un aislamiento acústico avanzado, aplicable en investigaciones científicas,

mediciones de alta precisión y aplicaciones industriales donde la interferencia sonora debe reducirse al mínimo.

2. COMPONENTES Y DISEÑO GENERAL

Para lograr un aislamiento acústico efectivo, es fundamental considerar la interacción entre los distintos elementos que conforman la cámara aislante. El diseño no se limita únicamente a la elección de materiales, sino que requiere una integración precisa de estructuras rígidas, sistemas de vacío [1] y mecanismos de suspensión que trabajen en conjunto para minimizar la propagación del sonido y las vibraciones [3]. En esta sección se detallan los componentes principales y su función dentro del sistema, destacando el papel de la cámara interna y externa, el espacio de vacío que actúa como barrera acústica, y el sistema de levitación magnética [2] que garantiza la separación física entre ambas estructuras.

2.1 Cámara rígida interna

Ésta contiene la fuente de ruido que se quiere aislar. Debe ser lo más hermética posible para que el vacío sea efectivo. En la Figura 1 se observan varias vistas del diseño, donde en el interior de la cámara interna se incorpora un sistema de presurización [4] para mantener la presión interna simulando la presión atmosférica.

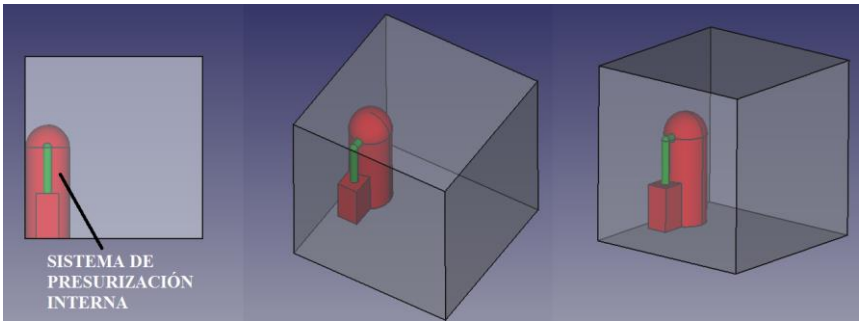


Figura 1: Diseño cámara interna.

2.2 Cámara rígida externa

Ésta contiene la cámara interna. También debe ser extremadamente robusta y hermética para mantener el vacío. En la Figura 2 se observan varias vistas del diseño, donde en la parte externa se incorpora un sistema de generación de vacío utilizando una bomba [1]. El espacio entre ambas cámaras es crucial. El vacío eliminará la transmisión de sonido por el aire.

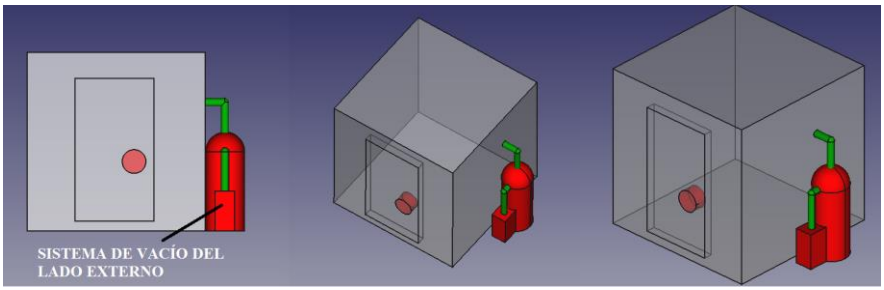


Figura 2: Diseño cámara externa.

2.3 Amortiguador Magnético (Sistema de Levitación)

Este sistema sostiene la cámara interna dentro de la externa sin contacto físico, eliminando la transmisión de vibraciones por contacto sólido. En la Figura 3 se puede observar la forma de un amortiguador con forma cilíndrica basado en la levitación controlada por la fuerza magnética.

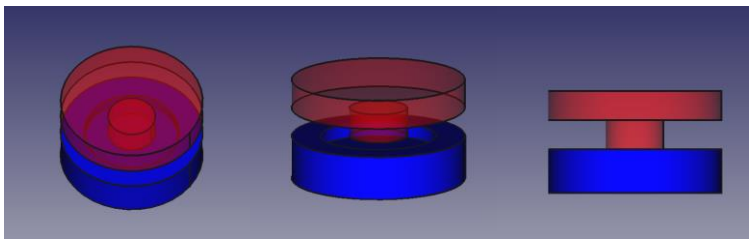


Figura 3: Diseño amortiguador magnético.

3. DISEÑO Y MATERIALES

La elección de los materiales y el planteo del diseño estructural constituyen la base del correcto funcionamiento de la cámara aislante. Para alcanzar los niveles de hermeticidad, rigidez y estabilidad requeridos, es indispensable combinar propiedades mecánicas de alta resistencia con soluciones que minimicen las vibraciones [3] y eviten interferencias magnéticas. Asimismo, el sellado y el sistema de levitación magnética [2] resultan elementos clave, ya que garantizan tanto la conservación del vacío [1] como la suspensión sin contacto de la cámara interna. En este apartado se presentan los criterios de selección de materiales, las técnicas de sellado propuestas y las alternativas para implementar un sistema de levitación estable y eficiente.

3.1 Materiales

Para ambas cámaras, se necesitan materiales con alta densidad y rigidez, como acero inoxidable de alto calibre o aleaciones de aluminio especiales. El objetivo es minimizar la vibración intrínseca de los materiales. La elección debe considerar también su capacidad para soportar vacío y ser no magnéticos (o con propiedades magnéticas muy controladas) para no interferir con el sistema de levitación.

3.2 Sellado

El diseño de ambas cámaras debe incluir bridas y juntas de vacío de alta calidad para asegurar una hermeticidad extrema, para eliminar totalmente el contenido gaseoso (aire) en la cavidad generada por la cámara interna y externa, ya que el aire es un medio de transmisión de la onda sonora [3] y si él no sería posible la propagación el cual es el objetivo buscado.

3.3 Sistema de levitación magnética

Aquí hay un desafío importante a afrontar, ya que se requiere eliminar el contacto de la cámara interna con la cámara externa para eliminar completamente o en su mayoría la transmisión del sonido a través de los puntos de apoyo.

3.3.1 Imanes permanentes

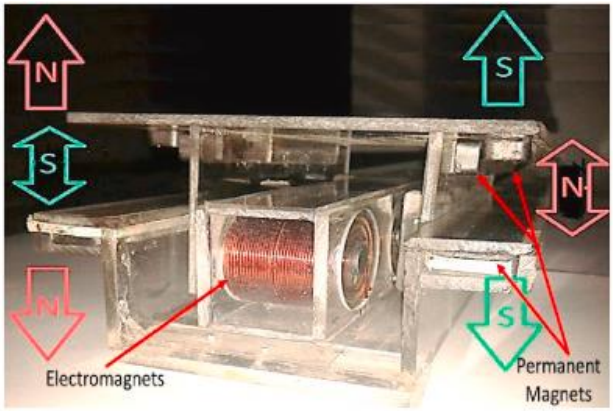
Los imanes permanentes pueden usarse para la levitación básica, colocados estratégicamente en las superficies enfrentadas de ambas cámaras. Sin embargo, tienen un punto de equilibrio inestable, lo que requiere un sistema activo.

3.3.2 Electroimanes y sensores (sistema activo)

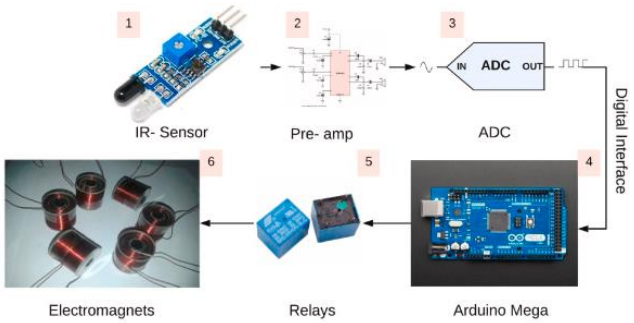
Esta es la opción más viable para una levitación estable y un "amortiguamiento". Se necesitan electroimanes controlados por un sistema de retroalimentación. Sensores de posición detectan cualquier movimiento o desviación de la cámara interna. Un controlador ajusta la corriente de los electroimanes para mantener la cámara interna centrada y sin contacto.

Para ello, nos basamos en el principio de levitación del tren MAGLEV [2], donde se utilizan electroimanes para generar la fuerza magnética necesaria controlada por circuitos y sensores según Figura 4, pero en nuestro caso adaptado a la estática de la cámara interna y no al movimiento.

Los imanes (permanentes o electroimanes) deben disponerse en un patrón que rodee la cámara interna, distribuyendo el peso y las fuerzas.



(a) Colocación de electroimanes e imanes permanentes (adaptado de Qadir [2])



(b) Diagrama de bloques del mecanismo de control del tren MAGLEV (adaptado de Qadir [2])

Figura 4: Sistema de control de levitación magnética.

4. FABRICACIÓN DE LAS CÁMARAS

Una vez definidos los materiales y el diseño estructural, el siguiente paso consiste en la fabricación de las cámaras, donde la precisión y la calidad de los procesos resultan determinantes para el correcto desempeño del sistema. Las partes de las cámaras se soldarían o unirían herméticamente. Las soldaduras deben ser impecables para mantener el vacío.

Ambas cámaras requieren un mecanizado de alta precisión para asegurar superficies planas y tolerancias ajustadas para el sellado y la interacción con los imanes. En la Figura 5 se observan ambas cámaras integradas donde se muestra la ubicación de los amortiguadores magnéticos [2].

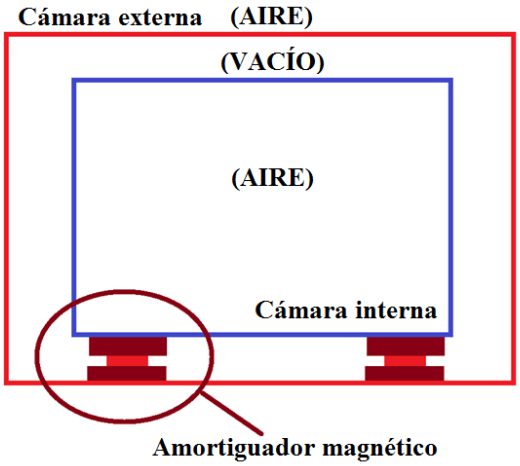


Figura 5: Integración de ambas cámaras.

5. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN

La integración del sistema de levitación representa una de las etapas más críticas en el desarrollo de la cámara aislante, ya que de su correcta implementación depende la estabilidad y el funcionamiento sin contacto de la cámara interna. Este proceso requiere la disposición estratégica de imanes o electroimanes para generar las fuerzas de repulsión o atracción controlada, así como la instalación de sensores de posición capaces de detectar con precisión cualquier desviación. A su vez, la electrónica de control conforma la base del sistema activo, permitiendo que los electroimanes ajusten su

intensidad en tiempo real mediante un microcontrolador y circuitos de potencia externos [2]. En conjunto, estos elementos garantizan una levitación estable, confiable y adecuada para mantener el aislamiento acústico previsto en el diseño.

Los imanes o electroimanes se montan en las superficies interiores de la cámara externa y las superficies exteriores de la cámara interna, con la polaridad y el diseño adecuados para la repulsión o atracción controlada.

Para un sistema de levitación activo, se necesita un complejo sistema de cableado para alimentar los electroimanes y conectar los sensores al controlador. La electrónica de control (microcontrolador, drivers de potencia) se encuentra fuera de la cámara externa.

En la Figura 6 se puede observar un diseño del principio de funcionamiento de uno de los amortiguadores utilizados para la suspensión de la cámara interna.

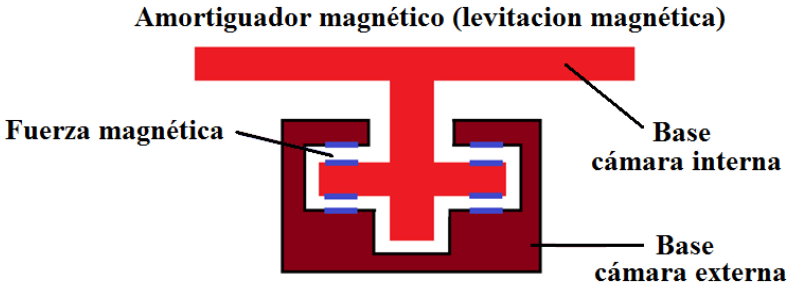


Figura 6: Amortiguador magnético.

6. GENERACIÓN DE VACÍO

La cámara externa lleva un puerto de vacío con una válvula para conectar una bomba de vacío. Se necesita un sistema de bombas de vacío (generalmente una bomba de paletas rotatorias) para evacuar el espacio entre las cámaras. Para ello, son necesarios manómetros para monitorear el nivel de vacío. Según Vega [1] Los sistemas industriales se pueden ubicar en diferentes grupos de rangos de presión como se expresan en la Tabla 1.

Tabla 1: Rangos de presión (extraído de Vega [1]).

Vacío	Rango de presión en [mbar]	Rango de presión en [torr]
Primario	1000 a 1	760 a 0,75
Medio	1 a 10^{-3}	0,75 a $7,5 \times 10^{-3}$
Secundario	10^{-3} a 10^{-7}	$7,5 \times 10^{-3}$ a $7,5 \times 10^{-7}$
Súper alto	10^{-7} a 10^{-11}	$7,5 \times 10^{-7}$ a $7,5 \times 10^{-11}$
Extremo	$< 10^{-11}$	$< 7,5 \times 10^{-11}$

Los diferentes tipos de bombas para estos rangos de vacío se pueden dividir en bombas primarias (apoyo), bombas nodrizas y bombas secundarias (alto vacío): rangos de presión alto, muy alto y súper alto [1].

Hay dos categorías básicas de bombas de vacío, bombas de transferencia de gas y bombas de captura [1]. Las bombas de transferencia trasladan moléculas de gas por intercambio de movimiento (acción cinética) y las bombas de transferencia cinéticas utilizan paletas de alta velocidad o introducción de vapor para dirigir el gas hacia la salida [1]. En la Figura 7 se muestra un ejemplo teórico de las presiones en cada cavidad, la idea es conseguir la menor presión, en lo posible $P_0 < 1 \times 10^{-11}$ mbar.

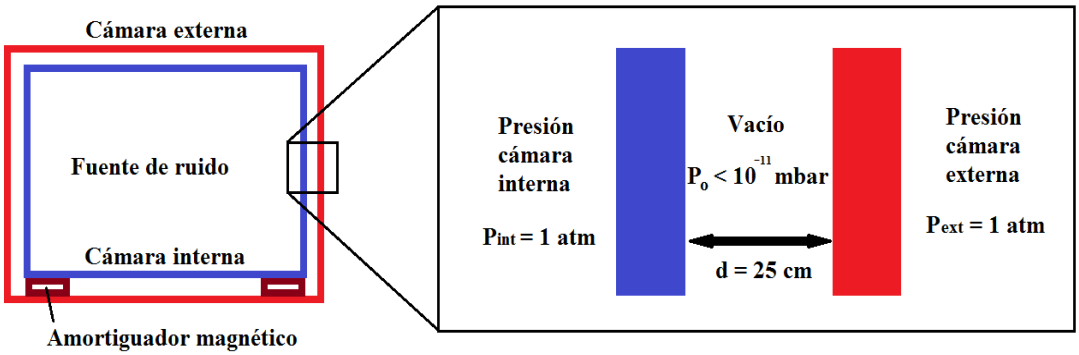


Figura 7: Generación de vacío entre ambas cámaras.

La Figura 8 muestra a groso modo y de forma conceptual cómo la amplitud de la onda incidente dentro de la cámara interna disminuye o desaparece casi completamente por ausencia del medio de propagación en la cavidad entre ambas cámaras.

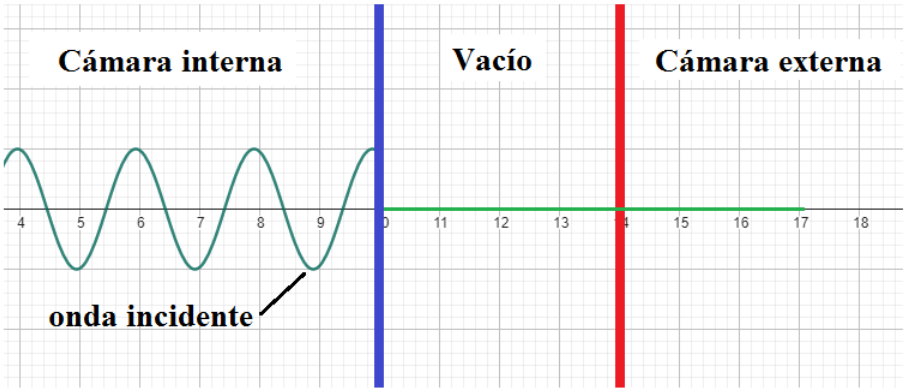


Figura 8: Amplitud de onda incidente, atenuación del ruido casi al 100%.

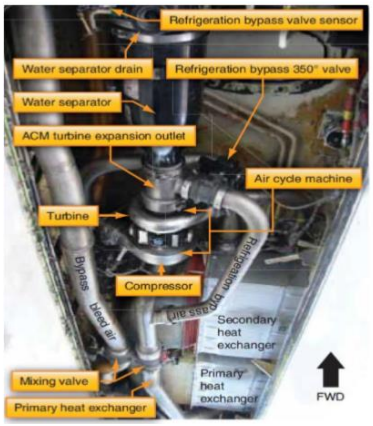
7. PRESURIZACIÓN DE LA CÁMARA INTERNA

Es importante presurizar la cámara interna, ya que según su uso, al estar cerrada de forma hermética, no tiene contacto con el exterior, por lo tanto el aire que contiene puede acabarse, ya sea por la presencia de seres vivos, intercambio gaseoso, oxigeno por dióxido de carbono, u otros experimentos que requieran uso de aire. En los aviones, los sistemas de presurización y aire acondicionado se encargan de mantener a la aeronave "a una temperatura y presión adecuada" desde el inicio del vuelo hasta que termine el mismo, el sistema de aire acondicionado de la aeronave es el sistema de apoyo a la vida a bordo y está diseñado para mantener la temperatura y la presión de aire de la cabina hermética en un nivel para asegurar el funcionamiento normal de los pasajeros y la tripulación [4].

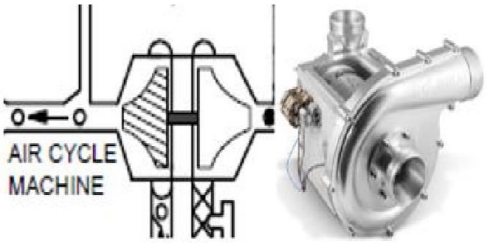
Análogamente se aplica este principio para mantener la cámara interna a una presión adecuada para los integrantes que habiten en ella y puedan hacer de su uso, tanto experimentales como de otra índole. Todo el sistema de presurización debe estar incorporado en la cámara interna para que no haya contacto con la cámara externa, ya que no debe haber transmisión del sonido alguna. Para ello, son necesarios uno o más tanques de oxígeno dentro de la cámara para el abastecimiento, ya que no se puede tomar oxigeno desde el exterior, esto implicaría conexiones entre ambas cámaras que daría lugar a la transmisión del sonido, para evitar eso, ambos sistemas deben estar separados y asilados entre sí.

El sistema de aire acondicionado proporciona aire en la cámara que, de tal manera, se pueda respirar garantizando el confort y la seguridad de los integrantes.

En la Figura 9 se puede apreciar un sistema básico de presurización [4].



(a) Sistema de presurización y aire acondicionado (adaptado de Jarrin Campoverde [4])



(b) Gráfico esquemático del sistema de presurización (adaptado de Jarrin Campoverde [4])

Figura 9: Sistema de presurización de una aeronave.

8. ENSAMBLAJE FINAL Y PRUEBAS

Inserción de la Cámara Interna: La cámara interna se suspende dentro de la externa.

Conexión del Sistema de Levitación: Los cables y el sistema de control se conectan.

Evacuación: Se realiza el proceso de vacío.

Activación del Sistema de Levitación: Una vez que el vacío sea adecuado, se activa el sistema de levitación magnética para suspender la cámara interna.

Pruebas acústicas: Se realizan pruebas exhaustivas para medir la atenuación del sonido, tanto con la cámara interna suspendida como con cualquier otra configuración de prueba, esto incluye generadores de sonido y micrófonos de precisión.

En la Figura 10 y Figura 11 se muestra el diseño final de las cámaras integradas donde se aprecia el sistema de presurización en la cámara interna, el sistema de generación de vacío en la cámara externa, los amortiguadores y una puerta de ingreso doble sellada para ambas cámaras.

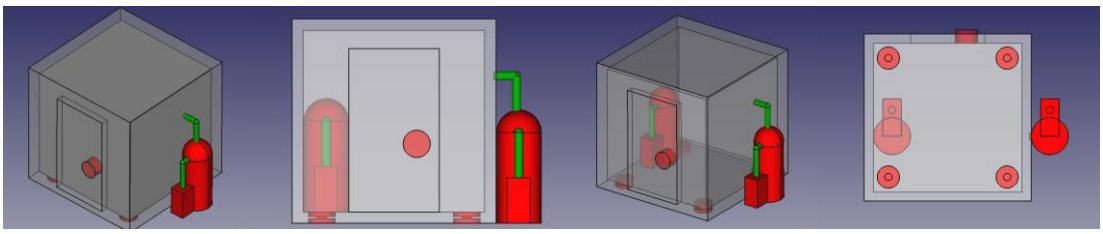


Figura 10: Diseño final de la cámara aislante.

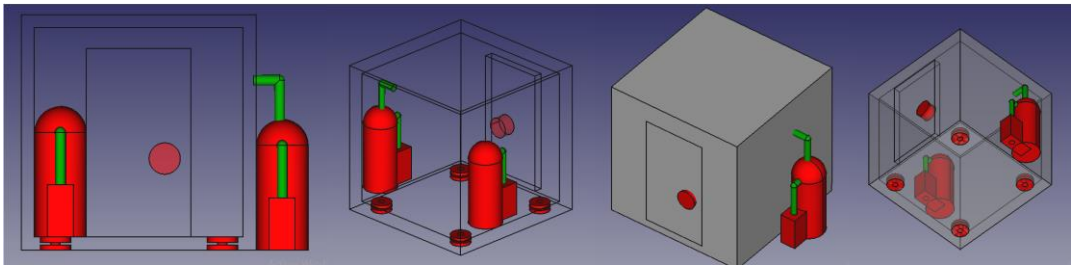


Figura 11: Cámara aislante, diferentes vistas.

9. CONCLUSIONES

El diseño de la cámara aislante presentada combina principios de ingeniería acústica [3], vacío [1] y levitación magnética [2] para alcanzar un nivel de aislamiento significativamente superior al de estructuras convencionales. La incorporación de materiales rígidos y sellados herméticos, junto con un sistema de suspensión sin contacto [2], permite eliminar las principales vías de transmisión del ruido. Si bien la complejidad técnica de la fabricación implica desafíos en cuanto a mecanizado, control electrónico y mantenimiento del vacío, el resultado ofrece una herramienta de gran valor para entornos donde el control del sonido es crítico. En conclusión, la propuesta representa un avance viable y prometedor en el desarrollo de sistemas de aislamiento acústico de alta precisión.

10. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de Buenos Aires y a la carrera de Ingeniería Electrónica por la formación recibida por sus docentes, la difusión del evento y el marco académico que posibilitó la realización de este trabajo. Se reconoce el acompañamiento y las sugerencias durante la cursada, que fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Finalmente, se agradece a la AdAA por el espacio de difusión, fomentar la investigación y brindar la posibilidad de difundir este aporte en el ámbito de la acústica.

REFERENCIAS

[1] R. Vega, “El ABC de las bombas industriales de vacío”, 2023.

[2] Z. Qadir, A. Munir, T. Ashfaq, H. S. Munawar, M. A. Khan y K. Le, “A prototype of an energy-efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport”, *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 4 ,2021.

[3] J. L. Ordóñez, “Física del sonido”, *Revista Digital de ACTA (patrocinada por CEDRO)*, pp. 1-36, 2022.

[4] D. F. Jarrin Campoverde, G. S. Inca Yajamín, R. C. Bautista Zurita, E. A. Arévalo Rodríguez y M. A. Arellano Reyes, “Implementación del sistema de presurización y aire acondicionado, mediante información técnica del manual de mantenimiento ata 21, en el simulador de la aeronave Boeing 737-800 perteneciente a la Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE”, *Polo del conocimiento*, vol. 7, no. 4, pp. 1938-1955, 2022.
ISSN: 2550 - 682X DOI: 10.23857/pc.v7i4.3930.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Desarrollo del mapa de ruido ambiental del barrio Nueva Córdoba, de la ciudad de Córdoba

Pérez Villalobo, J. A.[†,1]; Lamas, M. F.[†]; Yebra, C. J.[†]; Romero, L. N. [‡]; Ramirez, C. E.[†]; Fernandez Vilca, M. S.[†]; Hinalaf, M. [‡]

[†] Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Córdoba(UTN-FRC), Ciudad de Córdoba

‡ Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Córdoba(UTN-FRC), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas(CONICET), Ciudad de Córdoba

[1] jorgeperezvillalobo@gmail.com

Resumen Los mapas de ruido ambiental en entornos urbanos muestran de forma gráfica y sencilla el grado de contaminación sonora que presenta un sector determinado, donde generalmente el tránsito vehicular es la principal fuente de emisión. En este trabajo se estudió la contaminación acústica de un sector con características residenciales/comerciales (específicamente el barrio Nueva Córdoba) de la ciudad de Córdoba –Argentina– donde a partir de los niveles sonoros relevados en diferentes puntos fijos de medición se desarrolló luego –con la ayuda del software de simulación sonora CadnaA– un mapa de ruido de toda el área. La zona de estudio posee una superficie de aproximadamente 1,3 km^2 y el horario analizado es el diurno. De los valores obtenidos en el mapa se infiere que prácticamente en la totalidad de las arterias analizadas los niveles sonoros exceden los máximos recomendados por la Organización Mundial de la Salud para este tipo de contaminante.

Palabras clave: contaminación sonora, ruido urbano, simulación acústica, tránsito vehicular.

Abstract Noise maps in urban environments graphically and simply display the level of noise pollution in a given area, where vehicular traffic is generally the main source of emissions. This paper studied noise pollution in a residential/commercial area (specifically the Nueva Córdoba neighborhood) in the city of Córdoba, Argentina. Based on the noise levels recorded at different fixed measurement points, a noise map of the entire area was developed –with the help of CadnaA sound simulation software. The study area covers an area of approximately 1.3 km^2 and is analyzed during the daytime. The values obtained on the map indicate that noise levels exceed the maximum recommended by the World Health Organization for this type of pollutant on virtually all of the arteries analyzed.

Keywords: noise pollution, urban noise, acoustic simulation, vehicular traffic.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación sonora, definida como la presencia de ruidos molestos o perjudiciales para la salud y el bienestar humano, constituye hoy uno de los principales problemas ambientales en zonas urbanas densamente pobladas [1]. En particular, se considera que niveles de presión sonora excesivos generan efectos adversos tales como alteraciones del sueño, cambios de comportamiento, estrés, alteraciones del sistema cardiovascular (como el incremento en la presión sanguínea, elevación del ritmo cardíaco y la vasoconstricción), pérdida auditiva y disminuciones del rendimiento cognitivo, entre otros [2]-[6].

En virtud de esta problemática, a través de la Directiva 2002/49/CE [7], la comunidad europea insta a los municipios y comunas que posean una población superior a los 100.000 habitantes, a la elaboración de mapas estratégicos de ruido y en base a estos desarrollar planes de acción para la disminución de los niveles de contaminación sonora.

Los mapas de ruido se elaboran a partir del parámetro nivel sonoro continuo equivalente ponderado A (LAeq), dado que la sensación de molestia del ruido percibida por el individuo posee una buena correlación con este descriptor.

El trazado del mapa de ruido requiere de la medición de los niveles sonoros en posiciones fijas sobre el área de estudio y de la modelización acústica de la zona mediante software específico. De esta forma el empleo de aplicaciones informáticas de predicción sonora optimiza notablemente los tiempos de desarrollo. La modelización de la zona implica la selección de un modelo de fuente sonora y otro de propagación acústica en el medio. Ante la falta de un modelo de ruido de tráfico local, se tomaron como referencia los utilizados en estudios anteriores [8],[9].

Este trabajo tiene por objetivo describir acústicamente, a través de su mapa de ruido, un sector particular de la ciudad de Córdoba –como lo es el barrio de Nueva Córdoba– caracterizado por ser una zona altamente residencial, con muy importante presencia de actividad comercial, de ocio y también hospitalaria.

2. METODOLOGÍA

En primer lugar se definió específicamente el sector a analizar, quedando conformado por la totalidad del barrio Nueva Córdoba. Luego se determinó estratégicamente una serie de puntos de medición que fuese lo más representativa posible del área. Para posteriormente y aplicando el software de simulación sonora CadnaA realizar el modelado acústico-arquitectónico. Por último, se introdujo en este modelado el valor de los niveles sonoros relevados in situ, de manera de obtener un mapa de ruido basado en mediciones reales.

2.1 Área de estudio

La superficie del área analizada es de 1,3 km^2, encontrándose delimitada por las arterias: Av. Vélez Sarsfield, Bv. Arturo Illia/Bv. San Juan, Av. Leopoldo Lugones, Av. Los Nogales, y calle Venezuela (ver Figura 1). El número de habitantes en el sector es de aproximadamente 37055 personas, de acuerdo a los datos relevados en el Censo Nacional 2010 [10].

Desde sus comienzos este barrio se caracterizó por tratarse de un área netamente residencial, con arterias de mucha circulación vehicular como lo son: Av. Vélez Sarsfield, Av. Hipólito Yrigoyen, Bv. Illia/Bv. San Juan, Av. Manuel Estrada/Av. Pueyrredón, Av. Chacabuco, Av. Los Nogales, Av. Leopoldo Lugones/Av. Ambrosio Olmos. En estas se concentra además una destacada actividad comercial. Asimismo, todo el sector ha experimentado en los últimos años un cambio muy importante en su arquitectura, encontrándose numerosos edificios de departamentos residenciales de hasta 30 plantas (principalmente de estudiantes universitarios, por su cercanía a la Ciudad Universitaria que colinda al Sur) que conviven con escasas edificaciones tradicionales de una y dos plantas. Igualmente es importante mencionar que existen varios centros de salud de gran envergadura, y cuantiosos locales de ocio (bares, restaurantes y discotecas), presentándose como fuentes adicionales de flujo vehicular en el sector.

2.2 Relevamiento

En toda el área se efectuaron mediciones distribuidas en 70 puntos fijos, de manera que los niveles relevados sean representativos del comportamiento del ruido generado por el tráfico rodado, entendido como la principal fuente de contaminación sonora en zonas urbanas. Asimismo, se evitó medir el aporte de fuentes de ruidos eventuales, como lo son: obras en construcción, eventos sociales, entre otras. Cada punto de medición se ubicó a mitad de cuadra, reduciendo la influencia de las intersecciones entre arterias. Contemplando también que no existieran paradas de colectivos próximas al punto de medición, obviando así las contribuciones a los niveles sonoros provocados por aceleraciones/frenadas bruscas. También se tuvo en cuenta, en aquellas vías de escaso tránsito vehicular, que los puntos de medición estuviesen alejados al menos 100 m de intersecciones con arterias de elevado flujo vehicular.

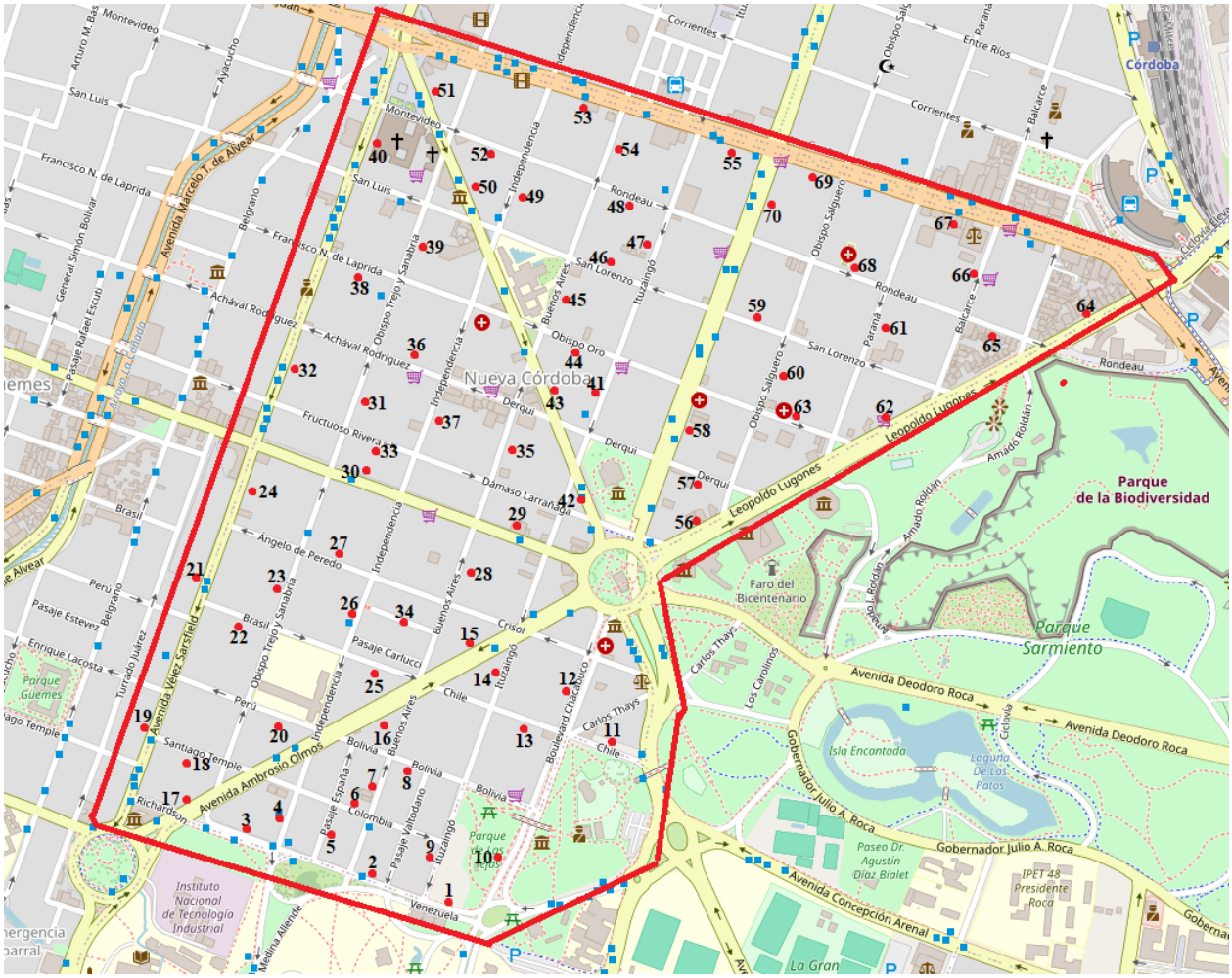


Figura 1: Planimetría del barrio con los puntos de medición (círculos rojos).

Para llevar a cabo las mediciones se empleó un medidor de nivel sonoro Brüel & Kjaer 2250. En cada punto se obtuvo un registro del nivel sonoro continuo equivalente con ponderación A (LAeq) durante un periodo de 15 minutos. Simultáneamente fue contabilizado el aforo vehicular, clasificándose a los vehículos en: automóviles y motocicletas (vehículos livianos), colectivos y camiones (vehículos pesados). El equipo de medición se situó a 20 cm del cordón de la vereda, y a una altura de 1,5 m del nivel del suelo, orientándose hacia el centro de la calzada.

Las mediciones se realizaron en días laborables (Lunes a Viernes) durante el horario diurno propuesto por la norma IRAM 4062-2:2025 [11], pero específicamente entre las 10:00 y las 18:00 hs, evitando así el horario pico de tránsito entre las 8:00 y 9:00 hs.

Adicionalmente en cada punto de medición se relevaron las características edilicias, como longitud, ancho y tipo de superficie de la calzada, ancho de veredas, altura promedio de las edificaciones a ambos lados de la calzada, entre otras. En aquellas cuadras donde no se efectuaron mediciones esta información se relevó a través de las aplicaciones Google Earth Pro y Google Street View.

Con toda esta información tanto acústica como arquitectónica se procedió luego al modelado computacional.

2.3 Modelado

En el presente trabajo se utilizó el software de simulación acústica CadnaA para realizar el modelado computacional del área. Este requiere seleccionar un modelo de fuente sonora (tráfico rodado), y otro

referido a la propagación acústica en el medio. Para el primero se escogió el propuesto por la norma alemana RLS-90 [12] y para el segundo el planteado por la ISO 9613-2:1996 [13].

En el modelo RLS-90 los niveles de potencia sonora de la fuente son estimados a partir de un parámetro definido como el valor de inmisión sonora a 25 m del centro del carril. En nuestro caso se utilizó como parámetro de entrada al modelo de fuente un nivel de presión sonora representativo del nivel medido in situ en cada punto de medición. Afectado por dos correctores que contemplan medir a distancias diferentes de 25 m del centro de calzada y reflexiones múltiples debido a la proximidad de obstáculos cercanos a la fuente. Este procedimiento de elaboración del mapa de ruido aseguró que los niveles simulados por el modelo coincidan con los realmente medidos.

Finalmente debe señalarse que se realizaron simplificaciones en el modelo arquitectónico elaborado en el software de simulación de acuerdo a las recomendaciones descriptas por el Grupo de Trabajo en la Evaluación de Exposición al Ruido de la Agencia Medioambiental Europea [14]. Se logró desarrollar toda el área en un modelo tridimensional. La grilla de cálculo utilizada poseía una resolución de 10x10 m, además se optó por una representación en áreas de ruido en intervalos de 5 dBA y empleando la escala de colores propuesta por la norma ISO 1996-2:1987 [15]. Es importante destacar que la malla de cálculo del mapa se fijó a una altura de 1,5 m, es decir, la misma altura a la que se efectuaron las mediciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis del mapa de ruido (Figura 2) se infiere que las arterias principales como lo son la Av. Vélez Sarsfield, Bv. Illia/Bv. San Juan, Av. Yrigoyen y Av. Lugones presentan niveles sonoros en el orden de 70 a más de 75 dBA (sin llegar en ningún tramo a alcanzar 80 dBA). En Av. A. Olmos, Av. Estrada/Bv. Pueyrredón y Bv. Chacabuco los niveles son algo menores, en torno a los 65 hasta 75 dBA. Todas estas arterias son coincidentes con los flujos vehiculares y velocidades más altas registradas en el sector como así también donde se encuentran los porcentajes más elevados de vehículos pesados, a causa de la presencia de varios recorridos del transporte público de pasajeros, asimismo son las que presentan mayor actividad comercial y de ocio.

Las demás arterias –calles interiores, más angostas, con menor flujo vehicular y velocidades algo menores– presentan niveles de entre 60 a casi 70 dBA, en su mayoría las ubicadas en el sector Central y Norte del barrio. Las interiores del sector Sur, donde el flujo vehicular es más escaso y prácticamente no existe circulación de vehículos pesados (sector netamente residencial), presentan niveles de 55 a poco más de 65 dBA.

Otra observación importante a destacar es la que muestran los espacios verdes (plazas, paseos y parques) del barrio, donde en el interior de los mismos los niveles se encuentran en torno a los 45 a 55 dBA (a excepción de la plaza España que es un centro neurálgico de distribución del tránsito por ser una rotonda que conecta varias avenidas).

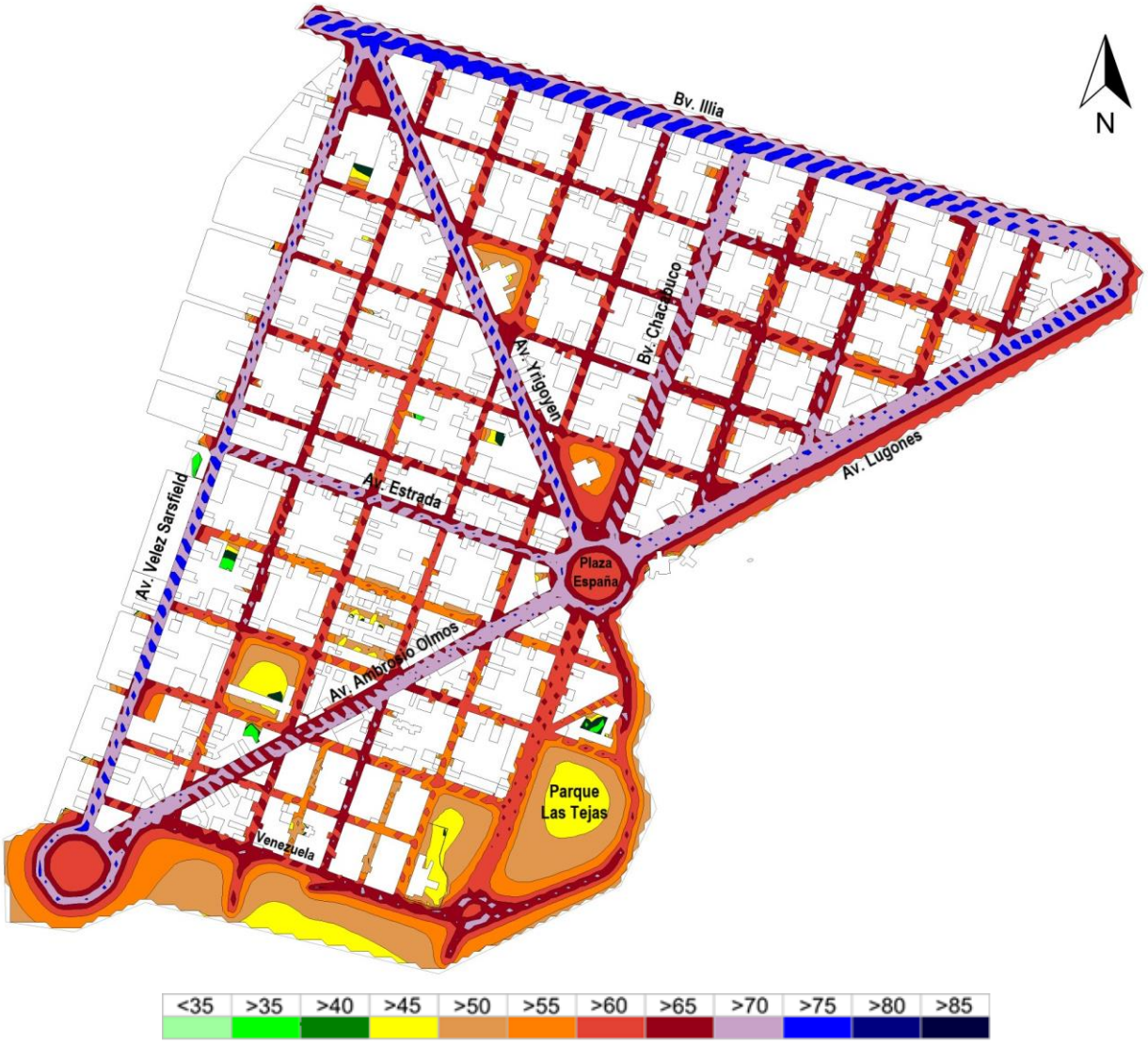


Figura 2: Mapa de ruido a 1,5 m de altura (en dBA).

4. CONCLUSIONES

Como conclusión general, se observa en el mapa de ruido que prácticamente en la totalidad de las arterias de la zona estudiada los niveles sonoros se encuentran por encima de los 55 dBA, valor de referencia para horario diurno en ambientes exteriores de vivienda, que produce en gran parte de la población una molestia acentuada, de acuerdo a los niveles guía planteados por la Organización Mundial de la Salud [4].

Sin embargo, en el interior de aquellos espacios verdes de grandes dimensiones –como el parque de Las Tejas– los niveles sonoros no llegan a superar los 55 dBA.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible gracias al financiamiento de la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SCyT) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) y el CINTRA (UE del CONICET) de la UTN-Facultad Regional Córdoba.

REFERENCIAS

[1] WHO, “Environmental noise guidelines for the European Region”, *World Health Organization*, 2018. https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563

[2] M. Basner, W. Babisch, A. Davis, M. Brink, C. Clark, S. Janssen, y S. Stansfeld, “Auditory and nonauditory effects of noise on health”, *The Lancet*, vol. 383, pp. 1325–1332, 2014.

[3] M. Basner, “Noise: what is to be done?” *Dtsch Arztebl Int*, vol. 116, no. 235, pp. 6, 2019. DOI: 10.3238/arztebl.2019.0235

[4] B. Berglund, T. Lindvall, y D. Schwela, “Guidelines for community noise”. *World Health Organization*, WHO, 1999.

[5] B. Shah, R. Raj, y P. Kaur, “Association of transportation noise with cardiovascular diseases”, *Clinical Cardiology*, vol. 47, e24275, 2024. https://doi.org/10.1002/clc.24275

[6] L. Yang, D. Gutierrez, y O. Guthrie, “Systemic health effects of noise exposure”, *Journal of Toxicology & Environmental Health*, Part B, vol. 27, no. 1, pp. 21–54, 2024. https://doi.org/10.1080/10937404.2023.2280837

[7] Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Evaluación y Gestión del Ruido Ambiental. *Diario oficial de la UE* L189/12-25, del 25 de Junio de 2002.

[8] H. Contrera, J. Perez Villalobo, R. Bodoira, y E. Cáceres, “Estudio de la contaminación sonora por ruido de tránsito en zona residencial de la ciudad de Córdoba”, en *Proceedings de XIII Congreso Argentino de Acústica*, 2015.

[9] J. Pérez Villalobo, H. Contrera, R. Bodoira, E. Cáceres, M. Hinalaf, y P. Kogan, “Contrastación de mapas de ruido mediante software de predicción acústica a partir de niveles sonoros relevados in situ vs. datos del flujo vehicular”, *Mecánica Computacional*, vol. 34, pp. 427–438, 2016.

[10] Censo Argentina, Resultados definitivos, 2010. https:www.indec.gov.ar

[11] IRAM 4062-2, *Ruidos molestos al vecindario. Parte 2-Método de medición y calificación en la vía pública y en exteriores linderos con la vía pública*. Argentina, 2025.

[12] RLS-90, “Richtlinien für den Lärmschutz an StraBen“, *Der Bundesminister Für Verkehr, Abteilung StraBenbau*, 1990.

[13] ISO 9613-2, *Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation*, 1996.

[14] European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN), “Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure”, *Position paper, Tech. Rep*. 004:pp. 1-129, 2007.

[15] ISO 1996-2. *Acoustics – Description and measurement of environmental noise – Part 2: Acquisition of data pertinent to land use*, 1987.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Comunicación acústica en vizcachas (*Lagostomus maximus*): ¿Alguien está golpeando la puerta?

Ruido, Evangelina[†,1]; Contarde, Cecilia Belén [†,2]; Piceda, Laura Berenice [‡,3]; Guzmán, Diego Alberto [†,4]; Vergara, Ramiro Oscar [‡,5]

[†] Instituto de Investigaciones Biológicas y Tecnológicas, UNC, CONICET.

[‡] Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo), Universidad Nacional de Quilmes, CONICET.

[1]evangelinaruido@mi.unc.edu.ar, [2]cecilia.contarde@mi.unc.edu.ar ,[3]laura.piceda@unq.edu.ar, [4]diego.guzman@unc.edu.ar, [5]ramiro.vergara@unq.edu.ar

Resumen Este trabajo presenta el primer registro acústico del comportamiento de golpeteo con las patas en la vizcacha (*Lagostomus maximus*). Estos animales pasan gran parte del día en madrigueras grupales subterráneas conocidas como "vizcacheras", pero por la noche realizan actividades en la superficie. Aunque la comunicación vocal de la especie ha sido estudiada recientemente, hasta ahora no se habían documentado señales acústicas no vocales. Durante observaciones en colonias silvestres de la provincia de Córdoba, se registraron dos eventos de golpeteo producidos por machos adultos en respuesta a estímulos externos, como vocalizaciones de alarma de otras vizcachas o de aves. Los golpes fueron detectados por micrófonos ubicados en el interior de las madrigueras, lo que demuestra que este comportamiento genera señales acústicas de baja frecuencia capaces de propagarse a través del sustrato y ser percibidas por las vizcachas dentro de la madriguera. Este hallazgo constituiría la primera evidencia documentada de una señal acústica no vocal en *L. maximus* y sugiere que el golpeteo podría cumplir una función comunicativa vinculada a la alerta o la coordinación grupal. El conocimiento del repertorio sonoro de la especie puede ser una herramienta fundamental para la implementación de planes de conservación de este roedor emblemático de las llanuras argentinas.

Palabras clave: *Lagostomus maximus*, bioacústica, golpeteo con las patas, mamífero fosorial

Abstract This study presents the first acoustic record of foot-drumming behavior in the plains vizcacha (*Lagostomus maximus*). These animals spend most of the day in underground communal burrows, known as “vizcacheras,” but are active on the surface at night. Although the species’ vocal communication has been recently studied, non-vocal acoustic signals had not been documented until now. During observations of wild colonies in Córdoba Province, two foot-drumming events were recorded in adult males in response to external stimuli, such as alarm calls from other vizcachas or birds. The stomps were detected by microphones placed inside the burrows, demonstrating that this behavior produces low-frequency acoustic signals capable of propagating through the substrate and being perceived by conspecifics within the burrow. These findings provide the first documented evidence of a non-vocal acoustic signal in *L. maximus* and suggest that foot-drumming may serve communicative functions related to alerting or group coordination. Knowledge of the species’ acoustic repertoire could be a valuable tool for the implementation of conservation strategies for this emblematic rodent of the Argentine plains.

Palabras clave: *Lagostomus maximus*, bioacustic, foot-drumming, fossorial mammal

1. INTRODUCCIÓN

La comunicación cumple un rol clave en la transmisión de información en el mundo animal. Los animales se comunican mediante señales sensoriales diversas (químicas, táctiles, visuales y acústicas) a través de las cuales informan aspectos relacionados con la territorialidad, receptividad sexual, presencia de depredadores y alimentos, entre otros [1].

En el caso de la comunicación acústica de los roedores, estos producen vocalizaciones en un amplio rango de frecuencias que van desde 200 a 100.000 Hz y que varían desde sonidos acústicamente simples hasta sonidos espectralmente complejos [2]. Además de emitir vocalizaciones, algunas especies de roedores se comunican mediante la producción de sonidos y vibraciones que generan, por ejemplo, con el golpeteo con las patas o con la cabeza sobre un sustrato [3] [4] [5].

Al igual que en otros órdenes de animales, en los roedores se ha observado una asociación positiva entre la complejidad del repertorio comunicacional y la complejidad de los comportamientos sociales. Es así que en las especies estudiadas de roedores sociales, se ha visto que desarrollan repertorios acústicos más complejos debido a la necesidad de coordinar actividades grupales y mantener la cohesión social. En contraste, las especies solitarias emiten vocalizaciones más esporádicas, generalmente vinculadas a interacciones agonísticas o reproductivas [6].

Para que la comunicación acústica sea efectiva, hay tres aspectos que deben interactuar correctamente: las cualidades espectrales de los sonidos emitidos, el rango de audición del receptor y las propiedades acústicas del entorno en el que ocurre la comunicación [7]. En ese sentido, la adaptación acústica de los roedores que viven en madrigueras subterráneas es fundamental para que la comunicación sea efectiva. Las madrigueras subterráneas presentan condiciones físicas distintivas, como alta humedad, baja ventilación y alta absorción del sonido, lo que afecta la calidad del aire y les confiere condiciones acústicas particulares [8]. Investigaciones sobre la transmisión del sonido han revelado que en las madrigueras subterráneas los sonidos de baja frecuencia (alrededor de 200 a 800 Hz) se transmiten más efectivamente que los sonidos de más alta frecuencia, mientras que en la superficie la transmisión sonora es efectiva en un rango amplio de frecuencias [8] [9].

Algunos estudios sugieren que la producción de sonidos y vibraciones mediante golpes al sustrato constituye un mecanismo efectivo para transmitir información hacia las madrigueras. Estas señales pueden propagarse a través de dos canales: el aire (acústico) y el sustrato (sísmico) [5]. Este tipo de comunicación ha sido documentado tanto en roedores solitarios como sociales. Entre los primeros, se mencionan roedores de hábitos subterráneos como la rata topo *Spalax ehrenbergi* que golpea con la cabeza la parte superior de la madriguera [3] [10], *Georychus capensis* [4], y fosoriales como la rata canguro *Dipodomys spectabilis* [11] que golpean con las patas sobre el suelo. En roedores sociales se ha observado este comportamiento en los grandes jerbos fosoriales *Rhombomys opimus* [12].

En *S. ehrenbergi*, las vibraciones sísmicas son detectadas presionando la mandíbula inferior contra el suelo, lo que permite transmitir las vibraciones al oído interno por conducción ósea [10] [13]. En cambio, otros roedores probablemente perciben los componentes acústicos de los golpes. Los experimentos realizados en madrigueras de *D. spectabilis* [11] demostraron que las señales generadas por el golpeteo con las patas se transmiten a través del sustrato y alcanzan la cámara subterránea con una intensidad mucho mayor (hasta 40 dB superior) que un sonido aéreo emitido a la misma distancia. Sin embargo, la evidencia sugiere que *D. spectabilis* no detecta directamente las vibraciones del suelo, sino que utiliza su oído altamente sensible a bajas frecuencias [14] [15] para escuchar el sonido aéreo irradiado por las paredes de la madriguera.

La vizcacha (*Lagostomus maximus*), un roedor herbívoro perteneciente a la familia Chinchillidae (Rodentia) nativo de Sudamérica, representa un caso interesante. Se trata de una especie de hábitos nocturnos y gregarios, que vive en grupos sociales de 6 a 33 individuos, conformados por hembras emparentadas, uno a tres machos adultos y juveniles [16] [17]. Cada grupo social comparte un sistema de madrigueras subterráneas comunales denominado “vizcachera” [18]. En general, cada vizcachera posee múltiples entradas (bocas) vinculadas a un sistema de túneles y cámaras interconectados [17].

Esta especie habita en madrigueras pero realiza actividades en la superficie, por lo que es clasificada como un roedor de hábitos fosoriales [2]. Son activas durante todo el año, mostrando actividad en el interior de sus cuevas durante el día y en el exterior de las vizcacheras desde el atardecer hasta el amanecer [17] [19] [20].

Los animales fosoriales como la vizcacha deberían ser capaces de emitir y percibir sonidos de manera eficiente tanto en el interior como en el exterior de sus madrigueras. Una investigación reciente

analizó espectralmente un amplio banco de registros audiovisuales obtenidos en el exterior de las vizcacheras [21], evidenciando la complejidad del repertorio vocal de la especie, con al menos diez tipos de vocalizaciones diferenciadas. Sin embargo, aún no se han realizado estudios acústicos en el interior de las madrigueras ni sobre señales acústicas no vocales producidas por las vizcachas. En este sentido, Contarde (2019) registró por primera vez el comportamiento "golpeteos al suelo" para la especie [20], caracterizado por movimientos alternados y rápidos de las extremidades posteriores, generalmente acompañados de la emisión de sonidos fuertes y estiramientos del cuello hacia adelante. No obstante, durante dichos registros audiovisuales no se obtuvieron registros de sonidos y/o vibraciones producidos por este comportamiento.

Históricamente, la vizcacha estuvo ampliamente distribuida en Argentina, en diversas ecorregiones que incluyen el Chaco Húmedo, Chaco Seco, Espinal, Monte de Llanuras y Mesetas, Pampa y Monte de Sierras y Bolsones [22]. Pese a ello, sus poblaciones se han visto amenazadas debido a la modificación de su hábitat, la caza y el comercio no controlado de su carne. En este contexto, aspectos como la comunicación acústica de la especie, son conocimientos esenciales que pueden contribuir al diseño de estrategias de conservación.

Por lo expuesto, el presente trabajo se enmarca en un estudio destinado a ampliar el conocimiento sobre la comunicación acústica de *Lagostomus maximus*. En este trabajo presentamos un registro inédito de golpeteo con las patas en vizcachas, observado en el exterior y detectado acústicamente dentro de la madriguera. Nuestro objetivo es describir este evento dentro del marco general de la comunicación acústica de la especie, aportando nuevos elementos para comprender las adaptaciones bioacústicas de la vizcacha frente al desafío de comunicarse y desarrollar estrategias antidepredatorias en dos entornos acústicos con diferentes cualidades (bajo tierra y en la superficie).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los estudios relacionados con este proyecto se realizaron sobre la misma colonia de vizcachas en la que se obtuvieron registros audiovisuales previos sobre la comunicación de la especie en el exterior de las madrigueras [20] [21].

2.1 Área de estudio y selección de vizcacheras

La colonia estudiada se encuentra en la Estancia Tres Estrellas, ubicada en el departamento de Punilla, en el centro de la provincia de Córdoba (900 msnm), Argentina, a 5 km de Cabalango, a 8,9 km de Villa Carlos Paz y a 37,7 km de Córdoba Capital en línea recta.

Dentro del área de estudio se seleccionaron tres vizcacheras al azar entre aquellas que poseían un mínimo de 4 bocas activas (identificadas por la presencia de heces frescas, huellas o signos recientes de excavación). Este tamaño de vizcachera incrementa las posibilidades de observar grupos sociales con individuos de ambos sexos y con todas las clases etarias representadas [23].

2.1.1 Instalación de equipos y toma de registros

Para el registro de sonidos producidos por la vizcacha, se utilizaron micrófonos Behringer ECM8000 calibrados (Calibrador Decibelímetros Nivel Sonoro Cem), conectados a una grabadora de audio Zoom H6.

Por vizcachera muestreada se instalaron 3 micrófonos todos ubicados en relación a una misma boca activa seleccionada al azar Dos micrófonos se colocaron en el interior de la madriguera, introducidos verticalmente desde la superficie a través de caños de PVC instalados mediante el uso de palas hoyadoras. Los caños se dispusieron de forma que su extremo coincida con el techo de los túneles, de modo que quedaran alineados con la sección superior del espacio de tránsito de los animales. Para asistir en esta tarea se empleó un dispositivo autónomo equipado con una cámara con visión nocturna (Figura 1.A), que permitió inspeccionar visualmente el interior de los túneles, detectar posibles conexiones entre bocas activas y asegurar una correcta ubicación de los micrófonos. El primer micrófono se ubicó una distancia aproximada de 1 metro y el segundo a 2 metros de distancia hacia el

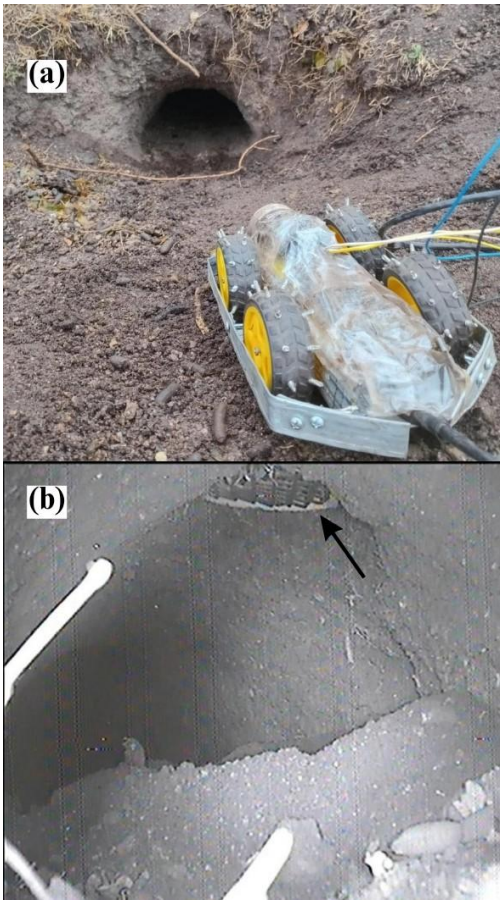
interior de la madriguera, medidos desde la entrada. La disposición final de los micrófonos dependió de las limitaciones relacionadas con la complejidad estructural de la vizcachera (curvas pronunciadas, angostamientos, bifurcaciones, profundidad y longitud de los túneles). Por encima de los micrófonos internos se colocó material aislante hasta el nivel de superficie con el fin de minimizar variaciones térmicas en el interior de la vizcachera y reducir la captación de sonidos o vibraciones transmitidos por el PVC.

El tercer micrófono se colocó en el exterior de la madriguera, frente a la boca activa seleccionada (Figura 1.B).

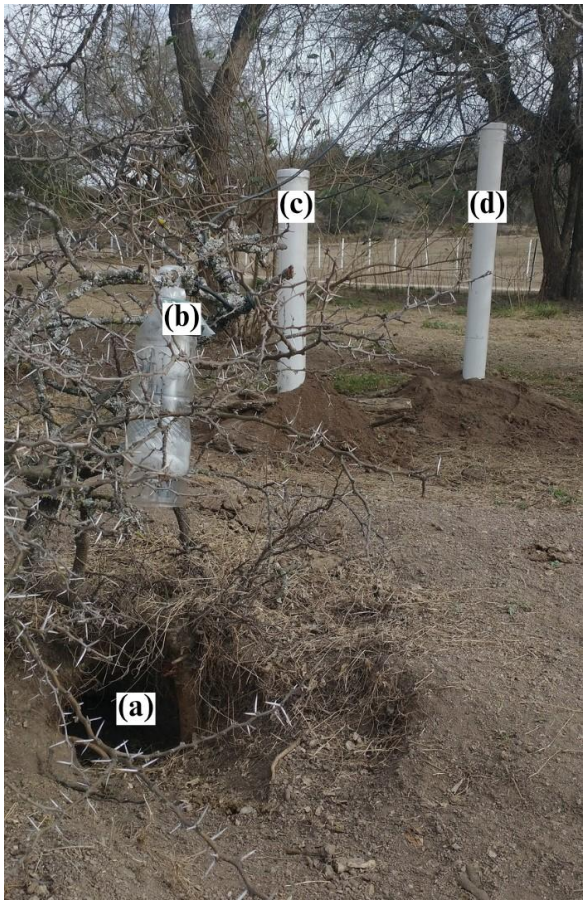
Simultáneamente con los registros sonoros, se llevaron a cabo registros audiovisuales continuos del exterior de las madrigueras, mediante cámaras Ezviz C3TN con visión nocturna. Estas cámaras se ubicaron de manera que permitan monitorear las entradas de las madrigueras en la que se colocaron los micrófonos.

Transcurridas 48 hs desde la instalación de los equipos en la vizcachera, lo que permite una ambientación de las vizcachas a los objetos noveles colocados en su entorno [18], se iniciaron en forma simultánea las grabaciones de audio (en formato .wav con una frecuencia de muestreo de 44,1 kHz y 24 bits de profundidad) y video.

Para cada vizcachera se realizaron registros continuos de 24 horas de duración.



A. **(a)** Dispositivo con cámara incorporada, utilizado para acceder al interior de la madriguera y asegurar la correcta instalación de los micrófonos internos. **(b)** Foto del interior de la madriguera, capturada por la cámara. En la parte superior se observa el extremo del caño de PVC (indicado con una flecha) por el cual se introduce el micrófono.



B. Disposición de los micrófonos. **(a)** Boca activa por la cual se ingresó al túnel donde se colocaron los micrófonos; **(b)** micrófono externo dentro de una botella plástica como protección; **(c)** caño PVC que contiene el primer micrófono interno, ubicado a 1 metro de la boca activa; **(d)** caño PVC que contiene el segundo micrófono interno, ubicado a 2 metros de la boca activa.

Figura 1. Equipos e instalación de micrófonos.

4. RESULTADOS

Se obtuvieron un total de 48 horas de registros de audio y video correspondientes a dos vizcacheras activas pertenecientes a diferentes grupos sociales.

Además de las vocalizaciones ya conocidas para la especie, se registraron dos eventos acústicos asociados al comportamiento de "*golpeteos al suelo*", ambos en la misma vizcachera, por lo que se atribuyen al mismo grupo social.

En el primer registro un individuo macho adulto ubicado aproximadamente a 0,5 metros de la boca monitoreada (Figura 2) fue observado manipulando una rama con la boca cuando se registró una vocalización de alarma tipo *"pi-chung"* [21] distante. Al escucharla, el individuo soltó la rama y realizó una serie de golpeteos con las patas posteriores, acompañados por vocalizaciones tipo "*ronquido*" [21] y orientando la cabeza hacia la dirección de la vocalización de alarma. La duración total del evento fue de 2,8 s, tras lo cual el individuo retomó la manipulación de la rama. No se registró la presencia de otros individuos durante el evento.

Figura 2. Foto obtenida a partir de uno de los videos capturados por la cámara durante el primer evento. Se observa un individuo macho adulto (señalado con la flecha) que realiza el golpeteo y emite vocalizaciones. Se encuentra situado a 0,5 metros de la boca activa **(a)** utilizada para el ingreso al túnel donde se colocaron los micrófonos: el primero de ellos **(c)** situado a 1,50 metros de la boca y a 40 centímetros de profundidad; el segundo micrófono interno **(d)** a 2,50 metros de la boca activa y a 35 centímetros de profundidad. El micrófono externo **(b)** situado sobre la boca. En el borde inferior izquierdo aparece la información de fecha y hora registrada por la cámara.

En los registros acústicos (Figura 3), el micrófono externo captó las vocalizaciones tipo *"pi-chung"* y "*ronquido*" [21]. Mientras que, los micrófonos internos registraron principalmente los componentes de baja frecuencia correspondientes al golpeteo. En estos últimos también se detectaron leves componentes de las vocalizaciones, aunque muy atenuadas y no perceptibles auditivamente durante la reproducción de los audios. Las señales asociadas al golpeteo presentaron frecuencias inferiores a 2.000 Hz, con un pico de energía en 86 Hz, lo que indica un componente dominante de baja frecuencia.

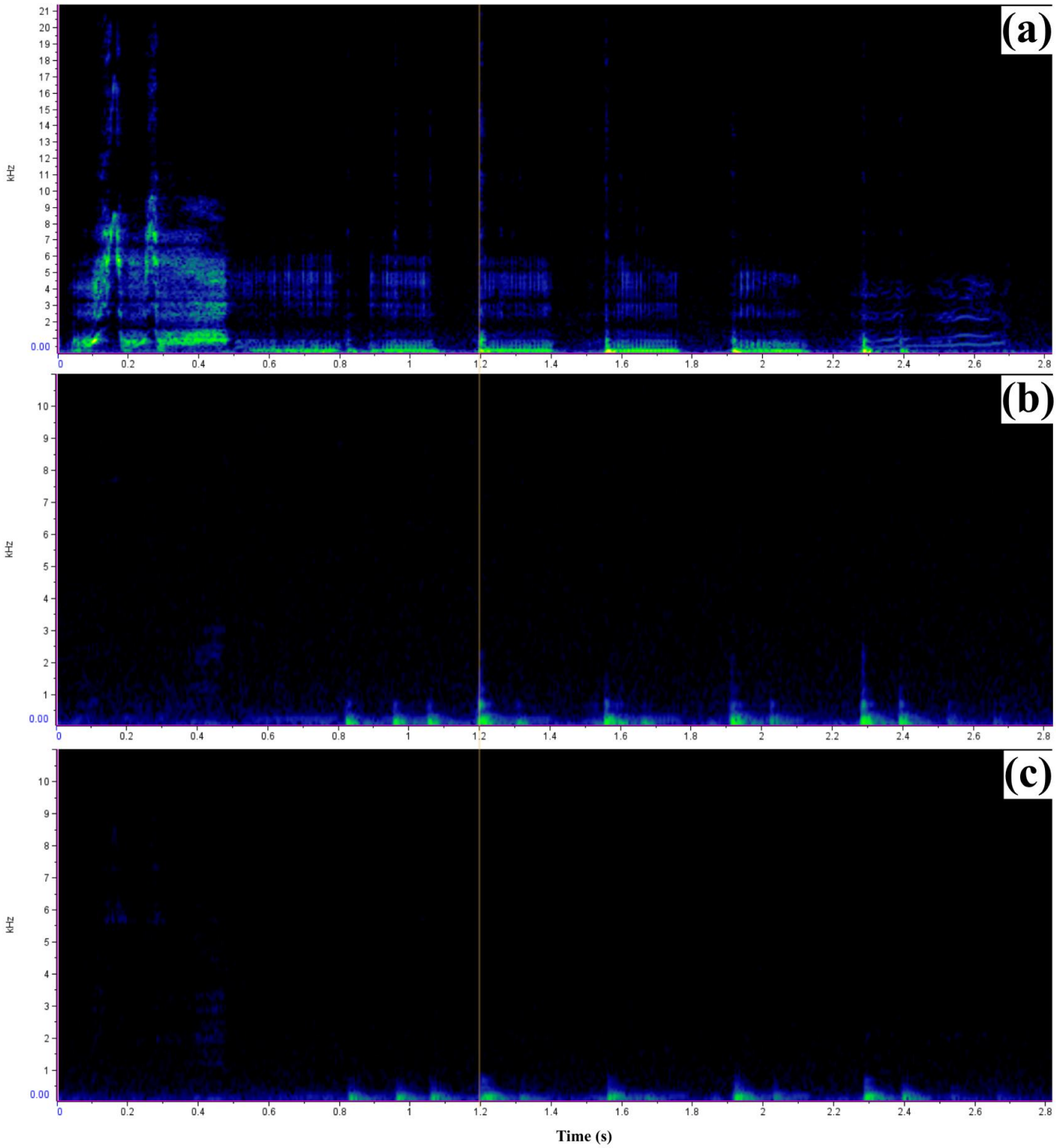


Figura 3. Registros acústicos correspondientes al primer evento de golpeteo con las patas. **(a)** Espectrograma correspondiente al micrófono externo ubicado sobre la boca de la madriguera. Al inicio del registro se observa el espectro correspondiente a una vocalización de alarma tipo "*pi-chung*" [21], emitida por un individuo que no se encontraba dentro del campo visual de la cámara. A partir de los 5 segundos, se registran las vocalizaciones tipo "*ronquido*" [21] emitidas por el individuo observado en la cámara, coincidiendo con la ejecución del golpeteo. Hacia el final del espectrograma se distingue una vocalización tipo "*armónico*" [21], también atribuida a un individuo no visible en la grabación. **(b)** Espectrograma correspondiente micrófono interno situado a 1 metro de la boca. Se observa la señal correspondiente al golpeteo con las patas con la energía concentrada en bajas frecuencias (< 2.000 Hz). Además, se detectan componentes atenuados de las vocalizaciones. **(c)** Espectrograma correspondiente al micrófono situado a 2 metros de la boca. Se observa una señal similar al anterior (b), con menor energía en general.

En un segundo evento, un individuo macho adulto ubicado en una boca contigua a la utilizada para la instalación de los micrófonos (Figura 4) fue observado acicalándose. Al percibir vocalizaciones de teros (*Vanellus chilensis*), el individuo giró en la dirección de las mismas y comenzó a realizar golpeteos con las patas posteriores, acompañados por movimientos de cola y la emisión de vocalizaciones. Simultáneamente, se registró un quejido agudo distante. La duración total del comportamiento fue de 5 segundos. Tras el golpeteo, el individuo emitió vocalizaciones tipo "*ronquido*" [21] y permaneció inmóvil observando hacia la dirección de los quejidos.

En los registros visuales se detectó la presencia de otro individuo a cierta distancia, aunque su comportamiento no pudo determinarse debido a la baja resolución y la distancia de la cámara.

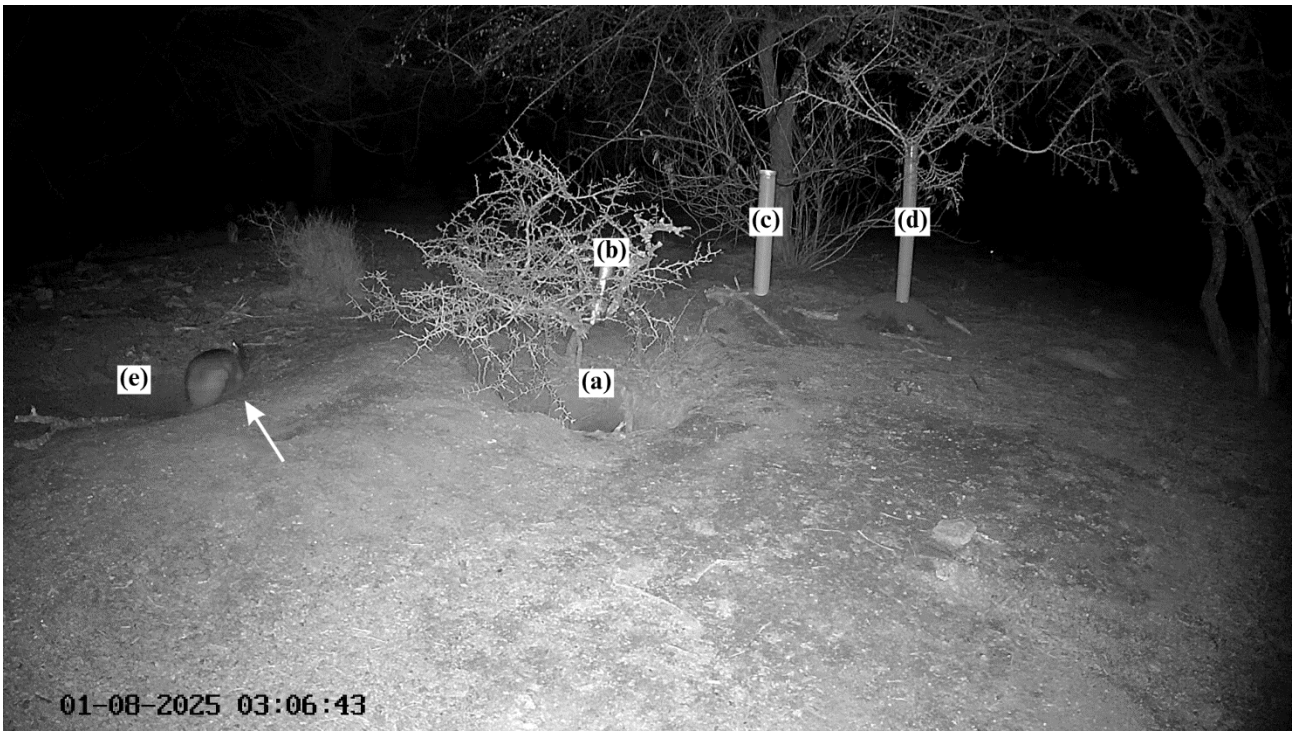


Figura 4. Foto obtenida a partir de uno de los videos capturados por la cámara durante el segundo evento. Se observa un individuo macho adulto (señalado con la flecha) que realiza el golpeteo y emite vocalizaciones. Se sitúa sobre una boca activa contigua (e) y no conectada directamente con la boca activa (a) sobre la cual se ubicó el micrófono externo (b) y por la que se ingresó para la instalación de los micrófonos internos (c) y (d). En el borde inferior izquierdo aparece la información de fecha y hora registrada por la cámara.

En los registros acústicos (Figura 5), el micrófono externo captó las vocalizaciones de los teros, del individuo que realiza el golpeteo al suelo y los quejidos agudos provenientes de otro. En este caso, las vocalizaciones emitidas por la vizcacha, se superpusieron con las vocalizaciones de los teros, impidiendo su identificación precisa. Mientras que los micrófonos internos registraron los sonidos compatibles con el golpeteo. Estas señales presentaron frecuencias inferiores a 1.000 Hz, con una frecuencia dominante de 86 Hz. A diferencia del primer evento, los golpeteos fueron realizados con un ritmo más rápido, algo que se evidenció tanto en el video como en el registro sonoro. Los micrófonos internos también captaron componentes de las vocalizaciones, aunque atenuadas y no discernibles auditivamente.

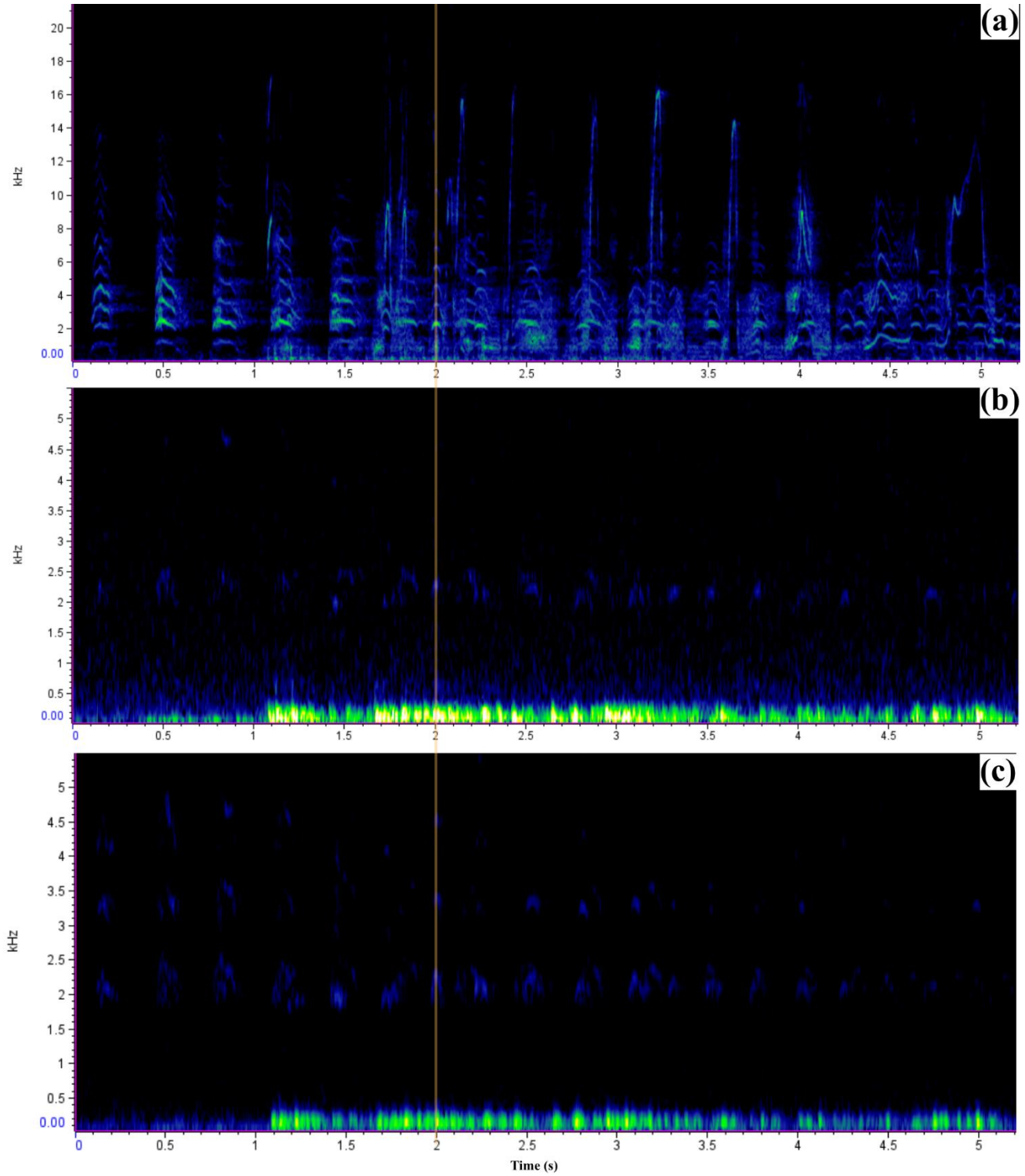


Figura 5. Registros acústicos correspondientes al segundo evento de golpeteo con las patas. **(a)** Espectrograma correspondiente al registro del micrófono externo situado sobre la boca. Se observan las vocalizaciones de los teros, un quejido agudo distante, y vocalizaciones de vizcacha superpuestos espectralmente. **(b)** Espectrograma correspondiente al micrófono situado a 1,50 metros de la boca. Se registran señales compatibles con el golpeteo con las patas, con energía concentrada por debajo de 1.000 Hz. Además, se detectan débiles componentes de las vocalizaciones. **(c)** Espectrograma correspondiente al micrófono situado 2,50 metros de la boca. Se observa un patrón similar al anterior (b) con menor energía en general.

4. DISCUSIÓN

El registro del golpeteos al suelo con las patas constituiría la primera evidencia documentada de una señal acústica no vocal en *Lagostomus maximus*. Este comportamiento, comúnmente denominado *foot-drumming*, ha sido descrito para otras especies de roedores con hábitos subterráneos o fosoriales, donde cumple múltiples funciones comunicativas, como advertencia frente a depredadores, defensa territorial o coordinación de interacciones sociales y reproductivas [5]. En *L. maximus*, los eventos registrados se produjeron como respuesta ante estímulos externos, como la emisión de vocalizaciones de alarma de vizcachas o vocalizaciones de aves (*Vanellus chilensis*). Esto sugiere que el golpeteo con las patas podría estar vinculado a señales de alerta o comunicación intragrupal.

Los golpes rítmicos producidos con las patas generan tanto ondas acústicas como vibraciones transmitidas a través del suelo, lo que permite que la señal sea percibida por distintos canales sensoriales. Aunque en el presente estudio no se realizaron mediciones directas de vibraciones del sustrato, el hecho de que estos golpes hayan sido detectados por micrófonos ubicados bajo tierra, a aproximadamente 2 metros del punto de emisión (correspondiente al segundo evento registrado), constituye una evidencia sólida de que las vizcachas generan golpes con la fuerza suficiente para producir ondas capaces de propagarse eficazmente a través del suelo. De acuerdo con los resultados de las investigaciones en madrigueras de la rata canguro fosorial *Dipodomys spectabilis* [10], las señales generadas por los golpes pueden transmitirse de forma más eficiente a través del suelo, alcanzando las cámaras subterráneas con intensidades significativamente mayores a sonidos aéreos emitidos a la misma distancia. En este sentido, las grabaciones obtenidas dentro de las madrigueras de vizcachas, sugieren que este comportamiento podría generar energía acústica capaz de propagarse a través del sustrato, con potencial para ser percibida por las vizcachas dentro del sistema de túneles como mínimo en un radio de 2 metros.

En conclusión, este estudio amplía el conocimiento sobre el repertorio acústico de *L. maximus* al documentar por primera vez un comportamiento de golpeteo con las patas, con características compatibles con señales acústicas y posiblemente sísmicas. Futuras investigaciones deberían incorporar sensores de vibración (geófonos o acelerómetros) para evaluar la propagación de las ondas a través del sustrato. Además, deberían evaluarse los mecanismos de percepción empleados por la especie y las posibles respuestas de vizcachas, tanto dentro como fuera de las vizcacheras. Comprender la función comunicativa de estas señales permitirá avanzar en el conocimiento de la ecología sensorial de la vizcacha y aportar herramientas relevantes para su conservación.

REFERENCIAS

[1] R. A. Suthers, W. T. Fitch, R. R. Fay, y A. N. Popper, Eds., Vertebrate Sound Production and Acoustic Communication, vol. 53. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

[2] M. L. Dent, R. R. Fay, y A. N. Popper, Eds., Rodent Bioacoustics, vol. 67. New York: Springer International Publishing, 2018.

[3] G. Heth, E. Frankenberg, A. Raz, y E. Nevo, “Vibrational communication in subterranean mole rats (*Spalax ehrenbergi*),” Behav. Ecol. Sociobiol., vol. 21, pp. 31–33, 1987.

[4] P. M. Narins, O. J. Reichman, J. U. Jarvis, y E. R. Lewis, “Seismic signal transmission between burrows of the Cape mole-rat, *Georychus capensis*,” J. Comp. Physiol. A, vol. 170, pp. 13–21, 1992.

[5] J. A. Randall, “Evolution and function of drumming as communication in mammals,” Am. Zool., vol. 41, no. 5, pp. 1143–1156, 2001.

[6] L. A. Ebensperger y L. D. Hayes, Sociobiology of Caviomorph Rodents: An Integrative Approach. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.

[7] J. W. Bradbury y S. L. Vehrencamp, Principles of Animal Communication, 2nd ed. Sunderland, MA: Sinauer, 2011

[8] G. Heth, E. Frankenberg, y E. Nevo, “Adaptive optimal sound for vocal communication in tunnels of a subterranean mammal (*Spalax ehrenbergi*),” Experientia, vol. 42, pp. 1287–1289, 1986.

[9] S. Lange, H. Burda, R. E. Wegner, P. Dammann, S. Begall, y M. Kawalika, “Living in a stethoscope: burrow-acoustics promotes auditory specializations in subterranean rodents,” Naturwissenschaften, vol. 94, pp. 134–138, 2007.

[10] R. Rado, M. Himelfarb, B. Arensburg, J. Terkel, y Z. Wollberg, “Are seismic communication signals transmitted by bone conduction in the blind mole rat?” Hear. Res., vol. 41, pp. 23–30, 1989.

[11] J. A. Randall y E. R. Lewis, “Seismic communication between the burrows of kangaroo rats, Dipodomys spectabilis,” J. Comp. Physiol., vol. 181, pp. 525–531, 1997.

[12] Jan A. Randall, Evolution and Function of Drumming as Communication in Mammals, American Zoologist, Volume 41, Issue 5, October 2001, Pages 1143–1156

[13] R. Rado, J. Terkel, y Z. Wollberg, “Seismic communication signals in the blind mole-rat (*Spalax ehrenbergi*): electrophysiological and behavioral evidence for their processing by the auditory system,” J. Comp. Physiol., vol. 183, pp. 503–511, 1998.

[14] D. B. Webster y W. Plassmann, “Parallel evolution of low-frequency sensitivity in old world and new world desert rodents,” en The Evolutionary Biology of Hearing, R. R. Fay and A. N. Popper, Eds. New York: Springer, 1992, pp. 633–636.

[15] D. M. Lay, “Anatomy of the heteromyid ear,” en Biology of the Heteromyidae, H. H. Genoways and J. H. Brown, Eds. Shippensburg, PA: American Society of Mammalogists, 1993, vol. 10, pp. 270–290.

[16] A. C. Llanos y J. A. Crespo, “Ecología de la vizcacha (*Lagostomus maximus maximus* Blainv.) en el Nordeste de la Provincia de Entre Ríos,” Rev. Investig. Agrícolas, vol. 6, pp. 289–378, 1952.

[17] L. C. Branch, “Intergroup and intragroup spacing in the plains vizcacha, *Lagostomus maximus*,” J. Mammal., vol. 74, no. 4, pp. 890–900, 1993a.

[18] J. D. Giulietti y J. H. Veneciano, “La vizcacha,” Informativo Rural, E.E.A. INTA San Luis, vol. 2, no. 7, pp. 8–10, 2005.

[19] L. C. Branch, “Social organization and mating system of the plains vizcacha (*Lagostomus maximus*),” J. Zool., vol. 229, no. 3, pp. 473–491, 1993b.

[20] C. B. Contarde, Caracterización espacial y patrones de actividad en una colonia de vizcachas (*Lagostomus maximus*) de la zona serrana del centro de Córdoba, Tesis de Licenciatura, 2019.

[21] L. B. Piceda, R. O. Vergara, C. B. Contarde, y D. A. Guzmán, “Estudio preliminar sobre la estructura del repertorio vocal en vizcachas (*Lagostomus maximus*),” en XVIII Congreso Argentino de Acústica, AdAA 2023, 2023.

[22] M. R. Álvarez y R. A. Martínez, “Suborden Histricognathi (Tullberg, 1899),” en Mamíferos de Argentina: sistemática y distribución, R. M. Barquez, M. M. Díaz, y R. A. Ojeda, Eds. Tucumán: Sociedad Argentina para el Estudio de los Mamíferos, 2006.

[23] L. C. Branch, D. Villareal, A. Sosa, M. Pessino, M. Machicote, P. Lerner, P. Borraz, M. Urioste, y J. L. Hierro, “Estructura de las colonias de vizcacha y problemas asociados con la estimación de la densidad poblacional en base a la actividad de las vizcacheras,” Mastozool. Neotrop., vol. 1, no. 2, pp. 135–142, 1994.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Bandas de atenuación de vibraciones en estructuras finitas localmente resonantes con amortiguamiento

Cortínez, V. H.[†‡§,1]; **Dominguez, P. N.** [†‡,2]; **Stoklas, C. I.** [†,3]

[†] Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada (CIMTA), 11 de abril 461, Bahía Blanca, Argentina.

‡ Universidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina

[§] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnica, CONICET

[1] vcortine@hotmail.com, [2] pdoming@uns.edu.ar, [3] stoklas@frbb.utn.edu.ar

Resumen En este trabajo se estudia, desde un punto de vista unificado, la aparición de bandas de atenuación en estructuras finitas (barras, vigas y placas) localmente resonantes que consideran el efecto del amortiguamiento de los resonadores distribuidos. Tales bandas de atenuación se identifican como los rangos de frecuencia donde todos los factores de amplificación modal permanecen por debajo de la unidad, lo que garantiza una respuesta estructural global reducida. Este enfoque permite explorar el rol del amortiguamiento de los resonadores en la formación y extensión de las bandas de atenuación. Se presenta la formulación teórica y algunos ejemplos numéricos para ilustrar la teoría.

Palabras clave: estructuras localmente resonantes, bandas de atenuación, vibraciones, amortiguamiento.

Abstract In this work, the occurrence of attenuation bands in finite structures (bars, beams, and plates) with locally resonant characteristics is investigated from a unified perspective, accounting for the effect of damping in the distributed resonators. These attenuation bands are defined as the frequency ranges in which all modal amplification factors remain below unity, thereby ensuring a globally reduced structural response. The proposed framework enables the examination of the role of resonator damping in the formation and extension of attenuation bands. Theoretical developments are presented together with selected numerical examples to illustrate the approach.

Key words: locally resonant structures, attenuation bands, vibrations, damping.

1. INTRODUCCIÓN

Los metamateriales y metaestructuras elásticas con resonadores locales han adquirido gran relevancia en los últimos años debido a su capacidad para atenuar vibraciones mecánicas y ondas acústicas. Una forma común de lograr este comportamiento consiste en acoplar múltiples osciladores del tipo masa-resorte a una estructura soporte, como puede ser una viga o una placa [1].

Una de las propiedades más notables de estos sistemas es la aparición de bandgaps (BGs), entendidos como intervalos de frecuencia en los que la propagación de ondas se ve fuertemente suprimida. El estudio de la dinámica de tales configuraciones suele realizarse en el marco de estructuras idealizadas como infinitas, aplicando el formalismo de Bloch-Floquet [2].

El fenómeno de los BGs también puede analizarse desde otra perspectiva: el estudio de las vibraciones en estructuras finitas provistas de resonadores locales distribuidos espacialmente de manera regular. Este enfoque, introducido por Sugino *et al*. [3] para el caso de vigas en flexión, fue posteriormente ampliado hacia un marco unificado para estructuras unidimensionales y bidimensionales, abarcando vibraciones longitudinales y torsionales en barras, así como vibraciones transversales en vigas y placas, lo que permite una explicación detallada de la formación de bandgaps en sistemas finitos [4].

Tal teoría, en su formulación original, está limitada a configuraciones con resonadores idénticos, no amortiguados y dispuestos de manera cuasi periódica. Más tarde, El-Borgi *et al*. [5] extendieron este

planteo para el caso de vigas en flexión, incorporando más de un tipo de resonadores no amortiguados, distribuidos de forma regular. En este contexto demostraron la posibilidad de predecir explícitamente la aparición simultánea de dos bandgaps en la respuesta dinámica transversal al considerar dos tipos de resonadores. La teoría de Sugino *et al*. [4] también ha sido empleada para estudiar la formación de bandgaps en otras configuraciones estructurales análogas [6].

Un aspecto central en la evaluación de la capacidad de atenuación de las estructuras localmente resonantes es el papel del amortiguamiento interno de los resonadores. En el marco de la propagación de ondas en estructuras infinitas, Hussein y Frazier (2013) [7] mostraron que la introducción de un amortiguamiento pequeño en los resonadores distribuidos mejora notablemente la capacidad de disipación, introduciendo el concepto de meta-amortiguamiento. Más recientemente, Das, Bera Banerjee [8] analizaron la dispersión de ondas flexo-torsionales en vigas asimétricas de pared delgada con resonadores locales, demostrando que el amortiguamiento interno de los resonadores incrementa de manera significativa la efectividad de la atenuación.

En el presente trabajo se presenta una extensión de la teoría de Sugino *et al*. [4], para una clase general de estructuras finitas localmente resonantes, que permite incorporar tanto el efecto del amortiguamiento interno de los resonadores como la coexistencia de múltiples tipos de resonadores distribuidos regularmente.

Este enfoque se basa en analizar la respuesta modal forzada de la estructura localmente resonante. Se representa la respuesta como suma de modos de vibración libre asociadas a la estructura base (sin resonadores), y se identifican los factores de amplificación modal asociados a cada modo en función de la frecuencia de excitación y las características de masa, rigidez y amortiguamiento de los resonadores. Las bandas de atenuación se identifican como los rangos de frecuencia donde todos los factores de amplificación modal permanecen por debajo de la unidad, lo que garantiza una respuesta estructural global reducida. Este enfoque permite explorar el rol del amortiguamiento de los resonadores en la formación y extensión de las bandas de atenuación. Esto es especialmente útil en conjunto con una estrategia frecuentemente empleada para mejorar la eficiencia de materiales localmente resonantes consistente en el uso de varios resonadores con frecuencias locales ligeramente diferente: efecto “rainbow” [9].

La utilización de indicadores basados en los factores de amplificación modal resulta especialmente adecuada en las etapas de prediseño de sistemas de resonadores destinados al control de vibraciones de estructuras localmente resonantes finitas ya que tales indicadores resultan independientes de las características específicas de la estructura base así como de la carga externa.

Se presenta la formulación teórica y algunos ejemplos numéricos para ilustrar la teoría.

2. DINÁMICA DE UNA CLASE GENERAL DE ESTRUCTURAS LOCALMENTE RESONANTES

En esta sección se presenta la formulación teórica de una clase general de estructuras localmente resonantes. En 2.1 se muestran las ecuaciones diferenciales gobernantes del problema, en 2.2 se determina una solución general de tales ecuaciones en términos de autofunciones de la estructura base y en 2.3 se presentan los criterios para la determinación de bandgaps en el caso de resonadores sin amortiguamiento y bandas de atenuación en el caso de resonadores amortiguados.

2.1 Formulación

Siguiendo a Sugino *et al.* [4], se considera aquí la dinámica de una clase bastante general de estructuras localmente resonantes. Es decir, estructuras acopladas a un conjunto de resonadores espacialmente distribuidos de manera regular. Entre los problemas abarcados por esta formulación pueden mencionarse: a) vibraciones longitudinales de barras, b) vibraciones torsionales de barras, c) vibraciones transversales de vigas, d) vibraciones transversales de membranas y e) vibraciones transversales de placas. Algunos de los esquemas correspondientes se muestran en la Figura 1. Se consideran tales

estructuras finitas concebidas como una sucesión de N_s celdas Ω_c (Ω_c representa la longitud de la celda para barras y/o vigas y el área para membranas y/o placas), sujetas a cargas armónicas (Figura 1).

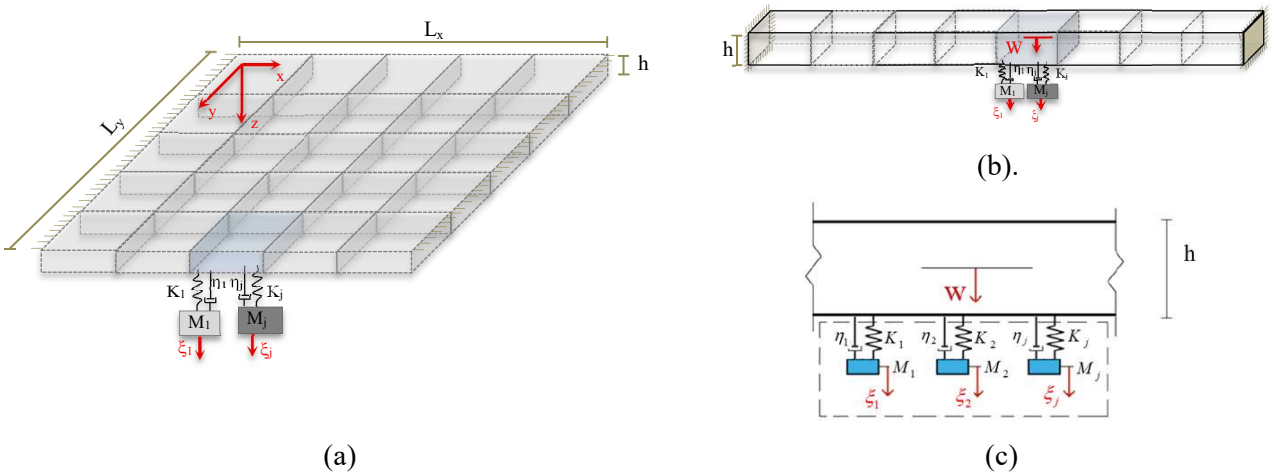


Figura 1: Estructuras bajo estudio, (a) Esquema de una placa localmente resonante, (b) Esquema de una viga localmente resonante y (c) Esquema de resonadores en cada celda

Cada celda contiene un sistema de N_r resonadores paralelos de rigidez K_j y masa M_j. Se asume que las N_s celdas tienen idéntica configuración de resonadores y que la distancia entre ellas es muy pequeña en comparación con las dimensiones globales de la estructura. Esta característica hace posible considerar, de manera aproximada, que los resonadores se encuentran distribuidos espacialmente de manera continua sobre la estructura base (homogeneización). Los problemas dinámicos mencionados para tales tipologías estructurales pueden expresarse de manera unificada de la siguiente manera:

$$L[w] + m\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q(\mathbf{x})e^{i\omega t} - \sum_j m\alpha_j \frac{\partial^2 \xi_j}{\partial t^2} \tag{1}$$

$$\frac{\partial^2 \xi_j}{\partial t^2} + 2\eta_j\omega_j\frac{\partial \xi_j}{\partial t} + \omega_j^2\xi_j = \omega_j^2 w + 2\eta_j\omega_j\frac{\partial w}{\partial t} \quad , \quad j = 1,2,...,N_r \tag{2}$$

donde w es el desplazamiento de un punto de la estructura, m es la masa unitaria de la estructura base (masa/unidad de longitud en el caso de vigas y masa/unidad de área en el caso de placas), $q(\mathbf{x})$ es la carga distribuida, α_j corresponde a la masa del resonador j-ésimo dividido por la masa de la estructura base en la celda y se define como $\alpha_j = M_j / m\Omega_c$. L es el operador diferencial lineal autoadjunto de rigidez (en el apéndice se muestran los operadores estructurales contemplados), η_j y ω_j ($\omega_j = \sqrt{K_j / M_j}$) corresponden a la razón de amortiguamiento y a la frecuencia local del resonador, respectivamente, ξ_j es el desplazamiento del resonador j-ésimo y ω es la frecuencia de excitación. A diferencia de las ecuaciones propuestas por Sugino *et al.* [4], en éstas, se consideran varios tipos de resonadores por celda que pueden poseer amortiguamiento.

Las ecuaciones (1) y (2) están sujetas a las correspondientes condiciones de borde del problema.

2.2 Análisis modal de estructuras localmente resonantes

La respuesta compleja de la estructura localmente resonante sometida a la carga armónica considerada se puede expresar en términos de los modos de vibración (libre) W_n correspondientes a la frecuencia natural ω_n de la estructura base (sin resonadores):

$$w = \sum_n A_n W_n \mathrm{e}^{i\omega t}, \qquad \xi_j = \sum_n B_{jn} W_n \mathrm{e}^{i\omega t} \tag{3}$$

donde W_n verifica:

$$L[W_n] - m\omega_n^2 W_n = 0 \tag{4}$$

A partir de la ecuación de vibración libre (4), siendo L un operador autoadjunto lineal, se puede demostrar que para las condiciones de borde habituales las autofunciones son ortonormales:

$$\int_\Omega W_n W_m d\Omega = \delta_{nm} \tag{5}$$

donde $\delta_{mn} = 1$ si $n = m$ y $\delta_{mn} = 0$ si $n \neq m$. Sustituyendo (3) en (2) se obtiene:

$$\sum_n B_{jn} W_n \left[-\omega^2 + 2\eta_j \omega_j (i\omega) + \omega_j^2 \right] = \sum_n A_n W_n \left[\omega_j^2 + 2\eta_j \omega_j (i\omega) \right] \tag{6}$$

Luego, pueden obtenerse las constantes B_{jn} como:

$$B_{jn} = A_n \left(\gamma_{R_j} + \gamma_{I_j} i \right) \tag{7}$$

donde se ha definido:

$$\gamma_{R_j} = \frac{\omega_j^2 \left(\omega_j^2 - \omega^2 \right) + \left(2\eta_j \omega_j \omega \right)^2}{\left(\omega_j^2 - \omega^2 \right)^2 + \left(2\eta_j \omega_j \omega \right)^2}, \qquad \gamma_{I_j} = \frac{-2\eta_j \omega_j \omega^3}{\left(\omega_j^2 - \omega^2 \right)^2 + \left(2\eta_j \omega_j \omega \right)^2} \tag{8}$$

Reemplazando ahora (3) en (1), multiplicando por W_m, integrando en el dominio de la estructura (Ω) y considerando (7), se llega a:

$$\begin{gathered} \sum_n A_n \left[\int_\Omega W_m L[W_n] d\Omega - m\, \omega^2 \int_\Omega W_m W_n d\Omega \right] = \\ \int_\Omega q W_m d\Omega + \sum_j \sum_n m\, \alpha_j \omega^2 \left(\gamma_{R_j} + i\gamma_{I_j} \right) \int_\Omega W_n W_m d\Omega \end{gathered} \tag{9}$$

Luego, teniendo en cuenta (4) y (5), la ecuación anterior puede reescribirse como:

$$A_n \left[m\left(\omega_n^2 - \omega^2 \right) - \sum_j \omega^2 \alpha_j m \left(\gamma_{R_j} + i\gamma_{I_j} \right) \right] = \int_\Omega q W_n d\Omega \tag{10}$$

Entonces, los coeficientes complejos A_n se obtienen de la siguiente manera:

$$A_n = \frac{\int_\Omega q W_n d\Omega}{m \left[\left(\omega_n^2 - \omega^2 \right) - \sum_j \alpha_j \omega^2 \left(\gamma_{R_j} + i\gamma_{I_j} \right) \right]} \tag{11}$$

A partir de (11), (7), (8) y (3) se determina la respuesta estructural compleja. Para obtener la componente física de la respuesta se debe tomar la parte real de la respuesta compleja obtenida.

2.3 Bandas de atenuación

La energía cinética media de la estructura es proporcional a la siguiente expresión:

$$E_c = \int_\Omega \frac{\int_0^T \left(\mathrm{Re}(w)\right)^2 dt}{T} d\Omega \tag{12}$$

donde $T = 2\pi / \omega$ es el período y *Re* la parte real. Sustituyendo w dada por la expresión (3) en (12) y operando, puede expresarse la energía cinética media como $E_c = \frac{1}{2}\sum_n |A_n|$ donde, a partir de (11) el módulo de A_n se puede expresar en la forma:

$$|A_n| = \frac{\left|\int_\Omega q W_n d\Omega\right|}{m\omega_n^2} Fa_n \tag{13}$$

donde se ha definido el factor de amplificación modal Fa_n como:

$$Fa_n = \frac{1}{\sqrt{\left(1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\left(1+\sum_j \alpha_j \gamma_{R_j}\right)\right)^2 + \left(\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \sum_j \alpha_j \gamma_{I_j}\right)^2}} \tag{14}$$

Debe observarse que este factor depende únicamente de las frecuencias naturales de la estructura base, de las características de los resonadores y de la frecuencia de excitación. Como se puede apreciar en (13), dada una estructura base y una carga *q*, la única forma de reducir la energía cinética media de la estructura base es disminuyendo los factores de amplificación mediante una elección adecuada de los parámetros de los resonadores. De hecho, si todos los factores de amplificación resultan menores que 1, la energía cinética media, y entonces la respuesta estructural global, se atenúan.

Si se considera, como caso particular, el amortiguamiento nulo ($\eta_j = 0$) para todos los resonadores, la expresión (14) se reduce a la siguiente:

$$Fa_n = \frac{1}{\left|1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\left(1+\sum_j \frac{\alpha_j}{\left(1-\left(\omega/\omega_j\right)^2\right)}\right)\right|} \tag{15}$$

Se observa que esta magnitud es menor que 1 independientemente del valor de ω_n si el factor del segundo término del denominador es menor que cero, es decir si:

$$1+\sum_j \frac{\alpha_j}{\left(1-\left(\omega/\omega_j\right)^2\right)} < 0 \qquad n = 1,2,\ldots \tag{16}$$

ya que en tal caso, el denominador de (15) es mayor que 1. De esta forma, la expresión (16) permite definir los BGs como aquellos rangos de frecuencia para los que todos los factores de amplificación son menores que 1 (respuesta estructural atenuada):

$$Fa_n < 1 \qquad n = 1,2,\ldots \tag{17}$$

Debe notarse que la expresión que figura en el miembro izquierdo de la desigualdad (16) corresponde al cociente entre la masa unitaria equivalente de la estructura localmente resonante y la masa unitaria de la estructura base [10], [11]:

$$\frac{m_{eq}}{m} = 1 + \sum_j \frac{\alpha_j}{\left(1 - \left(\omega / \omega_j\right)^2\right)} \tag{18}$$

De hecho, en las referencias [10] y [11] se indica que, en el caso de vigas sometidas a flexión, el BG se obtiene cuando $m_{eq} < 0$. Entonces, la determinación numérica de BGs se puede obtener fácilmente mediante un barrido en ω identificando los rangos donde se cumple la expresión (16). En este sentido, el enfoque propuesto es más simple y general que el inicialmente presentado por Sugino *et al.* [4].

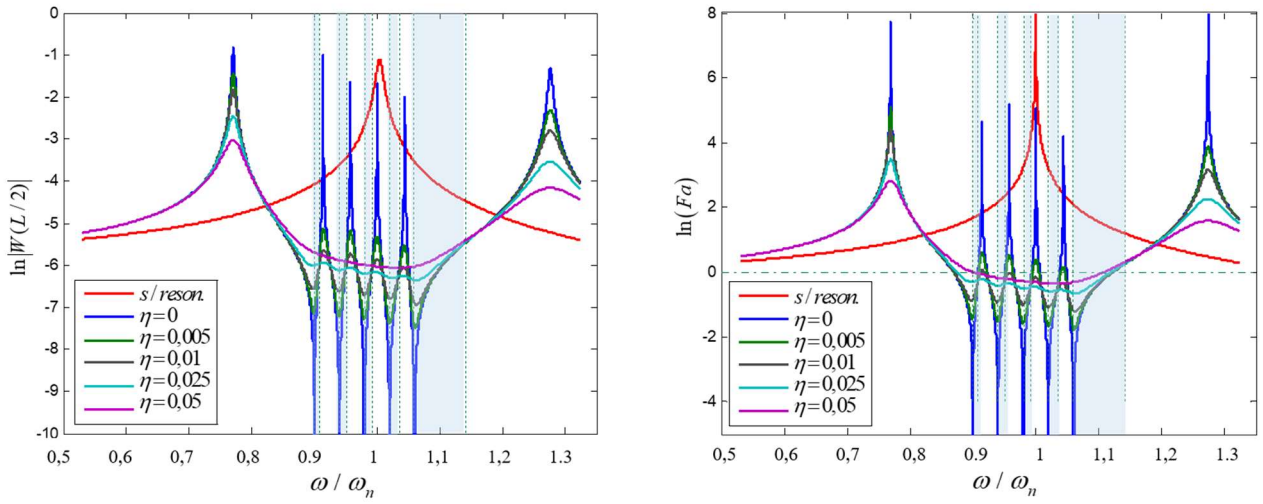
Considerando ahora amortiguamiento en los resonadores, es posible ampliar el rango de frecuencias donde la respuesta estructural es atenuada. Para ello deben seleccionarse las correspondientes razones de amortiguamiento de los mismos para minimizar los factores de amplificación (14) en cercanía de la frecuencia de interés. Usualmente, esta última está en cercanía de alguna de las frecuencias naturales ω_n de la estructura base, con lo cual el factor de amplificación del modo correspondiente es dominante y, entonces, las razones de amortiguamiento η_j de los resonadores se seleccionan de manera tal que dicho factor sea el mínimo posible. Tal rango de frecuencias, ampliado con respecto al BG, se denomina en este trabajo "banda de atenuación".

En resumen, el diseño de las características del sistema de resonadores de una estructura localmente resonante, a efectos de lograr una atenuación de la respuesta estructural en cercanía de una frecuencia de interés ω_T, generalmente cercana a una de las frecuencias naturales ω_n, se realiza seleccionando las razones de masa y de rigidez de los resonadores para provocar BGs de acuerdo a (16) en cercanía de ω_T y luego, seleccionar las razones de amortiguamiento η_j correspondientes, que minimicen el apropiado factor de amplificación Fa_n (14). Debe notarse que tal procedimiento resulta independiente de la carga aplicada, de las condiciones de borde y del tipo de estructura. De esta manera, el análisis completo de la estructura localmente resonante es necesario solamente en la verificación final o para diseñar otros aspectos estructurales ajenos al sistema de resonadores (resistencia, rigidez).

3. EJEMPLOS NUMÉRICOS

En primer lugar, se consideran las vibraciones flexionales de una viga de sección I, doblemente simétrica, acoplada a 5 resonadores por celda. Las propiedades de la estructura sin resonadores (estructura base o huésped) son las siguientes: longitud L=2 m, altura h=0,1 m, ancho del ala b=0,04 m, espesor=0,006 m, módulo de elasticidad E=4,5x10^{10} Pa, módulo de elasticidad transversal G=1,8x10^{10} Pa, densidad $\rho = 2650\,\text{kg/m}^3$ y masa unitaria $m = \rho A$ (A es el área de la sección transversal). Se pretende atenuar la respuesta flexional forzada, para una carga uniforme armónica $q\cos(\omega t)$ (q=1000 N/m) actuando en la dirección del alma de la sección transversal, donde la frecuencia de excitación ω puede estar en cercanía de la frecuencia natural del sistema base $\omega_n = 377{,}65$ rad/s. Para ello se adoptan 5 resonadores en cada celda distribuidos periódicamente a lo largo de la viga. Las correspondientes frecuencias locales para los tipos de resonadores considerados se expresan como $\omega_j = \omega_A + (j-1)\Delta\omega$ (j=1,..,5), donde $\omega_A = 0{,}9\,\omega_n$ y $\Delta\omega = 15\,\text{rad/s}$. En todos los casos se mantiene constante la relación de masa de los resonadores $\alpha_j = 0.05$. Se consideran diferentes razones de amortiguamiento η_j. Esta estrategia, consistente en la utilización de resonadores con frecuencias ligeramente diferentes busca ampliar el rango efectivo de atenuación, lo que solo se puede conseguir con la ayuda del amortiguamiento interno [9].
Se ha obtenido la respuesta en frecuencia para esta estructura utilizando el método de elementos finitos. En la Figura 2 (a) se muestra la respuesta en frecuencia, en escala logarítmica, de la deflexión en el punto medio de la luz de la viga para varias razones de amortiguamiento. También se muestra la respuesta de la viga base (sin resonadores). Asimismo, se han determinado los BGs correspondientes (utilizando la expresión 16) que aparecen como zonas sombreadas. Se observa que la respuesta de la estructura base se modifica sustancialmente con la incorporación de los resonadores. En el caso de

resonadores sin amortiguamiento ($\eta_j = 0$) se puede observar que la respuesta es fuertemente atenuada en los BGs. Sin embargo, aparecen picos resonantes en los rangos de frecuencia entre BGs. Estos últimos pueden atenuarse contemplando amortiguamiento en los resonadores. Si el amortiguamiento resulta muy bajo, $\eta_j = 0{,}005$, los picos resonantes siguen teniendo una amplitud importante. En el otro extremo, si el amortiguamiento es alto, $\eta_j = 0{,}05$, la respuesta en los picos de resonancia se atenúan pero se incrementa en los BGs, es decir, se anula el efecto localmente resonante. En este caso, la mejor opción de atenuación corresponde a valores intermedios de η_j, entre 0,01 y 0,025. De esta manera, la región comprendida entre el inicio del primer BG y la finalización del último BG corresponde a una banda de atenuación. En la Figura 2 (b) se muestran los BGs obtenidos así como la respuesta en frecuencia, en escala logarítmica, para el factor de amplificación. Se indica también en una línea de trazos el valor nulo para $\ln(F_a)$ a fin de identificar sus valores negativos, ya que indican atenuación de la respuesta. Se puede ver que este gráfico es cualitativamente muy similar al anterior. De la observación del mismo se desprende que, de igual manera que en el caso anterior, los resonadores con razones de amortiguamiento entre 0,01 y 0,025 serían los más adecuados y podrían permitir la banda de atenuación que se indicó previamente. Es decir, que el análisis del factor de amplificación permite obtener las mismas conclusiones respecto al diseño de resonadores que el análisis dinámico completo, aunque de manera más simple desde el punto de vista computacional.

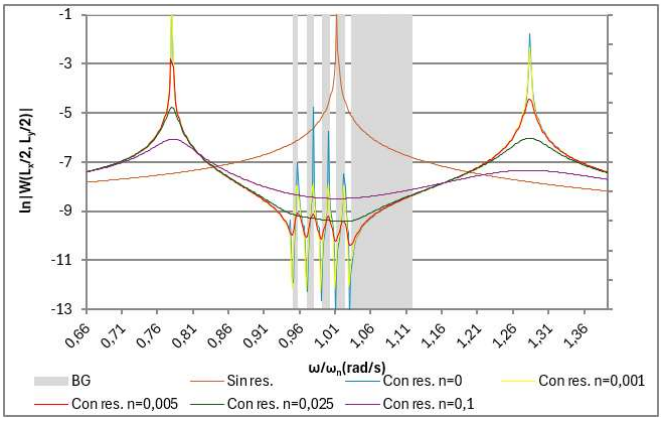


(a) (b)

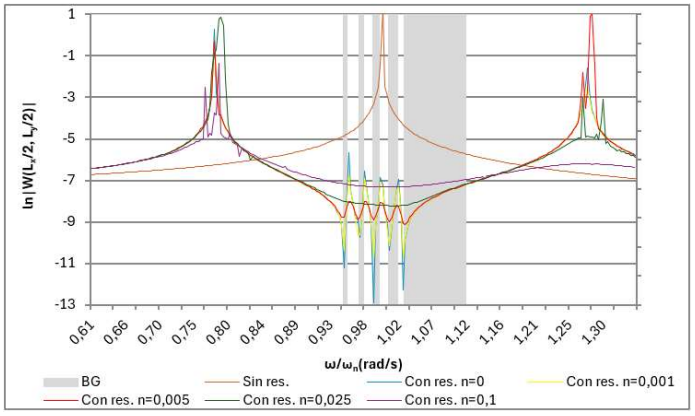
Figura 2: Respuesta estructural en cercanías de la frecuencia ω=377,65 rad/s usando 5 resonadores, a) desplazamiento máximo de la viga simplemente apoyada con carga distribuida, b) factor de amplificación modal.

Como segundo ejemplo, se consideran las vibraciones forzadas transversales de una placa rectangular empotrada de lados Lx=Ly=1.36 m y espesor h=0,01 m, acoplada a un sistema de 5 resonadores masa-resorte en cada celda, distribuidos de manera uniforme. Las características del material de la placa huésped (sin resonadores) son: módulo de elasticidad E=2x10^{11} Pa, módulo de elasticidad transversal G=0.769x10^{11} Pa y densidad ρ= 7800 kg/m^3 (m=ρh). La frecuencia fundamental de esta placa es ω_n=302 rad/s. La razón de masa de los resonadores es $\alpha_j = 0{,}05$, las frecuencias locales vienen dadas por $\omega_1 = 0{,}95\omega_n$, $\omega_2 = 0{,}97\omega_n$, $\omega_3 = 0{,}99\omega_n$, $\omega_4 = 1{,}01\omega_n$ y $\omega_5 = 1{,}03\omega_n$. Se ha obtenido la respuesta en frecuencia, tanto de la estructura base como de la localmente resonante, para una carga armónica uniforme $q\cos(\omega t)$ (q=1000 Pa) mediante el método de elementos finitos. Asimismo, se han determinado los BGs de acuerdo a la expresión (16). Se han obtenido respuestas para diferentes valores de η_j. En la Figura 3 (a) se muestra la respuesta en frecuencia del desplazamiento en el punto medio de la placa. De igual manera que lo analizado para la viga, es posible apreciar que los resonadores sin

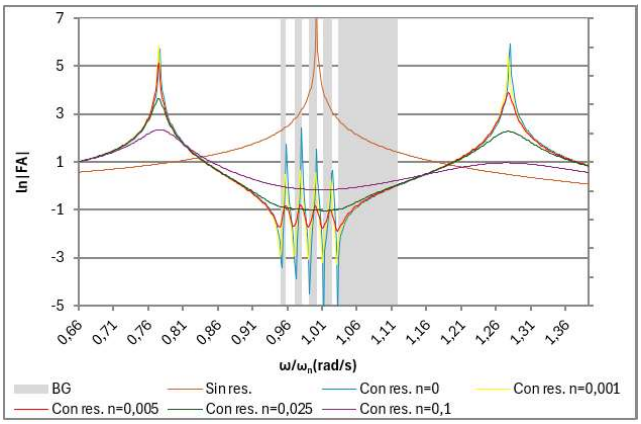
amortiguamiento inhiben resonancias dentro de los BGs, aunque no lo pueden hacer en los espacios entre BGs. Para poder atenuar la respuesta en éstos, debe recurrirse al amortiguamiento, y las razones de amortiguamiento adecuadas corresponden a valores intermedios η_j del orden de 0,005. En la Figura 3 (c) se muestra la respuesta en frecuencia en término del factor de amplificación en escala logarítmica $\ln(F_a)$. Como se puede apreciar, el gráfico es cualitativamente similar y permite obtener las mismas conclusiones relativas a la selección de la razón de amortiguamiento.



(a) Desplazamiento máximo para una placa empotrada (frecuencia ω_{n1}=302 rad/s).



(b) Desplazamiento máximo para una placa simplemente apoyada (frecuencia ω_{n1}=164 rad/s).



(c) Factor de amplificación modal.

Figura 3: Respuesta en frecuencia en cercanías de la frecuencia objetivo para estructuras tipo placa localmente resonante usando 5 resonadores.

Como último ejemplo, se analiza una placa con las mismas características que la anterior pero con los bordes simplemente apoyados. En tal caso, la frecuencia de interés es la natural $\omega_n = 164\,\text{rad/s}$. La correspondiente respuesta en frecuencia, obtenida por el método de elementos finitos, se muestra en la Figura 3 (b), muy similar a la del ejemplo anterior. La correspondiente respuesta en frecuencia en función del factor de amplificación, para $\omega_n = 164\,\text{rad/s}$ es idéntica a la del caso anterior. Tales gráficos de Fa_n resultan idénticos, a pesar de corresponder a diferentes frecuencias, porque están representados en términos de ω/ω_n.

4. CONCLUSIONES

Se ha presentado una teoría general para determinar los BGs en una clase general de estructuras localmente resonantes considerando varios tipos de resonadores distribuidos regularmente. Asimismo, este modelo permite estimar las bandas de atenuación de vibraciones que corresponden a una ampliación de los BGs que resulta posible mediante la introducción de amortiguamiento interno en los resonadores.

La teoría presentada permite el diseño de las características del sistema de resonadores utilizando un indicador muy simple que depende únicamente de las características de los mismos. Los experimentos numéricos llevados a cabo, algunos de los cuales se presentan aquí, muestran la conveniencia del enfoque presentado para diversas aplicaciones de ingeniería acústica, mecánica y civil.

5. CONCLUSIONES

Los autores desean agradecer el apoyo recibido de las instituciones de pertenencia: Universidad Tecnológica Nacional, Universidad Nacional del Sur y CONICET. Asimismo, se agradece el apoyo recibido de la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación mediante el financiamiento del proyecto PICT 2021-I-A-01262.

REFERENCIAS

[1] H. Sun, X. Du, P. Frank Pai, "Theory of metamaterial beams for broadband vibration absorption", *J. Intell. Mater. Syst. Struct*., vol 21, p.p.1086–1101, 2016.

[2] M. I. Hussein, M. J. Leamy, M. Ruzzene, "Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress, and future Outlook", *Applied Mechanics Reviews*, vol. 66, nro. 4, p. 040802, 2014.

[3] C. Sugino, S. Leadenham, M. Ruzzene y A. Erturk, "On the mechanism of bandgap formation in locally resonant elastic metamateriales", *Journal of Applied Physics*, vol. 120, nro. 13, p. 134501, 2016.

[4] C. Sugino ,Y. Xia ,S. Leadenham , M. Ruzzene y A. Erturk, "A general theory for bandgap estimation in locally resonant metastructures", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 406, nro. 13, p.p. 104-123, 2017.

[5] S. El-Borgi, R. Fernandes, P. Rajendranc, R. Yazbecka, J.G. Boydb y D.C. Lagoudas, "Multiple bandgap formation in a locally resonant linear metamaterial beam: Theory and experiments", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 488, p. 115647, 2020.

[6] C. Sugino, Y. Xia, S. Leadenham, M. Ruzzene y A. Erturk, "Merging mechanical and electromechanical bandgaps in locally resonant metamaterials and metastructures", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 406, p.p. 104-123, 2017.

[7] M. I. Hussein y M. J. Frazier, "Metadamping: An emergent phenomenon in dissipative metamaterials", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, nro. 20, p.p. 4767-74, 2020.

[8] A. Das, K. K. Bera, y A. Banerjee, "Emergence of metadamping in thin-walled mono-symmetric metabeam: Homogenization approach", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 283, p. 109621, 2024.

[9] V. H. Cortínez y P. N. Dominguez, "Dinámica de vigas Vlasov localmente resonantes con resonadores graduados", *Mecánica Computacional*, vol XL, p.p. 533-542, 2023.

[10] V. H. Cortínez, P. N. Dominguez y C. I. Stoklas, "Diseño de placas localmente resonantes amortiguadas", *Mecánica Computacional*, vol XLI, p.p. 405-414, 2024.

[11] P. N. Dominguez, V. H. Cortínez y M. T. Piovan, "Attenuation bands for flexural–torsional vibrations of locally resonant Vlasov beams", *Thin-Walled Structures*, vol. 181, p. 110115, 2022.

Apéndice A. OPERADORES DE RIGIDEZ

El operador L indicado en la ecuación (1) puede corresponder a los siguientes casos de dinámica estructural [4]: a) vibraciones longitudinales de barras ($K=EA$, rigidez axial), b) vibraciones torsionales de barras ($K=GJ$, rigidez torsional), c) vibraciones transversales de vigas (EI, rigidez flexional) , d) vibraciones transversales de membranas (T, tensión membranal) y e) vibraciones transversales de placas (D, rigidez flexional).

$$\text{a) y b) } L=\frac{d}{dx}\left[K(x)\frac{d}{dx}\right], \quad \text{c) } L=\frac{d^2}{dx^2}\left[EI(x)\frac{d^2}{dx^2}\right],$$

$$\text{d) } L=-T\nabla^2 \quad \text{y} \quad \text{d) } L=D\nabla^4$$

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Diseño y evaluación de prototipos de rejillas acústicas

Slavin, J.[†,1]**; Sabater, A. M.** [†,2]

[†] BRUIT SRL, Caseros, Tres de Febrero.

[1] jslavin@bruit.com.ar, [2] asabater@bruit.com.ar

RESUMEN AMPLIADO

Resumen La necesidad de control de ruido en entornos industriales y urbanos con ventilación forzada plantea un desafío técnico relevante. Las rejillas acústicas (louvers) permiten el paso de aire mientras atenúan la transmisión sonora, contribuyendo al confort acústico y al cumplimiento normativo.

Esta investigación presenta el diseño, fabricación y evaluación de cuatro prototipos de rejillas con distintas configuraciones geométricas y materiales absorbentes[1][1]. Se midieron sus prestaciones acústicas mediante ensayos de pérdida por transmisión e inserción, siguiendo la norma ISO 11820, en condiciones de campo difuso. Los resultados mostraron que un modelo con lamas a 45° y mayor exposición del material fonoabsorbente ofreció un mejor desempeño en bajas y medias frecuencias, superando a modelos comerciales de referencia. La pérdida por transmisión se destacó como el parámetro más representativo para evaluar el aislamiento acústico, por su menor sensibilidad a las condiciones del entorno de medición.

El trabajo aporta criterios de diseño para soluciones acústicas eficientes en espacios que requieren ventilación, y propone una base para futuras optimizaciones en el desarrollo de sistemas pasivos de control de ruido.

Palabras clave: rejillas acústicas, control de ruido, ruido industrial.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido en entornos industriales y urbanos constituye un problema creciente con impacto directo en la salud y en la calidad de vida. La exposición prolongada a niveles elevados de presión sonora se asocia a pérdida auditiva prematura, estrés, fatiga y otras enfermedades crónicas no transmisibles, lo que convierte al control del ruido en un eje prioritario de la ingeniería acústica contemporánea [2].

En la industria, los equipos de gran potencia como turbinas, compresores, generadores y sistemas de climatización generan simultáneamente calor y elevados niveles de ruido [3]. Esto obliga a implementar sistemas de ventilación que garanticen la disipación térmica, pero que al mismo tiempo no incrementen la contaminación acústica en los ambientes de trabajo ni en las comunidades cercanas.

Las rejillas acústicas, o louvers, constituyen una solución pasiva que compatibiliza ventilación con aislamiento sonoro mediante mecanismos de absorción y difracción de ondas [4]. No obstante, en Argentina la disponibilidad de modelos es reducida y las especificaciones técnicas publicadas son escasas, lo que dificulta la elección de diseños adecuados para cada aplicación.

En este contexto, la presente investigación se propone diseñar, construir y caracterizar diferentes configuraciones de rejillas acústicas con el fin de evaluar su desempeño y establecer criterios de diseño que contribuyan al desarrollo de soluciones más eficientes y adaptadas al ámbito local.

2. METODOLOGÍA

Se diseñaron y construyeron cuatro prototipos de rejillas acústicas variando la geometría interna y la disposición de materiales fonoabsorbentes. La caracterización acústica se realizó mediante ensayos de pérdida por transmisión (*TL*) y pérdida por inserción (*IL*), siguiendo la norma ISO 11820 [5].

[1] Este artículo se basa en resultados de una tesis de grado presentada en la Universidad Nacional de Tres de Febrero [1].

2.1 Diseño y construcción de rejillas acústicas

Se desarrollaron cuatro prototipos de rejillas acústicas (A, B1, B2 y B3) con el objetivo de explorar la influencia de la geometría y de los materiales en su desempeño. Para todos los casos el tamaño de los louvers fue de 725 x 1100 x 300 mm (ancho x alto x espesor). Las variables de diseño incluyeron el ángulo, espesor y paso de aire entre lamas, y el tipo de material fonoabsorbente. El porcentaje de área libre se mantiene constante en 27%. El ángulo entre lamas varía de 30° a 45°, el espesor y cantidad de lamas se modifican para que se mantenga fija el área libre, buscando maximizar la superficie absorbente en el volumen del elemento sin despreciar la masa efectiva. Para el interior de las lamas se trabaja con tres tipos de composición de materiales fonoabsorbentes según lo indica la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros y características constructivas variables de cada prototipo de louver diseñado.

Prototipo	Angulo de lamas [°]	Espesor de lamas [mm]	N° lamas	Espesor pasos de aire [mm]	Material Absorbente
A	30	68	7	43	Lana de roca 50kg/m3
B1	45	50	5	60	Lana de roca 50kg/m3
B2	45	50	5	60	Espuma soft 22kg/m3
B3	45	50	5	60	Espuma soft 22kg/m3 + Barrier 4mm 5kg/m2

Cada prototipo fue fabricado con estructura metálica en chapa galvanizada. El montaje permitió una correcta fijación al sistema de medición y el reemplazo rápido entre configuraciones. La Figura 1 muestra un corte con el diseño y dimensiones de los prototipos, así como también fotografías de ambas caras del prototipo B1 construido.

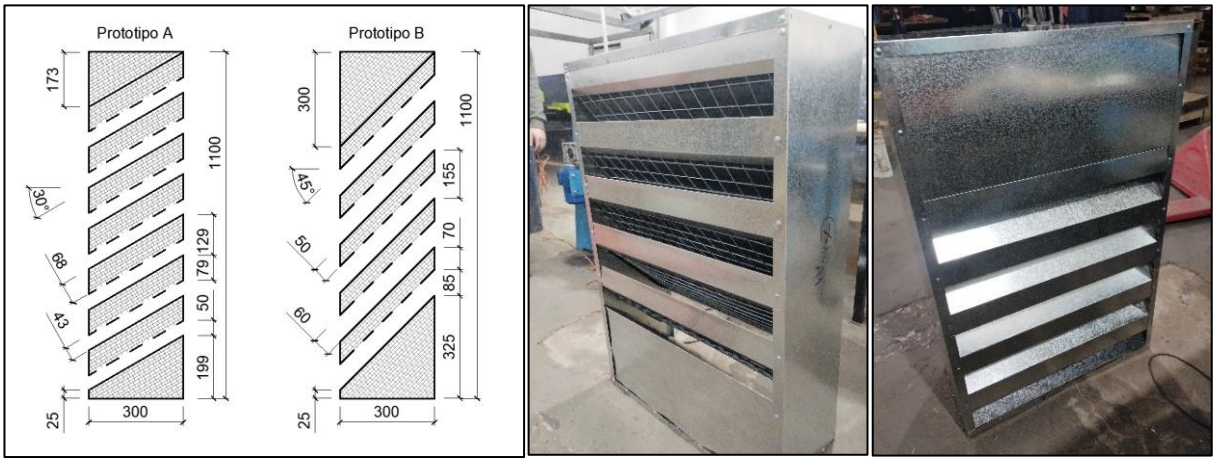


Figura 1: Esquema en corte de los prototipos A y B diseñados, con cotas en milímetros (izquierda) y fotografías del prototipo B1 construido (centro y derecha)

2.2 Mediciones acústicas

La caracterización del desempeño acústico se realizó siguiendo la norma ISO 11820, que establece los métodos de medición *in situ* para los parámetros *TL* e *IL* en atenuadores acústicos como silenciadores y rejillas. Para ello se utilizaron dos salas con campo difuso, acondicionadas para generar condiciones controladas y comparables. El procedimiento consistió en el registro de niveles sonoros en ambas salas para determinar la pérdida por transmisión, y en la medición del nivel en la sala emisora con y sin el prototipo, para calcular la pérdida por inserción.

Las mediciones se realizaron en las instalaciones de Bruit SRL utilizando un sonómetro integrador–analizador clase 1 (Svantek Svan-971), calibrado antes y después de los ensayos. El registro de datos se efectuó en bandas de tercio de octava entre 50 Hz y 10 kHz, con integración de 60 s y respuesta lenta (*slow*). Como fuente sonora se utilizó un compresor de aire Kommberg KB-BC30200T, cuya emisión permitió recrear condiciones de funcionamiento real en salas de máquinas.

El entorno de ensayo estuvo conformado por dos salas contiguas, consideradas con campo difuso. La apertura entre recintos fue adaptada para el montaje de los louvers. Se caracterizó el ruido de fondo, el tiempo de reverberación y la respuesta modal de las salas, confirmando que las bajas frecuencias presentaban mayor dispersión debido a ondas estacionarias, mientras que en frecuencias medias y altas se logró un campo más uniforme.

La Figura 2 muestra un plano con los puntos de medición, ubicación de la fuente y la rejilla entre las dos salas, así como también fotografías del procedimiento.

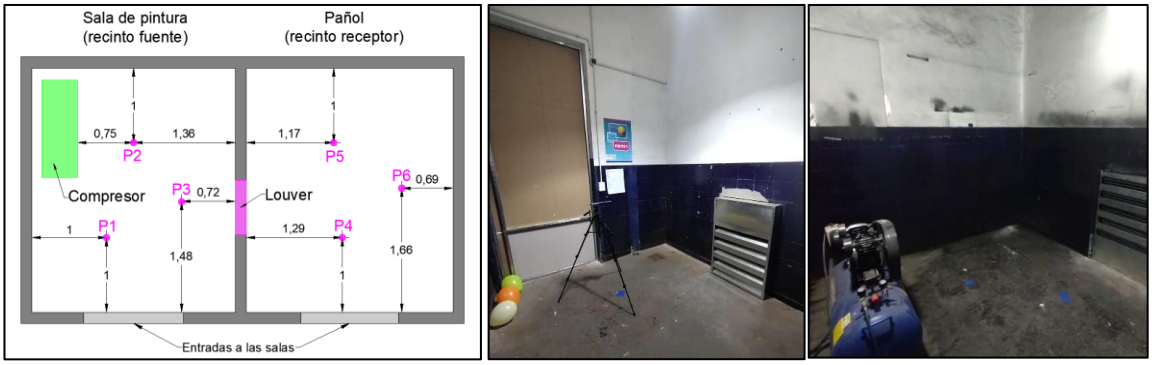


Figura 2: Plano con la ubicación de los puntos de medición en cada sala, cotas expresadas en metros (izquierda), y fotografías de las salas durante las mediciones con el louver colocado (centro y derecha).

3. RESULTADOS

Se evaluaron los prototipos de rejillas acústicas según ISO 11820. Por debajo de 50 Hz, las diferencias con el ruido de fondo fueron menores a 3 dB, impidiendo resultados válidos. Los parámetros de pérdida por transmisión e inserción se calcularon con y sin el factor de corrección de campo K, siguiendo los procedimientos normativos, y se derivó el índice ponderado de reducción sonora Rw según ISO 717-1 [6]. La Figura 3 muestra las curvas de TL e IL para los 4 prototipos, mientras que en la Tabla 2 se observan los resultados de atenuación global, Rw, C y Ctr (términos de adaptación espectral a ruido rosa y tráfico urbano, respectivamente).

El prototipo B1 presentó el mejor desempeño global. La mayor atenuación se observa especialmente en frecuencias medias (400–1.000 Hz) y altas (1–5 kHz), donde su geometría optimizada y relación de espesor/paso de aire cercana a 1:1 favorece la reducción sonora. B3 mostró desempeño superior a B2 en frecuencias superiores a 800 Hz gracias a la inclusión del barrier en las lamas, mientras que en bajas frecuencias los resultados fueron irregulares y sin claro predominio entre uno u otro.

Para IL, B1 fue significativamente superior a B2 y comparable a B3. El prototipo A mostró valores ligeramente por encima de B1, pero con menor eficiencia en bandas medias y altas. Esto indica que B1 mantiene un mejor equilibrio entre la atenuación en transmisión y la inserción.

B1 mostró Rw superior a B2 y B3, y mejor adaptabilidad a ruido rosa y tráfico urbano que A y las otras variantes.

Tabla 2: Valores globales de aislamiento obtenidos para los cuatro prototipos de louver acústicos.

Prototipo	Att_{TA} [dBA]	R_w [dB]	C [dB]	C_{tr} [dB]
A	13,3	14	-1	-2
	12,0	-	-	-
B1	15,4	15	0	-1
	11,8	-	-	-
B2	12,8	12	0	-1
	8,6	-	-	-
B3	13,0	13	-1	-2
	11,0	-	-	-

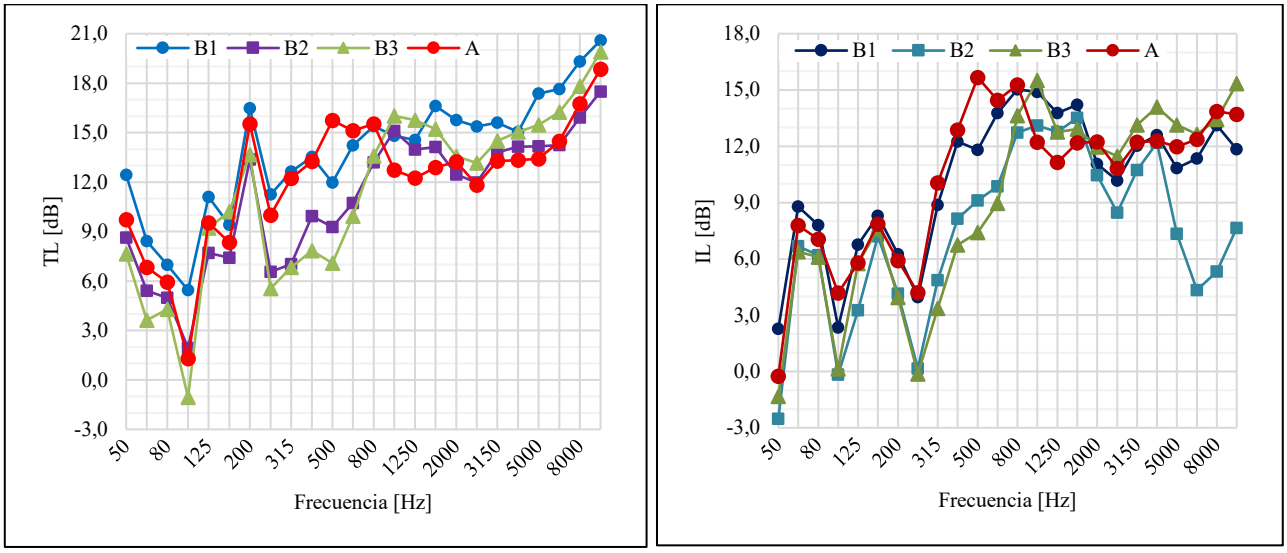


Figura 3: Curvas de *TL* (izquierda) y de *IL* (derecha) en función de la frecuencia para los cuatro prototipos.

4. CONCLUSIONES

La investigación permitió evaluar el impacto del diseño y los materiales en el desempeño acústico de prototipos de louvers industriales. Los resultados confirman que la optimización del diseño de lamas (ángulo, espesor, paso de aire y materiales absorbentes) es crítica para mejorar el aislamiento acústico global.

Entre los modelos desarrollados, B1 mostró la mejor atenuación global, destacando en frecuencias bajas y medias (63–500 Hz) y manteniendo un rendimiento equilibrado en altas frecuencias gracias a la alta exposición del material absorbente, superando consistentemente tanto a su variante de material (B2 y B3) como al diseño de diferente morfología interna (A). A su vez, supera en bajas frecuencias a la mayoría de los modelos comerciales internaciones de similares características, evidenciando que la combinación de diseño de lamas y selección de materiales es determinante para la efectividad acústica.

La pérdida por transmisión se identificó como el parámetro más representativo, dado que proporciona mediciones más estables y comparables con caracterizaciones estándar de otros productos.

En síntesis, el prototipo B1 demuestra que un louver industrial cuidadosamente diseñado puede mejorar significativamente el control de ruido en aplicaciones reales, aportando información útil para optimización de productos y desarrollo de nuevas soluciones acústicas en la industria.

REFERENCIAS

[1] J. Slavin, “Diseño, construcción y caracterización de rejillas acústicas” Tesis de grado, Universidad Nacional de Tres de Febrero, Buenos Aires, Argentina, 2025.

[2] O. Hernández Peña, G. Hernández Montero, y E. López Rodríguez, "Ruido y salud," *Revista Cubana de Medicina Militar*, vol. 48, no. 4, pp. 929–939, Dec. 2019. [Online]. Disponible en: https://revmedmilitar.sld.cu/index.php/mil/article/view/431/375

[3] C. M. Harris, Manual de medidas acústicas y control de ruido, 3ra ed. Madrid, España: McGraw-Hill, 1998.

[4] E. B. Viveiros, Evaluation of the acoustical performance of louvres by impulse response analysis, Tesis Doctoral, Univ. Federal de Santa Catarina y Univ. de Liverpool, 1998. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/77590

[5] International Organization for Standardization, Acoustics — Measurements on silencers in situ (UNE-EN ISO 11820:1997). Ginebra, Suiza: ISO, 1996.

[6] International Organization for Standardization, Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation (ISO 717-1). Ginebra, Suiza: ISO, 2020.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Diseño e implementación de silenciadores gran escala para control de ruido en planta industrial

Sabater, A. M.[†,1]; Novarino, S. [†,2]; Saraullo, J. A. L.[†,3]; Romero, J. F. [†,4]; Gallego, S. D. [†,5]

[†] BRUIT SRL, Caseros, Tres de Febrero.

[1] asabater@bruit.com.ar, [2] snovarino@bruit.com.ar, [3] jsaraullo@bruit.com.ar, [4] jromero@bruit.com.ar, [5] sgallego@bruit.com.ar

RESUMEN AMPLIADO

Resumen El control de ruido en entornos industriales próximos a zonas residenciales constituye un desafío creciente en materia de ingeniería ambiental y convivencia urbana. El presente trabajo expone el proceso de control de ruido llevado a cabo en una planta papelera, cuya emisión sonora hacia el vecindario generaba denuncias, al estar ubicada en una zona predominantemente residencial. Se efectuaron mediciones iniciales y se definió la instalación de silenciadores en tres ductos de extracción de vapor, ubicados en un sector productivo.
Los silenciadores diseñados combinaron técnicas de atenuación pasiva y reactiva, incorporando principios de dinámica de fluidos y consideraciones específicas de diseño, de acuerdo a las características del flujo de aire en su interior. Los silenciadores presentaron un peso aproximado de 1500 kg y una altura de 7,5 m, lo que representó un desafío de montaje y fijación, al ser instalados a 22 m de altura. Para este desarrollo se utilizaron herramientas de simulación y cálculo estructural.
Una vez finalizada la instalación, se realizaron mediciones en las salidas de los silenciadores y se compararon con las mediciones iniciales. Se verificó que la reducción del nivel sonoro superó las proyecciones previstas, disminuyendo el nivel de ruido emitido al vecindario.

Palabras clave: control de ruido, ruido industrial, silenciadores industriales.

1. INTRODUCCIÓN

La problemática del ruido industrial en entornos urbanos constituye un aspecto central de la ingeniería ambiental, debido a su impacto en la calidad de vida y en la convivencia entre actividades productivas y comunidades residenciales. Las plantas industriales presentan desafíos asociados a los sistemas de ventilación y extracción, que pueden convertirse en fuentes relevantes de contaminación acústica cuando se ubican en proximidad con zonas habitadas.

En el caso analizado, se registraron emisiones sonoras provenientes de los sistemas de extracción de una planta de producción ubicada en Bernal, las cuales ocasionaban molestias en el entorno residencial colindante. Ante esta situación, se llevó a cabo una evaluación técnica orientada a caracterizar los niveles de ruido generados y a establecer medidas correctivas acordes con la normativa vigente.

A partir de la identificación de los extractores como principales emisores, se desarrolló una propuesta de mitigación basada en el diseño e implementación de silenciadores. Finalmente, se realizaron mediciones para verificar la reducción generada por los elementos instalados.

2. MEDICIONES INICIALES Y ASESORAMIENTO

2.1 Metodología de medición

Con el propósito de caracterizar la situación acústica inicial, se llevaron a cabo mediciones de ruido ambiental y de emisión directa en la salida de los ductos de extracción, como se observa en la Figura 1. En total se relevaron seis posiciones: cuatro ubicadas a un metro de distancia de cada uno de los extractores, con el fin de determinar el nivel de emisión individual de cada fuente, y dos adicionales situadas en el vecindario, representativas de la recepción en el entorno residencial.

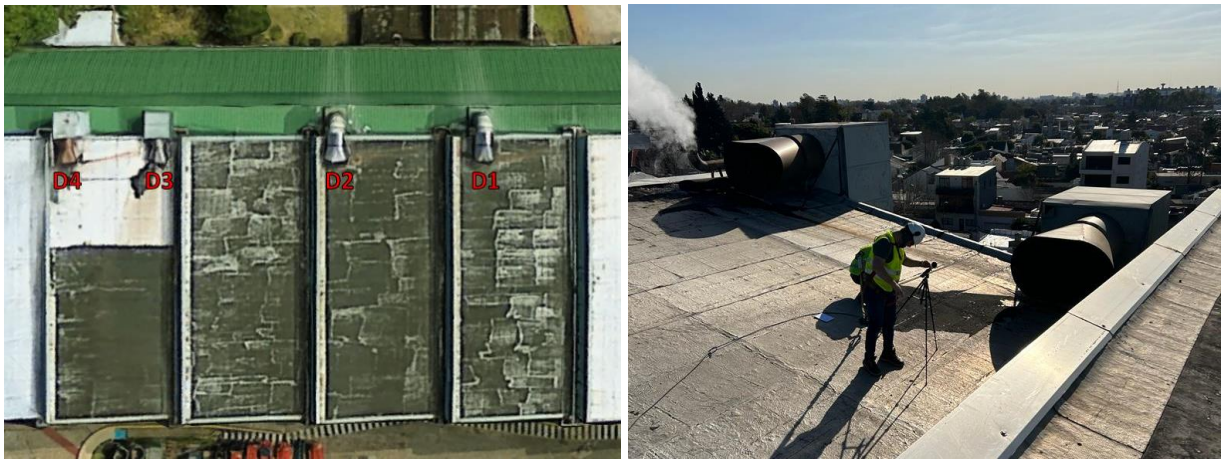


Figura 1: Puntos de medición en las salidas de los ductos de extracción.

Las mediciones se efectuaron con un sonómetro analizador de espectro. Se determinaron el Nivel Sonoro Continuo Equivalente (L_{eq}), los percentiles L_{10} y L_{90}, y el Nivel Máximo (L_{max}). Estos indicadores fueron obtenidos con ponderación A, en respuesta temporal lenta (slow), registrándose adicionalmente el valor $L_{AF(max)}$ con respuesta rápida. El tiempo de integración fue de cinco minutos por punto. Finalmente, se midió el espectro en bandas de tercios de octava sin ponderación espectral, a fin de contar con un diagnóstico detallado en el dominio frecuencial.

2.2 Análisis de resultados

En las mediciones iniciales, detalladas en la Tabla 1, se observa que los extractores 1 y 3 resultaron los principales contribuyentes al nivel global de ruido. El extractor 2 también presentó un aporte considerable, aunque de menor magnitud, mientras que el extractor 4 mostró una incidencia mínima.

Tabla 1: Niveles de ruido iniciales medidos a la salida de los ductos evaluados.

Punto de medición	L_{eqA} [dBA]	L_{eqC} [dBC]	L_{eqZ} [dBZ]	Condición
D1	93,7	103,1	111,6	Activos
D2	83,2	96,5	101,2	Activos
D3	92,5	108,9	121,2	Activos
D4	71,7	83,4	91,7	Activos
D4	65,1	83,0	86,3	Inactivos

En los puntos de medición ubicados en el vecindario se registraron niveles superiores a los máximos permisibles establecidos por la Norma IRAM 4062, lo que permite clasificar la situación como generadora de ruido molesto al vecindario.

Por otro lado, el análisis espectral muestra resonancias en bandas de bajas frecuencias, como se observa en la figura 2.

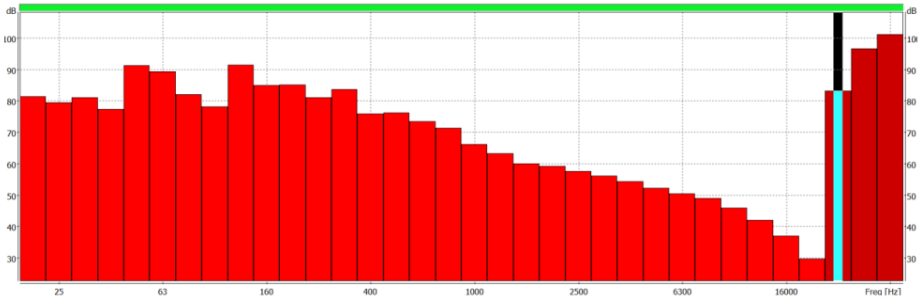


Figura 2: Análisis espectral de una medición realizada en una salida de extracción.

3. DISEÑO, FABRICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN

3.1 Consideraciones de diseño

Para mitigar el ruido se implementó la instalación de silenciadores acústicos tipo dumper en los tres extractores de mayor incidencia, de modo que se colocarían interrumpiendo el desarrollo del ducto. Estos incorporan los conceptos de cámara de expansión, filtros tonales en 50, 63 y 315 Hz, directores internos para flujo laminar y elementos resistivos para atenuación general.

3.2 Consideraciones de fabricación

Los silenciadores se construyeron a partir de esqueletos modulares, para facilitar el transporte, pero garantizando la rigidez y estanqueidad en las uniones, a la vez que se realizó un proceso de galvanizado asegura la durabilidad en las condiciones de humedad y temperatura del vapor extraído.

Los paneles se fabricaron en chapa galvanizada con relleno de lana de roca mineral, protegida con velo negro y malla electrosoldada, como se observa en la Figura 3. Los directores internos se confeccionaron con marcos y almas metálicas. Finalmente, los filtros se integraron mediante bandejas modulares con un sistema colector de agua y drenaje, soldado a la estructura, garantizando la operatividad y la durabilidad del conjunto.

Figura 3: Modulo de uno de los silenciadores en proceso de fabricación.

3.3 Consideraciones de implementación

Para el sistema de fijaciones y sujeción de los silenciadores se realizaron cálculos de cargas y esfuerzos, aplicando un factor de seguridad que garantice la seguridad del sistema, considerando un siendo el silenciador S3 el de mayor volumen, con 7,5 m de altura, 2,4 m de ancho, 1,4 m de profundidad y un peso aproximado de 1500 kg.

Además, se determinó el centro de masa para asegurar una correcta distribución de cargas y evitar desplazamientos que comprometieran la operación del izaje. Adicionalmente, se instalaron arriostres para limitar los momentos verticales inducidos por el viento,

Finalmente, se incorporaron cáncamos de izaje en la unión de módulos, diseñados para transmitir las cargas a la estructura y adaptados al equipamiento de la grúa. En la Figura 4 se observa uno de los silenciadores en el proceso de izaje, y ya colocado en su posición, durante las mediciones finales.

Figura 4: Izq.: Silenciador durante el proceso de izaje e instalación. Der.: Medición posterior a la instalación del silenciador.

4. MEDICIONES POSTERIORES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Por último, en la tabla 2 se muestran los resultados iniciales y los obtenidos en los ductos intervenidos. En cuanto a la atenuación de los silenciadores, al comparar las curvas de nivel en función de la frecuencia, se aprecia una mitigación notable de las resonancias en bajas frecuencias

Tabla 2: Niveles de ruido medidos iniciales y posteriores a la implementación.

Punto de medición	Inicial		Posterior	
	L_{eqA} [dBA]	Condición	L_{eqA} [dBA]	Condición
D1/S1	93,7	Activo	78,8	Activo
D2/S2	83,2	Activo	84,0	Activo
D3/S3	92,5	Activo	78,2	Activo

La evaluación de atenuación de los silenciadores mostró una reducción significativa de resonancias en bajas frecuencias en S1 y S3, con disminuciones de niveles globales de 14,9 dB y 14,3 dB, respectivamente. En el caso de S2, la cercanía a otras fuentes impidió una comparación directa; sin embargo, al analizar su operación activa e inactiva, se determinó un aporte de solo 3,7 dB sobre el ruido de fondo, indicando baja contribución energética.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Aplicación de simulación acústica para la mitigación de ruido industrial en zona residencial

Sabater, A. M.[†,1]**; Novarino, S.** [†,2]**; Saraullo, J. A. L.**[†,3]**; Gallego, S. D.** [†,4]

[†] BRUIT SRL, Caseros, Tres de Febrero.

[1] asabater@bruit.com.ar, [2] snovarino@bruit.com.ar, [3] jsaraullo@bruit.com.ar, [4] sgallego@bruit.com.ar

RESUMEN AMPLIADO

Resumen La simulación acústica se ha consolidado como una herramienta fundamental para el diseño eficiente de soluciones de control de ruido en entornos industriales complejos. El presente trabajo expone el proceso de diseño e implementación de sistemas de control de ruido dentro del predio de una empresa dedicada a la fabricación de empaques, ubicada en Ushuaia, Tierra del Fuego. En particular, en el sector exterior se localizaban equipos de refrigeración, próximos al perímetro del predio, donde se encuentran viviendas unifamiliares.

A partir de mediciones acústicas iniciales y un relevamiento del entorno, se llevó a cabo una simulación del espacio y se elaboró un mapa de ruido mediante software especializado DGMR iNoise. De este modo, se modeló el terreno y se identificaron las fuentes de ruido a tratar. Con base en esta información, se diseñaron las soluciones a implementar.

Una vez instalados los sistemas, se efectuaron mediciones posteriores y se verificó que la atenuación obtenida cumple con lo proyectado. Asimismo, se realizó un análisis de los niveles de ruido finales conforme a la Ordenanza Municipal N.º 2467/2002 del municipio de Ushuaia, así como una evaluación complementaria en conformidad con la norma IRAM 4062-1.

Palabras clave: Mapa de ruido, ruido industrial, simulación acústica.

1. INTRODUCCIÓN

El control de ruido en entornos industriales próximos a zonas residenciales constituye un aspecto fundamental dentro de la gestión ambiental y de la convivencia urbana. En este contexto, una planta de producción de envases ubicada en Ushuaia presentaba emisiones sonoras significativas asociadas a dos fuentes principales: los equipos *chiller* instalados en una plataforma exterior y el ducto de transporte neumático de pellets plásticos hacia los silos de almacenamiento.

Con el propósito de caracterizar la magnitud de la emisión y establecer medidas correctivas, se realizaron mediciones acústicas iniciales en distintos puntos ubicados en el predio de la planta. Los resultados evidenciaron que ambas fuentes contribuían de manera significativa a la generación de ruido ambiental.

A partir de estas mediciones se realizaron mapas de ruido que permiten visualizar la situación actual, así como proyectar los niveles de emisión con soluciones implementadas individualmente y en conjunto. Posterior a la implementación se realizaron mediciones acústicas y un análisis de los niveles de ruido según la normativa vigente y complementariamente la norma IRAM 4062-1 [1].

2. MEDICIONES INICIALES Y MAPA DE RUIDO

La planta cuya emisión se evaluó se ubica en una zona industrial de la ciudad de provincia de Tierra del Fuego. Dentro del predio, en el exterior se encuentra una plataforma sobre la cual se encuentran equipos de refrigeración. La evaluación se focalizó en la emisión a domicilios unifamiliares cercanas a este sector, así como la emisión de cada fuente, para lo cual se definieron los puntos de medición

detallados en la Figura 1. En esta se observa una vista satelital de la planta, y se resaltan los equipos de refrigeración (amarillo) y el ducto de transporte de materia prima (naranja).

Figura 1: Izq.: Fuentes evaluadas y puntos de medición. Der.: Medición acústica realizada en punto próximo a perímetro de la planta.

A partir de esta información se procedió a simular la situación mediante software acústico especializado. Se generó un modelo geolocalizado del sector bajo análisis, considerando la topografía del terreno, como se observa en la Figura 2.

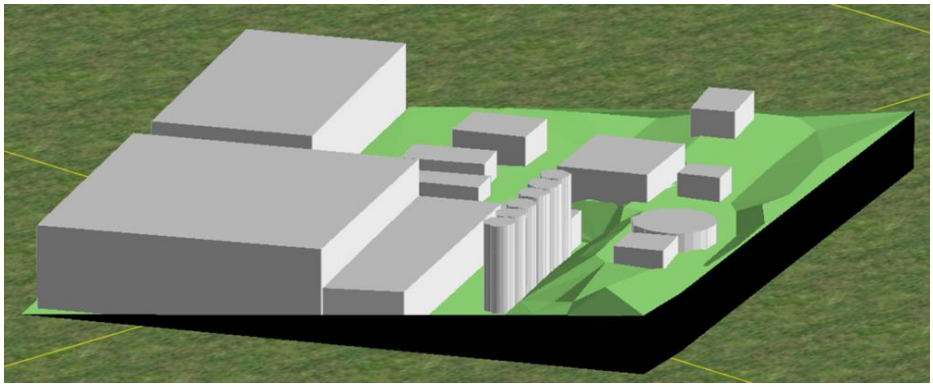


Figura 2: Modelado 3D de la planta y topología terreno, para la simulación con software acústico.

De este modo, fue posible aislar el aporte de cada fuente de ruido evaluada, como se observa en la Figura 3, y proyectar el sistema de mitigación apropiado.

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El diseño se realizó a partir de estos niveles medidos, las simulaciones realizadas y el relevamiento de la estructura de la plataforma, así como de los espacios donde se ubicaba el ducto de transporte de materia prima.

De este modo, implementó un sistema de apantallamiento acústico para mitigar la emisión de los equipos de refrigeración a las viviendas próximas al predio. Además, en el ducto de materia prima se implementó un recubrimiento tipo encamisado, con material fonoabsorbente adecuado para las condiciones climáticas del entorno. En la figura 4 se muestran ambos sistemas implementados.

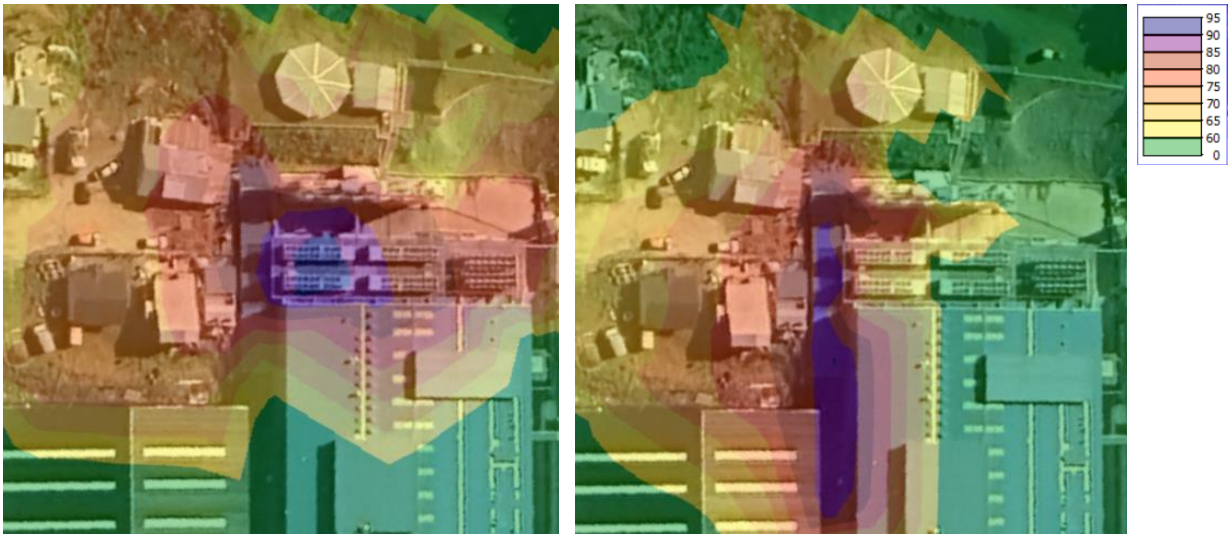


Figura 3: Izq.: Mapa de ruido con 2 equipos de refrigeración activos. Der.: Mapa de ruido con ducto de transporte de materia prima activo.

Figura 4: Sistemas de apantallamiento y recubrimiento de ducto implementado.

4. MEDICIONES POSTERIORES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las mediciones acústicas posteriores se realizaron en los puntos representativos de la emisión de la fuente y su impacto en las viviendas próximas.

Considerando las diferencias en las condiciones de funcionamiento de la planta en ambas instancias de mediciones, se obtuvieron valores proyectados mediante simulación para poder realizar una evaluación de los niveles de ruido mitigadas mediante la implementación de las soluciones. De este modo se obtienen los niveles y atenuaciones detallados en la Tabla 1.

Tabla 1: Niveles previos y posteriores a la implementación de los sistemas de mitigación de emisión acústica.

Punto de medición	Condición inicial L_{eqA} [dBA]	Condición posterior L_{eqA} [dBA]	Atenuación [dB]
12	88,2	81,2	7,0
14	77,4	70,0	7,4
15	96,4	72,5	23,9
17	88,7	81,9	6,8

En cuanto a la normativa vigente en la ciudad de Ushuaia, se comprobó que los niveles de ruido medidos en el punto representativo del nivel de ruido incidente en la fachada del vecino, bajo las condiciones actuales de funcionamiento, se encuentran por debajo de los límites establecidos por la Ordenanza Municipal N.º 2467/2002 [2].

Adicionalmente, se realizó una evaluación complementaria conforme a la norma IRAM 4062-1. Se observa que, durante el período diurno hábil, el ruido no se considera molesto. No obstante, al extender la evaluación a los períodos de descanso diurno y nocturno, el ruido podría clasificarse como molesto. Es importante destacar que esta evaluación se basó en la suposición de un nivel sonoro constante durante toda la jornada, dado que no se contaba con mediciones en ese periodo de tiempo.

REFERENCIAS

[1] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, “Método de medición y calificación en ambientes interiores y en exteriores no linderos con la vía pública”, IRAM 4062-1, 2025.

[2] Consejo Deliberante de la Ciudad de Ushuaia, “Ordenanza Municipal 2467/2002”, 2002.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Caracterización de cámara reverberante

Echapresto Garay, I.[†,1]; Marañón Di Leo, J. [†,‡,2]; Delnero, J. S. [†,‡,3]

[†] Centro Tecnológico Aeroespacial, Departamento de Ingeniería Aeroespacial, Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata

‡ CONICET, Ciudad Autónoma de Buenos Aires

[1] iban.echapresto@ing.unlp.edu.ar, [2] jmaranon@ing.unlp.edu.ar, [3] delnero@ing.unlp.edu.ar

Resumen En el Centro Tecnológico Aeroespacial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, específicamente en la Unidad de Investigación, desarrollo, extensión o transferencia - Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, se diseñó y construyó una cámara reverberante de 22,5 metros cúbicos de volumen y de unas dimensiones aproximadas de 2720 mm x 2320 mm x 3360 mm.
La misma cuenta con fuentes sonoras alimentadas por una señal de excitación cuyas características son elegidas de acuerdo con el tipo de perfil requerido. Así mismo, se dispone de cuatro micrófonos GRAS 46AQ de ½", los cuales están optimizados para la medición de niveles sonoros en campos de incidencia aleatoria, es decir, campos difusos.
La caracterización se realizó primero generando ruido blanco y midiendo en varios puntos del interior de la cámara para determinar la distribución uniforme. Una vez establecido esto, se realizaron mediciones para determinar el tiempo de reverberación con la cámara vacía, completando la caracterización de la misma.

Palabras clave: absorción, protección, acústica.

Abstract At the *Centro Tecnológico Aeroespacial* of the *Facultad de Ingeniería* of the *Universidad Nacional de La Plata*, particularly at the *Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia – Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental*, a reverberation chamber with a volume of 22.5 cubic meters and approximate dimensions of 2720 mm x 2320 mm x 3360 mm was designed and built.
It features sound sources powered by an excitation signal whose characteristics are chosen according to the required profile. It also features four 1/2" GRAS 46AQ microphones, optimized for measuring sound levels in random incidence fields, i.e., diffuse fields.
The characterization was first performed by generating white noise and measuring at various points inside the chamber to determine uniform distribution. Once this was established, measurements were taken to determine the reverberation time with the chamber empty, completing the characterization.

Palabras clave: absorption, protection, acoustics.

1. INTRODUCCIÓN

Una cámara reverberante es una sala cerrada con paredes reflectantes que permiten que las ondas sonoras reboten muchas veces generando un campo acústico difuso. En su interior se instalan fuentes sonoras para modular dicho campo y también se utilizan micrófonos para el sensado del mismo y la realización de ensayos. Entre los ensayos posibles se encuentran la medición del coeficiente de absorción acústica de los materiales, el cual está estandarizado [1], [2], como también la evaluación del efecto producido sobre estructuras expuestas a niveles muy altos de ruido, como es el caso de lanzadores espaciales.

Debido a las dimensiones particulares de la cámara reverberante construida, la caracterización se realizó inicialmente comprobando la generación del campo difuso. Luego se continuó con los lineamientos indicados en las normas [1], [2], donde se propone una metodología de caracterización basada en la medición de la tasa de decaimiento del sonido dentro de la cámara, en múltiples puntos del recinto y para las bandas de octavas de frecuencia requeridas. Para eso, la norma propone realizar

mediciones y evaluar la velocidad de reducción de ruido al apagar instantáneamente la fuente sonora. Luego, esa información se contrasta con valores límites para determinar si la reverberación producida resulta aceptable.

2. METODOLOGÍA

Para todos los ensayos realizados se utilizó la cámara reverberante de la Unidad de Investigación, desarrollo, extensión o transferencia - Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, la cual cuenta con un volumen de 22,5 m^3, las dimensiones aproximadas máximas son 2720 mm x 2320 mm x 3360 mm.

Las fuentes sonoras que se encuentran dentro de la cámara, son alimentadas por una señal de excitación cuyas características son elegidas de acuerdo al tipo de perfil requerido. Esta señal es generada mediante el software LabView y acondicionada por un módulo NI-9263, el cual se vincula a la computadora mediante el chasis NI cDAQ-9174, que posee conexión tipo USB y permite conectar cuatro módulos en simultáneo, ya sean de adquisición o generación. La señal acondicionada es amplificada por medio de una potencia de dos canales modelo SKP MAX-320, y ecualizada en el caso de que se requiera mediante el ecualizador dbx 215s.

Los micrófonos utilizados son marca G.R.A.S. modelo 46AQ de ½", los cuales están optimizados para la medición de niveles sonoros en campos de incidencia aleatoria, es decir, campos difusos. Su respuesta en frecuencia es plana hasta aproximadamente los 10 kHz. Su rango de medición abarca frecuencias desde 12,5 Hz a 8 kHz, dentro de una banda de ±1 dB, o de 3,15 Hz a 16 kHz en la banda de ±3 dB.

La adquisición de la señal de salida de los micrófonos se realiza mediante el módulo NI-9234, que se conecta al chasis cDAQ-9174 para su vinculación con la computadora. Posee cuatro canales independientes con filtros anti-aliasing, por lo cual se pueden medir señales de hasta cuatro micrófonos en simultáneo.

2.1 Caracterización del campo difuso

Se busca la caracterización de una cámara reverberante con el propósito de verificar la consistencia en la respuesta en frecuencia de los micrófonos en cualquier ubicación dentro de la misma. Con este fin, se llevaron a cabo mediciones en nueve puntos en un plano horizontal dispuestos en una grilla con un espaciado de 50 cm. Esta grilla se midió a tres alturas, presentadas como niveles 0, 1 y 2, a los que corresponden las distancias desde el suelo de 0.5 m, 1 m y 1.5 m respectivamente. Además, se registró la posición angular del micrófono, considerando ángulos de 0° y 90° con respecto a la vertical y este último apuntando siempre a la pared donde se encuentra la puerta de la cámara. Para todas las mediciones se generó inicialmente un ruido blanco continuo y se midió el nivel global de presión sonora (OSPL) en cada punto.

2.2 Tiempo de reverberación con la cámara vacía

Para cálculo del tiempo de reverberación con la cámara vacía se utiliza el método estandarizado en [1] y [2] con la misma señal acústica que se generó en los ensayos de caracterización de la cámara, ésta se apaga aproximadamente a los 10 segundos de iniciada mientras el micrófono continúa midiendo por 10 segundos más. En la Figura 1 se muestra la señal obtenida por el micrófono en uno de los ensayos.

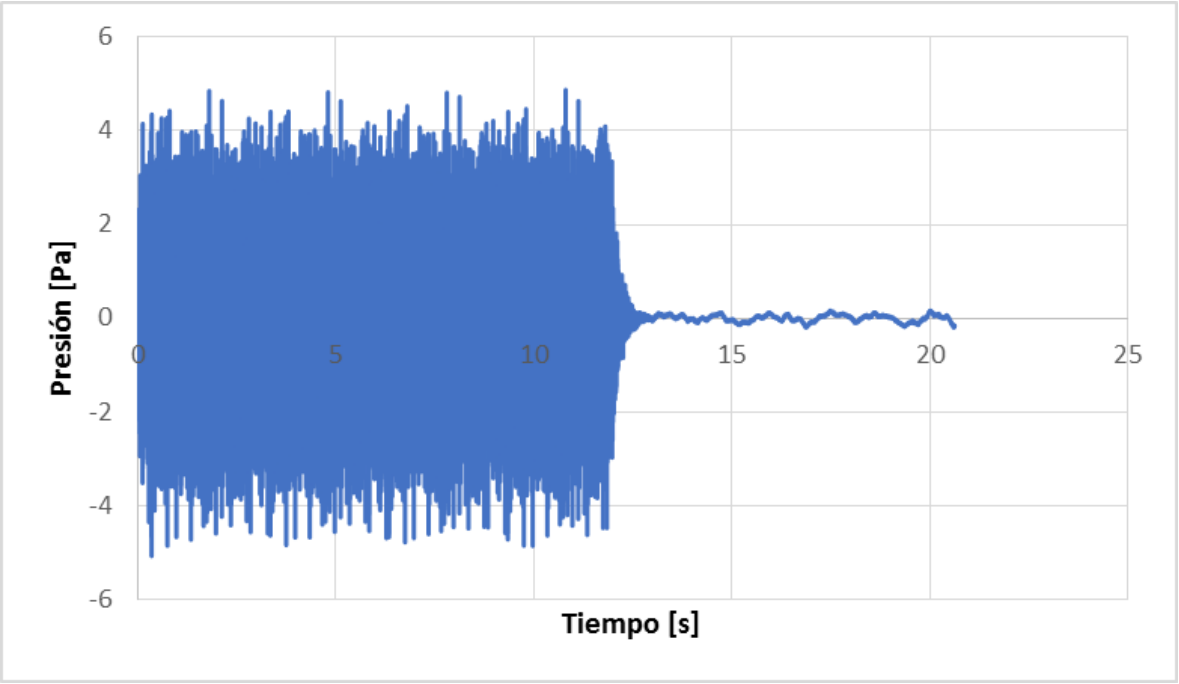


Figura 1: Señal de presión acústica en función del tiempo.

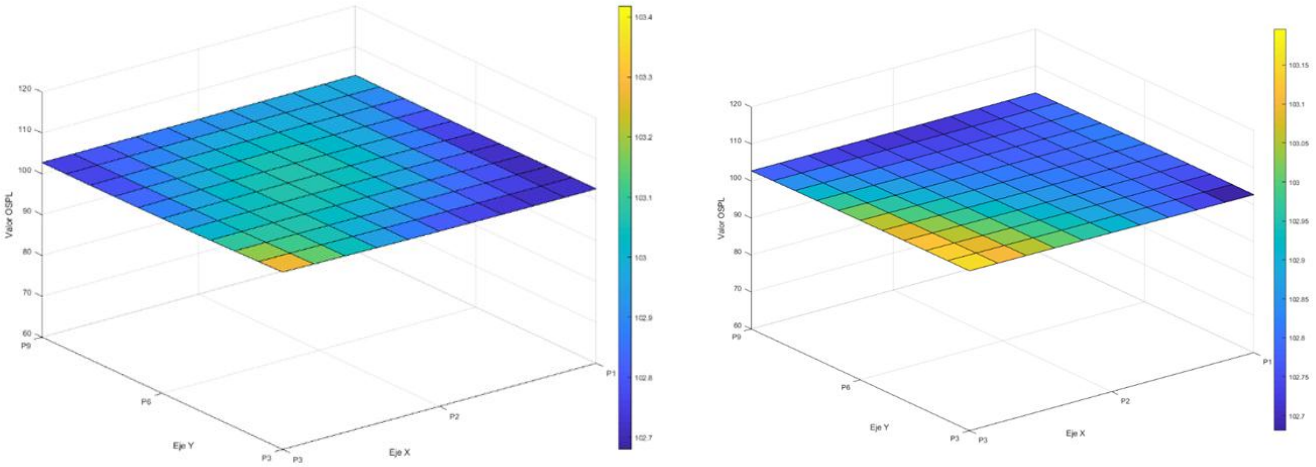
Esta señal es procesada inicialmente para transformar la señal de presión del micrófono a nivel de presión sonora "SPL" en dB. Luego de esta transformación se define la zona de decaimiento para finalmente realizar el cálculo de la tasa de decaimiento o tiempo de reverberación.

3. RESULTADOS

Se presentan en primer lugar los resultados de los ensayos de caracterización del campo difuso y luego los resultados obtenidos del cálculo del tiempo de reverberación con la cámara vacía.

3.1 Ensayos de caracterización

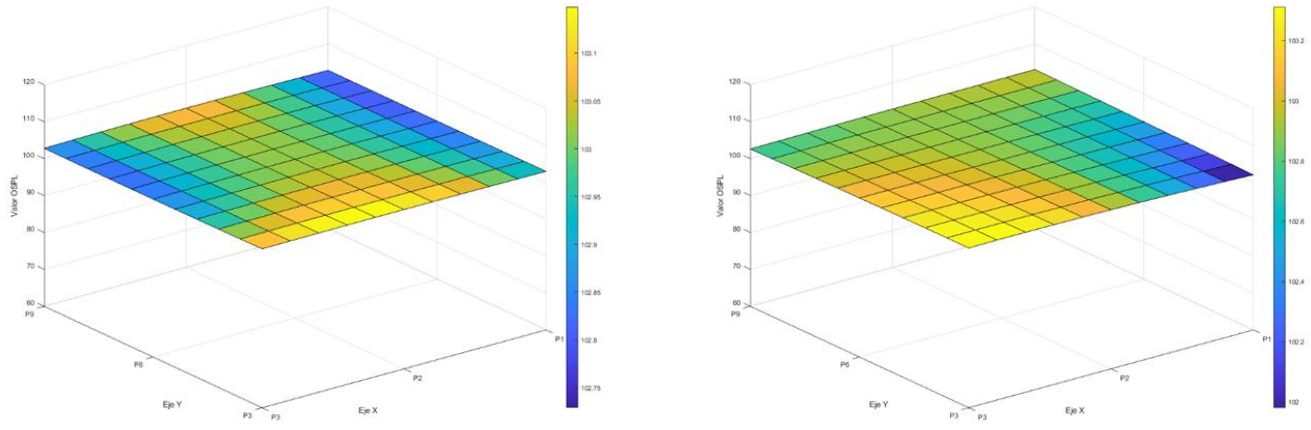
En la Figura 2 se encuentran los resultados de las mediciones a 0,5 m de altura en un plano horizontal, para un ángulo de 0° en la Figura 2 a y de 90° en la Figura 2 b.



(a) Micrófono a 0° (b) Micrófono a 90°

Figura 2: Medición a 0,5 m de altura.

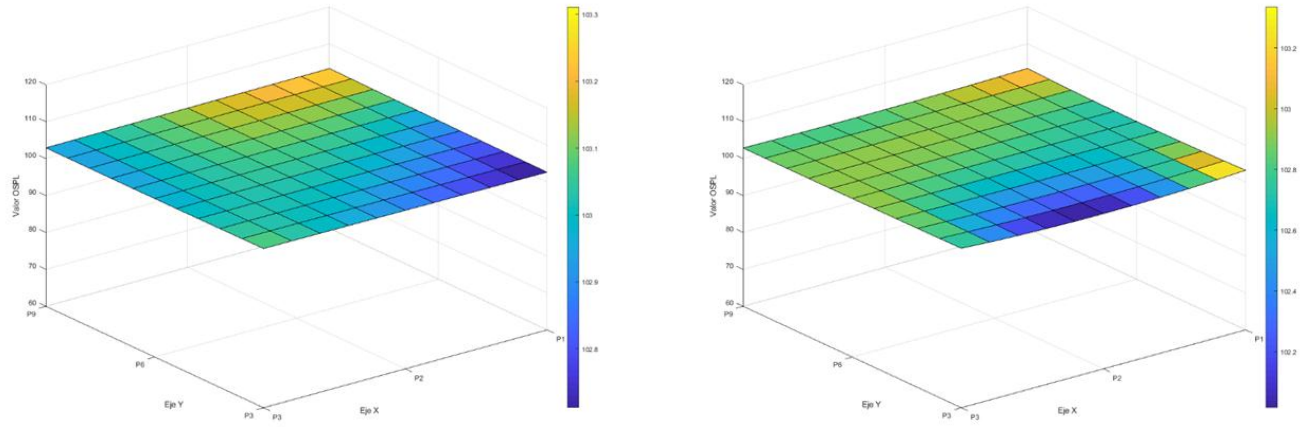
En la Figura 3 se muestran los resultados de las mediciones a 1 m de altura desde el piso de la cámara.



(a) Micrófono a 0° (b) Micrófono a 90°

Figura 3: Medición a 1 m de altura.

Finalmente, las mediciones a 1,5 m de altura se pueden ver en la Figura 4.



(a) Micrófono a 0° (b) Micrófono a 90°

Figura 4: Medición a 1,5 m de altura.

Para una mejor visualización y comparación de los resultados en las figuras anteriores se tiene como límite inferior 102,7 dB de OSPL y como límite superior 103,4 dB.

3.2 Cálculo del tiempo de reverberación

Una vez obtenida la señal del micrófono se transforma en nivel de presión sonora como se muestra en la Figura 5. Allí se indica en líneas rojas la zona de decaimiento que se utiliza para obtener el tiempo de reverberación mediante la regresión lineal que indican las normas [1] y [2]. La tasa de decaimiento calculada para esta señal resultó ser de 46 dB/s.

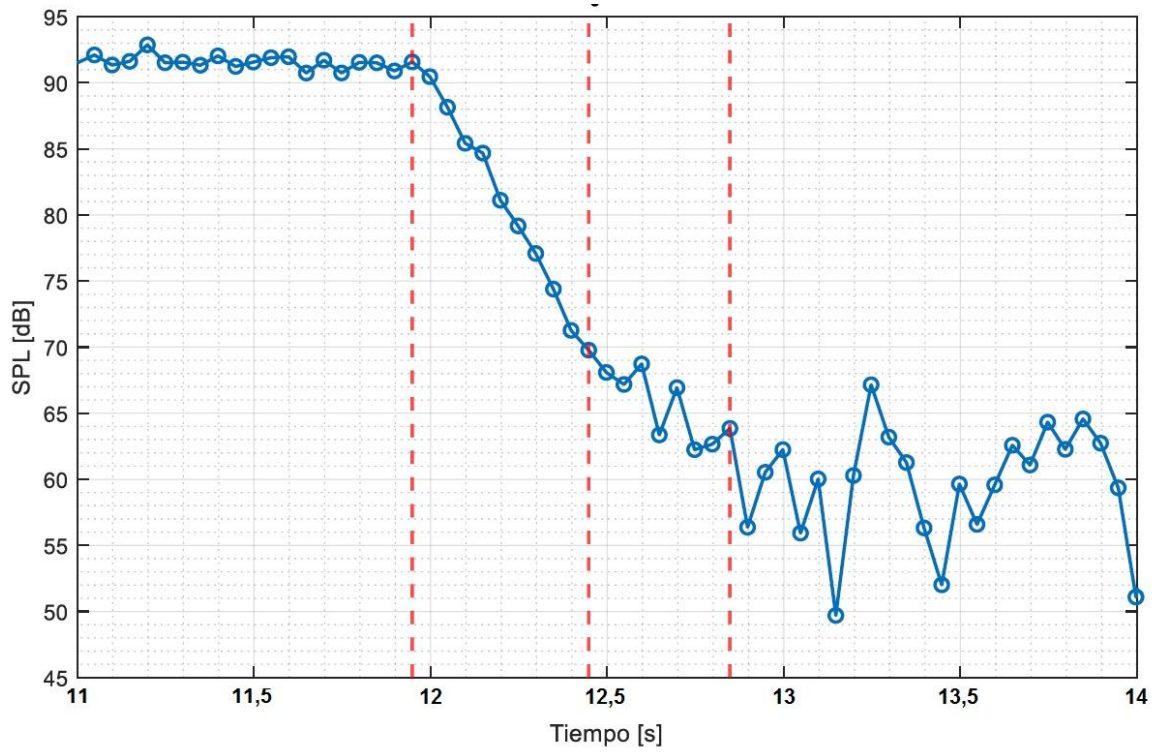


Figura 5: Señal de SPL de un ensayo de tiempo de reverberación.

4. CONCLUSIONES

A partir de las mediciones realizadas en la grilla horizontal y a distintas alturas se puede concluir que se obtuvo un campo sonoro difuso en el interior de la cámara de reverberante. Así mismo, luego de establecido el campo difuso e interrumpido súbitamente, se pudo calcular la tasa de decaimiento de la cámara reverberante con un método estandarizado.

Esto permite la utilización de la cámara reverberante para ensayos de absorción acústica de materiales, como así también ensayos de fatiga por ruido de componentes estructurales aeroespaciales.

REFERENCIAS

[1] *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*, ISO 354:2003, International Organization for Standardization, Suiza, 2024.

[2] *Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method*, ASTM C423-22, ASTM International, USA, 2023.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Determinación de la absorción acústica con tubo de impedancia de materiales de protección acústica para uso aeroespacial

Echapresto Garay, I.[†,1]**; Marañón Di Leo, J.** [†,‡,2]**; Delnero, J. S.** [†,‡,3]

[†] Centro Tecnológico Aeroespacial, Departamento de Ingeniería Aeroespacial, Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata

‡ CONICET, Ciudad Autónoma de Buenos Aires

[1] iban.echapresto@ing.unlp.edu.ar, [2] jmaranon@ing.unlp.edu.ar, [3] delnero@ing.unlp.edu.ar

Resumen En el Centro Tecnológico Aeroespacial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, específicamente en la Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia - Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, se diseñó y construyó un tubo de impedancia para determinar la absorción acústica de distintos materiales. Entre los materiales ensayados se encuentran diversas mantas acústicas utilizadas para proteger elementos electrónicos sensibles al ruido que forman parte de la carga paga de lanzadores espaciales. Particularmente se busca proteger dichos elementos contra las fuertes vibraciones y ondas acústicas producidas en el despegue. De esta manera, los materiales utilizados deben estar caracterizados en su absorción acústica buscando el menor peso con la mayor absorción posible. En este trabajo se ensayaron en un tubo de impedancia probetas de distintos materiales presentes en el mercado, con el mismo diámetro y el espesor correspondiente, para clasificarlos según absorción y tamaño.

Palabras clave: cohete, satélite, mantas, telas.

Abstract At the *Centro Tecnológico Aeroespacial* of the *Facultad de Ingeniería* of the *Universidad Nacional de La Plata*, particularly at the *Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia – Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental*, an impedance tube was designed and built to determine the acoustic absorption of different materials. Among the materials tested were various acoustic blankets used to protect noise-sensitive electronic components that are part of the payload of space launch vehicles. Specifically, these components are protected from the strong vibrations and acoustic waves produced during takeoff. Therefore, the materials used must be characterized by their acoustic absorption, seeking the lowest weight with the highest possible absorption. In this work, specimens made of different commercially available materials, with the same diameter and corresponding thickness, were tested in an impedance tube to classify them according to absorption and size.

Palabras clave: rocket, satellite, blankets, fabrics.

1. INTRODUCCIÓN

Durante el vuelo de un lanzador aeroespacial existen tres momentos de gran solicitación acústica, el despegue, el rango transónico y cuando se alcanza la máxima presión dinámica. De todos ellos el despegue es donde ocurren los mayores niveles sonoros [1]. Con el objetivo de proteger la carga paga y los elementos sensibles del sistema de navegación del vehículo, se utilizan distintas técnicas y materiales. Particularmente, la protección acústica de la carga paga se realiza principalmente con la combinación de mantas y resonadores acústicos, Las mantas tienen un mejor desempeño para altas frecuencias y los resonadores se pueden diseñar para bajas frecuencias. Las mantas se colocan en sobres de tela que se adhieren a las paredes de la cofia del lanzador, mientras que los resonadores se pueden construir como parte de la estructura de la misma.

Los materiales de las mantas acústicas se deben seleccionar según su coeficiente de absorción acústica, priorizando el mejor desempeño al menor peso posible. Para determinar el coeficiente de absorción acústica existen tres métodos normalizados, el primero utilizando una cámara reverberante [2], [3], el segundo con un tubo de Kundt [4] y el tercero con un tubo de impedancia [5], [6]. El

método del tubo de impedancia es el más rápido y utiliza el menor tamaño de muestra, sin embargo, se obtiene únicamente el coeficiente de absorción de incidencia normal. Este coeficiente es útil para realizar una primera clasificación de los materiales, como también para verificar si la presencia de las distintas telas con las que se confeccionarán los sobres modifican el coeficiente de absorción.

En este trabajo se presenta el estudio de distintos materiales de mantas y telas para la determinación del coeficiente de absorción acústica de incidencia normal utilizando el método del tubo de impedancia estandarizado en [6].

2. METODOLOGÍA

En la Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia - Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental se diseñó y construyó un tubo de impedancia siguiendo los lineamientos de [6] para determinar el coeficiente de absorción acústica de distintos materiales de mantas acústicas y telas para sobres contenedores de dichas mantas. En la Figura 1 se observa dicho tubo siendo utilizado en un ensayo.

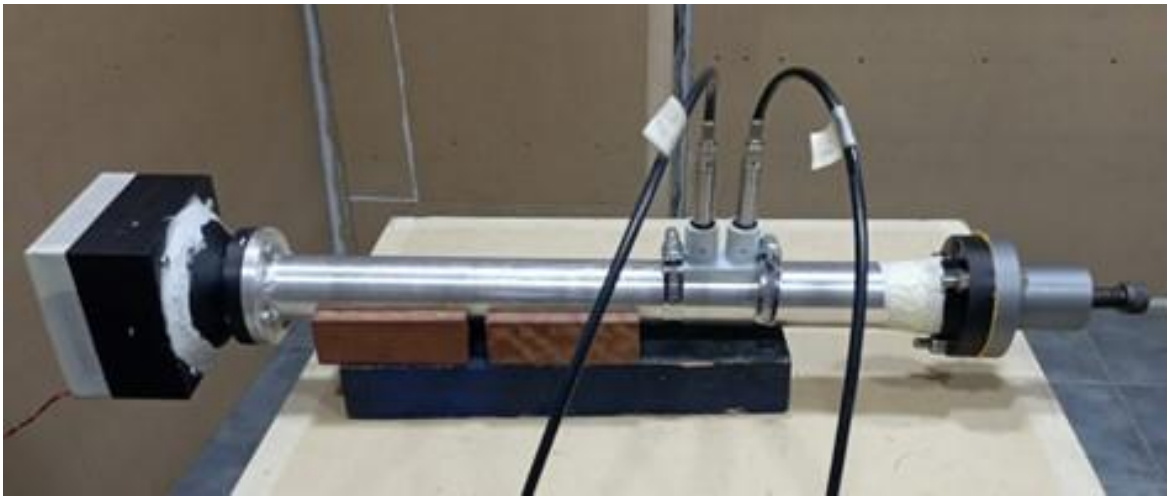


Figura 1: Tubo de impedancia.

En primer lugar, se deben preparar las probetas a ser ensayadas de manera cuidadosa para evitar resultados incorrectos, para esto se utilizó un cortador circular del diámetro interno del tubo de impedancia siguiendo lo expresado en [7]. En la Figura 2 se muestran las probetas utilizadas.

Figura 2: Probetas de los distintos materiales ensayados.

Entre los materiales para mantas acústicas ensayados se encuentran espuma de melamina, espuma de poliuretano poliéster, espuma de poliamida y fieltro de lana de vidrio, de espesores de 20 mm, 25 mm y 50 mm. Así mismo, para los sobres contenedores se ensayaron seis telas de distintas composiciones de para aramida, meta aramida y poliamida. Los ensayos de los géneros se realizaron con una espuma de poliéster de 25 mm.

Los micrófonos utilizados son marca G.R.A.S. modelo 46AE de ½". La fuente de sonido es marca YAHRO modelo AR410 de 80 W y 4 Ohm. La adquisición de la señal de salida de los micrófonos se realiza mediante el módulo NI-9234 conectado al chasis cDAQ-9174, ambos de National Instruments. Posee cuatro canales independientes con filtros anti-aliasing, por lo cual se pueden medir señales de hasta cuatro micrófonos en simultáneo.

3. RESULTADOS

Se presentan los resultados del coeficiente de absorción acústica de incidencia normal en función de la frecuencia de los materiales ensayados, comenzando por las mantas acústicas de espuma de melamina y poliuretano poliéster, luego las de fieltro de lana de vidrio y por último las de espuma de poliamida. Por otro lado, se muestra también la combinación de telas con una muestra de espuma de poliéster de 25 mm.

3.1 Mantas acústicas

En la Figura 3 se encuentran los resultados de mantas acústicas de 20 mm de espesor de marca Fonac de espuma de melamina y poliuretano poliéster, como también una manta de la misma marca y material, pero de 50 mm de espesor. Se hace evidente en la gráfica que el espesor es un factor determinante en el valor del coeficiente, sin embargo, a mayor espesor mayor es el peso, y lo que se busca es la mejor relación absorción/peso.

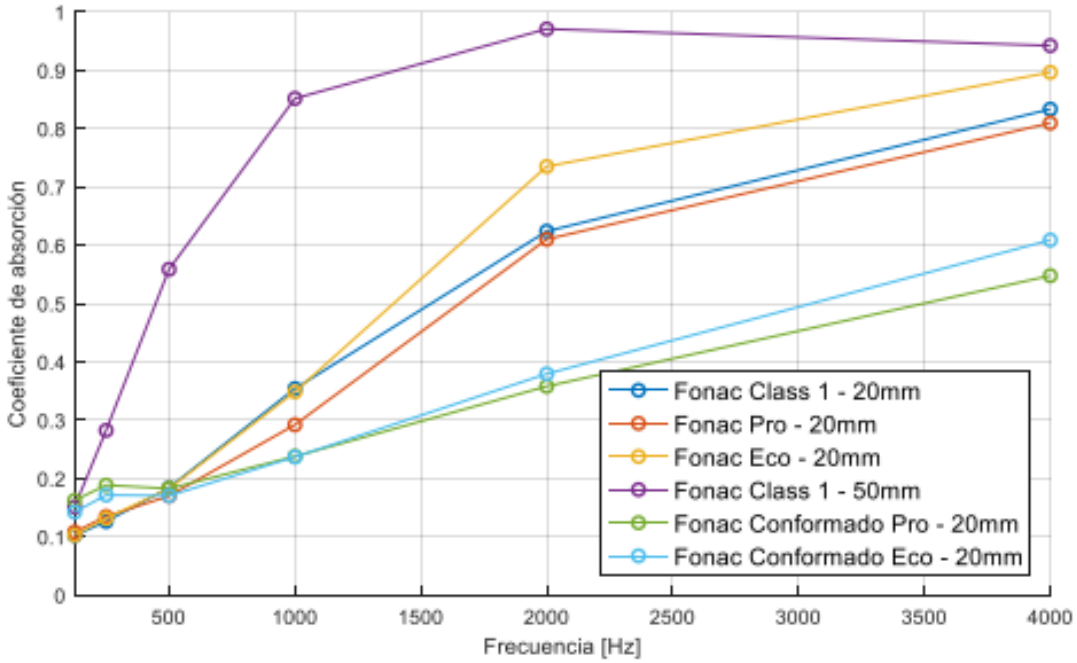


Figura 3: Coeficiente de absorción acústica de espumas de melamina y poliuretano poliéster.

En la Figura 4 el material es espuma de poliéster, el espesor es 25 mm y la marca es Acuflex.

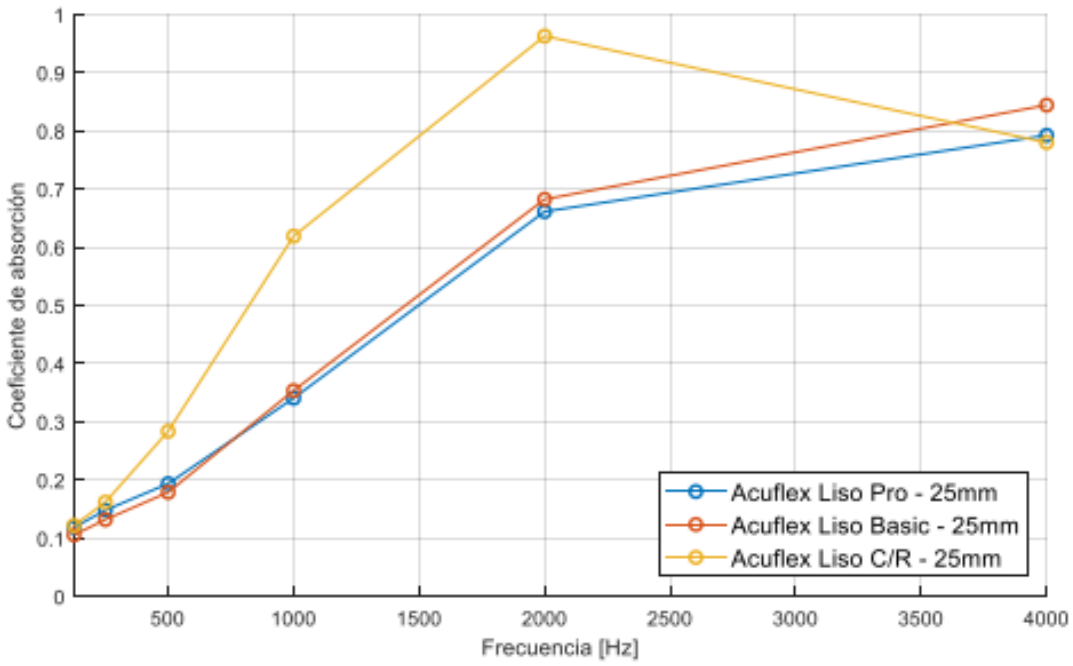


Figura 4: Coeficiente de absorción acústica de espumas de poliéster.

El fieltro de lana de vidrio tiene espesores que van desde 38 mm hasta 100 mm pasando por 50 mm, el coeficiente de absorción acústica de incidencia normal es alto para un amplio rango de frecuencias como puede verse en la Figura 5 donde se muestran los resultados de las probetas de marca Isover. Así mismo son las probetas de mayor espesor y más pesadas.

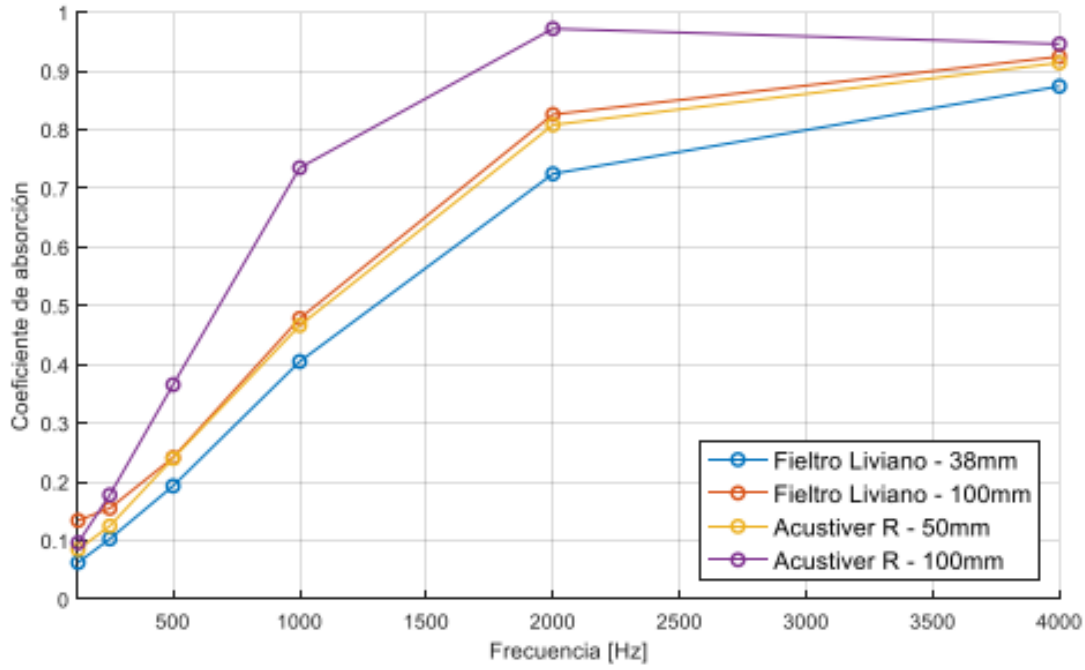


Figura 5: Coeficiente de absorción acústica de fieltro de lana de vidrio.

Finalmente, en la Figura 6 se encuentran los resultados de una probeta de espuma de melamina de la marca Willtec y de dos probetas de espuma de poliamida de la marca Solimide. En este caso el espesor es 25 mm para cada probeta, siendo el mismo el original de venta. En la Figura 7 se muestran los resultados del ensayo superponiendo dos probetas del mismo material y marca para lograr un espesor de 50 mm, observándose que mejora el rendimiento de la manta de marca Willtec pero no tanto así los de la marca Solimide.

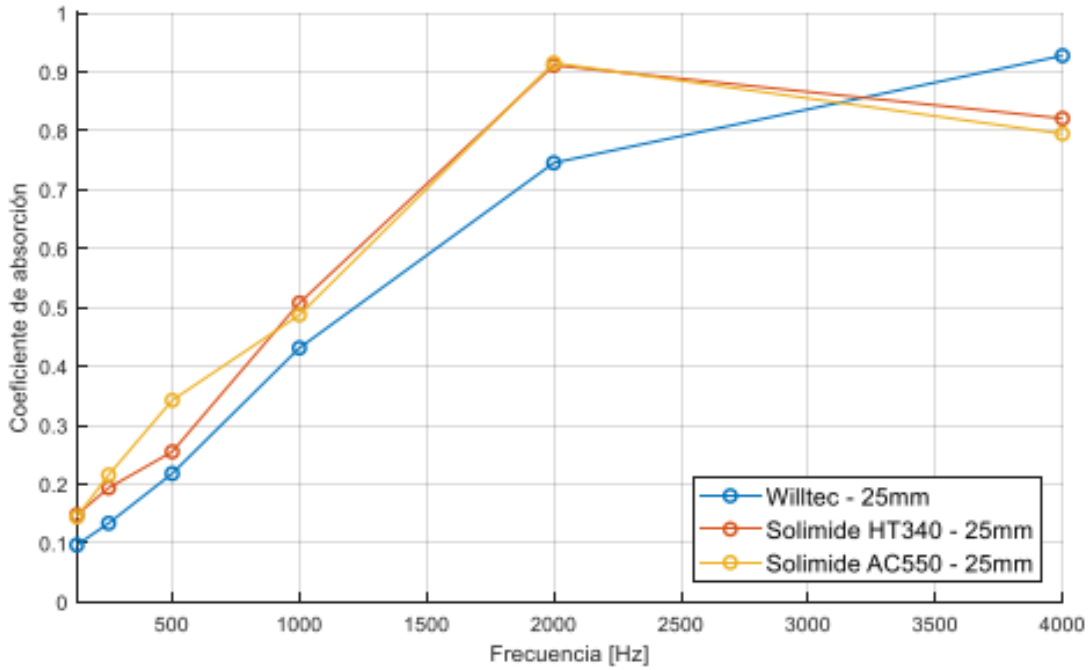


Figura 6: Coeficiente de absorción acústica de espumas de melamina y de poliamida de 25 mm.

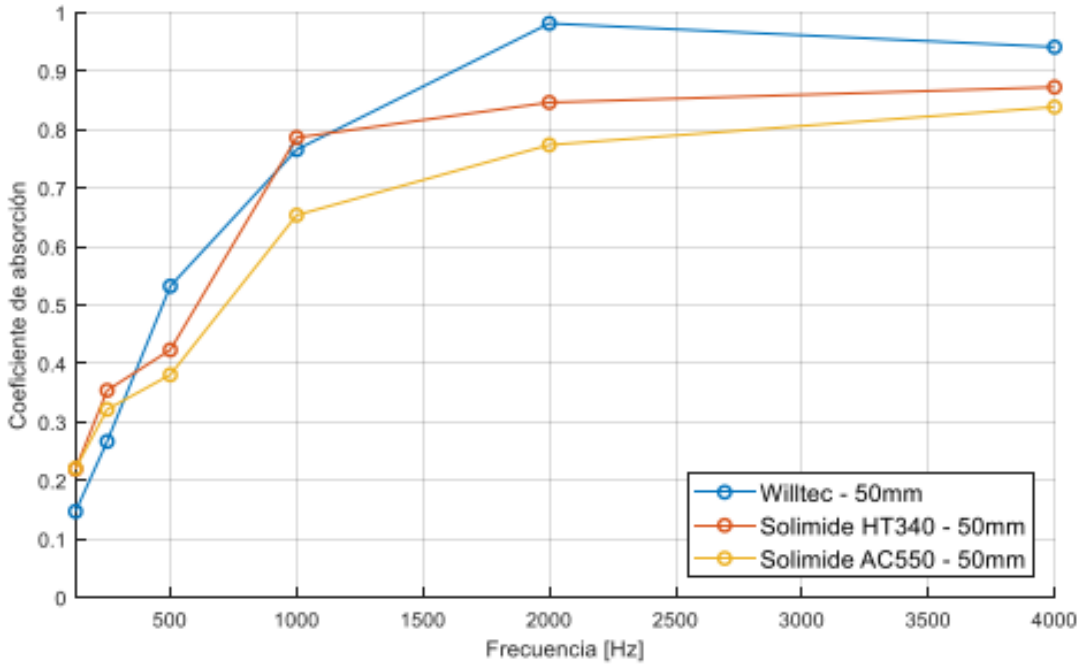


Figura 7: Coeficiente de absorción acústica de espumas de melamina y de poliamida de 50 mm

3.2 Telas para sobres contenedores de mantas acústicas

Para determinar el comportamiento de las telas se realizaron los ensayos utilizando para cada una el mismo material de manta acústica, este fue espuma de poliéster de 25 mm Acuflex Liso Pro (ver Figura 4). Para algunas muestras, la tela aumentó el coeficiente de absorción y para otros lo redujo. Esto se observa en la Figura 8 donde las telas 1, 4 y 6, que presentan un menor coeficiente de absorción que la manta sola, contienen mayor cantidad de para aramida (Kevlar). Y las telas 2, 3 y 5, que presentan un mayor coeficiente que la manta sola, contienen mayormente meta aramida (Nomex).

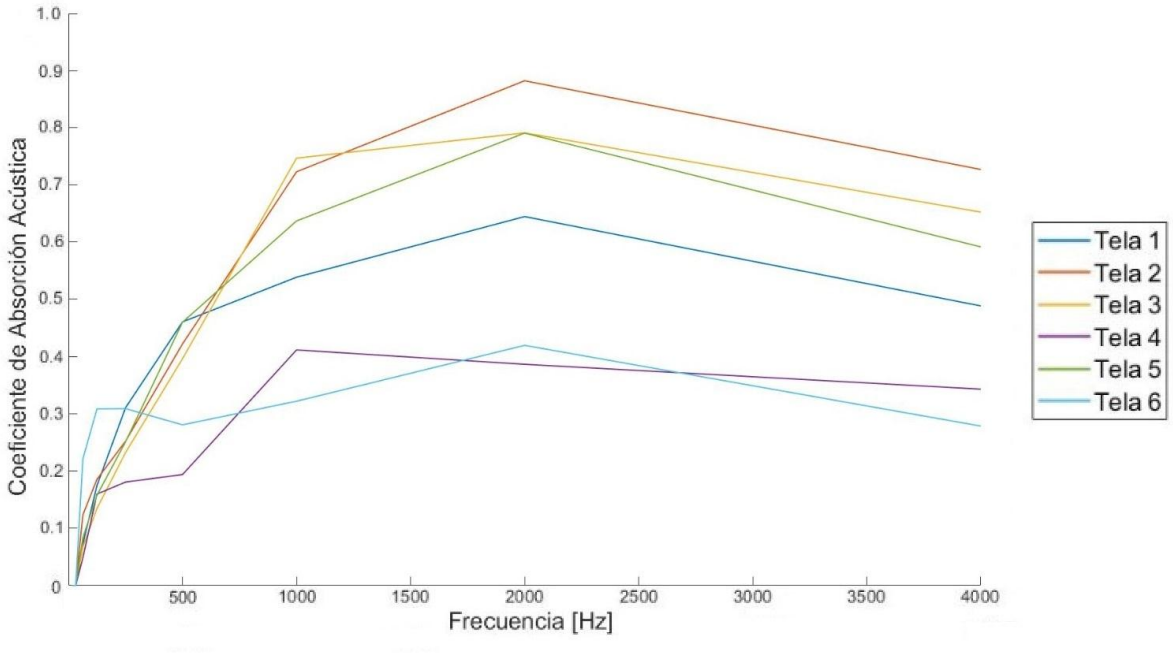


Figura 8: Coeficiente de absorción acústica de telas con espuma de poliéster de 25 mm.

4. CONCLUSIONES

De los materiales ensayados, las mantas acústicas que presentan mejores coeficientes de absorción con relación al espesor/peso son la espuma de poliéster Acuflex C/R y la espuma de poliamida Solimide HT 340 y AC 550.

Los fieltros de Isover y las espumas Fonac brindaron los coeficientes más bajos con relación al peso.

Por otro lado, las muestras de telas Nomex tienen un coeficiente de absorción alto en combinación con la manta Accuflex Pro R placa lisa de 25 mm de espesor. Y las muestras que contienen Kevlar presentan un coeficiente de absorción menor, lo que indica que reflejan más las ondas acústicas. Esto es interesante para la confección de los sobres contenedores de las mantas acústicas, porque podrían realizarse combinando una tela reflexiva para el interior de la cofia y una tela más absorbente en contacto con la pared de esta, ya que la mayor fuente de ruido proviene del exterior.

En cuanto al método, se puede concluir que resulta adecuado para la comparación de un mismo elemento (manta acústica o tela) de una gran cantidad de materiales o proveedores, debido a su velocidad de ensayo y sencillez, prestando atención a la confección de las probetas. Y si bien la norma indica que es un método para determinar el coeficiente de absorción de incidencia normal, el cual no es directamente aplicable al diseño, permite establecer una comparación aceptable para una primera decisión de material y espesor de una manera económica tanto en tiempo como en dinero.

REFERENCIAS

[1] Langley Research Center y K. M. Eldred, “Acoustic loads generated by the propulsion system”, National Aeronautics and Space Administration, 1971.

[2] *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*, ISO 354:2003, International Organization for Standardization, Suiza, 2024.

[3] *Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method*, ASTM C423-22, ASTM International, USA, 2023.

[4] *Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: Method using standing wave ratio*, ISO 10534-1:1996, International Organization for Standardization, Suiza, 2022.

[5] *Acoustics — Determination of acoustic properties in impedance tubes. Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance*, ISO 10534-2:2023, International Organization for Standardization, Suiza, 2023.

[6] *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System*, ASTM E1050-19, ASTM International, USA, 2024.

[7] D. R. Stanley, “Impedance Tube Specimen Preparation and Mounting Issues”, presentado en inter.noise, New York City, USA, 2012.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Tratamiento acústico con bajo impacto ambiental en aulas universitarias: una propuesta modular.

Parisi, Virginia[†,1]; Ruiz, Darío[‡§,2]; Payo, Damian[‡†,3]

[†] Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Católica de Salta

‡ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

[§] Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora, Universidad Nacional de Quilmes.

[1] mparisi@ucasal.edu.ar, [2] dario.ruiz@unq.edu.ar, [3] sdpayo@ucasal.edu.ar

Resumen La calidad acústica en los espacios educativos es fundamental para mejorar la comprensión verbal y el rendimiento académico. Sin embargo, muchas aulas no cuentan con un tratamiento acústico interno adecuado y las soluciones aplicadas a menudo utilizan materiales de alto impacto ambiental. Este trabajo aborda esta problemática proponiendo el desarrollo de dispositivos acústicos modulares fabricados con materiales sostenibles y de bajo impacto ambiental. Los dispositivos diseñados fueron evaluados mediante simulaciones en dos aulas modelo de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Católica de Salta. Los resultados demostraron que el diseño es eficaz para el tratamiento acústico interno en entornos educativos.

Palabras clave: Acústica Arquitectónica, Materiales Sustentables, Espacios Educativos, Micelio, Lana de Oveja.

Abstract Acoustic quality in educational spaces is essential for improving verbal comprehension and academic performance. However, many classrooms do not have adequate internal acoustic treatment, and the solutions applied often use materials with a high environmental impact. This work addresses this problem by proposing the development of modular acoustic devices made from sustainable materials with a low environmental impact. The devices designed were evaluated through simulations in two model classrooms at the Faculty of Architecture of the Catholic University of Salta. The results demonstrated that the design is effective for internal acoustic treatment in educational environments.

Keywords: Architectural Acoustics, Sustainable Materials, Educational Spaces, Mycelium, Sheep wool.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad educativa depende no solo de los procesos académicos, sino también de las condiciones edilicias en las que se desarrolla la enseñanza. En este marco, el diseño de aulas debe contemplar variables arquitectónicas y acústicas, ya que los entornos inadecuados, con elevados niveles de ruido o deficiente acondicionamiento, generan efectos adversos en docentes y estudiantes, como fatiga, pérdida de concentración y alteraciones fonoaudiológicas [1,2]. La Organización Mundial de la Salud [3] advierte que el ruido escolar constituye un obstáculo crítico para la comunicación oral y el aprendizaje del lenguaje.

Entre los parámetros fundamentales, el tiempo de reverberación (TR) incide directamente en la inteligibilidad de la palabra: valores excesivos provocan enmascaramiento y pérdida de claridad, mientras que valores reducidos mejoran la comprensión [4,5] . Las normativas internacionales (ANSI, NBR, OMS) establecen rangos óptimos de TR en función del volumen y uso de los recintos

[6]. Sin embargo, las normativas educativas nacionales continúan priorizando aspectos estructurales y visuales por sobre los acústicos [7,8].

Los materiales juegan un rol determinante en este comportamiento, particularmente los absorbentes porosos como fibras minerales y espumas sintéticas (lana de vidrio, lana de roca, poliuretano), de alta eficacia pero con elevado impacto ambiental y dependencia de recursos fósiles [9,10] (ver Tabla 1). En contraposición, la construcción sostenible y la economía circular orientan la investigación hacia materiales alternativos de bajo impacto ambiental [11]. Dos opciones relevantes son el micelio, capaz de formar compuestos sólidos biodegradables con propiedades acústicas [12], y la lana de oveja de descarte, fibra renovable con potencial como aislante acústico y generadora de valor local [13,14] .

El presente trabajo analiza el acondicionamiento acústico de aulas desde una doble perspectiva: la influencia del diseño arquitectónico en la inteligibilidad del habla y el confort auditivo, y la incorporación de materiales sustentables que respondan a los desafíos ambientales y energéticos actuales. Se propone, en consecuencia, un enfoque integrador orientado a desarrollar lineamientos técnicos.

Tabla 1. Cuadro comparativo de materiales y sus características. (BIO: biodegradable, GEI: produce gases de efecto invernadero en su producción o distribución, EC: colabora a la economía circular).

Material	Origen	Inflamable	BIO*	GEI*	EC*
Lana de Vidrio	Mineral	NO	NO	SI	NO
Lana de Roca	Mineral	NO	NO	SI	NO
Espuma de poliuretano de alta densidad	Sintético	SI	NO	SI	NO
Placa MDF de 18mm	Vegetal	SI	SI	SI	NO
Lana de Oveja	Animal	NO	SI	NO	SI
Micelio	Vegetal	NO	SI	NO	SI

2. METODOLOGÍA

2.1. Caracterización acústica de materiales

Se realizaron medidas acústicas del micelio con una guía de onda que consta de un parlante, un tubo cilíndrico y dos micrófonos, con el fin de estudiar la respuesta en frecuencia del material, y poder determinar su coeficiente de absorción. La técnica elegida (*two microphones transfer matrix technique*) aparece en la bibliografía (Norma ASTM E1050-19) [15], como una técnica probada y robusta para estudiar tanto, la respuesta en impedancia, como el coeficiente de absorción de distintos materiales.

Se utiliza el software de medición IRma [16] desarrollado por parte del equipo perteneciente al Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo-UNQ, https://lapso.org). El procedimiento consta de un barrido logarítmico en un rango de frecuencias definido, entre 30 Hz y 22 kHz, que se reproduce a través del parlante ubicado en un extremo del cilindro [17]. La frecuencia de muestreo de las medidas es 96 kHz. Este barrido es grabado por los micrófonos ubicados en el extremo opuesto. En la señal de audio resultante es posible observar el comportamiento en frecuencia y amplitud de la guía de onda, o de un material de características desconocidas acoplado al final de esta (ver Figura 1).

(a) Tubo de impedancia utilizado para la realización de mediciones.

(b) Equipo de Laboratorio (LAPso) trabajando en las mediciones del material.

Figura 1: Mediciones en laboratorio del material Micelio.

2.2. Relevamiento Acústico Arquitectónico

Se evaluaron dos aulas de la Universidad Católica de Salta: un aula taller de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU) (a partir de ahora AT4) de base rectangular y con un volumen de 659,06 m^2 y un Aula de Diseño de interiores (a partir de ahora DI), de base rectangular y con un volumen de 211 m^2. El relevamiento acústico se realizó conforme a la norma ISO 3382 [18] considerando cuatro pares Fuente-Receptor (Receptores: M1 y M2 y Fuentes: F1 y F2) en el aula, se detalla a continuación un plano de ubicación de micrófonos y parlantes para el aula.

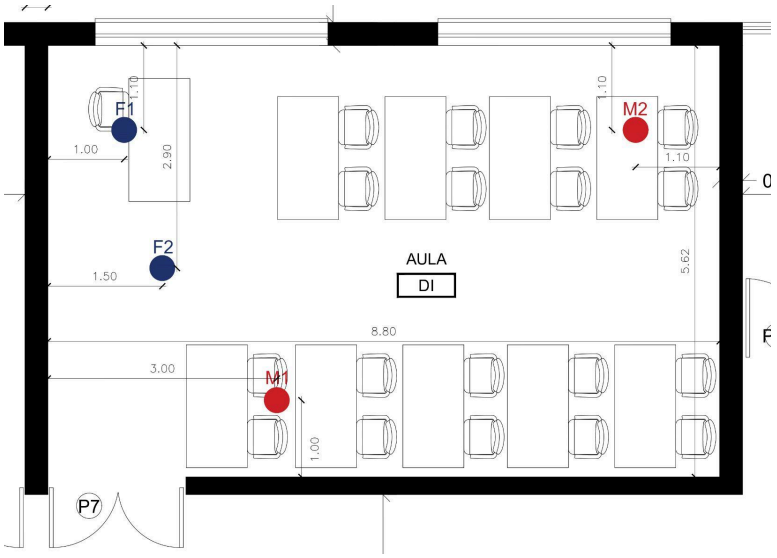


Figura 2: Planta de relevamiento acústico en aula DI. Se observan las Fuentes en Azul y los Receptores en Rojo

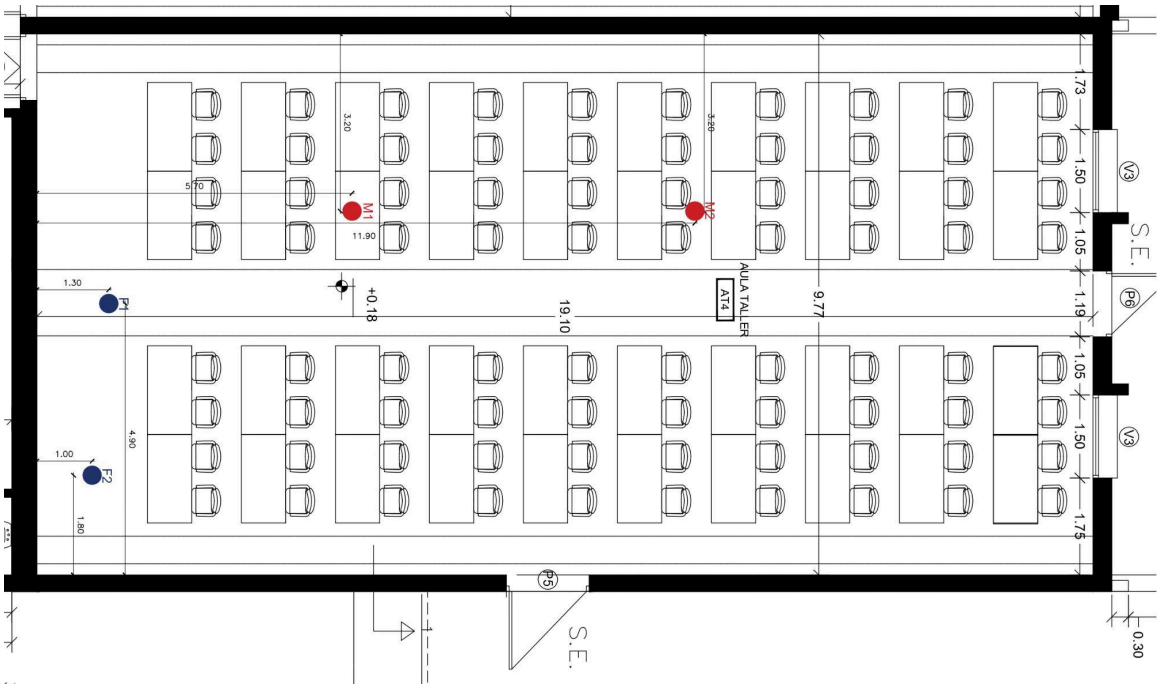


Figura 3: Planta de arq. de aula A4. Se observan las Fuentes en Azul y los Receptores en Rojo.

Las fuentes se ubicaron a 1,5 m y los receptores a 1,2 m, garantizando una amplia cobertura. Se empleó un parlante Genelec 4030b como fuente direccional y un micrófono Audix omnidireccional conectado a una interfaz Focusrite Scarlett 18i20. El estímulo de medición fue un barrido exponencial [17] de frecuencias (20 Hz–20 kHz). El análisis posterior de los datos, procesados por bandas de octava, se realizó con el software IRMA [19].

2.3. Diseño de dispositivos acústicos y aplicación teórica.

Para el diseño de los dispositivos acústicos se evaluaron las propiedades estructurales de los materiales seleccionados, considerando que el micelio posee capacidad de conformar una estructura rígida, mientras que la lana de oveja carece de dicha condición. En consecuencia, se proyectó un dispositivo de contención a base de micelio, incorporando lana de oveja como material de relleno. El desarrollo gráfico se realizó mediante los software *AutoCAD* y *SketchUp,* y la etapa de maquetación y visualización tridimensional se llevó a cabo en *Lumion*.

Con base en los datos obtenidos, se desarrollaron prototipos que optimizaron el grosor, la densidad y la disposición de los materiales. Los diseños fueron adaptados a la morfología del aula, priorizando la reducción de reflexiones internas y el logro de una absorción eficiente.

2.4. Aplicación teórica.

Los dispositivos fueron aplicados de forma teórica a los recintos aplicando el modelo teórico de Sabina [8,19], calculando la cantidad de módulos necesarios para aproximarse a los valores de TR óptimo (TRop) establecidos en la bibliografía. La comparación entre TR inicial, TRop y absorción de cada módulo permitió validar la efectividad de los prototipos.

3. RESULTADOS

3.1. Coeficiente de Absorción de los Materiales.

Muestra de Micelio de 4 cm de espesor: Las mediciones realizadas sobre las muestras de micelio evidencian un buen desempeño en la absorción de frecuencias bajas, mientras que en frecuencias altas, si bien presenta resultados favorables, su rendimiento disminuye (ver Tabla 2).

Lana de Oveja 7 cm de espesor: Se utilizarán los datos arrojados por el estudio de Vechiatti [13] (ver tabla 2), donde se analiza la muestra del material con un espesor de 7 cm de alto y su respectivo coeficiente de absorción para distintas bandas de octavas, se observa que el comportamiento acústico de la lana de oveja mejora a medida que la frecuencia aumenta, es decir actua más efectivamente como absorbente para frecuencias altas y disminuye su rendimiento en frecuencias bajas.

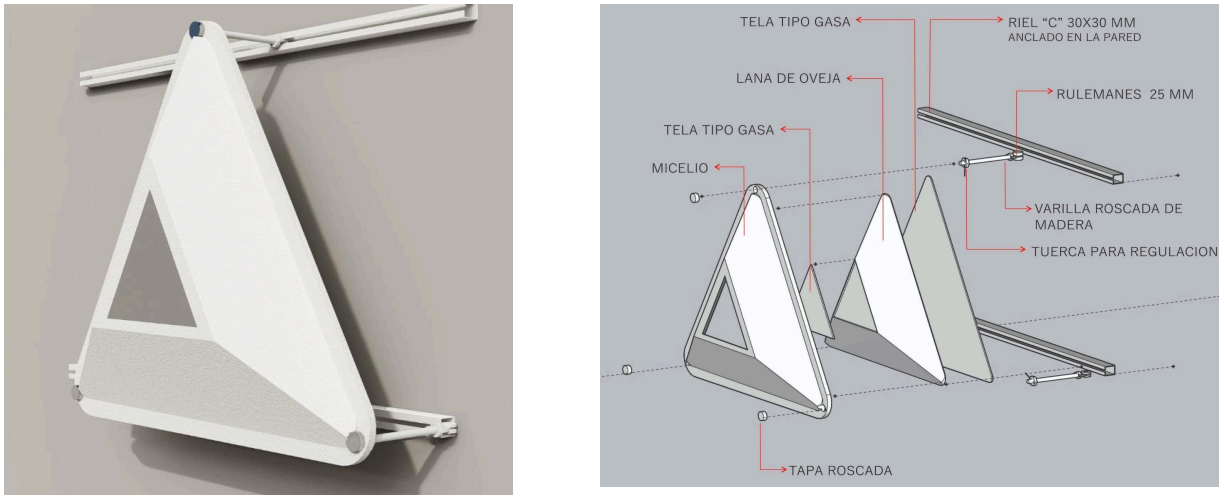
Tabla 2: Resultados promedio por banda de octava obtenidos, tanto en las mediciones del LAPSo(Micelio) como en los resultados logrados por el estudio de Nilda Vechiatti [13] (Lana de oveja).

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000
Lana de Oveja (α)	0.08	0.19	0.36	0.48	0.6
Micelio (α)	0.18	0.24	0.25	0.3	0.28

Estos datos revelan que ambos materiales pueden colaborar entre sí, ya que el micelio presenta un coeficiente de absorción mayor en bajas frecuencias (sobre todo en las dos primeras bandas de octava evaluadas) y la lana de oveja en altas frecuencias.

3.2. **Diseño de los Dispositivos Acústicos:**

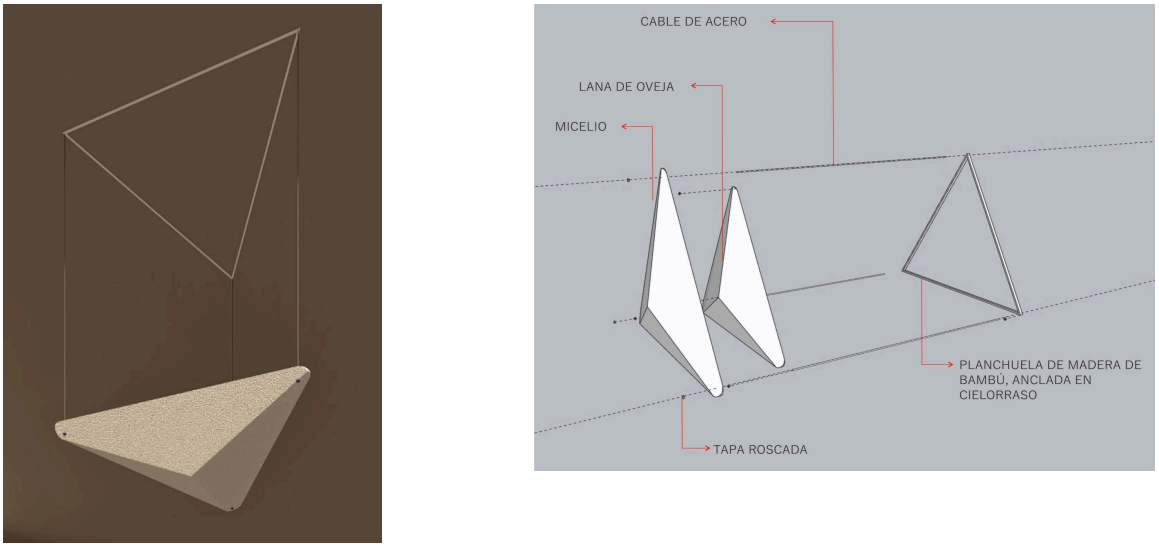
Para el diseño de los dispositivos acústicos se tomaron en cuenta los coeficientes de absorción recientemente analizados, la estructura material de cada uno de los biomateriales, y la distribución en el aula. Obtuvimos dos dispositivos modelos:



(a)Prototipo de dispositivo D1. (b) Despiece de dispositivo con montaje

Figura 2: Dispositivo D1).

El "Dispositivo D1" es un sistema modular facetado con base triangular de 55 cm por lado, morfología de pirámide truncada excéntrica y 10 cm de altura (Figura 2). Su envolvente está construida en micelio, material rígido y autoportante, mientras que su interior contiene lana de oveja recubierta con gasa para su protección. Se instala en pared mediante rieles empotrados y varillas roscadas regulables, lo que permite ajustar su separación, añadir o retirar módulos y lograr un acondicionamiento acústico flexible y variable.



(a)Prototipo de dispositivo D2. (b) Despiece de dispositivo con montaje

Figura 3: Dispositivo D2.

Se propone el diseño del "Dispositivo D2" para su uso en cielorrasos(Figura 3). Este dispositivo presenta una base triangular de 127 cm por lado, con centro excéntrico y una altura de 20 cm, configurando así una geometría diseñada para optimizar la dispersión y absorción acústica en el espacio.

Para determinar el comportamiento acústico se realizaron las fórmulas [1].

$$A_{tot} = (S_{micelio} \cdot \alpha_{micelio}) + (S_{lana} \cdot \alpha_{lana}) \quad [1]$$

La fórmula expresa la absorción acústica total (A_{tot}) de un dispositivo como la suma ponderada de las superficies de cada material por su respectivo coeficiente de absorción.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el análisis de los dispositivos (Tabla 3), organizados por bandas de octava y considerando los rangos sugeridos en la bibliografía de Carrión [20] y Cravero et al. [6].

Tabla 3: muestra los resultados de absorción total de cada dispositivo D1 y D2, por banda de octava.

	Bandas de Octavas.			
Absorción de dispositivos.	500 Hz.	1000 Hz.	2000 Hz.	4000 Hz.
Atot. D1	0.43	0.51	0.5	0.6
Atot. D2	0.68	0.81	0.86	0.94

3.3. Caracterización Acústica de Aulas.

Para el análisis comparativo se consideraron los valores óptimos de TR recomendados propuestos por Carrión y Cravero[20 Y 6] para recintos entre 100 m² y 10.000 m², que se ajustan al caso de estudio.

Los relevamientos acústicos mediante IRs evidenciaron tiempos de reverberación (TR_{30}) relevados, entre 2,6 y 2,7 s, superiores a lo recomendado por la bibliografía internacional. En consecuencia, la claridad (C_{50}) resultó baja, reduciendo la inteligibilidad de la palabra y confirmando que las aulas presentan condiciones acústicas inadecuadas para la comunicación verbal efectiva en el proceso de enseñanza–aprendizaje.

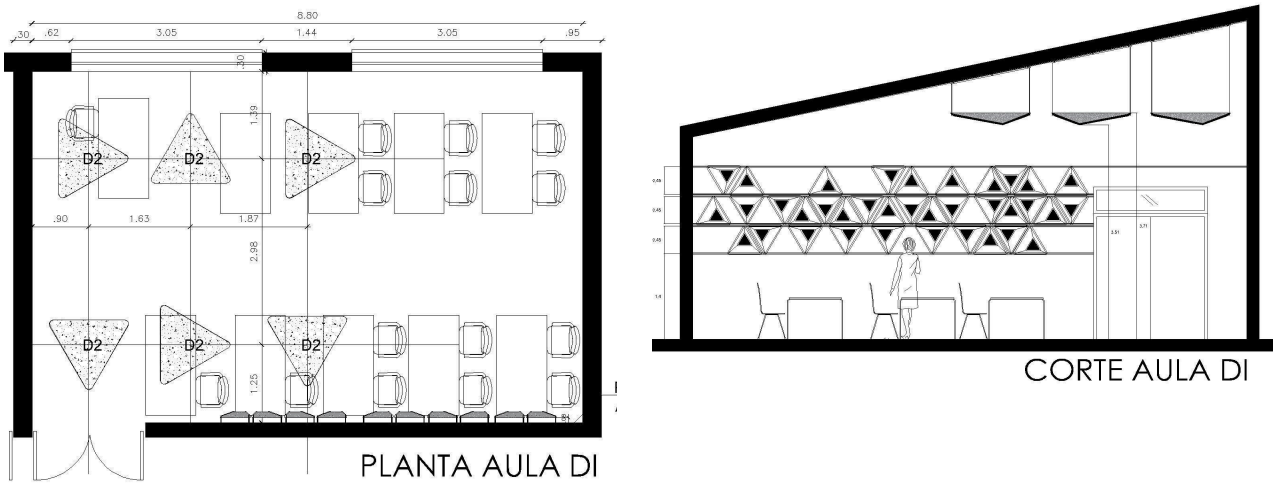
Con el fin de generar un resumen de todos los datos obtenidos se realiza una tabla comparativa (Tabla 4), que evalúa los valores recomendados para TR_{opt} y los TR_{30} obtenidos, en las bandas de octavas de 250, 500, 1000 y 2000 Hz.

Tabla 4: Tabla de comparación de los resultados obtenidos en las aulas analizadas y la Tabla 1

	250	500	1000	2000
TR op.	1	1	0.8	0.8
TR DI	3.2	2.6	2.7	2.4
TR AT	2.9	2.9	2.8	2.9

3.4. Aplicación Teórica de los Dispositivos mediante Teoría de Sabine.

Para cada aula modelo se realizó una simulación de aplicación teórica de los dispositivos acústicos D1 y D2.

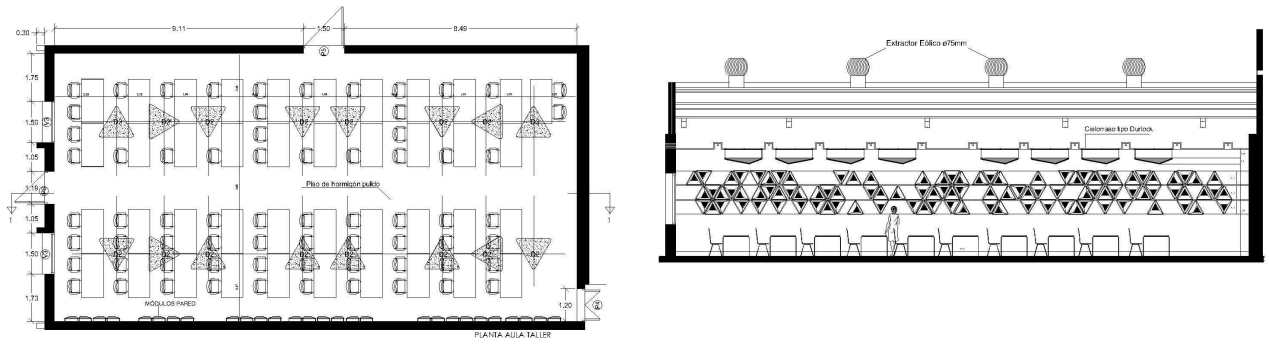


(a)Planta de aula DI, disposición de paneles. (b) Corte de aula DI, disposición de paneles

Figura 4: Planta y corte del aula DI, disposición de los módulos D1 y D2 en paredes y techo.

En el aula de Diseño de Interiores (DI) se instalaron 40 dispositivos acústicos modulares D1 en la pared sur, a 1,40 m de altura, garantizando una adecuada relación con la zona de oyentes. Dado que el cielorraso inclinado concentra la energía sonora en su punto más elevado, se incorporaron 6 dispositivos D2 suspendidos, distribuidos estratégicamente para mejorar la absorción y lograr una dispersión sonora más uniforme en el recinto (ver Figura 4).

En cuanto al aula taller de arquitectura (AT4), se aplicaron 102 dispositivos acústicos modulares D1 sobre la pared y 16 dispositivos D2 suspendidos en cielorraso (ver Figura 5).



(a)Planta de aula AT4, disposición de paneles. (b) Corte de aula AT4, disposición de paneles

Figura 5: Planta y corte del aula AT4, disposición de los módulos D1 y D2 en paredes y techo.

Finalmente se realizaron cálculos de acondicionamiento acústico de las aulas, teniendo en cuenta el área de absorción de los dispositivos D1 y D2, la implementación de dichos dispositivos resulta en la reducción del TR de manera significativa.

Tabla 5: Tabla de comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones teóricas a partir de las áreas de absorción de los módulos acústicos.

AULA	Tiempos de Reverberación	500 Hz	1000 Hz.	1500 Hz.	2000 Hz.
DI	TR sin acondicionamiento	3.2	2.6	2.7	2.4
DI	TR con acondicionamiento	1.18	1.14	1.02	0.86
AT4	TR sin acondicionamiento	2.9	2.9	2.8	2.9
AT4	TR con acondicionamiento	1.4	1.47	1.46	1.25

Los valores medidos y acondicionados indican la efectividad de los dispositivos acústicos implementados en el espacio para mejorar la calidad sonora.

4. CONCLUSIONES

Los relevamientos acústicos en aulas de la UCASAL mostraron tiempos de reverberación cercanos a 3 s, inadecuados para la enseñanza. Para corregirlos, se diseñaron paneles modulares con micelio y lana de oveja de descarte, que redujeron el TR hasta en 1,5 s.

Los resultados confirman la eficacia acústica y ambiental de estos biomateriales, al disminuir significativamente la reverberación y favorecer la economía circular. Se prevé una próxima etapa de fabricación y verificación in situ para optimizar los prototipos según las características de cada aula.

En conclusión, los paneles desarrollados constituyen una solución acústica sostenible que mejora la calidad de los espacios educativos y aporta beneficios ambientales.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su especial agradecimiento a la empresa Fungipor, por la valiosa colaboración en la provisión del material de micelio, fundamental para el desarrollo y análisis experimental realizado en el laboratorio.

Los autores han recibido financiación de la subvención UCASAL n.º 1232/2022.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] Zapata Rueda, C. M., Viegas, G. M., San Juan, G. A., Calonge, H. R., Coronado Ruiz, J. A., Ochoa Villegas, J., y Montoya Flórez, O. L. (2018). Comodidad ambiental en aulas escolares: Incidencia en la salud docente y rendimiento cognitivo de los estudiantes en colegios públicos de Bogotá, Medellín y Cali. Universidad de La Salle.

[2]Ferreyra, S. P., Cravero, G. A., Longoni, H. C., López, J. F., Parada, M. F., & Díaz, M. S. (2019). Calidad acústica de aulas universitarias: análisis y evaluación de parámetros acústicos de recintos. Revista Tecnología y Ciencia.

[3] Organización Mundial de la Salud. (1999). *Guías para el ruido urbano*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

[4] Kurtovic, H. (1975). The influence of reflected sound upon speech intelligibility. Acta Acustica united with Acustica.

[5] Marshall, L.G. (1994). Un programa de medición acústica para evaluar auditorios basado en la relación de energía sonora temprana/tardía. La Revista de la Sociedad de Acústica de América.

[6] Cravero, G. A., Ferreyra, S. P., Flores, M. D., Budde, L., Longoni, C., & Ramos, O. A. (2013). Medición y Simulación De Tiempo De Reverberación Y Otros Parámetros Acústicos De Aulas.

[7] Ministerio de Educación de la República Argentina (1998). Criterio y Normativa Básica de Arquitectura Escolar.

[8] Farina, M.A. (2021). Tipologías arquitectónicas y calidad acústica de salas para música. ISBN: 978-987-558-601-7. Universidad Nacional de Quilmes.

[9] Carrizo, C. D., Melian, J. S., y Stettler, G. (2011). Absorción Sonora. Cátedra Fundamentos de Acústica y Electroacústica. Universidad Tecnológica Nacional.

[10] Pereiro, G. (2012). Materiales compuestos de altas prestaciones elaborados con recursos naturales.

[11] Da Costa Pimenta, C. C. (2022). La Economía Circular como eje de desarrollo de los países latinoamericanos. Revista Economía y Política.

[12] Walter, N., y Gürsoy, B. (2022). A Study on the Sound Absorption Properties of Mycelium-Based Composites Cultivated on Waste Paper-Based Substrates. Biomimetics.

[13] Vechiatti, N., Iasi, F., Tomeo, D., Núñez Berté, A. (2023). Propiedades acústicas de mantos de lana de oveja de descarte, CAA-AdAA2023-037.

[14] Sandoval Manríquez, M. (2014). Convivencia y clima escolar: claves de la gestión del conocimiento. *Última década*, *22*(41), 153-178.

[15] Bodén, H., & Åbom, M. (1986). Influence of errors on the two‐microphone method for measuring acoustic properties in ducts. The Journal of the Acoustical Society of America, 79(2), 541-549.

[16] Payo, Damian, y Manuel Eguia. “IRMA: Software de código abierto para el análisis acústico”. En AdAA 2023. Buenos Aires, Argentina. Diciembre 2023.

[17] Farina, A. (2000). Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. *Preprints-Audio Engineering Society*.

[18] Norma, U. N. E. EN ISO 3382-2: 2008. Tiempo de reverberación en recintos.

[19] Sabine, W. C. (1922), Collected Papers on Acoustics, Harvard University Press.

[20] Carrión Isbert, A. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC.

[21]Cravero, G. A., Ferreyra, S. P., Flores, M. D., Budde, L., Longoni, C., & Ramos, O. A. (2013). Medición y Simulación De Tiempo De Reverberación Y Otros Parámetros Acústicos De Aulas.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Evaluación subjetiva de la cancelación de crosstalk en reproducción binaural por parlantes

Lizaso, G.[†,1]; Petrosino, J. [†‡,2].

[†] Centro de Estudios y Producción Sonora y Audiovisual, Universidad Nacional de Lanús, Remedios de Escalada

‡ Ingeniería de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero, Caseros

[1] glizaso@unla.edu.ar, [2] jpetrosino@untref.edu.ar

Resumen La reproducción de audio binaural mediante parlantes requiere una adecuada cancelación de crosstalk entre canales, lo cual suele implementarse mediante filtros inversos diseñados a partir de mediciones acústicas. En trabajos previos hemos aplicado técnicas de regularización de matrices para obtener dichos filtros, alcanzando niveles de cancelación inferiores a 20 dB en espacios acústicos no controlados. Estos valores coinciden con los reportados por otros autores que han trabajado cancelación de crosstalk con dos altavoces en ambientes de uso común. Sin embargo, parecen demasiado bajos si se considera la literatura especializada en percepción de espacialización. Pruebas informales realizadas entre los propios integrantes del equipo arrojaron resultados perceptivos sorprendentemente positivos, con una marcada sensación de espacialidad. Esta observación motiva el presente trabajo, que propone una evaluación subjetiva sistemática orientada a caracterizar en mayor profundidad la experiencia auditiva. Para ello, se aplicarán pruebas controladas centradas en atributos perceptuales relevantes para la escucha binaural con altavoces, como por ejemplo localización, profundidad y reverberación. Se espera que los resultados contribuyan a comprender mejor la relación entre el grado de cancelación alcanzado y la calidad percibida, aportando criterios para el diseño de sistemas de reproducción binaural robustos y de bajo costo.

Palabras clave: audio transaural, cancelación de crosstalk aéreo, percepción de binauralidad.

Abstract Binaural audio reproduction through loudspeakers requires proper crosstalk cancellation between channels, which is typically implemented using inverse filters designed from acoustic measurements. In previous work, we applied matrix regularization techniques to obtain such filters, achieving cancellation levels inferior to 20 dB in uncontrolled acoustic environments. These values are consistent with those reported by other authors who have studied two-loudspeaker crosstalk cancellation in common listening spaces. However, they appear rather low considering the specialized literature on spatial perception. Informal tests conducted among the research team yielded surprisingly positive perceptual results, with a strong sense of spatiality. This observation motivates the present work, which proposes a systematic subjective evaluation aimed at a deeper characterization of the auditory experience. Controlled listening tests will be conducted focusing on perceptual attributes relevant to binaural loudspeaker reproduction, such as localization, depth, and reverberation. The results are expected to contribute to a better understanding of the relationship between the achieved degree of cancellation and the perceived quality, providing criteria for the design of robust and low-cost binaural reproduction systems.

Palabras clave: transaural audio, crosstalk cancellation, binaural perception.

1. INTRODUCCIÓN

La reproducción de audio binaural mediante parlantes busca recrear la sensación tridimensional de una determinada escena sonora sin hacer uso de auriculares. El audio binaural utiliza dos canales, al igual que el audio estéreo, pero se diferencia en el tipo de señales que se transmiten por cada uno de esos canales. Las señales de audio binaural incluyen alteraciones específicas que son psicoacústicamente consistentes con indicios que le permiten al sistema auditivo recrear la imagen tridimensional de la escena sonora. Pero, para lograrlo resulta necesario que la señal de cada canal

llegue exclusivamente al oído correspondiente (ipsilateral), sin ningún tipo de interferencia entre canales. Esto se resuelve en general mediante el uso de auriculares para su reproducción. Además de significar una cierta incomodidad por tener que incorporar equipamiento en la cabeza del oyente existen reportes que indican que el uso de auriculares lleva a "internalizar" la imagen de ubicación de la fuente sonora [1].

Se conoce como audio transaural a la técnica que busca evitar el uso de auriculares reemplazándolos por dos altavoces con señales procesadas mediante filtros inversos encargados de cancelar el crosstalk aéreo. Este sistema permite a un oyente ubicado en una posición particular recibir la información directa correspondiente a cada oído del audio binaural (señales ipsilaterales) con una importante atenuación de las señales cruzadas (contralaterales). A lo largo de las últimas décadas, múltiples autores han abordado este problema desde distintos enfoques: desde los primeros sistemas analógicos propuestos por Schroeder y Atal en 1966 [2], hasta los desarrollos digitales de Nelson, Kirkeby y Bai en los años 2000 [3], [4] y Choueri en 2017 [5]. No obstante, a pesar de los avances en el diseño de filtros inversos y estrategias de regularización, la aplicación práctica de la cancelación de crosstalk enfrenta limitaciones como el reducido “sweet spot”, la sensibilidad al movimiento del oyente y la coloración espectral [6].

En trabajos previos, los presentes autores han implementado filtros de cancelación de crosstalk (XTC) obtenidos por regularización matricial utilizando dos altavoces ubicados frente a un oyente ubicado a 35 cm de distancia en condiciones no anecoicas. Los niveles de cancelación alcanzados se mantuvieron en un rango de entre 5 dB y 10 dB, obteniendo sólo para algunas frecuencias puntuales valores cercanos a los 20 dB [7]. Estos niveles de cancelación resultaron suficientes para lograr una sensación de binauralidad bien marcada. Estos resultados son compatibles con los reportados por otros autores [4][6][8]. Pero, contrastan notablemente con los estudios de Parodi y Rubak [1] que sostienen que la mínima separación audible entre canales para lograr que las señales binaurales con crostalk se perciban igual que las originales debe superar los 15 dB para la mayoría de los estímulos, y alcanzar los 20 dB para ruido de banda ancha. Sin embargo, Choueiri al referirse a este estudio, sostiene que para lograr una buena sensación de binauralidad no resulta sencillo ni necesario conseguir una separación de canales de 20 dB [5].

Para comprender las discrepancias observadas, resulta pertinente diferenciar entre distintos tipos de crosstalk y explicitar el modo en que éste se mide. En un sistema de reproducción binaural en funcionamiento normal, cada oído recibe señales distintas que pueden verse alteradas por un cruzamiento parcial entre canales. Una vez implementado el sistema, es posible evaluar su desempeño introduciendo como entrada una señal que contenga información únicamente en uno de los canales. La relación, expresada en decibeles, entre la medición en el oído contralateral y la correspondiente al oído ipsilateral representa el nivel de cancelación de crosstalk alcanzado.

Es importante aclarar que el sistema de filtros inversos tiene como objetivo cancelar el campo sonoro directo, sin que esta cancelación afecte a las reflexiones que resultan de la interacción del sonido directo con el ambiente. Considerando un funcionamiento ideal del filtro inverso en donde la señal directa en el oído contralateral sea completamente cancelada debido al filtrado, dicho oído continuaría recibiendo la energía del campo reverberante. En consecuencia, la medición antes descripta —considerada habitualmente como adecuada para determinar el crosstalk— estaría, en realidad, informando la relación entre el campo directo y el campo reverberante.

Lo que se plantea aquí es que dicha relación entre campo directo y reverberante constituye un límite físico a la máxima diferencia de nivel entre oídos que puede lograrse. En recintos sin tratamiento acústico resulta difícil alcanzar una relación directo-reverberante igual o superior a 20 dB, aun cuando los altavoces se ubiquen muy próximos a la cabeza del oyente.

Estas consideraciones podrían explicar las discrepancias entre los requerimientos planteados por Parodi [1] y los mencionados por Choueiri [5]. La clave podría residir en la diferencia entre tipos de crosstalk y en el modo en que la percepción auditiva procesa la información resultante en cada caso. En los experimentos de Parodi, el crosstalk se generó artificialmente mediante la superposición de

copias cruzadas entre ambos canales, fenómeno que aquí denominaremos *crosstalk eléctrico*. En cambio, el tipo de crosstalk que se mantiene presente luego de cancelar las señales cruzadas se establece entre dos señales con características diferentes: una componente directa que se propaga desde la fuente al oído contralateral y la señal que contiene una cola reverberante.

Este trabajo supone que ciertas características de la percepción auditiva podrían generar diferencias en el modo en que cada uno de estos tipos de crosstalk deteriora la sensación de binauralidad de los estímulos sonoros. La señal cruzada que llega al oído contralateral exclusivamente como producto de la cola reverberante podría tener menos impacto en degradar la percepción binaural, si se compara con el tipo de crosstalk que se produciría por una inadecuada cancelación cruzada de señales dentro del campo directo. Con la intención de evaluar el impacto perceptivo ante distintos tipos de crosstalk se diseñaron pruebas subjetivas realizadas con auriculares, manteniendo un control preciso del tipo de entrecruzamiento en cada caso.

Las hipótesis de trabajo son:

1. El crosstalk eléctrico —generado mediante el cruce de copias atenuadas de la información de cada canal— reduce fuertemente la externalización, angosta la imagen y degrada la localización.

2. El crosstalk residual reverberante —correspondiente a información contralateral que no contiene a la señal cruzada de campo directo sino solamente el resto de las reflexiones, resultando espectralmente diferenciadas—, produce una menor degradación de la binauralidad para igual nivel de atenuación.

El objetivo general es caracterizar perceptualmente el impacto del tipo de crosstalk sobre atributos de externalización, realismo y tamaño percibido del espacio sonoro.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Las pruebas se realizaron mediante auriculares, presentando a los participantes pares de estímulos (A/B) en un formato de elección forzada, en el cual debían seleccionar cuál de las dos versiones ofrecía una mayor externalización, realismo y sensación de espacio. Cada participante completó tres bloques de seis ensayos, correspondientes a tres conjuntos de estímulos distintos. Los pares se presentaron en orden aleatorio, y en cada bloque se formularon las mismas preguntas, a fin de garantizar la consistencia perceptual de la evaluación.

El experimento contó con la participación de N = 18 oyentes con audición normal y experiencia previa en tareas de evaluación auditiva.

Las preguntas a responder por los oyentes fueron:

1. ¿Qué audio externaliza mejor la imagen?

2. ¿Qué audio brinda una sensación más realista?

3. ¿Qué audio pareciera reproducirse en un recinto de mayor tamaño?

Las primeras dos preguntas son las principales a responder. Claramente al existir una única señal con reverberación resulta esperable que sea justamente la que los oyentes indiquen como relacionada a un recinto más grande. Se incluyó principalmente con la intención de chequear las elecciones para un caso que suponemos bien marcado.

2.1 Estímulos sonoros utilizados

Los audios binaurales utilizados como punto de partida para las pruebas subjetivas fueron tres. El primero corresponde al sonido de una corneta localizada a ±40° mediante convolución con una HRTF.

Los otros dos provienen de grabaciones realizadas con una cabeza artificial (dummy head): uno representa golpes y apertura de una puerta y el otro, el encendido de fósforos en proximidad a un oído.

Es importante mencionar que este conjunto de estímulos difiere en su naturaleza de los utilizados por Parodi y Rubak [1], quienes emplearon ruidos de banda estrecha, ruidos de banda ancha y una locución de voz femenina convolucionada con una HRTF.

Cada una de las muestras binaurales seleccionadas en el presente estudio fue posteriormente procesada para emular distintos tipos de crosstalk que se detallan a continuación:

1. Señal original: audios binaurales sin alteración.

2. Señal con crosstalk eléctrico: cada canal se obtiene superponiendo el canal ipsilateral de la señal original con una copia del canal contralateral atenuada en 9 dB,

$$\begin{aligned} y_L[n] &= x_L[n] + a x_R[n] \\ y_R[n] &= x_R[n] + a x_L[n] \end{aligned} \tag{1}$$

   donde xL[n],y xR[n] corresponden a la señal binaural de base ; y $a = 10^{-9dB/20}$.

3. Señal con crosstalk aéreo directo: Se genera de modo semejante al eléctrico pero se incorpora un breve retardo de τ = 400µs, imitando el tiempo de propagación adicional entre fuentes y oídos en señales contralaterales.

$$\begin{aligned} y_L[n] &= x_L[n] + a x_R[n-\tau] \\ y_R[n] &= x_R[n] + a x_L[n-\tau] \end{aligned} \tag{2}$$

   También aquí se utilizó $a = 10^{-9dB/20}$.

4. Señal con crosstalk residual reverberante: Busca emular la situación de cancelación perfecta del componente contralateral de campo directo, dejando inalterado todo el conjunto de reflexiones que el filtro XTC no es capaz de cancelar. El término residual hace referencia a que se mantienen en la señal cruzada solamente el conjunto de reflexiones que llegan al oido contralateral. Para esto se convoluciona la señal binaural con una respuesta al impulso binaural en la que se ha suprimido el primer pico correspondiente al sonido directo. En cada canal se superpone la señal ipsilateral con la cola reverberante obtenida por convolución. La cola reverberante se generó con un reverberador Schroeder/Moorer simple [9]:

$$\begin{aligned} y_L &= x_L + b.r_L(x_L, x_R) \\ y_R &= x_R + b.r_R(x_R, x_L) \end{aligned} \tag{3}$$

   donde r_L, r_R son colas reverberantes no coherentes entre oídos. El nivel de estas señales se ajustó para que la energía total de cada cola reverberante tenga un nivel 9 dB menor que la energía de la señal directa.

En cada bloque de análisis se utilizó una de las tres muestras binaurales. Los oyentes tuvieron que comparar este audio binaural con versiones procesadas con los distintos tipos de crosstalk mencionados anteriormente. Las pruebas consistieron en comparar de a pares considerando todas las combinaciones posibles en forma aleatoria resultando en seis comparaciones (ensayos) por cada bloque. Esto implica que se han analizado 325 comparaciones (A/B) en total.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados muestran una ventaja sistemática del crosstalk residual reverberante en la externalización (Q1), con un desempeño que supera a la señal original sin crosstalk. La pregunta sobre el tamaño aparente del recinto (Q3) muestra preferencias bien marcadas por la señal con reverberancia, lo que coincide com las suposiciones de control. La condición original mantuvo la preferencia en realismo (Q2), lo que sugiere que el anclaje perceptual de naturalidad permanece asociado a referencias sin procesamiento adicional. En contraste, el crosstalk eléctrico exhibe el rendimiento más bajo en todos los atributos.

En términos globales (Tabla 1), el estímulo con crosstalk residual reverberante alcanza 44,1 % (Q1) y 54,9 % (Q3), mientras que la señal original lidera Q2 con 29,3 %. Los estímulos con crosstalk eléctrico y aéreo directo quedan por detrás en todos los casos.

Tabla 1: Porcentajes globales obtenidos en la evaluación subjetiva.

Condición	Q1 Externalización [%]	Q2 Realismo [%]	Q3 Tamaño [%]
Aéreo directo	11,4	19,4	9,3
Eléctrico	12	24,4	10,5
Original	32,4	29,3	25,3
Residual reverberante	44,1	26,9	54,9

Considerando el diseño de elección forzada con tres bloques de seis ensayos por participante (N = 18), el conjunto comprende 325 comparaciones A/B, lo que brinda una base de observación suficiente para identificar tendencias.

Desde un punto de vista psicoacústico, los hallazgos son consistentes con los supuestos iniciales del trabajo que sostienen que la degradación en la percepción binaural debida al crosstalk no depende exclusivamente de su nivel en dB, sino también de su estructura temporal y espectral.

El crosstalk residual reverberante mantiene descorrelación interaural e incoherencia espectro-temporal en el canal contralateral (al retener energía reverberante y carecer de coincidencia exacta con el canal ipsilateral), lo que podría ser importante para preservar claves espaciales relevantes para la externalización (p. ej., diferencias interaurales de fase/tiempo de la componente directa). En este sentido, los resultados son consistentes con la hipótesis 2: un crosstalk residual reverberante, que alcanza los 9 dB, no degrada necesariamente la percepción binaural de forma significativa. En cambio, los resultados obtenidos con el crosstalk eléctrico —sin diferencias espectrales— sugieren que se produce un deterioro de los indicios necesarios para recrear la sensación de espacialidad en coincidencia con lo sostenido en la hipótesis 1.

Este patrón sugiere que vale la pena hacer la distinción físico-perceptual desarrollada en la introducción: la medida de “cancelación” habitual en contextos no anecoicos captura en la práctica una relación campo directo/reverberante que establece un límite físico sobre la máxima diferencia de nivel interaural alcanzable, aun con cancelación perfecta del campo directo en el oído contralateral.

Los resultados obtenidos ayudan a reconciliar aparentes tensiones en la bibliografía respecto de los niveles de cancelación de crosstalk necesarios para reproducción de sonidos binaurales al aire. Para un tipo de crosstalk residual de naturaleza difusa, niveles moderados de cancelación pueden ser perceptualmente tolerables sin degradación marcada de la externalización. Esta lectura es compatible con marcos que enfatizan la robustez de la imagen espacial bajo cancelación imperfecta cuando la energía difusa domina el canal contralateral. Los resultados obtenidos respaldan las hipótesis planteadas en la introducción y matizan la noción de umbrales fijos de cancelación en dB como criterio único de diseño, destacando la relevancia del tipo de señales y tipo de crosstalk a evaluar.

4. CONLUSIONES

La exigencia sistemática de niveles superiores a los 20 dB de cancelación de crosstalk podría ser excesiva para ciertos escenarios de reproducción, encareciendo innecesariamente el diseño de filtros y condicionando su operación a espacios altamente controlados. El diseño del filtro inverso pasaría de exigir más de 20 dB a exigir solamente un poco más que la diferencia de nivel entre señal directa y reverberante en las condiciones de escucha que se plantean en determinado recinto no anecoico.

Esto trae aparejado un impacto práctico adicional. En el proceso de diseño de los filtros inversos se aplica normalmente una técnica de regularización matricial con el fin de incrementar la zona correspondiente al sweet spot, y a su vez disminuir la exigencia de rango dinámico de los altavoces [5][7][10]. Pero, estas mejoras se pagan con una disminución del nivel de cancelación de crosstalk que se alcanza, con lo cual el diseñador siempre se ve obligado a resolver un compromiso entre regularización baja con alto nivel de cancelación y un diseño poco robusto frente a movimientos del oyente; o un nivel de regularización moderada con bajo nivel de cancelación y un resultado más robusto. Nuestro trabajo puede servir para realizar una elección más adecuada para resolver este conflicto de objetivos. Al disminuir la fuerte exigencia en el nivel de cancelación se pueden lograr diseños con un nivel de regularización mayor, sin que esto se convierta en una pérdida significativa de la sensación de espacialidad. Como trabajo futuro se prevé ampliar la muestra de oyentes y diversificar perfiles auditivos, incorporando medidas objetivas como la correlación interaural.

9. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los estudiantes de *Acústica y Psicoacústica I* perteneciente a la carrera de Ingeniería en Sonido de UNTREF por haber participado de las pruebas subjetivas para este trabajo.

REFERENCIAS

[1] Y. L. Parodi y P. Rubak, “A subjective evaluation of the minimum channel separation for reproducing binaural signals over loudspeakers”, *Journal of the Audio Engineering Society*, 2011.

[2] B. S. Atal, “Apparent sound source translator”, *United States Patent 3,236,949*, 1966.

[3] J. Rose, P. Nelson, B. Rafaely, y T. Takeuchi, “Sweet spot size of virtual acoustic imaging systems at asymmetric listener locations”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 112, no. 5, pp. 1992–2002, 2002.

[4] M. R. Bai y C.-C. Lee, “Objective and subjective analysis of effects of listening angle on crosstalk cancellation in spatial sound reproduction”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 120, no. 4, pp. 1976–1989, 2006.

[5] E. Choueiri, “Binaural audio through loudspeakers”, en *Immersive Sound*, Routledge, 2017, pp. 124–179.

[6] E. Y. Choueiri, “Optimal crosstalk cancellation for binaural audio with two loudspeakers”, *Princeton University*, vol. 28, 2008.

[7] F. Jofré, G. Lizaso, y J. Petrosino, “Implementación y evaluación de cancelación de crosstalk aéreo mediante regularización de matrices”, en *Avances del Audio en Latinoamérica*, AES – Tamaba, 2023, pp. 68–71, 2023.

[8] O. Kirkeby and P. A. Nelson, “Digital filter design for inversion problems in sound reproduction”, *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 47, no. 7/8, pp. 583–595, 1999.

[9] A. Uncini, *Digital Audio Processing Fundamentals*, vol. 21. Springer, 2022.

[10] G. Lizaso y J. Petrosino, “Audio Transaural y Sistemas de Cancelación de Crosstalk”, en *Investigaciones sobre audio espacial y estética del arte sonoro*, Wolowicz Editores, 2024, pp.116-142

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

AURICULARES ABIERTOS Y MICRÓFONOS INTRAURALES PARA APLICACIONES DE REALIDAD VIRTUAL Y REALIDAD AUMENTADA

Franco Cortez[†,1]; Eduardo Zavalla[†‡,2]; Ernesto Accolti[†‡,3]

[†] Departamento de Electrónica y Automática, FI, UNSJ, San Juan

‡ Instituto de Automática, UNSJ-CONICET, San Juan

[1] francocortez1992@gmail.com, [2] ezavalla@inaut.unsj.edu.ar, [3] eaccolti@inaut.unsj.edu.ar

Resumen Las aplicaciones de realidad virtual y aumentada acústica en ámbitos industriales, educativos, y de entretenimiento, entre otros, se implementan de diversas maneras entre las cuales se encuentran las que usan auriculares abiertos. La principal característica de estos es ofrecer una atenuación mínima a los sonidos provenientes del entorno real del usuario, siendo ideales para aplicaciones de realidad aumentada, donde se busca mezclar el entorno acústico real con el sonido reproducido por fuentes o reflexiones sonoras virtuales de modo que se perciban como plausibles de haber provenido de un entorno real. El presente trabajo consiste en la implementación de dos pares de auriculares abiertos y cuatro micrófonos intraurales, junto a la caracterización de los auriculares, determinando así cómo varía la respuesta en frecuencia según el usuario. La respuesta en frecuencia se midió utilizando un maniquí y la variabilidad entre participantes se midió usando los micrófonos intraurales. Por último, se reporta la atenuación para una orientación de 0º, 90º, 180º, y 270º aplicando técnicas de ventana sobre la respuesta al impulso adquirida con el simulador de cabeza y torso.

Palabras clave: función de transferencia de auriculares, auriculares abiertos, realidad aumentada.

Abstract Acoustic virtual and augmented reality applications in industrial, educational, and entertainment fields, among others, are implemented in a variety of ways, including those which utilize open headphones. Their main characteristic is that they offer minimal attenuation to sounds from the user's real environment, making them ideal for augmented reality applications, where the goal is to blend the real acoustic environment with sound reproduced by virtual sources or acoustic reflections which being perceived as plausibly originating from a real environment. This work involves the implementation of two pairs of open headphones and four intraural microphones and the characterization of the headphones. This study then determined how frequency response varied across users. The frequency response was measured with the mannequin technique and its interparticipant variability was measured using the in-ear microphones. Finally, the attenuation for 0º, 90º, 180º, and 270º orientation measured by applying window techniques on the impulse response acquired with the mannequin is reported.

Palabras clave: headphone related transfer function, open headphones, augmented reality.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de los auriculares abiertos y micrófonos intraurales surge de la creciente demanda de tecnologías inmersivas en diversos campos, como la educación, la medicina, el entretenimiento y la industria. Véase por ejemplo los desarrollos comerciales Meta Ray-Ban Smart Glasses, Apple Vision Pro, Microsoft HoloLens, Google Glass, entre otros.

Al mejorar la experiencia del usuario en entornos virtuales, la implementación de estos dispositivos contribuye al avance del conocimiento en el campo de la acústica y la electroacústica. Por ejemplo, la aplicación de auriculares abiertos en los sistemas de experimentación que se proponen en [1] y [2], aportan al estudio de acústica de escenarios.

El presente artículo detalla el proceso de fabricación de dos pares de auriculares abiertos y su caracterización acústica. El diseño de los auriculares ha sido desarrollado y presentado en [3], con el objetivo de conseguir transparencia acústica y audio de alta calidad en aplicaciones de realidad virtual/aumentada. La aislación acústica de los auriculares abiertos que actualmente se encuentran en el mercado es baja, pero resulta poco adecuada para las aplicaciones mencionadas tal como se documenta en [4] para los Sennheiser HD650 y los discontinuados Lambda STAX.

Este artículo aborda además la fabricación e implementación de micrófonos intraurales, tomando como referencia el modelo desarrollado en [5]. Estos dispositivos son muy utilizados en institutos y laboratorios dedicados a la audición, y resultan necesarios en este trabajo para estudiar las características acústicas de los auriculares, y para la personalización de auralizaciones que se plantean como trabajos futuros.

2. CONSTRUCCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Para la implementación práctica del diseño descripto por Mülleder y Zotter en [3], se consideró solamente el modelo original de auriculares, sin aplicarle las modificaciones adicionales que proponen los autores. Por el lado de los micrófonos, se reemplazó la impresión de tapones auditivos con material flexible detallada en [5] por una técnica de moldeado usando caucho de silicona, además de reemplazarse el modelo de micrófono MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*) sugerido por uno no discontinuado.

2.1 Auriculares abiertos MushRoom

Los auriculares abiertos presentados en [3] y [4] con el nombre MushRoom, han sido desarrollados como un prototipo de acceso abierto. En este trabajo se construyeron dos pares de auriculares tomando como referencia las instrucciones descriptas en [6], cada uno con un método de impresión 3D diferente a fin de contrastar los resultados obtenidos entre ambos.

2.1.1 Construcción del primer par de auriculares

Para materializar la estructura se utilizó una impresora 3D Hellbot Magna 500 con filamento PETG, optimizando las configuraciones de impresión para conseguir que el soporte adicional de las piezas pueda retirarse con el menor esfuerzo posible, especialmente en el caso de cada copa (Figura 1). Este trabajo de limpieza en las piezas terminadas se realizó manualmente.

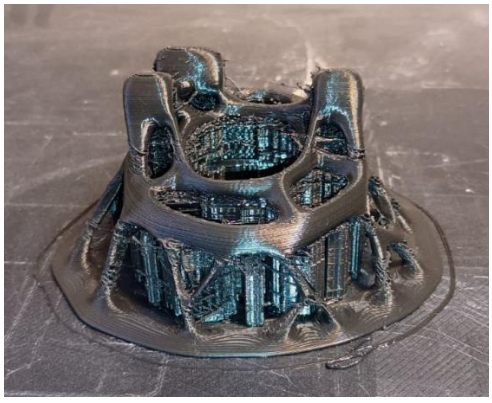


Figura 1: Copa derecha con soporte adicional en su interior.

Con relación a la parte electrónica, se utilizaron los parlantes Peerless HPD-50N25PR00-32 sugeridos en el documento de referencia [6], a los cuales se les soldaron conectores jack hembra de 3,5mm genéricos. El resultado se observa en la Figura 2a.

(a) MushRoom 1 terminado. (b) MushRoom 2 terminado.

Figura 2: Auriculares construidos.

2.1.2 Construcción del segundo par de auriculares

En este caso las consideraciones respecto a la electrónica de los auriculares son idénticas a las mencionadas en el apartado anterior. Para la estructura se utilizó una impresora 3D Stratasys F170 con filamento ABS propio de este modelo. Para los soportes adicionales la impresora emplea un material denominado QSR, el cual se elimina sumergiendo las piezas terminadas en agua. Como resultado de este proceso es obtuvieron piezas con un acabado más detallado y prolijo respecto al primer par de auriculares, tal como se observa en la Figura 2b, pero en contraposición estas piezas resultaron ser más frágiles.

2.2 Construcción de micrófonos intraurales

Este dispositivo se construyó tomando como referencia el proyecto detallado en [5], consta de un micrófono MEMS, un circuito regulador de tensión, un conector XLR y un tapón auditivo antropométrico. El resultado se observa en la Figura 3, en este trabajo se construyeron 4 unidades en total.

(a) Completo. (b) Vista frontal. (c) Vista lateral.

Figura 3: Micrófono intraural terminado.

Actualmente el micrófono Knowles SPH1642-HT5H propuesto en el citado proyecto se encuentra discontinuado, por ello se utilizó el modelo AMM-3538-2-B de PUI Audio como reemplazo, el cual requiere una alimentación V_{CC} comprendida en el rango de 1,6 V a 3,6 V. Esta tensión se obtiene aprovechando los 48 V que suministran los preamplificadores de micrófono, conocida como *phantom power*, reduciénda con el circuito regulador de tensión de la Figura 4 para entregar 2,3 V. Este circuito se construyó dentro del conector XLR, soldándose los componentes directamente entre sus terminales sin la necesidad de utilizar una placa de circuito impreso.

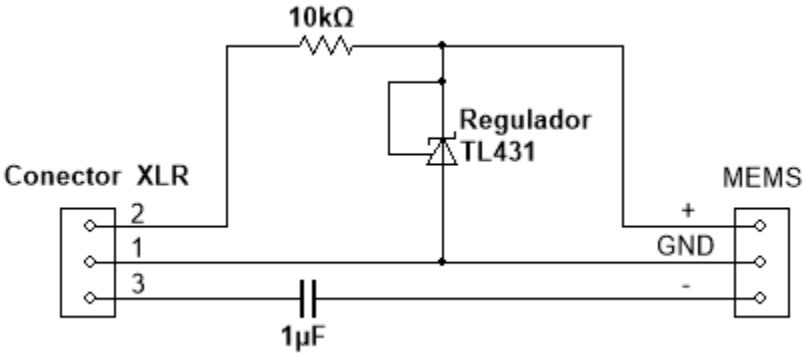
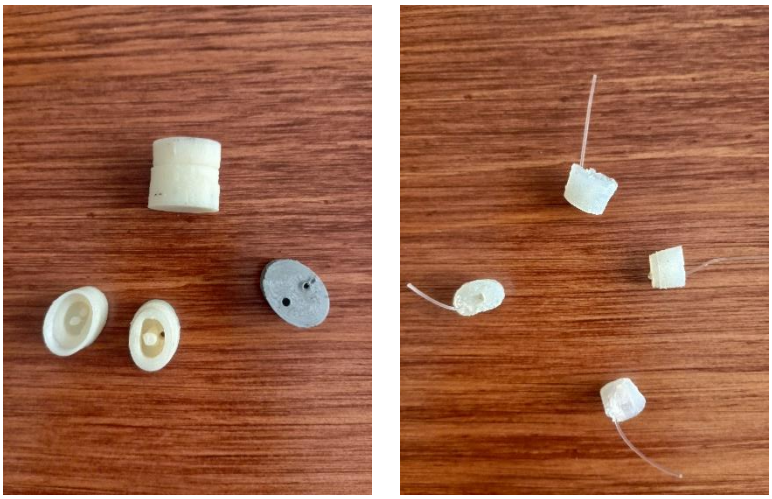


Figura 4: Esquema del circuito regulador de tensión.

Respecto al tapón auditivo, su función es bloquear el canal auditivo y acomodar el micrófono en la entrada del mismo. Para adaptarse a cualquier oído humano, su diseño antropométrico responde al análisis estadístico de las formas de cientos de conductos auditivos diferentes [5]. Tomando este modelo de referencia, se realizaron negativos del mismo a modo de moldes y se imprimieron en ABS. La Figura 5a muestra los moldes para tapones de tamaño grande y mediano, para ambos oídos.



(a) Moldes para tapones auditivos. (b) Tapones auditivos terminados.

Figura 5: Detalle del moldeado de tapones auditivos.

Cada tapón fue moldeado en caucho de silicona Silcast 840 para obtener un modelo resistente, maleable, cómodo para el oído y fácil de limpiar. Adicionalmente se les introdujo una pequeña cuerda de nylon para facilitar la extracción del canal auditivo. Los resultados se observan en la Figura 5b.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron diferentes mediciones acústicas a fin de calibrar los micrófonos intraurales y determinar las características de los auriculares, empleando los siguientes elementos:

- Sonómetro clase 1 RION modelo NL-52 AX.
- Parlante Audioengine A2+.
- Simulador de cabeza y torso del INAUT (SICTI [7]).
- Interfaz de audio M-audio Mobile Pre.
- Notebook (procesador i5-1235U 1.30 GHz, 8Gb RAM) equipada con el programa Room EQ Wizard (REW [8]).

Exceptuando las mediciones de respuesta en frecuencia de los auriculares detalladas en el apartado 3.4, para el resto de los ensayos fue necesario simular condiciones de campo libre, que se consiguieron utilizando un aula como espacio de prueba, enventanando la parte de sonido directo de la respuesta al impulso según el método de la ventana rectangular centrada en el máximo [9].

3.1 Verificación de frente de onda plana

A fin de cumplir con lo establecido en la Norma ITU-T P.58 [10], se verificó que las emisiones de la fuente sonora generan un frente de onda plana en el punto receptor, para lo cual se efectuó el siguiente procedimiento:

- Se dispuso el parlante orientado hacia el punto central del espacio de prueba, a una distancia de 3,6 m de la pared más cercana y con el punto medio entre sus componentes a una altura de 1,64 m.
- Se dispuso el sonómetro en una posición de referencia, esto es enfrentado con el parlante a una distancia de 3 m, con una altura de 1,64 m y guardando una distancia de 3,3 m respecto a la pared más cercana, tal como se observa en la Figura 6.
- Utilizando el programa REW se emitió un barrido de frecuencias de 80 Hz a 19 kHz por el parlante, registrando los niveles de presión sonora captados por el sonómetro.
- Siguiendo las indicaciones de la norma [10], se repitió el paso anterior seis veces más, modificando en cada medición la posición del sonómetro respecto a la inicial: 25 cm hacia adelante, atrás, izquierda, derecha, arriba y abajo.
- Se obtuvieron las respuestas al impulso de la sala para estas siete posiciones de micrófono.
- Con el programa REW se aplicó una ventana de 4,2 ms en la respuesta impulsiva de todas las mediciones, eliminando las reflexiones provenientes del piso en primera instancia y de todas las demás superficies internas de la sala.

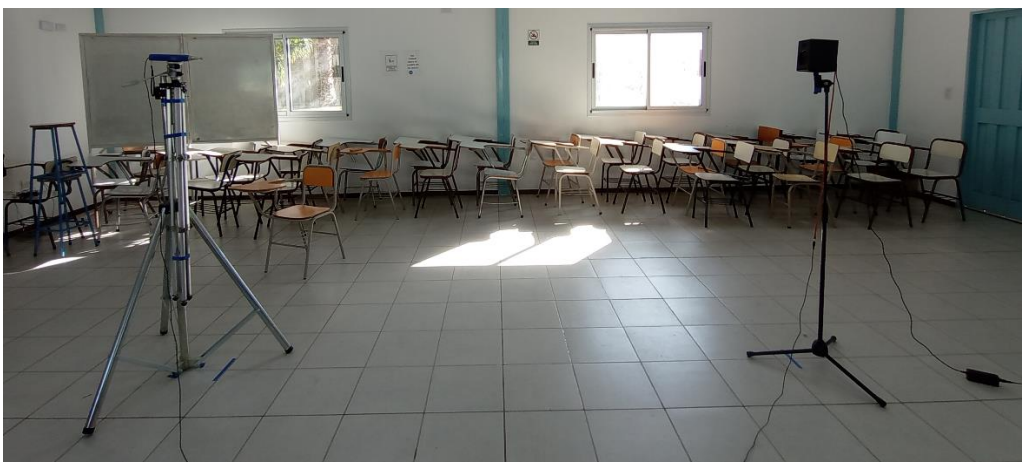


Figura 6: Disposición de elementos para verificación de onda plana.

Los resultados del procedimiento se observan en la Figura 7, se han suavizado las curvas 1/6 de octava para facilitar la visualización, y se grafican los límites de tolerancia establecidos en la norma vigente [10]. Se comprueba así que, respecto a los niveles de presión sonora captados en la posición de referencia (curva roja), cada una de las mediciones posteriores no se desvía en más de 2 dB para frecuencias inferiores a 300 Hz y 1 dB para frecuencias superiores.

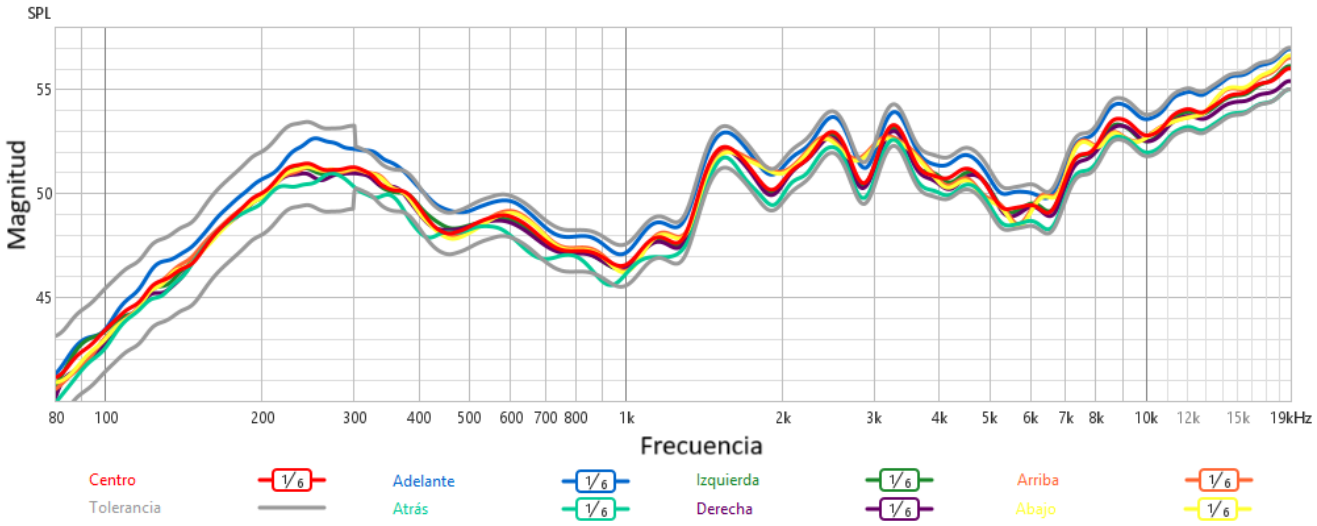


Figura 7: Mediciones del sonómetro en diferentes ubicaciones y límites de tolerancia.

3.2 Calibración de los micrófonos intraurales

Las mediciones necesarias para obtener los datos de calibración se realizaron de la siguiente manera:

- Se dispuso el parlante según lo detallado en el apartado 3.1.
- Se ubicó cada micrófono en la posición de referencia.
- Utilizando el programa REW se emitió un barrido de frecuencias para cada micrófono y se obtuvo la respuesta al impulso de la sala.
- Con el programa REW se aplicó una ventana de 4,2 ms en la respuesta impulsiva de todas las mediciones, eliminando las reflexiones.

Tomando como referencia los niveles de presión sonora captados por el sonómetro en su posición inicial, según se detalló en el apartado anterior, se generaron archivos de calibración para cada micrófono con el programa REW, según la ecuación (1)

$$H_C = H_S / H_M \tag{1}$$

donde H_S es la respuesta en frecuencia captada por el sonómetro, H_M es la respuesta en frecuencia captada por el micrófono, y H_C es el conjunto de datos de calibración para el micrófono empleado.

3.3 Mediciones de atenuación de los auriculares

Este ensayo se realizó únicamente sobre el SICTI, según se detalla a continuación:

- Se verificó campo libre según apartado 3.1.
- Se ubicó el SICTI orientado frente al parlante, con el punto medio entre sus oídos sobre la posición de referencia, tal como se observa en la Figura 8.
- Utilizando el programa REW se emitió un barrido de frecuencias y se obtuvo la respuesta al impulso binaural de la sala.
- Colocando los MushRooms 1 y 2 al SICTI, se repitieron las mediciones descriptas en el paso anterior.

- Se repitieron los dos pasos anteriores tres veces más, modificando en cada caso la orientación del SICTI, rotándolo sobre su eje 90°, 180° y 270°.
- Con el programa REW se aplicó una ventana de 4,2 ms en la respuesta impulsiva de todas las mediciones, eliminando las reflexiones de la fuente sonora.
- Finalmente se calculó la atenuación A_o para cada oído o y cada orientación ϕ según (2)

$$A_o(\phi) = L_{\mathrm{M},o}(\phi) - L_{\mathrm{H},o}(\phi) \quad (2)$$

donde $L_{\mathrm{M},o}$ y $L_{\mathrm{H},o}$ son los niveles sonoros debido al parlante Audioengine en el canal o del maniquí, sin auriculares y con auriculares respectivamente.

Figura 8: Disposición de elementos para medir atenuación.

Con el fin de contrastar la atenuación de los MushRooms con la atenuación de un modelo diferente de auriculares abiertos, se repitió el procedimiento detallado precedentemente empleando 2 pares de auriculares Sennheiser HD 650.

3.4 Mediciones de respuesta en frecuencia de los auriculares

Debido a que la respuesta en frecuencia de los dispositivos de audio queda condicionada por las características físicas de la persona oyente, se realizaron mediciones en seis sujetos de prueba diferentes y en el SICTI, a fin de poder observar la variabilidad interpersonal de estas respuestas y la repetibilidad de la medición.

3.4.1 Medición en SICTI

Se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Se colocó el primer MushRoom al SICTI.
- Utilizando el programa REW se emitió un barrido de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz por los auriculares, obteniendo la respuesta en frecuencia para el canal izquierdo y el derecho.
- Se repitió el paso anterior cinco veces más reacomodando los auriculares antes de cada nueva medición.
- Cambiando los auriculares por el segundo MushRoom, se repitieron las mediciones descriptas en los dos pasos anteriores.

El procedimiento se repitió para los auriculares Sennheiser HD 650 a fin de comparar resultados.

3.4.2 Medición en personas

Este procedimiento es similar al descripto en el apartado precedente, sólo que las mediciones se realizaron sobre personas: tres femeninas y tres masculinas, ubicadas en el rango etario de 18 a 29 años. Sólo se midieron los dos pares de auriculares MushRoom con este método.

Las mediciones se obtuvieron utilizando los micrófonos intraurales con sus correspondientes calibraciones, y con tapones auditivos acordes a cada individuo. Sólo dos personas requirieron el tamaño mediano para realizar el ensayo cómodamente.

Las mediciones se llevaron a cabo con el siguiente procedimiento:

- La persona sentada cómodamente se colocó los micrófonos intraurales, con los tapones auditivos previamente higienizados.
- Se colocó el primer MushRoom.
- Utilizando el programa REW se emitió un barrido de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz por los auriculares, registrándose cada canal de forma individual y calculando la respuesta en frecuencia.
- Se repitió el paso anterior 5 veces más reacomodando los auriculares antes de cada nueva medición.
- Utilizando el segundo MushRoom, se repitieron las mediciones descriptas en los dos pasos anteriores.

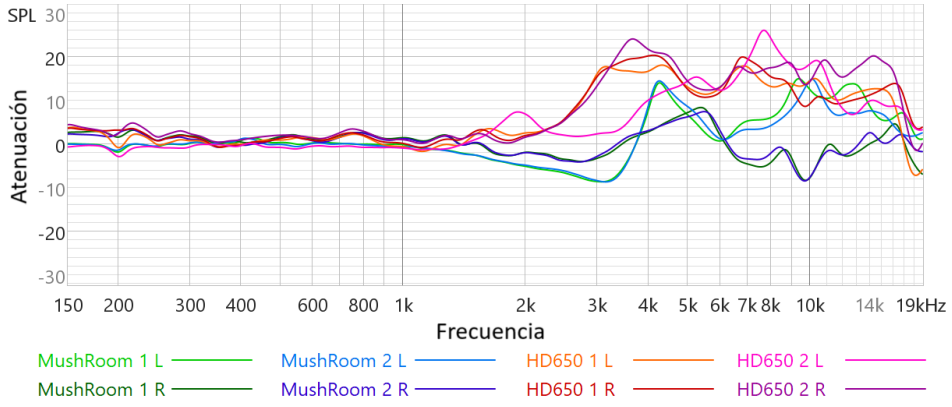
Los ensayos se realizaron en salas silenciosas de diferentes localizaciones, según la disponibilidad de cada persona que participó del estudio, pudiendo concretarse todos sin inconvenientes.

4. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

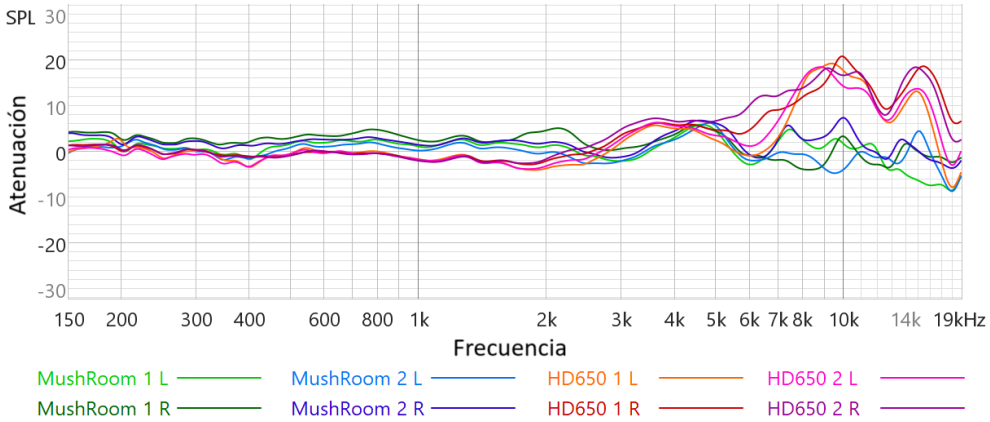
Se analizan los resultados obtenidos a continuación.

4.1 Atenuación

Se calcularon las curvas de atenuación según la ecuación (2) para ambos oídos del SICTI, los resultados se muestran en las Figuras 9, 10 y 11.



(a) Atenuación a 0°.

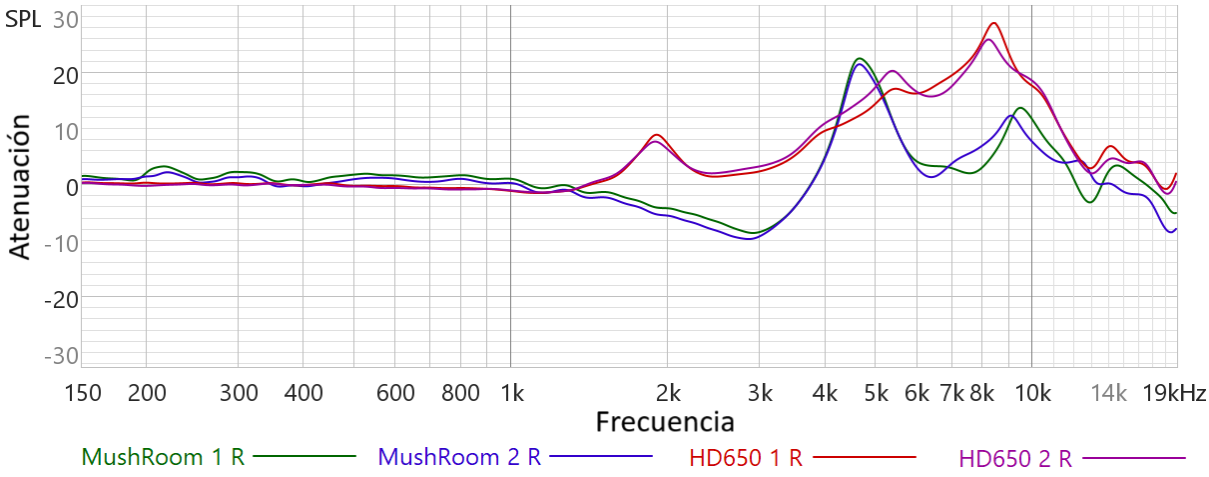


(b) Atenuación a 180°.

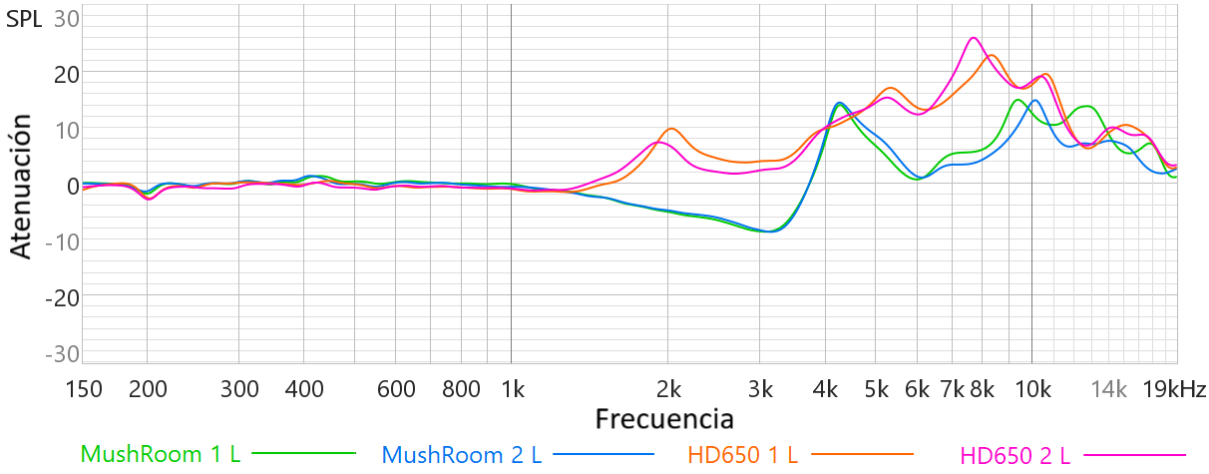
Figura 9: Atenuación de los auriculares en ambos oídos.

Puede observarse en la Figura 9 que para la orientación de 0° los pares MushRooms ofrecen menor o igual atenuación que los HD 650 en todo el rango de frecuencias, y para la orientación de 180°, en el rango de frecuencias medias y bajas, los HD 650 atenúan menos pero sin diferencias significativas respecto a los MushRoom, cuya atenuación sí resulta notablemente menor en altas frecuencias.

También se observa en la Figura 9b que, en el rango de frecuencias altas, los niveles de atenuación difieren entre los pares de un mismo modelo en el mismo oído. Esto se debe a la forma en que han sido colocados cada uno de los auriculares sobre el SICTI, en ningún caso estas disposiciones son idénticas, y esto se refleja en cada curva calculada.



(a) Atenuación a 90° para el oído derecho.

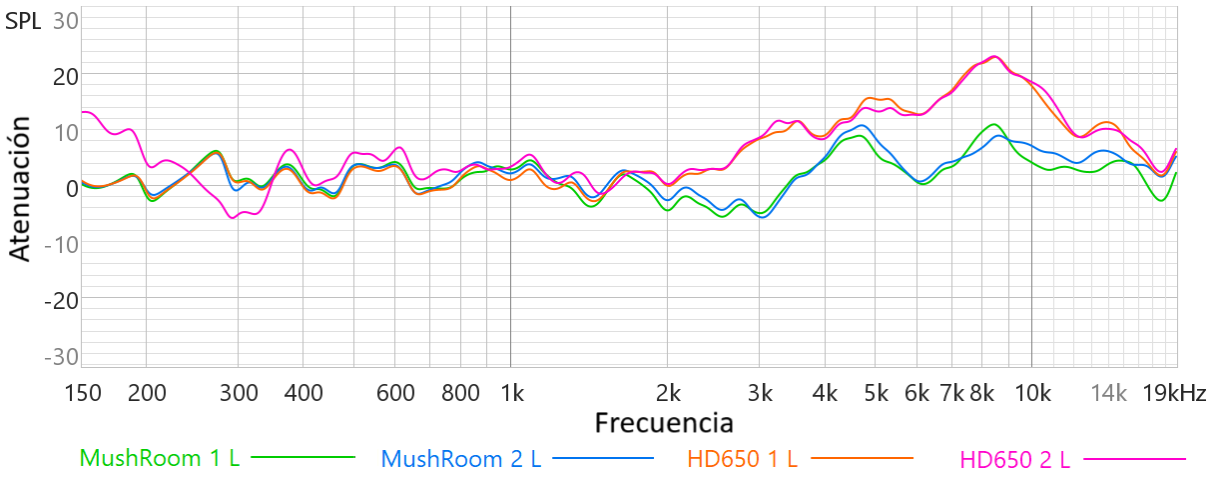


(b) Atenuación a 270° para el oído izquierdo.

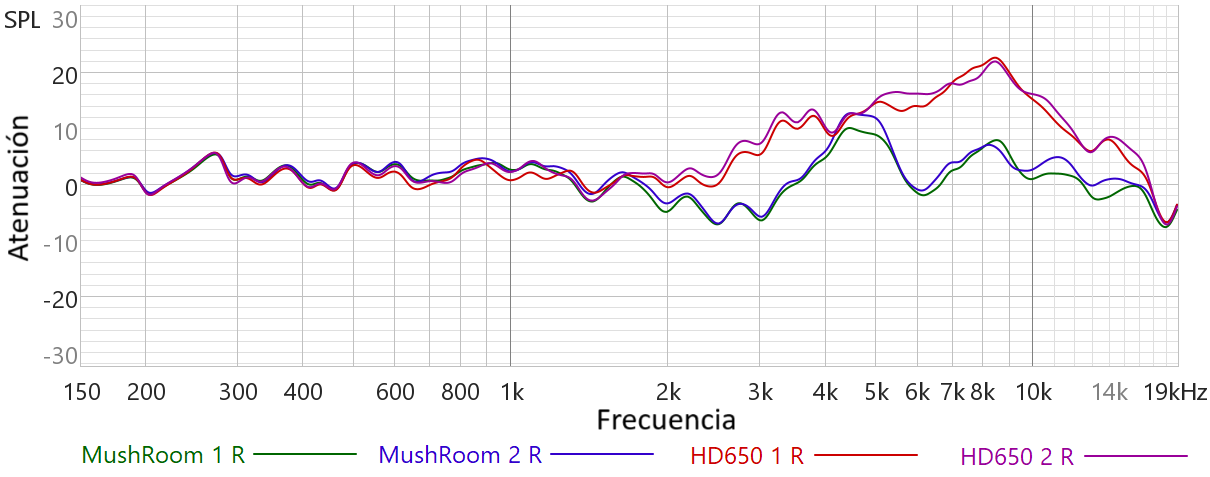
Figura 10: Atenuación al sonido directo.

Para el caso donde el oído recibe el sonido directamente desde la fuente, se observa en la Figura 10 que los MushRoom atenúan menos en altas frecuencias, y en el rango de frecuencias medias y bajas no se comprueban diferencias relevantes entre ambos modelos.

El mismo resultado se obtiene cuando el oído se encuentra en el lado opuesto respecto a la fuente sonora, esto se muestra en la Figura 11.



(a) Atenuación a 90° para el oído izquierdo.



(b) Atenuación a 270° para el oído derecho.

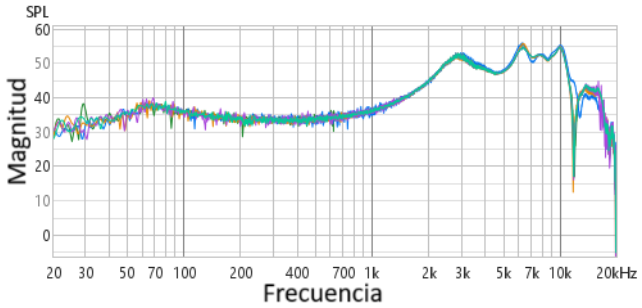
Figura 11: Atenuación en ambos oídos con la fuente sonora en el costado opuesto.

4.2 Respuesta en frecuencia

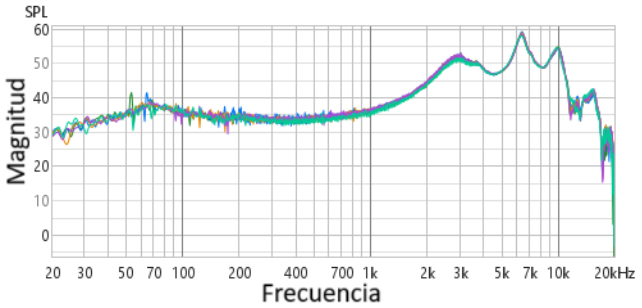
Se muestran en las Figuras 12a y 12b las curvas sin suavizado de las diferentes mediciones de los auriculares MushRoom en el oído derecho del SICTI (el análisis en el oído izquierdo resulta equivalente), observándose respuestas en frecuencia similares:

- Alrededor de 60 Hz existe un incremento de aproximadamente 8 dB en la magnitud.
- En el rango de 1 kHz a 3 kHz el incremento es de más de 15 dB
- El máximo nivel de presión sonora se da alrededor de los 6 kHz, nivel que disminuye con un marcado patrón de picos y valles en las frecuencias superiores.

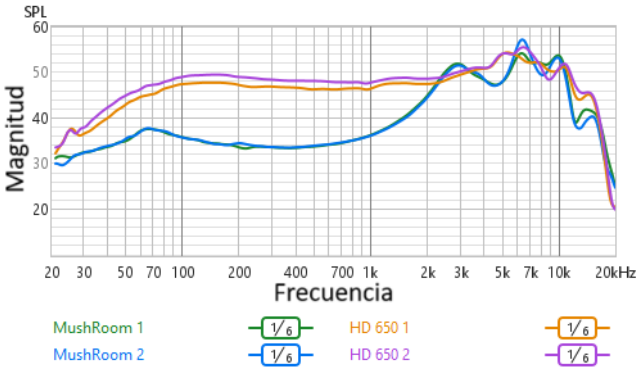
De acuerdo a lo expresado en [4], estas variaciones en las frecuencias más altas podrían aminorarse empleando un anillo de fieltro sobre el parlante, según se detalla en [3].



(a) Mediciones del MushRoom 1.



(b) Mediciones del MushRoom 2.

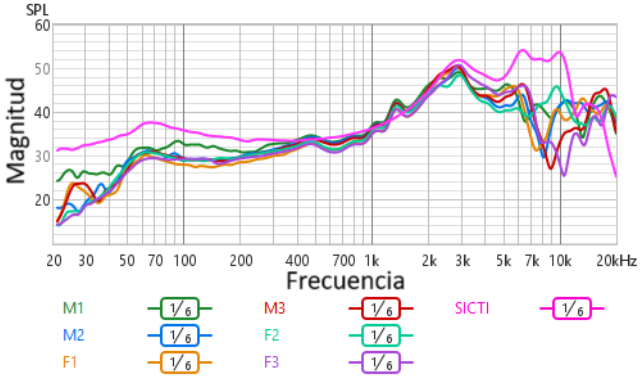


(c) Resultados promedio.

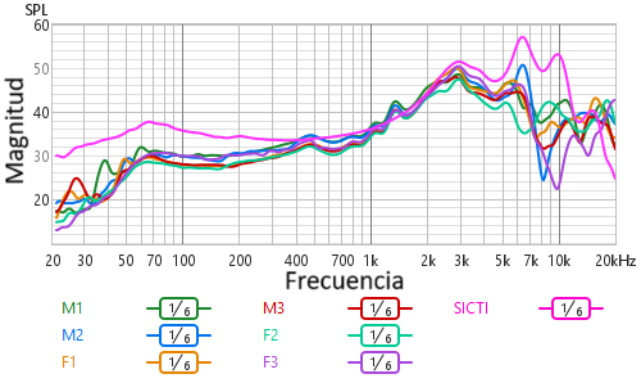
Figura 12: Respuestas en frecuencia medidas en oído derecho del SICTI.

En la Figura 12c se muestran los resultados promediados de todas las mediciones con suavizado de 1/6 de octava, puede observarse claramente que los HD 650 presentan una respuesta más plana que podría ser igualada por los MushRoom si se les aplican las modificaciones que se detallan en [3].

La Figura 13 muestra las respuestas en frecuencia promedio para el oído derecho de cada participante. Como es de esperar las curvas presentan oscilaciones en el rango de frecuencias altas, y los valores específicos de frecuencias donde ocurren picos y valles varían según cada participante, muy probablemente debido a las diferencias antropométricas de los pabellones auditivos.



(a) Mediciones del MushRoom 1.



(b) Mediciones del MushRoom 2.

Figura 13: Respuestas en frecuencia promedio del oído derecho con suavizado de 1/6 de octava.

5. CONCLUSIONES

Se implementaron dos pares de auriculares abiertos y cuatro micrófonos intraurales. Se obtuvo la función de transferencia de los auriculares midiendo con las técnicas del maniquí y con los micrófonos en oídos reales. Estas respuestas ofrecen la posibilidad de compensar su efecto usando un filtro generalizado al invertir la respuesta en frecuencia obtenida con el maniquí, o un filtro personalizado a partir de alguna de las seis respuestas personales obtenidas con micrófonos en oído ocluido. Adicionalmente, se ha relevado la atenuación para cuatro orientaciones en el plano axial demostrando que los MushRooms ofrecen menor atenuación que otros modelos de auriculares abiertos comercialmente disponibles en la actualidad. Por estas características, la utilización de los MushRooms resulta adecuada en trabajos futuros para auralizaciones y diseño de escenas de realidad virtual y aumentada, compensando el efecto de su respuesta en frecuencia.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la UNSJ y el CONICET por el soporte, a Santiago Río por la colaboración con el diseño de los moldes de los tapones auditivos, al personal técnico del INAUT Alejandro Avendaño y Pedro Campillo a cargo de la impresión 3D e implementación electrónica, respectivamente, y a las personas voluntarias que participaron en el estudio de los auriculares.

REFERENCIAS

[1] E. Accolti, L. Aspöck, M. Yadav, y M. Vorländer, “Real-time auralizationfor performers on virtual stages”, *arXiv preprint arXiv:2309.03149*, 2023.

[2] E. Accolti, L. Aspöck, y M. Vorländer, “An aproach towards virtual stage experiments”, en *10th Convention of the European Acoustics Association*, Torino, Italia, 2023. DOI: 10.61782/fa.2023.0286

[3] A. Mülleder y F. Zotter, “Ultralight Circumaural Open Headphones”, en *154th Audio Engineering Society Convention*, Espoo, Helsinki, Finlandia, 2023.

[4] A. Mülleder, M. Romanov, N. Meyer-Kahlen, y F. Zotter, “Do-it-yourself headphones and development platform for augmented-reality audio”, en *AES International Conference on Spatial and Immersive Audio*, Huddersfield, Reino Unido, 2023.

[5] F. Denk, F. Brinkmann, A. Stirnemann, y B. Kollmeier, “The PIRATE: an anthropometric earPlug with exchangeable microphones for Individual Reliable Acquisition of Transfer functions at the Ear canal entrance”, en *Fortschritte der Akustik - DAGA*, Rostock, Alemania, 2019.

[6] A. Mülleder, “Assembly Instructions DIY headphone MushRoom”, 2023. https://github.com/adude995/DIY-Open-Headphone/blob/main/assembly_instructions_mushroom.pdf

[7] F. Sarmiento, S. Río, G. Galarza, N. Vechiatti, y E. Accolti, “Prototipo de simulador de cabeza y torso para adquisición de audio con oído ocluido”, en *XIII Congreso Iberoamericano de Acústica*, Santiago de Chile, 2024.

[8] REW - Room EQ Wizard Room Acoustics Software. https://www.roomeqwizard.com/

[9] E. Accolti y F. di Sciascio, “On the use of time windows for the determination of sound strength parameter G from uncalibrated room impulse responses measurements”, 2021. Applied Acoustics, 178, 12. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108023

[10] Recomendación ITU-T P.58: Simulador de cabeza y torso para telefonometría. Ginebra, Suiza, 2023.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Percepción auditiva de distancia en entornos virtuales: influencia del equipamiento de reproducción (AdAA2025)

Piceda, Laura Berenice [†1]; Cerviño, Joaquín [†2]; Lombera, Esteban [‡3]; Vergara, Ramiro [†4]

[†] Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo), Universidad Nacional de Quilmes, CONICET, Bernal, Buenos Aires, B1876, Argentina

‡ Grupo de Investigación en Acústica y Psicoacústica, Departamento de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), Sáenz Peña, B1678, Argentina

[1] laura.piceda@unq.edu.ar, [2] joaquin.cervino@unq.edu.ar, [3] elombera@untref.edu.ar, [4] ramiro.vergara@unq.edu.ar

Resumen: La percepción de distancia auditiva en entornos virtuales depende de múltiples factores acústicos y cognitivos, pero pocas investigaciones han explorado cómo el tipo de equipamiento de escucha afecta esta percepción. En este estudio, comparamos la distancia percibida de fuentes sonoras virtuales reproducidas mediante equipamiento profesional (auriculares abiertos de alta gama, sistema calibrado en entorno controlado) con la misma experiencia auditiva reproducida en condiciones convencionales (auriculares domésticos, entorno variable), simulando escenarios reales de consumo de audio espacializado.

Se utilizaron estímulos musicales posicionados virtualmente a diferentes distancias frontales (1–6 m), procesados mediante HRTF no individualizadas. Los resultados preliminares revelan diferencias significativas en la percepción de distancia entre configuraciones, especialmente en relación con la externalización y la coherencia espacial percibida. Estos hallazgos subrayan la importancia del hardware en la creación de experiencias inmersivas auditivamente realistas.

Palabras clave: percepción auditiva de distancia, HRTF, realidad virtual, psicoacústica

Abstract: Auditory distance perception in virtual environments depends on multiple acoustic and cognitive factors, yet few studies have investigated how the type of listening equipment influences this perception. In this study, we compared the perceived distance of virtual sound sources reproduced through professional equipment (high-end open-back headphones, calibrated system in a controlled environment) with the same auditory experience reproduced under conventional conditions (consumer-grade headphones, variable environment), simulating real-world scenarios of spatial audio consumption.

Musical stimuli were virtually positioned at different frontal distances (1–6 m) and processed using non-individualized HRTFs. Preliminary results revealed significant differences in distance perception across configurations, particularly regarding externalization and perceived spatial coherence. These findings highlight the critical role of hardware in shaping immersive and perceptually realistic auditory experiences.

Palabras clave: auditory distance perception, HRTF, virtual reality, psychoacoustics

1. INTRODUCCIÓN

La percepción auditiva de distancia (PAD) constituye una de las dimensiones fundamentales de la audición espacial, junto con la localización en azimut y en elevación. Esta capacidad permite al oyente estimar la ubicación relativa de una fuente sonora a lo largo del eje anteroposterior, resultando esencial para la orientación espacial, la comunicación en entornos complejos y la interacción con el ambiente [1],[2]. A diferencia de la localización horizontal, donde los indicios binaurales como las diferencias interaurales de tiempo (ITD) y de nivel (ILD) permiten una estimación precisa [3], la PAD depende de múltiples factores acústicos y no acústicos, lo que la convierte en un fenómeno más variable y difícil de simular de manera verídica en entornos virtuales [4].

Entre los indicios acústicos más relevantes se encuentran la intensidad (relacionada con la ley del inverso del cuadrado de la distancia), la relación directo/reverberante, la absorción atmosférica diferencial de las altas frecuencias y el efecto de proximidad [5]–[7]. En ambientes reverberantes, la atenuación de la intensidad con la distancia se ve mitigada por las reflexiones, lo que obliga al sistema auditivo a integrar información de naturaleza espectral y temporal [8]. Además, investigaciones clásicas han demostrado que las frecuencias altas se atenúan más rápidamente durante la propagación (aprox. 3–4 dB/100 m a 4 kHz), ofreciendo un indicio adicional de lejanía [9].

A estos factores acústicos se suman indicios no acústicos que modulan la PAD. La presencia de estímulos visuales congruentes, la familiaridad con el material sonoro y las expectativas cognitivas del oyente han demostrado tener un peso significativo en la estimación de distancias [10],[11]. En este sentido, la PAD no puede comprenderse como un proceso meramente sensorial, sino como una integración multimodal que se ajusta a las condiciones del contexto y a la experiencia previa del individuo.

En los últimos años, el auge de la realidad virtual (RV) y la realidad aumentada (RA) ha potenciado la relevancia de la PAD como componente de la inmersión perceptual. La literatura reporta que la calidad del audio espacial influye de forma directa en la sensación de presencia y en la credibilidad de los entornos virtuales [12],[13]. Sin embargo, reproducir verídicamente las claves de distancia presenta desafíos técnicos, entre ellos la dependencia de las funciones de transferencia relacionadas con la cabeza (HRTF). Estas funciones, que representan cómo el torso, la cabeza y el pabellón auricular modifican el sonido antes de llegar al tímpano, varían de manera individual. El uso de HRTF no individualizadas —medidas en maniquíes o en otras personas— suele generar errores en la percepción de distancia y en la externalización de las fuentes [14]–[16].

Si bien numerosos estudios han explorado la PAD en entornos controlados de laboratorio, utilizando equipamiento de alta fidelidad y condiciones acústicas estandarizadas, aún existe un déficit de investigaciones que evalúen cómo se comporta esta percepción en contextos menos controlados, como los experimentos online o el uso de auriculares de consumo masivo [17]. Esto resulta especialmente relevante dado que la mayor parte de las experiencias inmersivas (videojuegos, cine 3D, aplicaciones de VR domésticas) se consumen en configuraciones hogareñas, con equipos heterogéneos en calidad y respuesta en frecuencia [18],[19]. Trabajos recientes han comenzado a comparar la percepción de escenas sonoras en laboratorios versus entornos virtuales accesibles al público, revelando diferencias significativas en la compresión de las distancias percibidas [20],[21].

En este marco, el presente estudio busca contribuir a esta discusión mediante una comparación directa de la PAD en un entorno controlado de laboratorio con equipamiento profesional y en un entorno remoto basado en la participación web, donde los sujetos utilizaron auriculares de diversa calidad. La hipótesis es que el tipo de equipamiento y la homogeneidad de las condiciones de escucha impactan de manera sistemática en la precisión y compresión de la percepción de distancia, lo que tiene implicancias tanto para la investigación psicoacústica como para el diseño de tecnologías inmersivas.

2. METODOLOGÍA

2.1 Participantes

Participaron 80 sujetos (28 mujeres, 50 varones y 2 que se identificaron con otra categoría de género), con una edad promedio de 32 años (rango 18–55). Treinta de ellos realizaron el experimento en un entorno controlado dentro de la Universidad Nacional de Quilmes, mientras que 50 participaron de forma remota a través de un sistema web. Todos los participantes reportaron audición normal, sin antecedentes de patologías auditivas ni uso de audífonos. Ninguno tenía conocimiento previo de los objetivos del experimento. Antes de iniciar, completaron un consentimiento informado por escrito, de acuerdo con la Declaración de Helsinki y las normativas del Comité de Ética de la Universidad Nacional de Quilmes.

2.2 Estímulos Sonoros

El estímulo utilizado consistió en un fragmento musical anecoico de 8 segundos, extraído de la pieza Hell of a Guy del repositorio de grabaciones anecoicas de Benjamin Bernschutz [22]. La señal se eligió por su rango espectral amplio y su carácter natural, lo que permite una estimación de distancia más ecológica que el uso de estímulos puramente sintéticos, como ruidos o tonos.

El fragmento fue convolucionado con respuestas impulsionales binaurales (BIRs) para generar seis posiciones de fuentes virtuales ubicadas a distancias frontales de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 metros, manteniendo el mismo ángulo de incidencia (0° de azimut y elevación). Las BIRs empleadas fueron no individualizadas y obtenidas de una base de datos de HRTF estándar, lo que es una práctica común en experimentos de percepción virtual [23],[24], aunque se reconoce que esta aproximación puede introducir sesgos en la externalización y precisión de la localización [25].

2.3 Equipamiento y Entornos de Reproducción

2.3.1 Entorno controlado

El experimento se realizó en un aula de la Universidad Nacional de Quilmes. La reproducción se realizó mediante auriculares abiertos Sennheiser HD 800, elegidos por su respuesta en frecuencia plana y baja distorsión. El procedimiento experimental fue controlado por una computadora portátil que ejecutaba Matlab R2016b con Psychtoolbox (PTB-3) y utilizando una interfaz de audio RME Fireface USB, con una frecuencia de muestreo de 44,1 kHz. Las distancias utilizadas en el experimento fueron: D = 1, 2, 3, 4, 5 y 6 metros.

2.3.2 Entorno remoto

La condición remota consistió en un experimento web, desarrollado para ejecutarse en navegadores compatibles con WebAudio API. Los participantes utilizaron sus propios auriculares, de diversos modelos (in-ear, supraaurales y circumaurales), y respondieron desde sus hogares. Aunque no se pudo estandarizar el equipamiento, se les indicó previamente que buscaran un entorno silencioso y ajustaran el volumen a un nivel cómodo pero moderado, siguiendo prácticas de estudios remotos [26],[27]. Las distancias utilizadas en el experimento también fueron: D = 1, 2, 3, 4, 5 y 6 metros.

2.4 Procedimiento Experimental

El experimento constó de las siguientes etapas:

-Encuesta inicial: recopilación de datos demográficos (edad, género, historial auditivo, tipo de auricular utilizado en caso remoto).

-Fase de familiarización: se presentó un breve entrenamiento con ejemplos de estímulos a distintas distancias para que el participante comprendiera la tarea, sin incluir los ensayos de prueba en el análisis.

-Tarea principal: en cada ensayo, se reproducía un estímulo a una de las seis distancias posibles, en orden pseudoaleatorio. El participante debía indicar la distancia percibida en metros mediante un teclado. Cada participante completó al menos 60 ensayos (10 por distancia), lo que permitió un análisis robusto de la función de compresión de distancia a nivel individual.

2.5 Análisis de Datos

Los datos fueron analizados en R mediante el paquete lme4 [28], ajustando un modelo lineal de efectos mixtos: $r' = \beta_0 + \beta_1 \cdot r + u_0 + u_1 \cdot r + \varepsilon$ donde: r' es la distancia percibida, r es la distancia física, β_0 y β_1 corresponden al intercepto y pendiente fijos para cada condición (controlada/remota), u_0 y u_1

representan los efectos aleatorios por sujeto (intercepto y pendiente individuales), y ε es el término de error residual. Este enfoque permite modelar la variabilidad interindividual y obtener estimaciones más precisas de la compresión de la percepción de distancia.

Se realizaron contrastes de hipótesis para la interacción entre condición y distancia, reportando valores de F y p ajustados. El nivel de significancia se fijó en α = 0,05. Los datos se visualizaron en gráficos de regresión para comparar el patrón de respuestas entre condiciones.

3. RESULTADOS

El análisis de los datos mediante el modelo lineal de efectos mixtos reveló una interacción significativa entre la condición experimental (entorno controlado vs. entorno remoto) y la distancia física en la estimación de la distancia percibida (□(2,77)=4.4973, □=0.01422). Esto indica que la compresión de la percepción de distancia difiere sistemáticamente según el tipo de entorno.

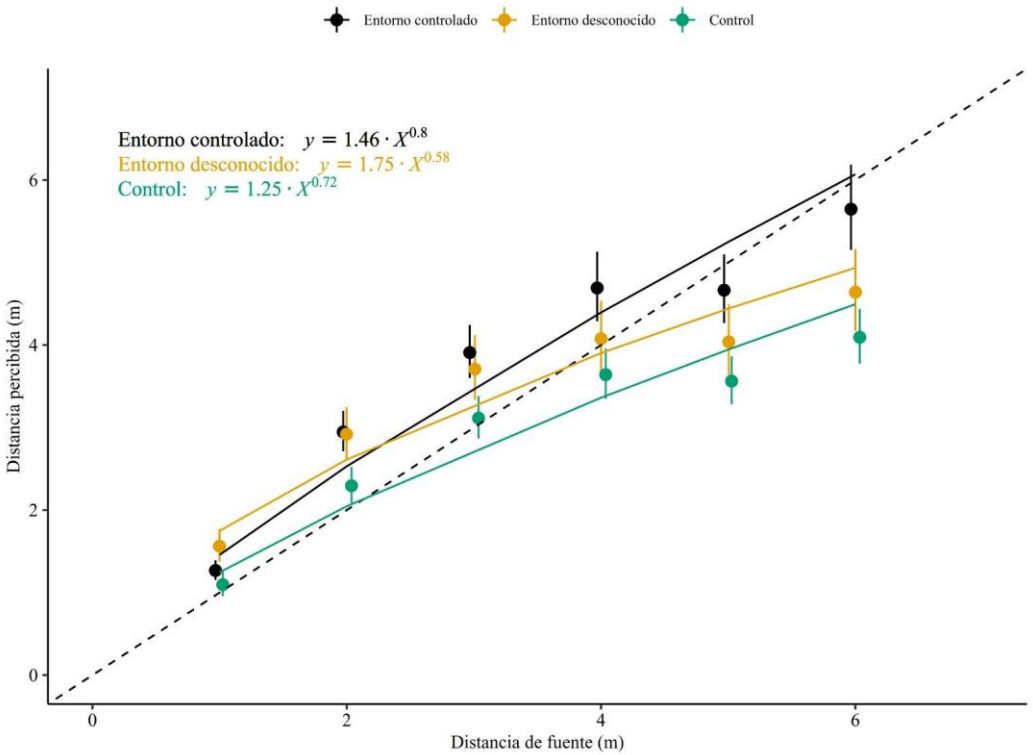


Fig. 1. Distribución de las pendientes del modelo lineal mixto (LMER) para cada condición experimental. Se muestran medianas (líneas horizontales), intervalos de confianza y dispersión de datos.

En la Figura 1 se muestran las distribuciones de las pendientes ajustadas para cada sujeto en las tres condiciones analizadas: Entorno Controlado (aula), Entorno Desconocido (remoto) y Control (experimento previo). Las pendientes individuales ajustadas a través del modelo revelaron un patrón consistente: los participantes en el entorno remoto presentaron valores de pendiente más bajos que los observados en el entorno controlado y en el grupo de control. Este resultado indica una mayor compresión de las distancias percibidas cuando se utilizan auriculares de diversa calidad en condiciones no controladas.

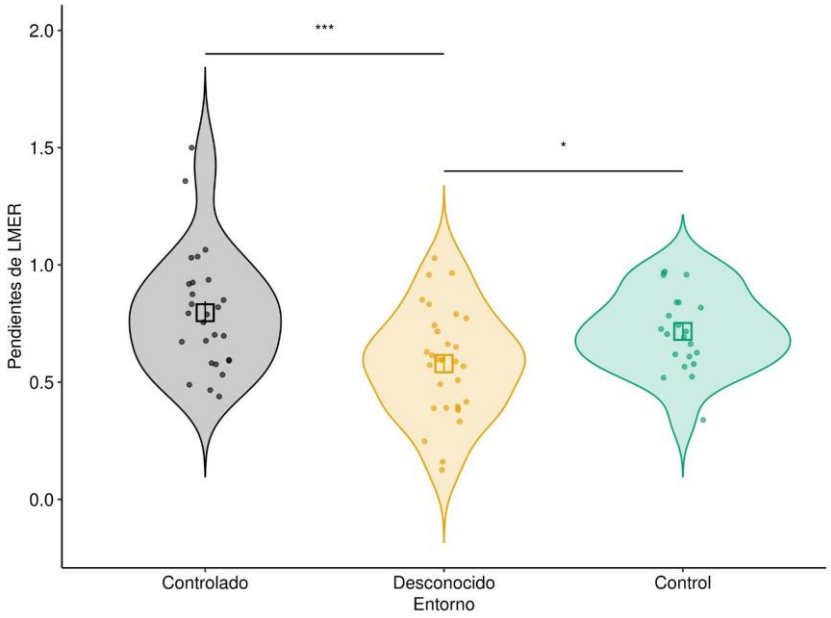


Fig. 2. Funciones de ajuste de potencia y medias de distancia percibida para cada condición. Las barras de error representan error estándar de la media.

Las funciones de ajuste de potencia obtenidas reflejan el efecto de compresión: los exponentes son menores que 1, confirmando la naturaleza compresiva de la percepción de distancia, pero el exponente más bajo en el entorno desconocido muestra que este efecto es más pronunciado en condiciones no controladas. Dicho patrón se manifiesta en una sobreestimación de las distancias más cortas y subestimación de las más largas, lo que produce una respuesta perceptiva "aplanada".

Finalmente, el modelo de efectos mixtos permitió estimar variaciones individuales de compresión. No se hallaron diferencias estadísticamente significativas en la variabilidad intersujeto entre las condiciones controladas (Control y Entorno Controlado), pero sí en comparación con el entorno remoto, que presentó mayor dispersión en las pendientes individuales (ver Fig. 1). Esto sugiere que la heterogeneidad del equipamiento utilizado en los hogares introduce ruido adicional en las estimaciones de distancia.

4. DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio muestran que la percepción auditiva de distancia se ve modulada de forma sistemática por el contexto experimental. En particular, se observó una tendencia general a la sobreestimación de las distancias reportadas para los estímulos sonoros en la condición de experimento remoto, lo que coincide con investigaciones recientes que han documentado sesgos similares en paradigmas web [21]. Sin embargo, esta tendencia no es uniforme en todo el rango de distancias: el análisis de la interacción entre condición y distancia revela que los estímulos más cercanos fueron sobrestimados en el entorno remoto/ no controlado, mientras que los más lejanos fueron subestimados, produciendo un patrón de compresión.

El hallazgo de pendientes menores en el entorno remoto sugiere que la representación perceptual del espacio auditivo se "contrae" en contextos de escucha domésticos, generando sobreestimación de las distancias más cortas y subestimación de las más largas. Este fenómeno coincide con observaciones de experimentos en línea, donde la falta de calibración de nivel y la heterogeneidad de los auriculares conducen a un patrón de respuestas más ruidoso y menos ajustado a la realidad física [21]. Se ha documentado que la intensidad es una de las pistas primarias en la percepción de distancia [1], por lo que pequeñas variaciones en el volumen de reproducción o en la respuesta en frecuencia de los auriculares pueden sesgar la estimación hacia mayores distancias cuando el nivel es menor de lo esperado, o hacia menores distancias cuando es excesivo.

Que el grupo de control y el entorno controlado no muestren diferencias significativas refuerza la confiabilidad del diseño experimental y la validez de la metodología utilizada. Los valores de pendiente hallados en la sala experimental coinciden con los reportados en estudios clásicos de PAD en condiciones anecoicas o semianecoicas, donde típicamente se observa una compresión moderada [29]. Esto sugiere que el laboratorio sigue siendo el estándar más estable para la medición de este fenómeno, mientras que el entorno remoto debe interpretarse con cautela, especialmente si el objetivo es obtener medidas absolutas de PAD.

El incremento de la dispersión interindividual observado en la condición remota es otro hallazgo relevante. Estudios previos han demostrado que distintas marcas y modelos de auriculares presentan desviaciones de hasta ±5 dB en bandas críticas para la percepción espacial [30], y que dichas diferencias se reflejan en la externalización y en la localización de fuentes [31]. Además, el ruido de fondo y las condiciones acústicas de cada hogar introducen variabilidad adicional, lo que puede explicar por qué algunos participantes mostraron pendientes casi lineales mientras que otros presentaron respuestas muy comprimidas. En este sentido, estrategias de calibración subjetiva y screening de auriculares, como las implementadas en plataformas de psicoacústica online recientes [26], podrían ayudar a mitigar parte de esta variabilidad y hacer más comparables los datos entre sujetos.

El patrón inverso observado en el entorno controlado —subestimación de las distancias más cercanas y sobreestimación de las más lejanas— es coherente con estudios que emplean reproducción en auriculares de referencia y estímulos virtuales, donde se ha reportado que la ausencia de variaciones no controladas en el nivel de reproducción y la homogeneidad del equipamiento tienden a producir una función de compresión más estable, aunque no perfectamente verídica [1]. En este contexto, la ligera subestimación de las fuentes próximas podría atribuirse a la falta de claves multimodales adicionales (como visión o interacción háptica), mientras que la sobreestimación de las fuentes lejanas podría reflejar la tendencia del sistema auditivo a compensar la atenuación de nivel en escenarios virtuales [29]. Estos hallazgos sugieren que las pistas acústicas disponibles en la reproducción controlada son suficientes para mantener una representación espacial consistente, pero que la percepción sigue estando influida por factores cognitivos y expectativas del oyente, que modulan la linealidad de la función de compresión.

Desde el punto de vista aplicado, estos resultados tienen implicaciones para el diseño de experiencias de realidad virtual (VR) y realidad aumentada (AR). La evidencia sugiere que no basta con reproducir con precisión las HRTF y la atenuación geométrica de la fuente; también es necesario considerar la calidad y respuesta del sistema de reproducción del usuario. Implementar algoritmos de calibración automática, por ejemplo mediante barridos de prueba o ecualización adaptativa, podría mejorar la consistencia de la percepción de distancia en entornos domésticos [19],[25].

REFERENCIAS

[1] Zahorik, P., Brungart, D. S., y Bronkhorst, A. W., “Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research,” *Acta Acustica United with Acustica*, 91, 409–420 (2005).

[2] Kolarik, A. J., Pardhan, S., Cirstea, S., y Moore, B. C., “Auditory spatial representations of the world are compressed in blind humans,” *Exp. Brain Res.*, 235(2), 597–606 (2017).

[3] Blauert, J., *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*, MIT Press (1997)

[4] Middlebrooks, J. C., “Sound localization,” *Handbook of Clinical Neurology*, 129, 99–116 (2015

[5] Gamble, E. A. (1909). Minor studies from the psychological laboratory of Wellesley College: Intensity as a criterion in estimating the distance of sounds. *Psychological Review, 16*(6), 416.

[6] Coleman, P. D., “An analysis of cues to auditory depth perception in free space,” *Psychological Bulletin*, 60, 302–315 (1963)

[7] Begault, D. R., “Preferred sound intensity increase for sensation of half distance,” *Perceptual and Motor Skills*, 71, 1019–1029 (1991).

[8] Bidart, A., y Lavandier, M., “Room-induced cues for the perception of virtual auditory distance,” *Acta Acustica United with Acustica*, 102(1), 159–169 (2016).

[9] Nyborg, W., y Mintzer, D., “Review of sound propagation in the lower atmosphere,” US Air Force WADA Tech. Rept., 54–60 (1955).

[10] Calcagno, E. R., Abregú, E. L., Eguía, M. C., y Vergara, R. (2012). The role of vision in auditory distance perception. *Perception*, *41*(2), 175-192.

[11] Cubick, J., et al., “The influence of visual cues on auditory distance perception,” DAGA Proceedings, 1220–1223 (2015).

[12] Serafin, S., et al., “Sonic interactions in virtual reality: State of the art,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, 38, 31–43 (2018).

[13] Bosman, I. D. V., Buruk, O. O., Jørgensen, K., y Hamari, J. (2024). The effect of audio on the experience in virtual reality: a scoping review. *Behaviour & Information Technology*, *43*(1), 165-199.

[14] Algazi, V. R., Avendano, C., y Duda, R. O., “Elevation localization and head-related transfer function analysis at low frequencies,” *JASA*, 109(3), 1110–1122 (2001).

[15] Jenny, C., y Reuter, C., “Usability of individualized HRTF in VR,” *JMIR Serious Games*, 8(3), e17576 (2020).

[16] Li, S., y Peissig, J., “Measurement of head-related transfer functions: A review,” *Applied Sciences*, 10(14), 5014 (2020).

[17] McCormack, L., y Politis, A., “SPARTA & COMPASS: Real-time implementations of spatial audio methods,” AES Immersive Conference (2019).

[18] Kronlachner, M., “Plug-in suite for mastering production and playback in surround and ambisonics,” AES Student Design Competition (2014).

[19] Sun, X., “Immersive audio: capture, transport, and rendering – a review,” *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 10, E13 (2021).

[20] Lombera, E. N., et al., “Comparison of perceived auditory distance between real and virtual sound sources,” *Applied Acoustics*, 231, 110519 (2025).

[21] Rehman, S., et al., “Comparison of virtual reality and web-based listening experiments on perception in complex auralized environments,” *Applied Acoustics*, 215, 109496 (2025).

[22] Bernschutz B., Fragmento de “Hell of a guy” de Anechoic Recordings, Cologne University of Applied Sciences, Institute of Communication Systems, Betzdorfer Str. 2, 50679 Cologne, Germany (2013) http://www.audiogroup.web.fh-koeln.de.

[23] Algazi, V. R., Avendano, C., & Duda, R. O. (2001). Elevation localization and head-related transfer function analysis at low frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *109*(3), 1110-1122.

[24] Li, S., & Peissig, J. (2020). Measurement of head-related transfer functions: A review. *Applied Sciences*, *10*(14), 5014.

[25] Jenny, C., & Reuter, C. (2020). Usability of individualized head-related transfer functions in virtual reality: Empirical study with perceptual attributes in sagittal plane sound localization. *JMIR serious games*, *8*(3), e17576.

[26] Woods, A. T., Velasco, C., Levitan, C. A., Wan, X., & Spence, C. (2015). Conducting perception research over the internet: A tutorial review. *PeerJ*, *3*, e1058.

[27] Anwyl-Irvine, A. L., Massonnié, J., Flitton, A., Kirkham, N., & Evershed, J. K. (2020). Gorilla in our midst: An online behavioral experiment builder. *Behavior research methods*, *52*(1), 388-407.

[28] lme4 package (R Core Team, 2021), https://cran.r-project.org/web/packages/lme4/index.html. Último acceso: Septiembre 2025

[29] Mershon, D. H., & King, L. E. (1975). Intensity and reverberation as factors in the auditory perception of egocentric distance. *Perception & Psychophysics*, *18*(6), 409-415.

[30] Olive, S., Welti, T., & McMullin, E. (2013, May). Listener preference for different headphone target response curves. In *134th Convention of the Audio Engineering Society*.

[31] Wiggins, I. M., & Seeber, B. U. (2012). Effects of dynamic-range compression on the spatial attributes of sounds in normal-hearing listeners. *Ear and hearing*, *33*(3), 399-410.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Evaluación de la inteligibilidad de los mensajes de radioaficionados en entornos sonoros urbanos

Musolino, Lautaro[†,1]

[†] Ingenieria de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero, Caseros, Buenos Aires

[1] lautaromusolino@yahoo.com.ar

Resumen Las comunicaciones de radioaficionados han aumentado en los últimos años y tienen un rol importante en situaciones atípicas en las que fallan los dispositivos digitales. El mensaje recibido debe ser claro y el operador de radio debe entenderlo correctamente. Esta investigación estudia la capacidad de comprender mensajes en diferentes entornos ruidosos. Se realizó una prueba de transcripción con 23 radioaficionados que escucharon indicativos ficticios compuestos por signos del alfabeto fonético de la OTAN. Los ruidos de fondo incluían ruido rosa, ruido de tráfico, ruido de personas hablando y versiones reverberadas, con relaciones señal-ruido (SNR) de -12 dB a 0 dB. Los resultados muestran que la comprensión mejora a medida que aumenta la SNR, alcanzando niveles casi perfectos por encima de 0 dB. El ruido más perturbador fue el de personas hablando, y el menos perturbador fue el ruido del tráfico. No se encontraron diferencias significativas relacionadas con la voz del transmisor o la experiencia del oyente. Las conclusiones sugieren otros factores influyentes, como la atención y la salud auditiva. Por último, se destaca la importancia de minimizar el ruido de las personas hablando y de realizar estas prácticas en entornos con tratamiento acústico.

Palabras claves: Radioaficionados, Inteligibilidad, SNR, Reconocimiento de palabra, Radiocomunicación.

Abstract Amateur radio communications have increased in recent years and are essential in atypical situations where digital devices fail. The received message must be clear and the radio operator must understand it correctly. This research studies the ability to understand messages in different noisy environments. A transcription test was conducted with 23 radio amateurs who listened to fictitious call signs made up of signs from the NATO phonetic alphabet. Background noises included pink noise, traffic noise, babbling people noise, and reverberated versions, with signal-to-noise ratios (SNR) from -12 dB to 0 dB. Results show comprehension improves as SNR increases, reaching near-perfect levels above 0 dB. The most disruptive noise was babbling people, and the least disruptive was traffic noise. No significant differences were found related to the transmitter's voice or the listener's experience. The conclusions suggest other influential factors such as attention and hearing health. Finally, the importance of minimizing babbling noise and conducting these practices in acoustically treated environments is emphasized.

Keywords: Amateur Radio, Intelligibility, Background noise, SNR, Speech Recognition, Radio Communication.

1. INTRODUCCIÓN

La radioafición es una actividad que se ha practicado desde los primeros días de las telecomunicaciones y sigue siendo un pasatiempo para millones de personas en todo el mundo. Para ser radioaficionado solo se necesita aprobar un examen teórico y práctico básico. Esto significa que las personas pueden obtener la licencia y comunicarse con equipos de radio sin fines militares. Estas conversaciones permiten intercambiar culturas y costumbres. Promueve la solidaridad, la camaradería y, en muchos casos, esta actividad sirve como un medio de comunicación alternativo en lugares donde no hay señal de teléfono móvil, durante emergencias o desastres naturales.

Por estas razones, lo que se transmite debe ser comprensible y emitirse en condiciones adecuadas respecto al ruido eléctrico, electromagnético y acústico. A su vez, quien lo recibe debe poder interpretarlo con claridad y entenderlo de forma ágil y sin esfuerzo.

A partir de esto, surgen nuevas preocupaciones relacionadas con los factores acústicos que interfieren en la transmisión y recepción de la información.

Esta investigación busca analizar cómo ciertos sonidos urbanos afectan la capacidad de los radioaficionados para comprender los mensajes que reciben. Cabe destacar que el estudio se centra exclusivamente en la interpretación del receptor. Asimismo, se parte del supuesto de que el mensaje emitido es claro y ha sido generado en condiciones acústicas óptimas, con un nivel mínimo de ruido de fondo.

Este tipo de estudios comenzaron hace cincuenta años y su objetivo era mejorar la eficiencia de las comunicaciones por radio con fines militares. Los primeros estudios fueron publicados por el Centro de Electrónica Naval de los EE. UU. para optimizar las comunicaciones de las fuerzas aéreas navales. Esta investigación abordó el desarrollo de sistemas para la comunicación en cubiertas de portaaviones, capaces de operar con niveles de ruido de hasta 130 dB SPL. Se centraban en técnicas de procesamiento de voz y en lograr una alta inteligibilidad y satisfacción del usuario [1]. Otro estudio similar presentó un documento que examinaba la inteligibilidad del habla en comunicaciones por radio para aeronaves navales [2]. Este estudio ya demostraba la necesidad de crear una lista de palabras que estandarizara las pruebas subjetivas de inteligibilidad.

Uno de los métodos subjetivos para evaluar la inteligibilidad del habla en inglés es el propuesto por la norma ANSI 3.2 [3], que incluye el Test de Rima Modificada (MRT), el Test de diagnóstico de la rima (DRT) y un conjunto de veinte listas de palabras Fonéticamente Balanceadas (PB). Sin embargo, esta norma no incluye un corpus de palabras en español para realizar una prueba de inteligibilidad.

Rao y Letowski analizaron la inteligibilidad del sistema CAT, desarrollado por el Laboratorio de Investigación del Ejército de Estados Unidos y la Dirección de Investigación e Ingeniería Humana (ARL-HRED). En este estudio, el sistema CAT utilizó el Alfabeto Fonético de la OTAN, el mismo que emplean los radioaficionados para comunicarse [4].

La tesis de Dunavold se centró en la evaluación de una versión modificada y abreviada del test de rima para medir la inteligibilidad del habla en comunicaciones por radio. En este trabajo se introdujo un método alternativo para realizar la misma prueba de forma más rápida, manteniendo el mismo nivel de eficacia que el test convencional [5].

Otra estudio [6] relacionado mostró que la pérdida de inteligibilidad del habla provocada por el ruido ambiental impacta de forma directa en el desempeño de los marineros en contextos operativos críticos y de emergencia. Los resultados muestran que esta dificultad no solo obstaculiza la comunicación efectiva, sino que también interfiere en la comprensión del entorno y en la toma de decisiones, aumentando el riesgo en situaciones de alta exigencia. En consecuencia, la adopción de estrategias para optimizar la claridad del habla podría favorecer un funcionamiento más seguro y eficaz en este tipo de entornos.

Por otra parte, la Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información (NTIA) publicó un informe técnico que investiga la inteligibilidad de diferentes sistemas de comunicación por radio en entornos acústicos con alta interferencia y típicos en situaciones de emergencia [7]. Utilizando la prueba de rima modificada (MRT), el estudio analiza la capacidad de varios sistemas de comunicación, incluidas las radios analógicas y digitales, para transmitir mensajes con claridad en condiciones de ruido extremo, especialmente en presencia de ruido en el lugar del incendio.

La calidad de las transmisiones radiales no es relevante únicamente en el ámbito militar. También tiene aplicaciones en otros contextos, como el reconocimiento de voz en operaciones policiales [8] o en la navegación marítima comercial [9]. Este último caso se centra en la banda VHF, y resulta particularmente interesante debido a la escasez de estudios que analicen la inteligibilidad en esa frecuencia. Por otro lado, aunque los radioaficionados emplean diversos modos de transmisión (código Morse, AM, SSTV o modos digitales), el método de fonía siendo el más utilizado, especialmente dentro de la banda VHF, ya que su equipamiento resulta sencillo de operar y ampliamente disponible para los usuarios.

El estudio de la inteligibilidad en comunicaciones radiales ha sido de gran interés durante décadas y varios estudios también han analizado cómo un idioma puede influir sobre otro. Por ejemplo, la investigación de Sommerhof y Rosas [10] indicó que el corpus de palabras fonéticamente equilibradas

(PB) estandarizado por ANSI para medir la inteligibilidad del habla no ofrecía los mismos resultados al aplicarse al español. Los autores concluyeron que existen diferencias notables al utilizar este método con palabras en español, y señalaron la necesidad de desarrollar una lista de palabras fonéticamente equilibradas adaptada específicamente a este idioma.

En lo que respecta a las pruebas subjetivas de inteligibilidad, se han publicado numerosas investigaciones relacionadas con la psicoacústica y la capacidad de reconocer distintos tipos de voces. También ha sido relevante el análisis del ruido de fondo y cómo este afecta la inteligibilidad, así como el reconocimiento del habla en entornos donde muchas personas hablan simultáneamente (conocido como *masking talkers' noise*) [11]. Otras investigaciones más específicas se centran en las características del habla, como el modo en que distintos niveles de voz y ruido influyen en la capacidad de reconocer palabras monosílabas entre adultos con diversos grados de audición [12].

En Argentina, el autor Pace [13] presentó en su tesis de grado el desarrollo de nuevas listas de palabras fonéticamente balanceadas para ser utilizadas en audiometría vocal y otras pruebas de inteligibilidad. Una característica particular de esta tesis es que las palabras corresponden al vocabulario español rioplatense. Posteriormente, surgieron otros trabajos de tesis que mejoraron, ampliaron y refinaron el trabajo de Pace. El autor Bertato [14] presentó en su tesis la validación del trabajo realizado por Pace y analizó los resultados obtenidos mediante métodos tradicionales de evaluación.

Los estudios citados anteriormente evidencian un interés por realizar investigaciones sobre inteligibilidad fuera del ámbito militar, pero centradas en contextos donde las personas suelen utilizar un vocabulario común en el español rioplatense.

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la capacidad de los radioaficionados para comprender un mensaje recibido por radio en presencia de paisajes sonoros ruidosos, así como analizar cómo influyen otros factores como el tipo de voz del emisor o la experiencia previa en esta actividad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Según el Ente Nacional de Comunicaciones (ENACOM), cualquier persona mayor de 9 años que sea ciudadano argentino o residente permanente puede convertirse en radioaficionado. Para ello deben cumplir con requisitos legales, aprobar un examen teórico sobre reglamentaciones y conceptos técnicos básicos, y completar una cierta cantidad de horas de práctica operativa. Una vez cumplidos estos requisitos y aprobados los exámenes, la autoridad nacional de telecomunicaciones del país correspondiente emite una licencia única e intransferible para utilizar equipos de radio en bandas de frecuencia específicas.

La licencia de radioaficionado está compuesta por cinco letras y un número. Las dos primeras letras son prefijos asignados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, un organismo de las Naciones Unidas que coordina el espectro radioeléctrico mundial para designar distintos países y territorios. Luego se asigna un número, seguido por tres letras finales.

La señal distintiva es importante para confirmar el contacto, ya que constituye la principal identificación de la estación emisora, y debe mencionarse al inicio y al final de cada mensaje transmitido por radio. Para ello se utiliza el Alfabeto Fonético Internacional de Radiotelefonía (también conocido como el alfabeto fonético de la OTAN), en el que cada letra corresponde a una palabra específica.

2.1 Estímulos de la prueba subjetiva

En este estudio se presentaron señales distintivas de radioaficionados provenientes de países de habla hispana (Argentina, Chile, Uruguay, Colombia, España y México) como estímulos auditivos. Estas señales de llamada están compuestas por palabras y números correspondientes al alfabeto fonético estándar de la OTAN. La lista de palabras y números utilizados se presenta en la Tabla 1.

Usando un código basado en Python [15] se generó una lista de señales distintivas ficticias. Tal como se menciona anteriormente, estas distinciones están compuestas por cinco letras y un número. La lista

Tabla 1: Lista de palabras del alfabeto fonético de la OTAN.

Letra	Palabra	Letra	Palabra
A	Alfa	N	November
B	Bravo	O	Oscar
C	Charlie	P	Papa
D	Delta	Q	Quebec
E	Eco	R	Romeo
F	Foxtrot	S	Sierra
G	Golf	T	Tango
H	Hotel	U	Union
I	India	V	Victor
J	Juliet	W	Whiskey
K	Kilo	X	X-Ray
L	Lima	Y	Yankee
M	Mike	Z	Zulu

generada fue leída por dos personas de diferente género utilizando una radio portátil (handy) sintonizada en la banda VHF de 2 metros [16]. La señal recibida por otra radio portátil fue grabada mediante un micrófono conectado una computadora en una sala silenciosa y acústicamente controlada, manteniendo una distancia de 1 m entre el micrófono y el handy. Se optó por utilizar radios portátiles operando en la banda VHF debido a que esta banda es una de las más empleadas en las comunicaciones por radioaficionados y porque el costo del equipo es considerablemente menor en comparación con otros sistemas de transmisión y recepción más sofisticados.

En la Figura 1 se muestran dos espectrogramas de voces de distinto género para dos señales distintivas diferentes. La voz masculina concentra la energía entre 125 Hz y 500 Hz, con una frecuencia fundamental cercana a 125 Hz y armónicos espaciados aproximadamente cada 125 Hz. En el caso de la voz femenina, la energía se distribuye entre 250 Hz y 1 kHz, con una frecuencia fundamental en torno a 250 Hz y armónicos espaciados en la misma cantidad. La atenuación en las frecuencias por encima de 4 kHz difiere en ambos casos: en la voz masculina, la energía disminuye 10 dB entre 4 kHz y 8 kHz, mientras que en la voz femenina la reducción en el mismo rango es de aproximadamente 5 dB. Estas diferencias pueden influir en la percepción auditiva del mensaje.

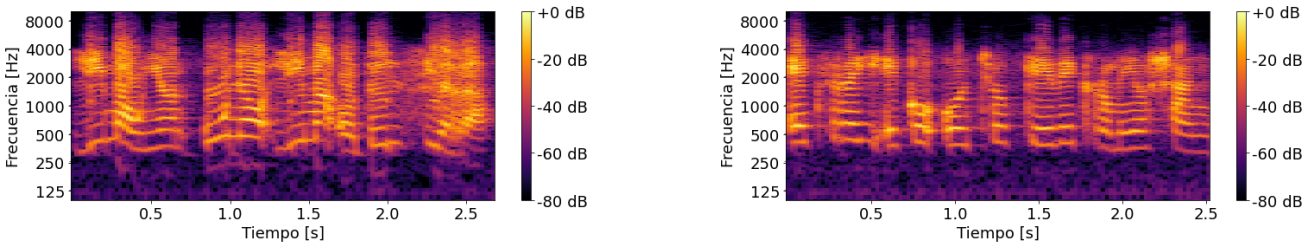


Figura 1: Señales de audio emitidas por diferentes tipos de voces: **(a)** Voz masculina y **(b)** Voz femenina.

El mensaje de audio se mezcló con cuatro tipos de ruido de fondo, coincidiendo tres de ellos con los utilizados en la investigación de Rao y Letowski (ruido de tráfico, ruido rosa y murmullo de personas). Adicionalmente, se incorporó el mismo murmullo de personas pero con una reverberación de 1 s, con el fin de simular la situación típica en los radio clubes[1].

Las grabaciones de audio de las señales y del ruido se normalizaron a -6 dBFS. Posteriormente, se

[1]Generalmente, los radio clubes son las instituciones autorizadas para impartir los cursos y realizar las prácticas operativas. También son lugares donde otros radioaficionados se reúnen para conversar de manera informal, lo que genera ruido de fondo. Además, las prácticas operativas suelen llevarse a cabo con varios equipos de radio funcionando simultáneamente en la misma sala.

mezclaron a cuatro niveles diferentes de relación señal-ruido (SNR). El audio de ruido se mantuvo a un nivel constante, mientras que las señales a reconocer se ajustaron a cuatro SNR: 0 dB, -3 dB, -9 dB y -12 dB. Esto dio lugar a los estímulos que fueron evaluados por los participantes. Para cada SNR se crearon cinco estímulos distintos con el fin de evitar repeticiones durante la prueba. Cada muestra de audio tuvo una duración aproximada de 5,5 s.

La Figura 2 muestra cómo el ruido de fondo enmascara las diferentes señales distintivas, dificultando su comprensión. En este caso, los mensajes de radio son recibidos en un entorno ruidoso de personas hablando en una sala sin tratamiento acústico (con reverberación).

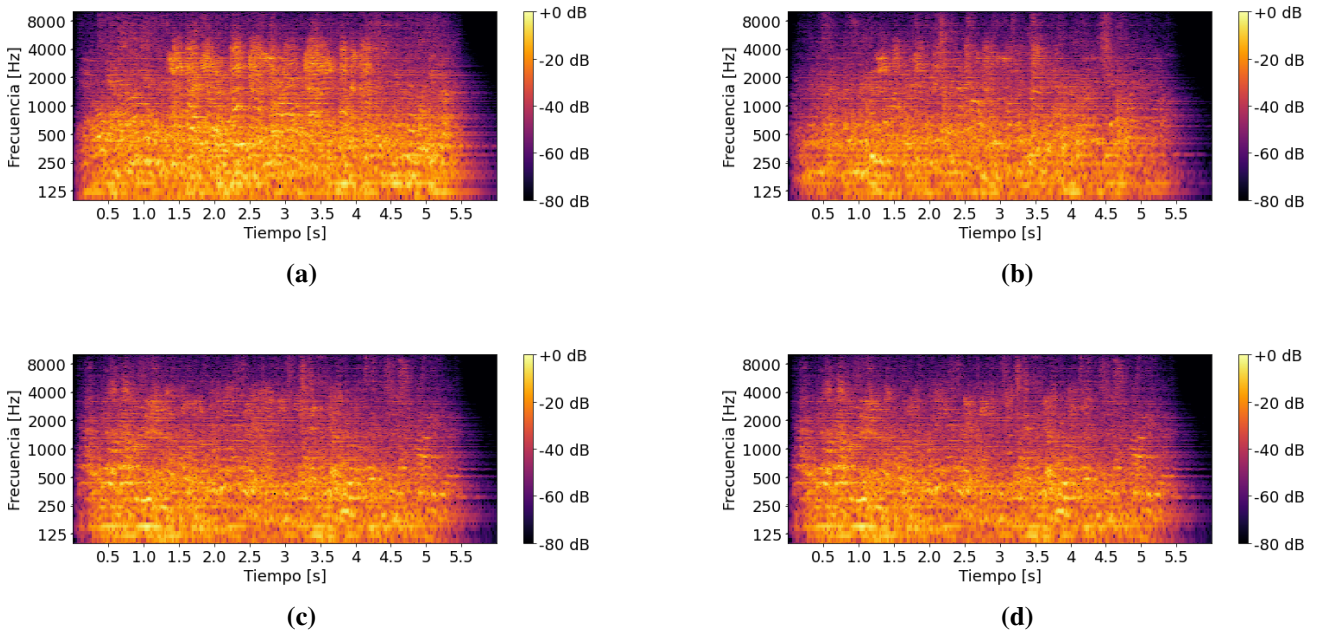


Figura 2: Espectrogramas de los estímulos de audio evaluados: **(a)** LU8ZCF con una SNR de 0 dB; **(b)** LU3FZT con una SNR de –3 dB; **(c)** LW1SIV con una SNR de –9 dB; y **(d)** LU6JUP con una SNR de –12 dB.

2.2 Entorno de la prueba

En este estudio participaron 23 radioaficionados con licencia vigente. Durante la prueba subjetiva, se les solicitó indicar su edad y la cantidad de años de experiencia estableciendo contactos. Esta información fue importante para contextualizar los resultados. El test se realizó en el laboratorio de electrónica del Radio Club Buenos Aires (LU4BB). Previo a su inicio, se midió el ruido de fondo, obteniéndose un LAeq de 38 dBA en un periodo de 10 minutos. Durante la evaluación, solo estaban presentes el participante y un supervisor para brindar asistencia en caso necesario. Los sujetos utilizaron auriculares y cada prueba tuvo una duración aproximada de 5 minutos.

2.3 Procedimiento del test subjetivo

Los tipos de test utilizados en esta investigación fueron de transcripción. Se solicitó a los participantes escuchar el audio estímulo y escribir la señal distintiva que reconocieron. En este tipo de evaluación no se consideraron valores atípicos, ya que cada carácter incorrecto fue contabilizado como un error.

La prueba subjetiva se llevó a cabo mediante una interfaz gráfica desarrollada en Python (Figura 3). Para cada nivel de SNR, el código seleccionó aleatoriamente una de cinco muestras de audio posibles para la evaluación. Esto aseguró que cada participante realizara un test único, evitando repeticiones. La evaluación de cada nivel también se seleccionó de forma aleatoria. El campo de texto donde los participantes ingresaron sus respuestas fue configurado para aceptar solo seis caracteres.

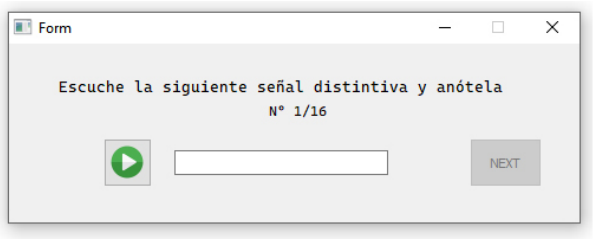


Figura 3: Python GUI for the subjective test.

Al inicio de la prueba se brindó a los participantes una breve introducción sobre cómo realizar el test (Figura 4). Luego, se les ofrecieron tres instancias de aprendizaje para que se familiarizaran con los niveles de dificultad del audio estímulo. Posteriormente, los sujetos comenzaron con la prueba propiamente dicha.

Figura 4: Sujeto realizando la prueba en la sala del radio club.

Sólo podían escuchar cada muestra de audio una vez y debían escribir lo que interpretaron. Si los participantes no reconocían ninguna palabra, podían dejar el formulario en blanco, y el código interpretaba automáticamente esto como un error. Finalmente, cada sujeto tenía que responder qué tipo de voz reconocía con mayor facilidad.

Las respuestas fueron registradas mediante la interfaz gráfica de Python y posteriormente analizadas con otro script de procesamiento de datos. La Figura 5 muestra la interfaz gráfica que muestra los resultados obtenidos en cada prueba, esto fue útil para aumentar el interés de los participantes sobre la investigación.

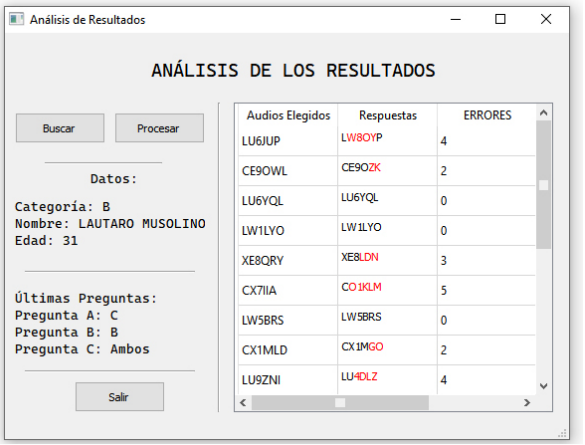


Figura 5: Interfaz gráfica en Python que muestra los resultados de las pruebas subjetivas.

3. Resultados

Basado en la cantidad de respuestas obtenidas, se llevó a cabo un análisis estadístico. En la primera parte, se estudió el fenómeno de la inteligibilidad del habla en toda la población y para los cuatro tipos de ruidos. Los resultados se analizaron según la elección del tipo de voz seleccionada en la pregunta final y, por otro lado, según los años de experiencia. Finalmente, se evaluó si las respuestas subjetivas finales coincidían con los resultados obtenidos en el análisis estadístico. Los análisis descriptivos muestran un aumento progresivo en el porcentaje promedio de palabras reconocidas correctamente a medida que mejora la relación señal-ruido (SNR). La Figura 6 muestra los porcentajes promedio de palabras correctas según cada grupo de SNR, y la barra de error indica la desviación estándar en cada tipo de ruido.

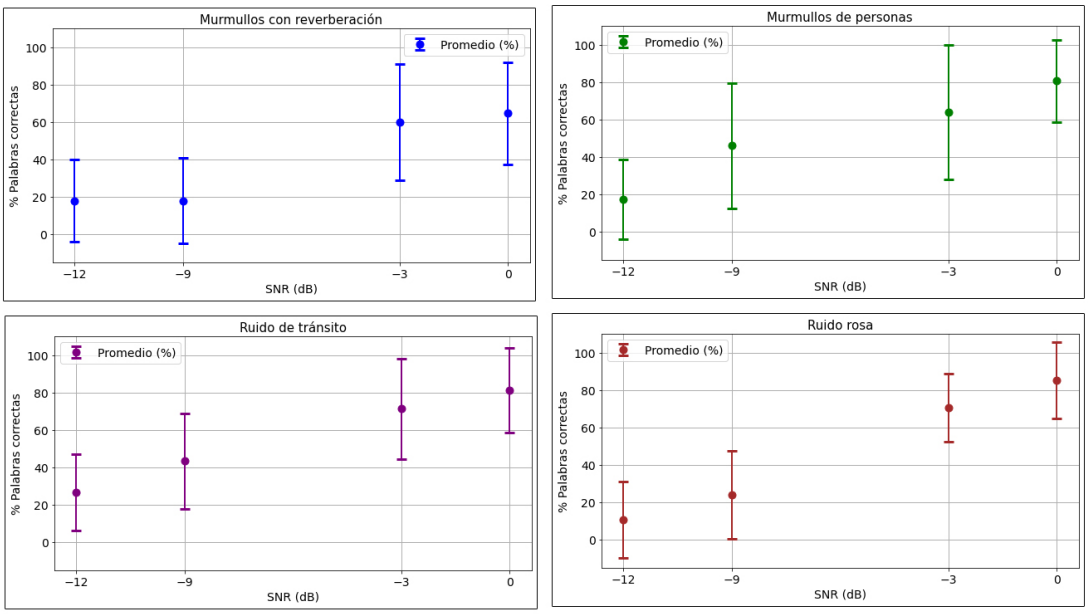


Figura 6: % de palabras correctas en cada grupo de SNR para cada tipo de ruido: (**a**) Personas hablando en una sala sin tratamiento acústico (con reverberación). (**b**) Personas hablando (sin reverberación). (**c**) Ruido rosa. (**d**) Ruido de tráfico.

El principal resultado observado es el aumento de la capacidad para comprender el mensaje a medida que aumenta la relación señal-ruido (SNR). Estos resultados también indican que, para comprender completamente el mensaje (100 %), se requieren niveles de SNR superiores a 0 dB.

Los gráficos superiores de la Figura 6 comparan la situación del mismo ruido de fondo de personas hablando, con y sin el efecto de la sala (reverberación). En el caso del ruido con reverberación (arriba a la izquierda), el porcentaje de palabras correctas es de aproximadamente 18 % (SNR –12 dB y –9 dB). Luego aumenta hasta sus valores máximos de aproximadamente 60–65 % (SNR –3 y 0 dB). Para el ruido de personas sin reverberación (arriba a la derecha), los resultados muestran un aumento considerable de 45 % (SNR –9 dB) y alcanzan un valor cercano al 80 % (SNR 0 dB). Estos resultados notan que los efectos de la reverberación en el ruido afectan la capacidad para comprender el mensaje, especialmente a niveles superiores a –9 dB.

Los resultados para el ruido rosa y el ruido de tráfico revelaron otros aspectos importantes. El ruido rosa (abajo a la izquierda) mostró valores muy bajos (11 % a –12 dB) y luego aumentó considerablemente, alcanzando 85 % de palabras correctas en SNR 0 dB. Por otro lado, el ruido de tráfico mostró mejores condiciones a bajos niveles de SNR (27 % a –12 dB), pero a niveles de –9, –3 y 0 dB, los resultados fueron similares a los del estudio con ruido rosa.

Considerando estas observaciones, el ruido de tráfico fue el menos perturbador (mejor inteligibilidad a –12 y –9 dB). Luego, el ruido rosa provocó mayor perturbación a bajos niveles de SNR, pero el ruido de habla (con y sin reverberación) tuvo el peor desempeño. La capacidad para comprender un mensaje

de radio presentó el rendimiento más bajo en presencia de ruido de habla simulado en una sala (con reverberación), particularmente a niveles de SNR superiores a –9 dB. Este último detalle es relevante, ya que es el más comúnmente encontrado en las prácticas operativas en los radio clubes.

Además, las barras de error muestran que la variabilidad es mucho mayor en presencia de ruido de habla (con o sin reverberación). Esto sugiere que algunos participantes tuvieron mayor dificultad para comprender el mensaje que otros. En cambio, el ruido de tráfico y el ruido rosa produjeron respuestas con menor desviación.

En todos los casos, los coeficientes de correlación de Pearson indicaron una correlación positiva y estadísticamente significativa entre el nivel de SNR y el porcentaje de palabras correctas. El ruido de tráfico tuvo el coeficiente más alto (r = 0,83), seguido por el ruido rosa (r = 0,68), el ruido de habla con reverberación (r = 0,63) y el ruido de habla sin reverberación (r = 0,62). Estas diferencias indican que el tipo de ruido influye en cómo la SNR afecta los errores de reconocimiento (p <0,001 en todos los casos).

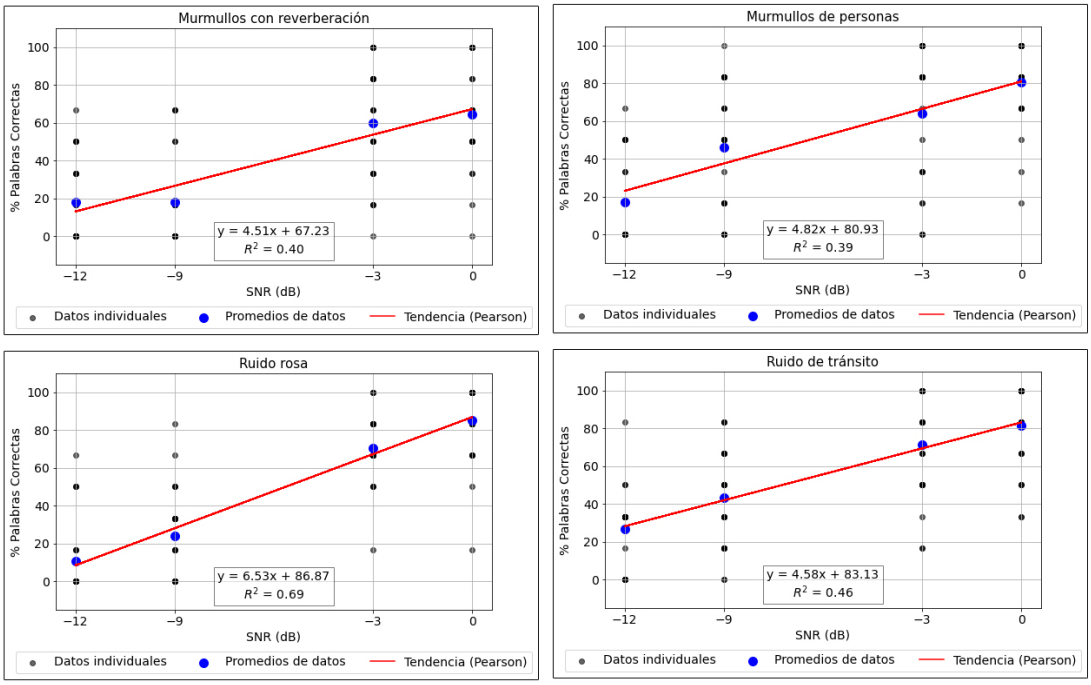


Figura 7: Regresión lineal para cada tipo de ruido: (**a**) Personas hablando en una sala sin tratamiento acústico (con reverberación). (**b**) Personas hablando (sin reverberación). (**c**) Ruido rosa. (**d**) Ruido de tráfico.

La Figura 7 muestra la regresión lineal para los cuatro tipos de ruido. En el caso del ruido de habla con reverberación, la pendiente es de 4,51 y la ordenada en el origen es de 67,23, con un R^2 de 0,40. Para el ruido de habla sin reverberación, la pendiente es de 4,82 y la ordenada en el origen es de 80,93, con un R^2 de 0,39. En el caso del ruido rosa, la pendiente alcanza un valor más alto de 6,53 y la ordenada en el origen es de 86,87, con un R^2 de 0,69. Por último, el ruido de tráfico presenta una pendiente de 4,58 y una ordenada en el origen de 83,13, con un R^2 de 0,46.

Posteriormente, la prueba de Kruskal-Wallis mostró diferencias estadísticamente significativas en los errores de reconocimiento según los niveles de SNR (p <0,001 en todos los casos). Estos resultados también indican que, independientemente del tipo de ruido, el aumento de la SNR tiene un efecto consistente en la reducción de los errores de reconocimiento de las señales distintivas.

El análisis post-hoc mediante pruebas de Mann-Whitney para los cuatro tipos de ruido reveló diferencias significativas entre varios pares de niveles de SNR, particularmente entre condiciones extremas como –12 dB y 0 dB.

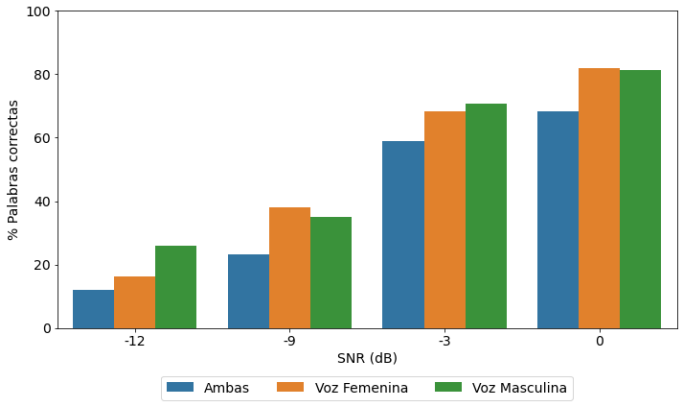


Figura 8: % palabras correctas según la preferencia de voz

3.1 Inteligibilidad de los mensajes según la preferencia de voz

Del total de participantes (N = 25), 10 eligieron la voz femenina, 8 eligieron la voz masculina y 7 participantes indicaron no tener preferencia de voz al reconocer el mensaje.

En la Figura 8 se muestran los resultados según cada tipo de preferencia de voz. No se observaron diferencias significativas entre las preferencias. Sin embargo, se realizó un análisis estadístico para investigar más a fondo estos resultados.

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk indicó que ninguna de las muestras (voz masculina, voz femenina y sin preferencia) siguió una distribución normal ($p < 0{,}001$ en todos los casos).

A pesar de ello, se llevó a cabo un ANOVA de dos vías con interacción para estudiar el efecto de los niveles de SNR y el tipo de voz sobre el porcentaje de palabras correctas. Los resultados mostraron un efecto significativo de la SNR ($F(3, 280) = 79{,}96$, $p < 0{,}001$), pero no se encontraron diferencias significativas entre tipos de voz ($F(1, 280) = 0{,}44$, $p = 0{,}509$), ni en la interacción entre tipo de voz y SNR ($F(3, 280) = 0{,}77$, $p = 0{,}511$).

Este resultado fue respaldado por la prueba de Mann-Whitney entre las condiciones de voz masculina y voz femenina, la cual tampoco mostró diferencias significativas ($U = 9914{,}0$, $p = 0{,}639$).

3.2 Inteligibilidad de los mensajes según los años de experiencia

Se realizó un análisis estadístico de las respuestas en función de los años de experiencia de los participantes. Del total de participantes, 13 tenían menos de 2 años de experiencia, 7 tenían entre 2 y 5 años de experiencia, 3 tenían entre 5 y 10 años de experiencia y solo 2 tenían más de 10 años de experiencia.

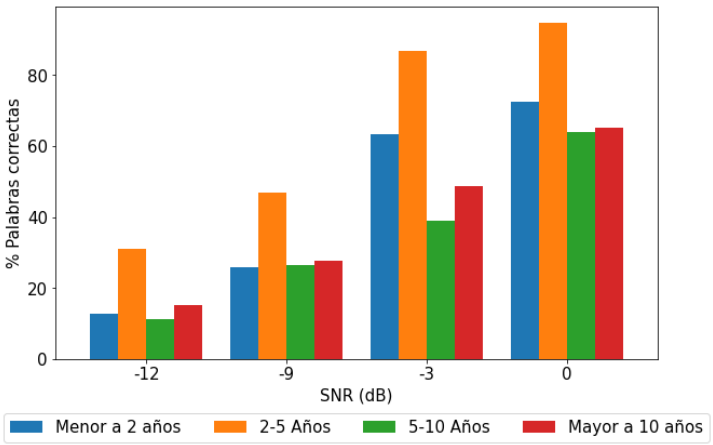


Figura 9: % palabras correctas según los años de experiencia.

La Figura 9 compara los resultados según los años de experiencia. Se observó que los radioaficionados con 5–10 años de experiencia (verde) tuvieron el peor desempeño en la comprensión de los mensajes recibidos. En contraste, aquellos con entre 2 y 5 años de actividad (naranja) obtuvieron los mejores resultados en la comprensión del mensaje.

Los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk indicaron que ninguna de las categorías de experiencia siguió una distribución normal ($p < 0{,}05$ en todos los casos). Por lo tanto, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar las diferencias observadas los porcentajes de aciertos de cada categoría. El resultado mostró variaciones estadísticamente importantes entre cada grupo ($H = 39{,}78$; $p < 0{,}001$). Finalmente, con un análisis post-hoc, y utilizando la prueba de Dunn con corrección de Bonferroni, se reveló que el grupo con 2 a 5 años de experiencia (naranja) mostró diferencias significativas en comparación con todas las demás categorías ($p < 0{,}001$ en todos los casos). Por otra parte, no se encontraron variaciones relevantes entre las demás combinaciones de categorías.

3.3 Cuestionario final

Antes de completar la prueba subjetiva, cada participante debía responder dos preguntas: A) *¿Qué tipo de ruido le resultó más molesto?* y B) *¿Qué ruido le resultó menos molesto?*. Cada participante podía elegir más de una opción. La Figura 10 muestra la comparación de los resultados para ambas preguntas. Se observa una coincidencia con los resultados estadísticos, ya que el ruido humano fue el más molesto. Por otro lado, el ruido rosa fue el menos molesto.

Se supone que este último resultado está relacionado con su similitud con el ruido característico de los equipos de radio. También podría estar vinculado a su naturaleza repetitiva y a la facilidad con que los radioaficionados pueden ignorarlo.

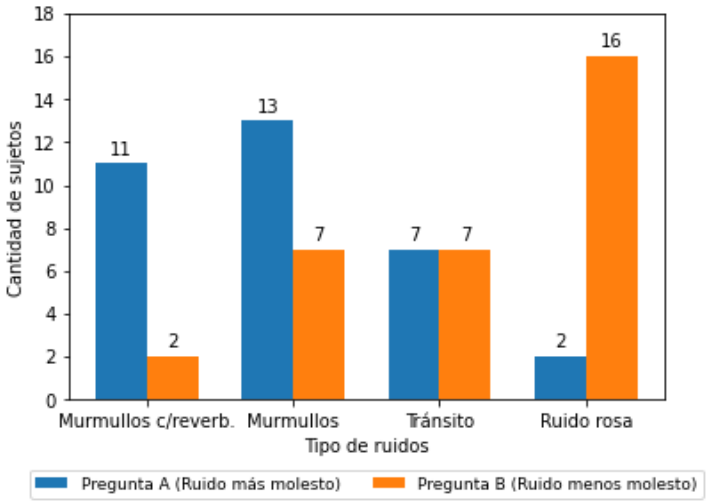


Figura 10: Comparación entre lo agradable y lo molesto de cada ruido.

4. Discusión

Los resultados obtenidos presentan algunas similitudes con los hallados por Rao y Letowski. La inteligibilidad del mensaje recibido se acerca al 100 % para SNR superiores a 0 dB. Sin embargo, la metodología de este estudio tuvo diferencias que influyeron en los resultados. Rao y Letowski utilizaron una muestra de 18 participantes con edades entre 18 y 25 años, todos con evaluaciones auditivas previas. El experimento se llevó a cabo en una sala de escucha silenciosa con tratamiento acústico que cumplía los requisitos de la norma ANSI S3.1-1999 [17].

En este estudio, los participantes tenían edades comprendidas entre 14 y 70 años, y no se realizaron evaluaciones auditivas previas. La sala del radioclub no cumplía con los requisitos de la norma ANSI

S3.1-1999, y las mediciones de ruido de fondo se realizaron de manera rápida.

Los resultados mostraron un aumento en el porcentaje de palabras correctas a medida que se incrementaba el SNR. Sin embargo, los análisis estadísticos indicaron que, en algunos grupos de SNR, los resultados fueron inconsistentes debido a desviaciones estándar elevadas. Esto sugiere que el SNR no fue el único factor que influyó en la inteligibilidad, y que ciertas limitaciones durante la prueba fueron significativas. Por ejemplo, varios participantes informaron dificultad para comprender los mensajes en el primer intento, mientras que otros requirieron asistencia para utilizar la interfaz gráfica y completar la prueba.

5. Conclusiones

Este estudio exploró la capacidad de los radioaficionados para interpretar un mensaje de radio recibido en un entorno ruidoso. Los resultados mostraron un aumento en el porcentaje de palabras correctas a medida que se incrementaba el SNR. Sin embargo, estos también contenían grandes desviaciones en cada grupo de SNR. Esto indica que el SNR no es el único factor que influye en la inteligibilidad. Aunque se registraron errores incluso en las mejores condiciones (SNR = 0 dB), lo que sugiere que otros factores también afectan la comprensión, se encontró que la diferenciación de la voz no tuvo un efecto significativo en la inteligibilidad. Por otro lado, sólo se encontraron diferencias notables en el desempeño de los participantes con experiencia entre 2 a 5 años con respeto al resto de los grupos.

Tal como se menciona anteriormente, mediante este estudio se pudo determinar la existencia de otros factores importantes que también afectan la capacidad de comprensión de un mensaje escuchado. Factores como la concentración, la velocidad de reacción para confirmar lo escuchado y su seguridad mostraron ser aún más importantes que las condiciones de escucha como el tipo de ruido o la relación señal a ruido. Muchos participantes manifestaron haberse desconcentrado al momento de escuchar el estímulo y, como sólo se permitía un solo intento de reproducción del audio, no lograban confirmar con exactitud ciertas palabras.

Para profundizar esta investigación, se recomienda aumentar el tamaño de la muestra con un mayor número de participantes para mejorar la representatividad y la solidez estadística de las respuestas. También sería interesante permitir la posibilidad de repetir el mensaje durante la prueba, lo que podría ayudar a evaluar la retención y la capacidad de comprensión bajo condiciones de estrés acústico. Asimismo, sería útil considerar la realización de estudios sobre la salud auditiva, ya que la audición y la discriminación auditiva pueden influir en los resultados obtenidos.

También podría realizarse este tipo de evaluación para otras bandas de radiofrecuencia u otros modos de comunicación(código morse, bandas de 40 y 80 metros, comunicación mediante satélites, etc). Estas variaciones podrían dificultar la prueba y representar un desafío mayor para los participantes ya que se tratan de métodos con mayores niveles de ruido y sonidos discretos.

Por último, también se contempla la posibilidad de investigar con mayor profundidad este tipo de fenómeno evaluando las características fonéticas de los intérpretes o bien, estudiar las curvas psicométricas de cada palabra del alfabeto de la OTAN.

Estas conclusiones reflejan la necesidad de continuar investigando los diferentes fenómenos que afectan la interpretación de mensajes en las comunicaciones por radio y plantea la idea de proponer una etapa de entrenamiento auditivo de mensajes en condiciones desfavorables.

6. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Dr. Shinichi Sato y al M.S. Mariano Girola (Ingeniería de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero) por su orientación y apoyo, así como a los miembros del Buenos Aires Radioclub (LU4BB) por su colaboración en los ensayos subjetivos.

Referencias

[1] R. G. Klumpp y J. C. Webster, «Acoustical Aspects of a Speech Communication System Designed for Operation in High Level Ambient Noise,» *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 6, págs. 183-192, 1958.

[2] J. Webster y C. Allen, «Intelligibility in Naval Aircraft Radios,» Naval Electronics Laboratory Center, inf. téc. NELC-TR-1830, 1972.

[3] M. E. Hawley, «The ANSI standard method for measurement of the intelligibility of speech over communication systems,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 90, 1991. dirección: https://doi.org/10.1121/1.402274.

[4] M. D. Rao y T. Letowski, «Callsign acquisition test (CAT): Speech intelligibility in noise,» *Ear and Hearing*, vol. 27, 2006. DOI: 10.1097/01.aud.0000202289.32228.f6.

[5] P. A. Dunavold, «Evaluation of a Reduced Modified Rhyme Test for Assessing Speech Intelligibility in Radio Communications,» Tesis de mtría., Idaho, USA, 2016.

[6] M. D. Keller, J. Ziriax, B. Sheffield et al., «The impact of reduced speech intelligibility on sailor performance in a navy command and control environment,» *Hearing Research*, vol. 349, págs. 55-66, 2017.

[7] D. J. Atkinson y A. A. Catellier, «Intelligibility of Selected Radio Systems in the Presence of Fireground Noise: Test Plan and Results,» NTIA Technical Report, inf. téc. TR-08-453, 2008.

[8] T. Srivastava, J.-C. Chou, P. Shroff, K. Livescu y C. Graziul, «Speech recognition for analysis of police radio communication,» *arXiv preprint arXiv:2409.10858*, 2024.

[9] J. I. of Navigation, «A Study of the Relation Between VHF Radio Communication and Ship Avoidance Movements in Ise Bay,» vol. 21, n.º 9, págs. 59-69, 2009.

[10] J. Sommerhoff y C. Rosas, «The evaluation of the intelligibility of speech in Spanish,» *Estud. Filol.*, vol. 42, págs. 215-225, 2007. DOI: 10.4067/s0071-17132007000100014.

[11] R. L. Freyman, U. Balakrishnan y K. S. Helfer, «Effect of number of masking talkers and auditory priming on informational masking in speech recognition,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, págs. 2256-2264, 2004.

[12] G. A. Studebaker, D. M. McDaniel y R. L. Sherbecoe, «Monosyllabic word recognition at higher-than-normal speech and noise levels,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 105, págs. 2439-2451, 1999.

[13] M. Pace, *Development of new psychometrically equivalent and phonetically balanced word lists for use in speech audiometry and other speech recognition tests in Rioplatense Spanish*, Sound engineering, Buenos Aires, Argentina, 2023.

[14] P. Bertato, *Validation of New Psychometrically Equivalent and Phonetically Balanced Word Lists for Use in Speech Audiometry and Other Speech Recognition Tests with Rioplatense Spanish*, Sound Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2024.

[15] I. Anaconda, *Anaconda Distribution*, Anaconda, Inc., 2023.

[16] Baofeng, *UV-5R Dual Band Two Way Radio User Manual*, Baofeng, 2013.

[17] ANSI, «American national standard: Maximum permissible ambient noise levels for audiometric test rooms (Tech. Rep. No. ANSI S3.1-1999 (R2018)),» Acoustical Society of America, inf. téc., 1999.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Sistema de Encriptación Acústica basado en Reversión Temporal y Metamateriales.

Gomez, V. S.[†,1]; Spiousas, I. [‡,2]; Eguia, M. C. [†,§,3]

[†] Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo). Escuela Universitaria de Artes. Universidad Nacional de Quilmes. Bernal.

‡ Laboratorio Interdisciplinario del Tiempo (LITERA), Universidad de San Andrés, Victoria, Buenos Aires.

[§] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires.

[1] valeria.gomez@unq.edu.ar, [2] ispiousas@udesa.edu.ar, [3] meguia@unq.edu.ar

Resumen Se presenta un sistema de comunicación acústica con encriptación basado en la técnica de reversión temporal (TR) y en una clave física generada por la configuración de un cristal sónico de geometría variable (CS). El sistema opera dentro del rango audible de frecuencias y utiliza TR para codificar un mensaje espacialmente asignando, a cada byte, una de las 256 posibles ubicaciones de reconstrucción de un pulso por TR. El CS (una matriz rectangular de 100 columnas asimétricas, que pueden rotar de forma independiente) se ubica entre una única fuente emisora y una grilla de posiciones para un micrófono receptor. Cada byte se codifica al asociarlo con la respuesta a impulso registrada en alguna posición de la grilla, utilizando una configuración específica del CS, que actúa como clave física para la codificación. Durante la decodificación, el mensaje codificado, convertido en una señal de audio digital, se transmite a través del mismo sistema. Solo cuando la configuración del CS coincide con la clave utilizada en la codificación, se produce una focalización por TR en la ubicación correspondiente, permitiendo la reconstrucción del mensaje encriptado. Este sistema puede alcanzar una precisión de decodificación cercana al 100% con una velocidad de transmisión de hasta 2.7 kbit/s.

Palabras clave: comunicación, encriptación, reversión temporal, metamateriales.

Abstract An acoustic communication system with encryption based on the time reversal (TR) technique and a physical key generated by the configuration of a variable geometry sonic crystal (CS) is presented. The system operates within the audible frequency range and uses TR to encode a message by spatially assigning each byte to one of the 256 possible TR pulse reconstruction locations. The CS (a rectangular array of 100 asymmetrical columns that can rotate independently) is located between a single transmitter source and a grid of positions for a receiver microphone. Each byte is encoded by associating it with the impulse response recorded at a position on the grid, using a specific CS configuration, which acts as a physical key for encoding. During decoding, the encoded message, converted into a digital audio signal, is transmitted through the same system. Only when the CS configuration matches the key used in the encoding does TR focalization occur at the corresponding location, allowing the encrypted message to be reconstructed. This system can achieve decoding accuracy close to 100% with a transmission speed of up to 2.7 kbit/s.

Palabras clave: communication, encryption, focalization, time reversal, metamaterials.

1. INTRODUCCIÓN

La Técnica de Reversión Temporal (TR), desarrollada principalmente por Mathis Fink y sus colaboradores [1][2], postula la posibilidad de que una onda lineal (como es representado el sonido), pueda regresar al punto de origen como si estuviera retrocediendo en el tiempo y, en consecuencia, concentrar toda su energía en una focalización localizada espacialmente en la posición de su fuente.

El funcionamiento de la TR se basa en dos etapas. En la etapa *forward*, la onda generada por una fuente puntual se propaga por el medio y es capturada por un conjunto de transductores que funcionan como emisores y receptores dispuestos, por ejemplo, en forma de anillo alrededor de la fuente [3]. En la etapa *backward*, cada transductor reproduce en total sincronía la señal capturada (una porción del

frente de onda inicial), pero invertida en el tiempo. De esta manera, las múltiples trayectorias de la onda se combinan de forma constructiva y destructiva recorriendo su camino en sentido inverso. Como resultado, el frente de onda se reconstruye y converge nuevamente en la posición de la fuente, concentrando la energía en un punto y en un instante específicos, generando una hiper-focalización o pulso TR.

La aplicación inicial de la TR se desarrolló principalmente en el campo de las comunicaciones acústicas submarinas [4][5], aunque con el tiempo, su alcance se ha expandido hacia otros ámbitos. Desarrollándose, especialmente, en el rango del ultrasonido con aplicaciones en; ingeniería biomédica [6], telecomunicaciones [7] y ensayos no destructivos [8], entre otros. Se han reportado transmisiones exitosas en una amplia gama de medios y frecuencias, abarcando desde 50 Hz hasta 30 kHz en distancias que van desde unos pocos metros hasta miles de kilómetros [9].

Entre los avances destacados, Anderson et al. implementaron TR mediante vibradores acoplados a tuberías de hierro fundido, logrando tres canales de comunicación independientes [10], mientras que Huang et al. desarrollaron un sistema ultrasónico a través de canales metálicos utilizando transductores piezoeléctricos y electromagnéticos [11]. Además, Candy et al. diseñaron un sistema de comunicación acústica aérea capaz de recuperar secuencias transmitidas en entornos altamente reverberantes, mediante receptores punto a punto basados en TR [12].

Si bien el esquema tradicional requiere un número considerable de transductores para completar el anillo alrededor de la fuente, existen métodos alternativos que reducen el sistema a un mínimo de dos elementos: un emisor y un receptor, siempre que se cumplan ciertas condiciones con el medio de propagación. Este enfoque, conocido como TR de un único canal [13], puede implementarse de dos formas: (a) utilizando un espacio cerrado altamente reverberante, donde los múltiples rebotes permiten recuperar las porciones del frente de onda que en campo abierto se perderían [14], o (b) mediante la interposición de un medio dispersor entre la fuente y el receptor que genere trayectorias múltiples y desordenadas en la onda que lo atraviese, equivalentes a las de un campo reverberante [15].

En trabajos previos del grupo de investigación, se ha demostrado la posibilidad de reproducir la técnica de TR de un único canal mediante la interposición de un metamaterial desarrollado por el Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo); el Cristal Sónico de Geometría Variable (CS). Esta estructura está compuesta por 100 columnas de madera con forma de “U”, cuyas orientaciones angulares pueden controlarse individualmente posibilitando la creación de configuraciones más complejas, con distintos niveles de desorden. Estudios de robustez mostraron que es capaz de generar un nivel de desorden acústico comparable al de un medio aleatorio ideal y que, al interponerla entre la fuente y el emisor, es posible generar focalizaciones por TR localizadas temporal y espacialmente en el rango audible de frecuencias [16].

Por otro lado, se descubrió que los cambios en la orientación de los dispersores entre la etapa *forward* y *backward* pueden impedir la reconstrucción de la focalización TR mostrando una relación directa entre la configuración del medio dispersor y la respuesta a impulso asociada a un punto específico del espacio afectado por el CS. Este descubrimiento permitió tener un control, tanto espacial como temporal, sobre la focalización, posibilitando su activación o desactivación de forma remota y dinámica [17].

Esta característica, habilitada por la variabilidad geométrica del CS, abre la puerta a nuevas aplicaciones, particularmente en el campo de las comunicaciones seguras. Algo que habría sido anticipado por Fink en referencia a la idea de usar la firma única del medio, registrada durante la etapa *forward*, como una clave criptográfica [2]. Sin embargo, controlar la disposición espacial de los dispersores en los sistemas implementados por Fink [2] o Derode [18], generalmente basados en varillas de metal sumergidas y dispuestas de forma aleatoria, resultaba poco práctico y muy difícil de implementar.

En este trabajo, proponemos un enfoque alternativo basado en dispersores asimétricos, cuya orientación puede modificarse mediante simples rotaciones sin alterar su posición en el espacio. De esta forma, el grado de desorden del medio se controla directamente a través de la geometría del CS,

permitiendo generar claves físicas únicas por medio de las múltiples combinaciones posibles en la rotación de sus dispersores. Además, el gran tamaño de la estructura del CS permite trasladar esta propuesta al rango de las frecuencias audibles y utilizarla para la encriptación con señales acústicas [19].

Este estudio presenta la implementación práctica de un sistema de encriptación acústica que emplea la localización espacial y temporal de pulsos TR generados con la interposición del CS, para la codificación y decodificación segura de mensajes. En este sistema, la configuración angular de los dispersores del CS funciona como la clave criptográfica, quedando físicamente codificada en una respuesta a impulso registrada durante la etapa *forward.* Luego, se utilizará como llave para la decodificación y recuperación del mensaje en la etapa *backward*. Este método ofrece un nuevo enfoque para la comunicación acústica segura, donde la encriptación no se realiza mediante software, sino a través de las propiedades físicas del medio; algo que podría tener interesantes aplicaciones, por ejemplo, en un contexto actual donde la comunicación segura enfrenta los avances de la computación cuántica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

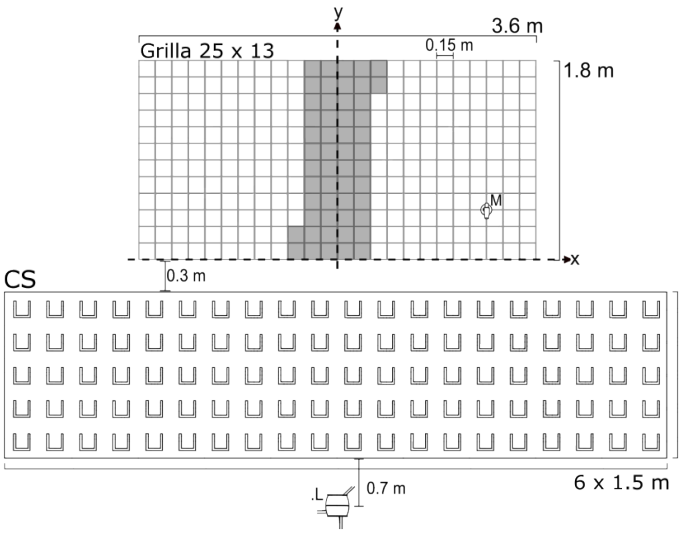
El Cristal Sónico de Geometría Variable es un metamaterial (estructura ordenada) compuesto por 100 columnas de madera en forma de "U", de 0.15 metros por lado y 2.7 metros de altura, dispuestas en una red cuadrada con periodicidad de 0.3 metros. Cada columna posee un motor paso a paso y un sistema de correa dentada que permite su rotación de forma independiente dentro de un rango de ±135° respecto a una posición central. Esta característica permite la generación de múltiples configuraciones ordenadas (todas las columnas orientadas de la misma manera) o desordenadas (cada columna con una rotación distinta). Para el presente trabajo se emplearon dos configuraciones desordenadas generadas de manera aleatoria que se denominarán *Key* y *non-Key*.

Para la reproducción de TR de un único canal se utilizó un parlante Genelec 8030B ubicado 0.7 metros detrás de la estructura del CS y un micrófono Ambisonics Sennheiser Ambeo VR (decodificado como micrófono omnidireccional) posicionado en el lado opuesto. El micrófono se ubicó sobre un carro autómata que facilitó la toma de medidas sistematizadas a lo largo y ancho de una grilla de 25×13 puntos de medida, con un espaciado de 0.15 metros, cubriendo un área total de 3,6×1,8 metros; como se muestra en la Figura 1.

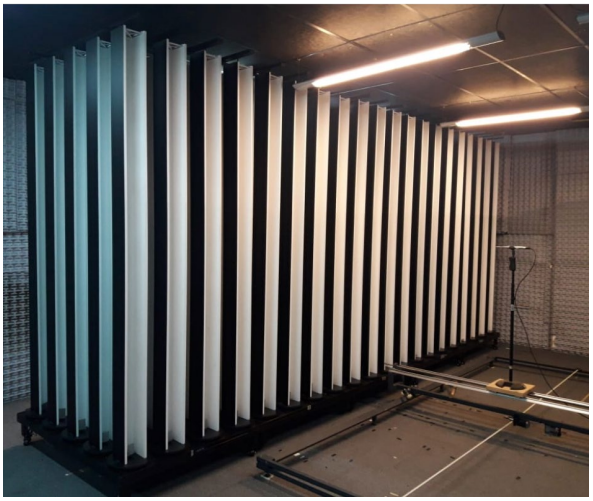
Las medidas y experimentos se realizaron con una interfaz de audio MOTU mk3 y una computadora Mac Mini, dentro de una sala de 12×7×3 metros, tratada acústicamente, con tiempos de reverberación de 0.45 s (20 Hz–20 kHz) y 0.14 s (500 Hz–20 kHz). En cada uno de los puntos de la grilla de medidas se capturó una respuesta a impulso (RI), utilizando el método de barrido logarítmico [20] recorriendo entre 0.5 y 20 kHz en 20 segundos. En total, se registraron 325 RIs con una relación señal-ruido de 54–60 dB.

Para la implementación del sistema de comunicación, se eliminaron las RIs correspondientes a las filas centrales de la grilla como muestra la Figura 1 con el sombreado gris, para completar un total de 256 (2^8) RIs finales (correspondientes con la cantidad de valores disponibles representables por un byte). Se decidió excluir las medidas centrales debido a la alta influencia de sonido directo que puede perjudicar la calidad de la TR [21][22] y la baja influencia del CS en la región del eje de simetría.

El proceso de TR para la toma de medidas experimentales se dividió en dos etapas: en la etapa *forward*, se grabaron las 325 RIs con la configuración *Key*; mientras que, en la etapa *backward,* se reprodujeron esas mismas RIs invertidas en el tiempo utilizando las configuraciones *Key* y *non-Key*, para obtener las focalizaciones por TR en los distintos puntos de la grilla de medidas.



(a) Diagrama del setup experimental y grilla de medidas



(b) Fotografía del Cristal Sónico de Geometría Variable y el carrito autómata

Figura 1: El cristal sónico, en una configuración ordenada, se sitúa entre la fuente (altavoz L) y la grilla de medidas con el micrófono M. La grilla abarca un espacio de 3.6 x 1.8 metros, dando un total de 325 puntos de grabación distribuidos a intervalos de 0.15 metros en ambos ejes. La zona sombreada de la grilla indica los puntos sobre los cuales se aplicó una máscara y no se incluyen en el Sistema de Comunicación.

Para caracterizar la efectividad del sistema de encriptación se calcularon dos métricas: *Iloss*, que mide el porcentaje de información o datos perdidos al decodificar el mensaje con la configuración clave (*Key*); e *Ileak*, que cuantifica el porcentaje de información recuperada al intentar decodificar con una configuración diferente (*non-Key*), algo que podría entenderse como una clave falsa.

3. SISTEMA DE ENCRIPTACIÓN ACÚSTICA

Se desarrolló un sistema de encriptación que utiliza la etapa *forward* del proceso de TR como fase de codificación y la etapa *backward* como fase de decodificación. Un mensaje codificado tendrá la forma de un archivo de audio *S(t)* compuesto por RIs invertidas temporalmente y se decodificará solo cuando se utilice la llave física correcta, es decir, la configuración *Key* del CS.

Se utiliza un esquema de codificación espacial asignando el valor de un byte (valor hexadecimal de dos dígitos) a cada punto de la grilla de medidas acústicas como se ilustra en la Figura 2. Esta asignación sigue un patrón secuencial, comenzando desde la parte superior izquierda y progresando de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, iniciando con el valor 00 (punto superior izquierdo) y finalizando con FF (punto inferior derecho). Las cinco columnas centrales al eje de simetría se ignoran con una máscara (sombreado gris en la Figura 2) y no se les asigna ningún valor hexadecimal, dejando un total disponible de 256 valores o puntos de la grilla.

Para codificar el mensaje representado por la cadena de bytes se toman las RIs registradas con la configuración *Key* en el CS y se realiza una asociación entre cada valor hexadecimal de dos dígitos con su posición asignada en la grilla de medidas. De esta manera, cada byte se puede correlacionar con una RI obtenida en ese punto. Así, por cada byte del mensaje, se obtiene una RI que se invierte temporalmente y se acomoda (respetando el orden de los bytes) en un archivo de audio *S(t)*. En consecuencia, un mensaje original, representado como una cadena de bytes, se transforma en un archivo de audio *S(t)* compuesto por una secuencia de respuestas a impulso temporalmente invertidas.

El comienzo de cada RI dentro de *S(t)* está separado de la RI anterior por un intervalo de tiempo medido en milisegundos denominado δt. Este intervalo de tiempo tiene un efecto en la decodificación

del mensaje, por lo tanto, se evaluó para distintos valores entre 1 y 100 milisegundos. Un rango que representa distintos niveles de solapamiento o superposición entre las RIs del mensaje codificado *S(t)*.

Para decodificar el mensaje, la señal de audio *S(t)* se reproduce por la fuente detrás del CS de manera que, por cada RI invertida, se genere una focalización TR del otro lado de la estructura, en posiciones específicas de la grilla de medidas. Así, en cada intervalo de tiempo *δt* se evalúan los 256 puntos de la grilla en busca de aquel con mayor amplitud, es decir, donde se genere el pulso por TR. La posición de cada focalización se corresponde con una posición particular de la grilla y se asocia con el valor hexadecimal asignado originalmente a esa posición.

Finalmente, cada valor hexadecimal se acomoda en una nueva cadena de bytes, respetando el orden de aparición de la focalización por TR. Si la cadena de valores resultante es igual a la cadena de bytes inicial (previa a la codificación), el mensaje se pudo decodificar correctamente. Esto sucede cuando se utiliza la misma configuración (*Key*) en las etapas *forward* y *backward* de la reproducción de TR, es decir, cuando se utiliza la misma configuración del CS en las etapas de codificación y decodificación.

Cualquier otra configuración del CS (*non-Key*) utilizada únicamente durante la etapa *backward* (decodificación) no produce focalizaciones TR al reproducir la misma señal de audio *S(t)* (conformada por las RIs de la configuración *Key*). En este caso, el sistema devuelve una cadena de bytes formada por los valores de mayor amplitud en cada intervalo *δt*, los cuales no coinciden con los originales. Como resultado, el mensaje no puede reconstruirse correctamente, lo que garantiza la encriptación física de la información y refuerza la robustez del sistema frente a ataques de fuerza bruta o intentos de intrusión.

3.1 Codificación

En el esquema que propone la Figura 2 se detalla la trayectoria del byte hexadecimal de dos dígitos **1E** perteneciente a la cadena de bytes del mensaje que se codificará. En este caso, **1E** se corresponde con el punto (5, 3) en la grilla de medidas.

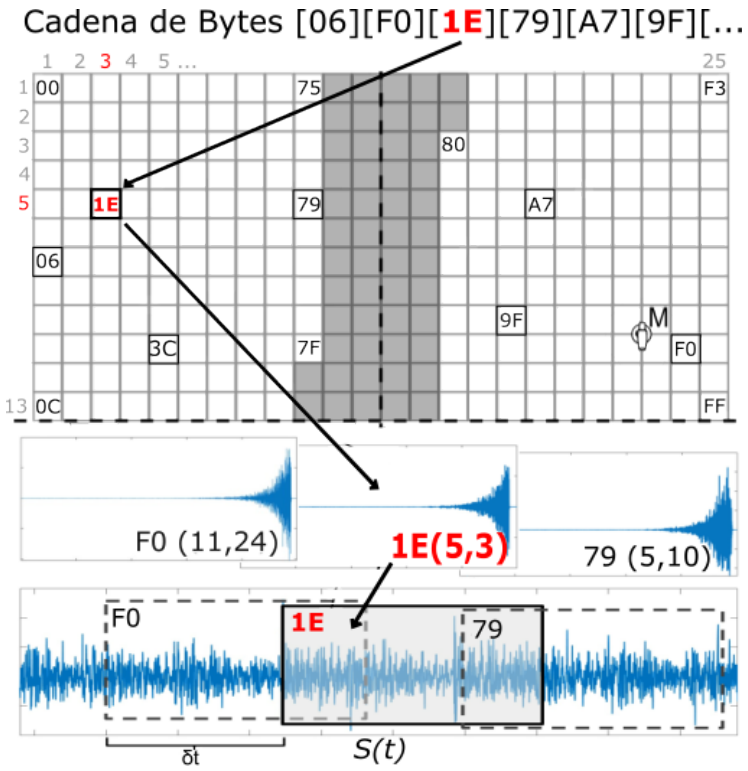


Figura 2: CODIFICACION. Se muestra el trayecto del byte **1E** a través del proceso de codificación donde se convierte en parte de una señal de audio *S(t)* conformada por una serie de respuestas a impulso invertidas temporalmente y equiespaciadas de acuerdo con el parámetro δt, Cada dato del mensaje original atraviesa el mismo proceso para su codificación.

Cada posición en la grilla está asociada previamente a un valor hexadecimal de dos dígitos y, por consiguiente, cada valor está vinculado a la RI obtenida en esa posición de la grilla utilizando la configuración *Key* del CS.

Para codificar el byte de información **1E** se selecciona la RI correspondiente al punto de la grilla (5, 3) originalmente asociado con el valor hexadecimal **1E**. Luego, la RI seleccionada se invierte temporalmente y se adiciona en orden secuencial dentro de una señal de audio *S(t)* junto con las demás RIs vinculadas a los valores de la cadena de bytes previos.

La separación temporal entre el inicio de cada RI invertida está determinada por el intervalo de tiempo asignado δt, que es consistente para todas las RIs dentro del mismo archivo de audio.

Siguiendo este proceso, cualquier cadena de bytes puede codificarse en el formato de una señal de audio *S(t)* compuesta por tantas RIs como bytes tenga el mensaje. Considerando que las RIs están invertidas temporalmente y solapadas de acuerdo con el valor del parámetro δt.

3.2 Decodificación

Para decodificar el mensaje oculto en la señal de audio *S(t)* y siguiendo el camino de **1E**, el primer paso es reproducir la señal *S(t)* a través del CS conservando el mismo setup experimental. Al momento de la reproducción de la RI (invertida temporalmente) asociada al byte **1E**, se registran todos los puntos de la grilla en busca de la posición con mayor amplitud. En este caso en particular, la posición con mayor amplitud se corresponde con una focalización TR en el punto de la grilla (5, 3).

A continuación, se adiciona en una nueva cadena de bytes el valor hexadecimal de dos dígitos asociado con el punto (5, 3), que en este caso es **1E**. De este modo, se reconstruye una cadena de bytes que organiza, en orden, los valores hexadecimales asociados a las posiciones de la grilla que, en cada intervalo δt, presentaron la mayor amplitud.

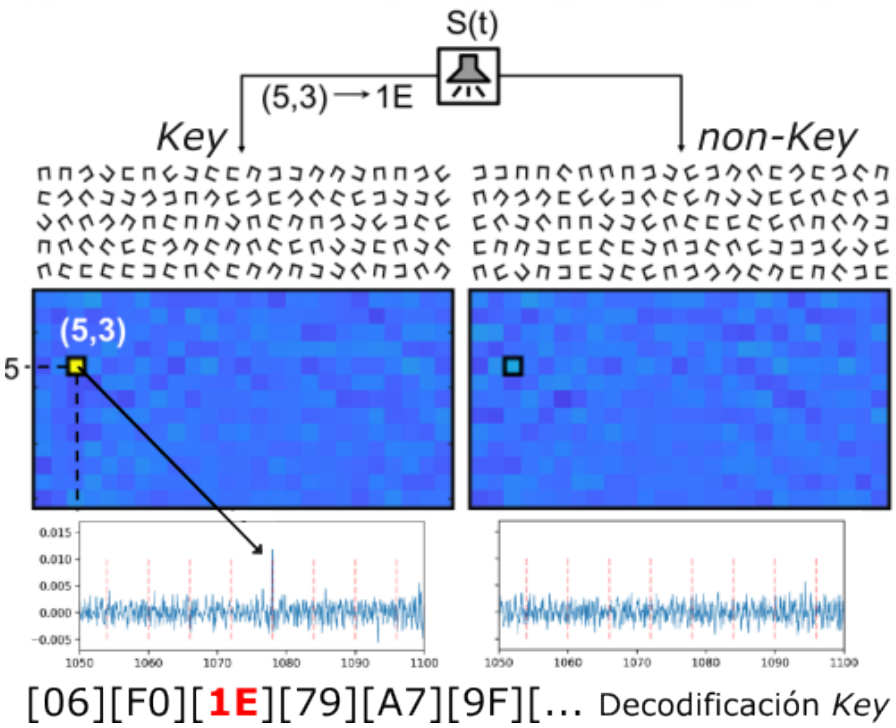


Figura 3: DECODIFICACION. Se muestra la recuperación del byte **1E** mediante la focalización (recuadro amarillo) generada en el punto de la grilla (5, 3) al utilizar la configuración *Key (panel izquierdo),* comparado con la ausencia de focalización al utilizar la configuración *non-Key (panel derecho)*.

La Figura 3 muestra el proceso de decodificación el byte **1E** en dos casos: (a) la decodificación utilizando la configuración *Key* en el CS (*panel izquierdo*); y (b) utilizando la configuración *non-Key* (*panel derecho*), análogo a utilizar una llave falsa o errónea para la decodificación.

En el panel izquierdo, se puede observar una focalización en el punto (5, 3) al momento de la reproducción de la RI asociada al valor **1E** (cuadro amarillo). Como consecuencia, el valor original del byte se puede recuperar correctamente. En el panel derecho, se observa que la RI correspondiente a **1E** no genera picos de amplitud notables en ningún punto de la grilla en particular, es decir, que no sucede ninguna focalización TR. Como resultado, el sistema registra la mayor amplitud en un punto arbitrario que no se corresponde con **1E** devolviendo información errónea.

Por lo tanto, el byte **1E**, solo se puede recuperar con éxito al utilizar la configuración *Key*, mientras que, con una configuración *non-Key* se obtiene información falsa que no permite la reconstrucción del mensaje codificado original.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para ilustrar la viabilidad del sistema de encriptación y caracterizar su efectividad se realizó la transmisión del retrato digital de un joven Alan Turing, de 12.5 kilobytes, codificado como una imagen en escala de grises de 8 bits.

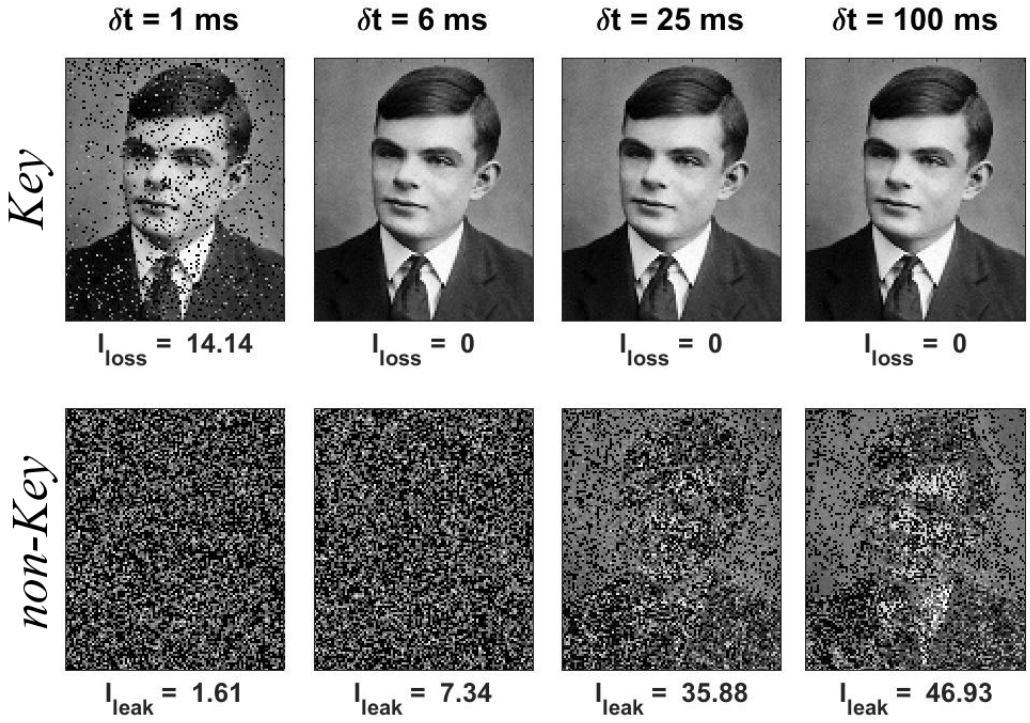


Figura 4: APLICACIÓN. Cada columna representa el mensaje decodificado (retrato de Alan Turing) para un valor específico de δt (en milisegundos). *Paneles superiores*: decodificación con la configuración *key;* el valor de *Iloss* debajo de cada panel indica la cantidad de píxeles perdidos. *Paneles inferiores:* decodificación con la configuración *non-Key;* el valor de *Ileak* indica la cantidad de píxeles recuperados.

La imagen, se puede representar como una cadena de bytes donde el valor de gris de cada píxel se transforma en una RI invertida en el tiempo, asociada con una ubicación específica dentro de la grilla de medidas. De esta manera, la imagen se codifica como un archivo de audio *S(t)*. Es importante tener en cuenta que el inicio de cada nueva RI se separa δt milisegundos de la RI anterior.

Con un intervalo δt de un segundo (δt = 100 ms), equivalente a la duración de una RI, se evita la superposición entre RIs consecutivas. Sin embargo, la señal *S(t)* transmite la información a una tasa muy baja de apenas 1 byte/s. Para aumentar la velocidad de transferencia es posible reducir el valor de δt, pero esto provoca un inevitable solapamiento entre las RIs dentro de *S(t)*.

Para ejemplificar el efecto del parámetro δt al mejorar la tasa de transferencia y evaluar su impacto en la calidad de la decodificación, se realizaron pruebas utilizando diferentes intervalos δt (1, 6, 25 y 100 milisegundo). La Figura 4 muestra los resultados de la decodificación del archivo de audio *S(t)* al reconvertirlo en una cadena de bytes y reconstruir la imagen de Turing. Los paneles superiores de la figura muestran la imagen reconstruida utilizando la configuración *Key* en los cuatro intervalos de tiempo δt. En los paneles inferiores, se observan las mismas reconstrucciones usando la configuración *non-Key*. Debajo de cada panel se especifican los valores de *Iloss* e *Ileak* correspondientes a cada δt.

De acuerdo con en estos resultados, es evidente que el intervalo δt desempeña un papel crítico en el proceso de decodificación. Se puede observar que, para la configuración *Key*, el valor de *Iloss* es cero cuando δt es mayor o igual a 6 ms, lo que significa que a partir de ese intervalo no se registra ninguna pérdida en la decodificación y el mensaje se puede reconstruir correctamente en su totalidad. Sin embargo, a medida que la tasa de transferencia aumenta con valores de δt más bajos (menores a 6 ms), la configuración *Key* comienza a tener dificultades para recuperar toda la información y el mensaje se reconstruye con algo de ruido.

En el caso de la configuración *non-Key*, a medida que el valor de δt aumenta y la tasa de transferencia disminuye, también aumentan los valores de *Ileak*. Como consecuencia, se puede vislumbrar una imagen fantasma de Turing. Esto implica que, mientras la configuración *Key* garantiza una recuperación completa de datos al aumentar el valor de δt, otras configuraciones *non-Key* podrían decodificar información que no deberían, perjudicando la robustez y seguridad del sistema de encriptación. Sin embargo, al aumentar la tasa de transferencia usando valores de δt por debajo de 6 ms, no se puede detectar la imagen fantasma y los valores de *Ileak* son muy bajos. Esto sugiere un proceso de decodificación seguro, ya que no es posible recuperar parte del mensaje con una llave falsa.

En particular, el caso con δt = 6 ms alcanza una tasa de transferencia de aproximadamente 1.3 kbit/s, que constituye el máximo valor posible sin pérdida de información. Bajo estas condiciones, el sistema demuestra un funcionamiento óptimo donde la decodificación con la configuración *Key* resulta completamente exitosa (*Iloss* = 0), mientras que, con una configuración *non-Key* solo se puede recuperar una pequeña fracción de datos (*Ileak* = 7.34%).

4.1 Robustez frente a la interferencia de ruido

Un aspecto crítico relacionado con la robustez del sistema es que los experimentos se llevaron a cabo en un entorno controlado con bajo nivel de ruido, lo que no necesariamente refleja las condiciones típicas de escenarios reales.

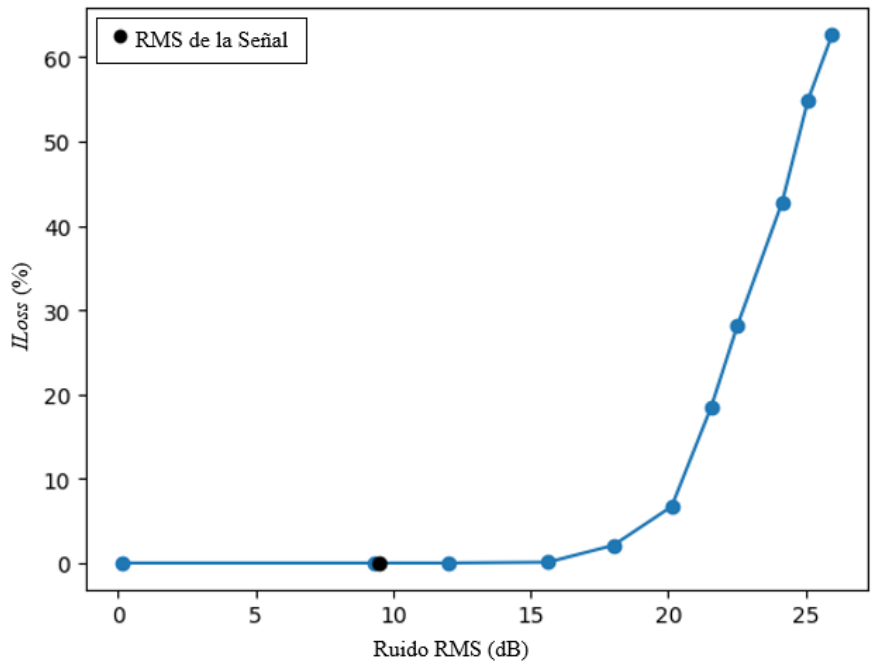


Figura 5: ROBUSTEZ. Impacto del ruido blanco gaussiano en el desempeño en la decodificación. Se muestra el porcentaje de símbolos perdidos (*Iloss*) en función de la amplitud RMS del ruido, para un δt fijo de 6 ms. La amplitud se expresa en dB en relación con la amplitud normalizada de la respuesta a impulso. El punto negro indica la amplitud RMS de la señal *S(t)* codificada (9.4 dB).

Para evaluar el impacto del ruido ambiental durante la etapa de decodificación, se introdujeron distintos niveles de ruido blanco gaussiano en el rango de 20 Hz a 20 kHz y se analizó su efecto sobre el desempeño del sistema. Los resultados, mostrados en la Figura 5, revelan una notable tolerancia al ruido.

Para un intervalo temporal de $\delta t = 6$ ms, la amplitud RMS normalizada de la señal resulta de 9.4 dB. A este nivel, el efecto del ruido sobre la pérdida de información es prácticamente nulo (Iloss < 0.1), manteniéndose estable. Solo cuando el nivel de ruido se incrementa hasta los 18 dB RMS, superando la amplitud de la señal S(t), Iloss aumenta aproximadamente un 2%, lo que confirma que el sistema conserva una notable robustez frente a interferencias incluso en condiciones de ruido significativo.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un sistema capaz de codificar y decodificar mensajes mediante señales audibles, combinando la técnica de reversión temporal con un cristal sónico de geometría variable. El estudio demostró que la transmisión es robusta frente al ruido y a intentos de decodificación con claves incorrectas, alcanzando tasas de hasta 2.7 kbit/s sin pérdidas significativas.

Asimismo, se identificó que la elección del intervalo temporal δt al codificar el mensaje es un factor crítico para balancear la tasa de transferencia y la seguridad de la llave física: valores demasiado pequeños incrementan el solapamiento de RIs y elevan el porcentaje de datos perdidos en la decodificación (*Iloss)*, mientras que valores grandes aseguran una reconstrucción completa al precio de aumentar el porcentaje de datos recuperados con una llave incorrecta (*Ileak*).

Dentro de un rango intermedio, el sistema logra un desempeño óptimo, asegurando la decodificación completa con la clave correcta y minimizando la probabilidad de recuperación de datos con una clave falsa.

La implementación de una llave física para la decodificación y el uso de señales en el rango audible abren la posibilidad de múltiples extensiones y aplicaciones. Si bien el sistema no está orientado a escenarios de cifrado de alto nivel, ofrece una alternativa práctica para la encriptación física de información y un punto de partida para explorarlo, por ejemplo, en otros rangos de frecuencia como el ultrasonido.

9. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo) y de la Escuela Universitaria de Artes de la Universidad Nacional de Quilmes.

REFERENCIAS

[1] Cassereau, Didier, and Mathias Fink. "Focusing with plane time-reversal mirrors: An efficient alternative to closed cavities." *The Journal of the Acoustical Society of America* 94.4 (1993): 2373-2386.

[2] Fink, Mathias. "Time-reversed acoustics." *Scientific American* 281.5 (1999): 91-97.

[3] Fink, Mathias. "Time-reversal acoustics." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 118. No. 1. IOP Publishing, 2008.

[4] Parvulescu, Antares, and C. S. Clay. "Reproducibility of signal transmissions in the ocean." *Radio and Electronic Engineer* 29.4 (1965): 223-228.

[5] Shimura, T., H. Ochi, and H. C. Song. "Experimental demonstration of multiuser communication in deep water using time reversal." *The Journal of the Acoustical Society of America* 134.4 (2013): 3223-3229.

[6] Fink, Mathias, Gabriel Montaldo, and Mickael Tanter. "Time-reversal acoustics in biomedical engineering." *Annual review of biomedical engineering* 5.1 (2003): 465-497.

[7] Montaldo, Gabriel, et al. "Telecommunication in a disordered environment with iterative time reversal." *Waves in Random Media* 14.3 (2004): 287.

[8] Anderson, Brian E., et al. "Stress corrosion crack depth investigation using the time reversed elastic nonlinearity diagnostic." *The Journal of the Acoustical Society of America* 141.1 (2017): EL76-EL81.

[9] Song, Hee-Chun. "An overview of underwater time-reversal communication." *IEEE Journal of Oceanic*

Engineering 41.3 (2015): 644-655.

[10] Anderson, Brian E., et al. "Three-dimensional time reversal communications in elastic media." *The Journal of the Acoustical Society of America* 139.2 (2016): EL25-EL30.

[11] Huang, Xin, et al. "Time reversal signal processing for ultrasonic communication through metal channels." *2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. IEEE, 2019.

[12] Candy, James V., et al. "Time-reversal processing for an acoustic communications experiment in a highly reverberant environment." *The Journal of the Acoustical Society of America* 115.4 (2004): 1621-1631.

[13] Draeger, Carsten, Jean-Christian Aime, and Mathias Fink. "One-channel time-reversal in chaotic cavities: Experimental results." *The Journal of the Acoustical Society of America* 105.2 (1999): 618-625.

[14] Maffei, Gaston, et al. "Spatial focusing of a one-channel time-reversal acoustic mirror in an underground water storage tank at audible frequencies." *The Journal of the Acoustical Society of America* 141.5_Supplement (2017): 3915-3915.

[15] Tourin, A., F. Van Der Biest, and M. Fink. "Time reversal of ultrasound through a phononic crystal." *Physical review letters* 96.10 (2006): 104301.

[16] Gomez, Valeria Sol, Ignacio Spiousas, and Manuel C. Eguia. "Time reversal focusing in the audible range using a tunable sonic crystal." *The Journal of the Acoustical Society of America* 149.6 (2021): 4024-4035.

[17] Gomez, Valeria Sol, Ignacio Spiousas, and Manuel C. Eguia. "Encrypted acoustical communication system using time reversal through a tunable sonic crystal." *The Journal of the Acoustical Society of America* 158.3 (2025): 2100-2110.

[18] Derode, Arnaud, Philippe Roux, and Mathias Fink. "Robust acoustic time reversal with high-order multiple scattering." *Physical review letters* 75.23 (1995): 4206.

[19] Derode, Arnaud, Arnaud Tourin, and Mathias Fink. "Random multiple scattering of ultrasound. I. Coherent and ballistic waves." *Physical Review E* 64.3 (2001): 036605.

[20] Farina, Angelo. "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique." *Preprints-Audio Engineering Society* (2000).

[21] Anderson, Brian E., Miles Clemens, and Matthew L. Willardson. "The effect of transducer directivity on time reversal focusing." *The Journal of the Acoustical Society of America* 142.1 (2017): EL95-EL101.

[22] Heaton, Christopher, Brian E. Anderson, and Sarah M. Young. "Time reversal focusing of elastic waves in plates for an educational demonstration." *The Journal of the Acoustical Society of America* 141.2 (2017): 1084-1092.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Sumatoria espectral de sonoridad en señales de audio de televisión

Brito, M. S.[†,1]**; Gerez, F.** [†,2]**; Lombera, E. N.** [†,3]

[†] Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF). Departamento de Ciencia y Tecnología. Grupo de investigación en Acústica y Psicoacústica (GIAP). Sáenz Peña, Argentina.

[1] solbrito1996@gmail.com, [2] gerezfederico@gmail.com, [3] elombera@untref.edu.ar

RESUMEN AMPLIADO

Resumen Esta investigación propone una modificación a los algoritmos de medición de sonoridad utilizados en señales de audio de televisión, con el fin de mejorar su precisión ante señales con componentes espectrales diversas. La técnica combina el modelo tradicional de promedio global recomendado por la ITU-R BS.1770-5 con un enfoque basado en la sumatoria espectral de sonoridad. Se pone a prueba la eficacia del nuevo algoritmo mediante comparaciones entre mediciones objetivas y evaluaciones subjetivas de sonoridad, realizadas por oyentes. Los resultados indican que el algoritmo propuesto ofrece una mejor correlación con las percepciones humanas que el método de la ITU, salvo en algunos casos puntuales donde no se identificó un patrón común. En particular, las señales clasificadas como “efectos especiales” evidenciaron una clara ventaja del modelo alternativo, en línea con estudios previos que reportan un bajo desempeño del método ITU ante señales de banda estrecha. En este contexto, el modelo BRITO demostró ser más eficaz, logrando una mayor precisión en la estimación de la sonoridad percibida. El trabajo también incluye análisis estadísticos que validan la superioridad del nuevo enfoque, abriendo camino a mejoras en los lineamientos actuales de medición de sonoridad para contenidos audiovisuales.

Palabras clave: sonoridad, sumatoria espectral, radiodifusión, televisión, ITU-R BS.1770-5.

1. INTRODUCCIÓN

La sonoridad en señales de televisión constituye un aspecto crítico de la calidad de servicio. Se han desarrollado diversas recomendaciones internacionales como la ITU-R BS.1770 para su control y medición [1]. Todas buscan establecer un nivel de referencia uniforme para la transmisión. No obstante, el algoritmo de la ITU basado en un promedio global ponderado, presenta limitaciones en señales con espectros complejos o de banda estrecha.

El presente trabajo propone un método alternativo de medición de sonoridad, denominado modelo BRITO, que incorpora un análisis basado en la sumatoria espectral de sonoridad, con el objetivo de mejorar la correlación con la percepción humana.

2. MARCO TEÓRICO

Los estudios de Zwicker [2-7] demostraron que la sonoridad percibida depende del contenido espectral del estímulo y no únicamente del nivel de presión sonora total. La teoría de las bandas críticas establece que el oído humano procesa los sonidos dividiendo el espectro en 24 regiones, en la escala de Bark, sobre las cuales es posible calcular la sonoridad específica y su posterior integración.

Esta teoría se formalizó en la norma ISO 532-1:2017, que establece un método objetivo de cálculo de sonoridad basado en la sumatoria espectral (para tonos, ruido y sonidos relativamente sencillos) [8].

Por otro lado, el documento ITU-R BS.1770-5 define el algoritmo aceptado internacionalmente para medir la sonoridad en televisión. Este aplica una ponderación en frecuencia K, un cálculo RMS por canal y la suma ponderada de los canales. El resultado es un valor global en LKFS (sonoridad, ponderada K, en relación con la plena escala nominal). Aunque eficaz en programas

con espectros amplios (música, diálogos), se ha demostrado su menor precisión en estímulos de banda estrecha. Diversos estudios [9-13] señalan que el método ITU no refleja adecuadamente la percepción en sonidos como efectos especiales, instrumentos solistas o ruidos filtrados. Estas limitaciones justifican la búsqueda de un modelo alternativo de medición que permita caracterizar mejor ese tipo de audios.

3. METODOLOGÍA

El modelo BRITO fue implementado en MATLAB. Combina la estructura multicanal de la recomendación ITU-R BS.1770-5 con ponderaciones adicionales basadas en la norma ISO 532-1. Se crea un algoritmo capaz de calcular el porcentaje de influencia de cada banda crítica en la sonoridad total, y se utiliza este factor para filtrar la señal y quitar o no información de cada banda en función de su peso. Luego, se realiza el cálculo de sonoridad total según la recomendación ITU sobre la señal filtrada. La arquitectura general se resume en un diagrama en bloques (véase Figura 1).

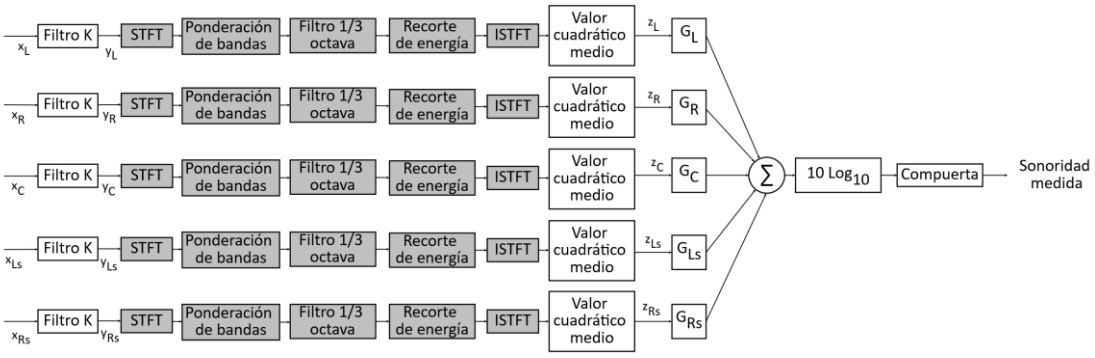


Figura 1: Diagrama en bloques del modelo BRITO.

3.1 Pruebas subjetivas

Para evaluar el algoritmo propuesto, se realizaron las mismas pruebas de validación utilizadas para el algoritmo de la ITU [1, 14].

Se realizaron experimentos de tipo loudness-matching con un grupo de oyentes en una sala acondicionada acústicamente. Las características de la sala y el sistema de reproducción son las definidas por la recomendación ITU-R BS.1116-3, mientras que para la disposición de los altavoces se utilizó la ITU-R BS. 775-4.

Los sujetos compararon pares de estímulos hasta igualar la sonoridad percibida. Debían empatar la sonoridad de un audio de prueba contra la de un audio de referencia fijo. Una prueba piloto de 6 sujetos permitió estimar el tamaño de muestra adecuado y refinar el protocolo experimental. Finalmente, en el experimento principal participaron 22 personas. Como estímulos de prueba se utilizaron segmentos de señales de televisión provenientes de distintos canales, que incluyeron: diálogo en español e inglés, música de películas y series, deportes y noticias, publicidad y efectos sonoros y especiales.

3.2 Análisis estadísticos

Se aplicaron análisis de media y modelos lineales de efectos mixtos (LMEM) para contrastar los resultados de los modelos (BRITO e ITU) con las respuestas subjetivas y determinar la validez del enfoque propuesto. Asimismo, se realizó una inspección de outliers mediante el criterio MAD = 3 y se calcularon correlaciones con parámetros acústicos complementarios.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El análisis estadístico se organizó en dos niveles: (i) un análisis de la media individual colapsada por sujeto y condición (diferencia entre la estimación objetiva y la respuesta subjetiva), y (ii) un modelo

lineal de efectos mixtos (LMEM) que cuantifica la relación entre la ganancia objetiva de cada modelo y la ganancia subjetiva aportada por los oyentes.

4.1 Análisis de potencia y tamaño muestral

Con los datos del piloto se estimó la potencia estadística del efecto condición en el LMEM. Con 6 sujetos, la potencia fue aproximadamente 60 % (IC95% [26,24; 87,84] %). Una simulación mediante el paquete simr en R indicó que se requerían al menos 16 sujetos para alcanzar una potencia superior al 90 % (91,9 %; IC95% [83,13; 99,8] %). Este criterio fue adoptado para definir el tamaño muestral del experimento principal.

4.2 Experimento principal

En el estudio principal participaron 22 sujetos, lo que garantizó una potencia estadística óptima.

4.2.1 Diferencias medias por condición

El patrón observado en el piloto se replicó en el experimento principal: ITU (M = 2,71 dB, IC95% [2,14; 3,29] dB) y BRITO (M = 2,06 dB, IC95% [1,48; 2,63] dB). El ajuste lineal con condición como efecto fijo resultó significativo (β = 0,65 %, IC95% = [-0,92; -0,39] %, prueba de efectos fijos: F(2,94) = 69,69, p < 0,001), confirmando que BRITO presenta diferencias menores.

4.2.2. LMEM

El modelo lineal de efectos mixtos confirmó la tendencia: BRITO (pendiente = 1,08, IC95% [1,02; 1,14]), ITU (pendiente = 1,11, IC95% [1,00; 1,15]), efecto de condición estadísticamente significativo F (1,409) = 49,32, p < 0,001. En ambos casos, las pendientes fueron cercanas a 1, pero BRITO mostró un ajuste más consistente con las respuestas subjetivas.

4.3. Análisis de los casos atípicos

Nueve estímulos de los 48 utilizados no siguieron la tendencia global. Se exploró su relación con parámetros acústicos: factor de cresta (correlación negativa moderada), percentiles L10, L50 y L90 (correlaciones positivas moderadas), mientras que rango dinámico y tipología no mostraron correlaciones claras. Esto sugiere que ciertas características espectro-dinámicas influyen en el rendimiento relativo de los modelos. Sin embargo, no se puede ser concluyente al respecto.

En un experimento, Fenton y Lee utilizaron señales individuales de pistas multitrack, con 14 sujetos y una referencia vocal [13]. Estos audios se asemejan a algunos estímulos de ancho de banda estrecho presentes en las señales de televisión, como los de efectos especiales. En las Tablas 1 y 2 se observa el error RMS de las respuestas subjetivas con las mediciones objetivas, tanto para el método ITU y los filtros propuestos por los autores y Cabrera et al. [15] según los resultados de sus pruebas con las señales multitrack, como para el método ITU y el modelo BRITO según los resultados de esta tesis para las señales de efectos especiales estudiadas.

Tabla 1: Errores R.M.S de la sonoridad percibida con las mediciones objetivas para las señales multitrack (extraído de Fenton y Lee [7]).

	Error del filtro K ITU (dB)	**Error del filtro 1 Fenton/Lee (dB)**	**Error del filtro 2 Fenton/Lee (dB)**	**Error del filtro de Cabrera et al. [9] (dB)**
Error R.M.S	**3,26**	**3,23**	**3,13**	**3,67**

Tabla 2: Errores R.M.S de la sonoridad percibida con las mediciones objetivas para los estímulos de efectos especiales del experimento principal (este trabajo).

	Error del filtro K ITU (dB)	Error método BRITO (dB)
Error R.M.S	**4,10**	**3,04**

5. CONCLUSIONES

El trabajo demuestra que el algoritmo ITU-R BS.1770-5, aunque ampliamente adoptado, no siempre representa fielmente la sonoridad percibida en televisión. El modelo BRITO, al incorporar la sumatoria espectral de sonoridad, ofrece una alternativa más precisa, especialmente en señales de banda estrecha y efectos especiales. La incorporación de este tipo de enfoques podría mejorar las recomedaciones internacionales y contribuir a una experiencia auditiva más consistente para los televidentes.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los sujetos que participaron de la evaluación, en su mayoría estudiantes de la Universidad Nacional de Tres de Febrero.

REFERENCIAS

[1] ITU-R BS.1770-5, *Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level*, International Telecommunication Union, 2023.

[2] Zwicker, E. (1961). Subdivision of the audible frequency range into critical bands (Frequenzgruppen). The Journal of the Acoustical Society of America, 33(2), 248-248.

[3] Zwicker, E., & Scharf, B. (1965). A model of loudness summation. Psychological review, 72(1), 3.

[4] Zwicker, E., & erhardt, E. (1980). Analytical expressions for critical-band rate and critical bandwidth as a function of frequency. The Journal of the Acoustical Society of America, 68(5), 1523-1525.

[5] Zwicker, E., & Zwicker, U. T. (1991). Audio engineering and psychoacoustics: Matching signals to the final receiver, the human auditory system. Journal of the Audio Engineering Society, 39(3), 115-126.

[6] Zwicker, E., Flottorp, G., & Stevens, S. S. (1957). Critical band width in loudness summation. The Journal of the Acoustical Society of America, 29(5), 548-557.

[7] Zwicker, E. (1961). Subdivision of the audible frequency range into critical bands (Frequenzgruppen). The Journal of the Acoustical Society of America, 33(2), 248-248.

[8] ISO 532-1:2017, *Acoustics — Methods for calculating loudness — Part 1: Zwicker method*, International Organization for Standardization, 2017.

[9] G. A. Soulodre y M. Lavoie, “Stereo and multichannel loudness perception and metering,” en *AES 119th Convention*, Nueva York, 2005.

[10] M. Lavoie y G. A. Soulodre, “Investigations in Real-time Loudness Metering,” en *AES 120th Convention*, Paris, 2006.

[11] M. Pestana y A. Barbosa, “Accuracy of ITU-R BS. 1770 algorithm in evaluating multitrack material,” en *AES 133rd Convention*, San Francisco, 2012.

[12] M. Pestana, J. Reiss, y A. Barbosa, “Loudness measurement of multitrack audio content using modifications of ITU-R BS. 1770,” en *AES 134th Convention*, Roma, 2013.

[13] M. Fenton y H. Lee, “Alternative weighting filters for multi-track program loudness measurement,” en *AES 143rd Convention*, Nueva York, 2017.

[14] G. A. Soulodre, “Evaluation of objective measures of loudness,” *Canadian Acoustics*, vol. 32, no. 3, pp. 152-153, 2004.

[15] D. Cabrera, I. Dash, y L. Miranda, “Multichannel loudness listening test,” en *AES 124th Convention*, Amsterdam, 2008.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Experimentos psicofísicos sobre constelaciones espaciales en la mezcla estéreo de música

Rodríguez, Leandro Enrique

EUDA, Universidad Nacional de Quilmes, Buenos Aires
Becario Doctoral CONICET, Buenos Aires
leandroerodriguez@gmail.com

Resumen Utilizando mapas previamente propuestos [1], [2] donde las fuentes musicales se determinan dentro de la imagen estéreo como componentes espaciales con características espectrales y dinámicas, se configuraron 2 experimentos psicofísicos. El primero de ellos se basa en una sola fuente (guitarra eléctrica) con distinta configuración espacial y el segundo se determina con fonogramas (de instrumentación similar) que son 3 ejemplos clásicos de la industria de la música en las décadas del ’60, ’70 y ’80. Los resultados validan la audición de los componentes de las fuentes musicales como constelaciones de componentes espectrales con características dinámicas para un total de 20 sujetos experimentales puestos a identificar mapas escuchando los ejemplos seleccionados.

Palabras clave: experimentos, psicofísicos, constelaciones, espaciales, estéreo.

Abstract Using previously proposed maps ([1] and [2]) where musical sources are determined within the stereo image as spatial components with spectral and dynamic characteristics, 2 psychophysical experiments were set up. The first one is based on a single source (electric guitar) with different spatial configuration and the second one is determined with phonograms (of similar instrumentation) which are 3 classic examples from the music industry in the 60s, 70s and 80s. The results validate the audition of the musical source components as constellations of spectral components with dynamic characteristics for a total of 20 experimental subjects set to identify maps by listening to the selected examples.

Keywords: experiments, psychophysical, constellations, space, stereo.

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo realizado sobre los fonogramas elegidos como corpus de análisis para una tesis doctoral determina las fuentes musicales como componentes espectrales o dinámicos dentro de la imagen estéreo [3]. Allí, por ejemplo, un fragmento de una grabación de guitarra eléctrica puede ser graficado en un mapa bidimensional donde sus principales zonas de mayor intensidad en su respuesta en frecuencia son determinadas como componentes espaciales dentro del espacio sonoro virtual, utilizando valores en Hz en el eje Y junto con posiciones en azimut en el eje X para determinar las coordenadas de ubicación espacial de sus componentes.

Puede verse un ejemplo de una configuración estéreo determinada para un fragmento de guitarra eléctrica en la figura 1. La misma define a una constelación de sus componentes según su posición espacial determinada por la mezcla.

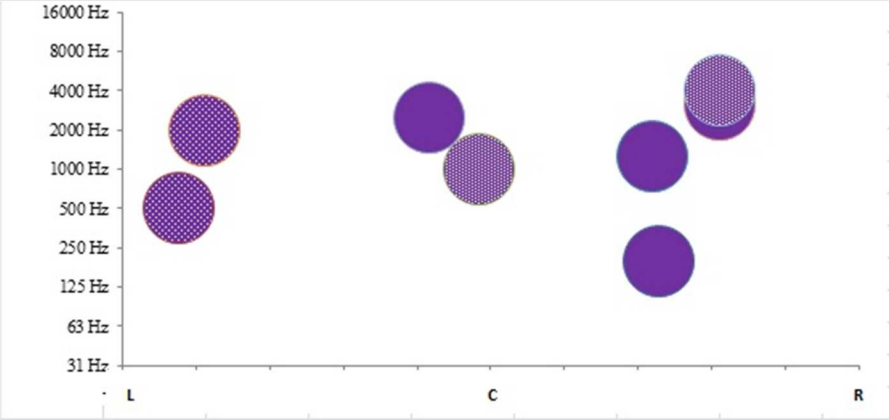


Figura 1: Ejemplo de constelación A de guitarra eléctrica

En la figura 2, que en adelante será llamada constelación B, podemos ver a la misma guitarra pero mezclada en espejo desde una perspectiva espacial. Esta configuración espejada se logra conmutando la señal L (*Left*, izquierda) con la señal R (*Right*, derecha) para la mezcla original graficada en el mapa de la figura 1.

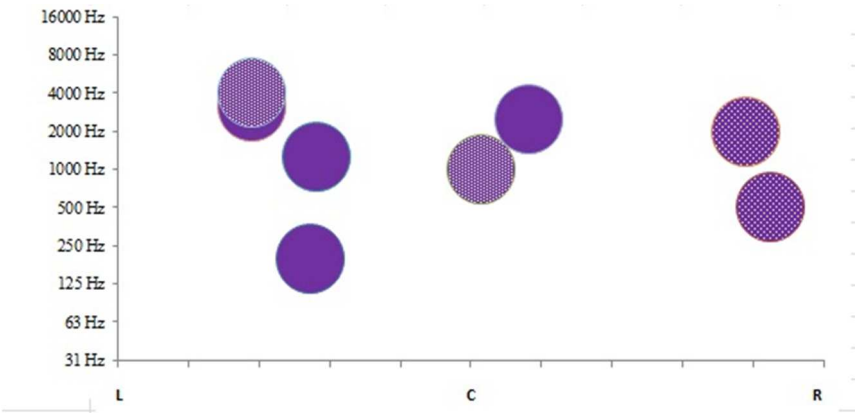


Figura 2: Ejemplo de constelación B de guitarra eléctrica

Por otro lado, en la figura 3 podemos ver el colapso a mono de esta misma mezcla, que será denominada constelación C. Este procedimiento se logra enviando las señales L y R en simultáneo a ambos canales, generando una mezcla mono dual donde todos los componentes se ubican espacialmente en el centro (C=*center*).

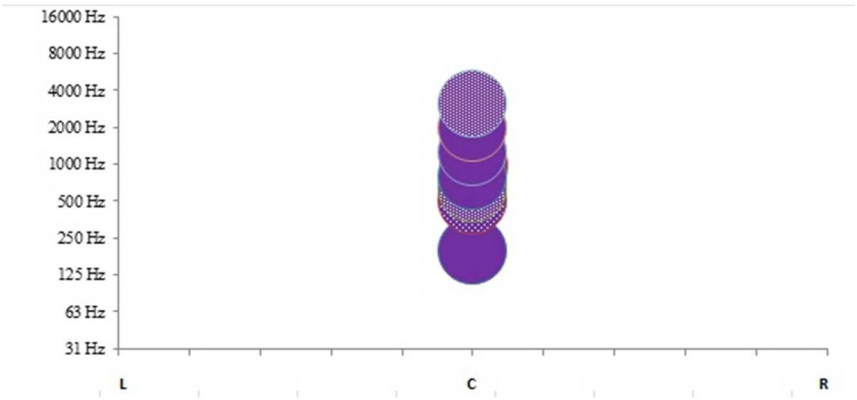


Figura 3: Ejemplo de constelación C de guitarra eléctrica

Los ejemplos descriptos en las figuras 1, 2 y 3 permiten visualizar tres instancias claras de configuraciones espaciales distintas, determinadas por la mezcla de audio en estéreo, para un solo instrumento-fuente musical, en este caso una guitarra eléctrica. En la figura 1 pueden verse componentes alrededor de 500 y 2000 Hz sobre la izquierda, 1000 Hz sobre el centro y 125 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz sobre la derecha. En la figura 2 se observa el espejo de esa imagen estéreo: 125 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz sobre la izquierda, 100 Hz sobre el centro y 500 y 2000 Hz sobre la derecha. En la figura 3, todos los componentes están colapsados a mono, por ende se ubican sobre el centro de la imagen.

A su vez, las figuras 4, 5, 6 determinan la configuración espacial de los componentes de 3 fragmentos de 30 segundos en 3 fonogramas distintos, pertenecientes a la industria musical en las décadas del ’60. ’70 y ’80 del siglo XX.

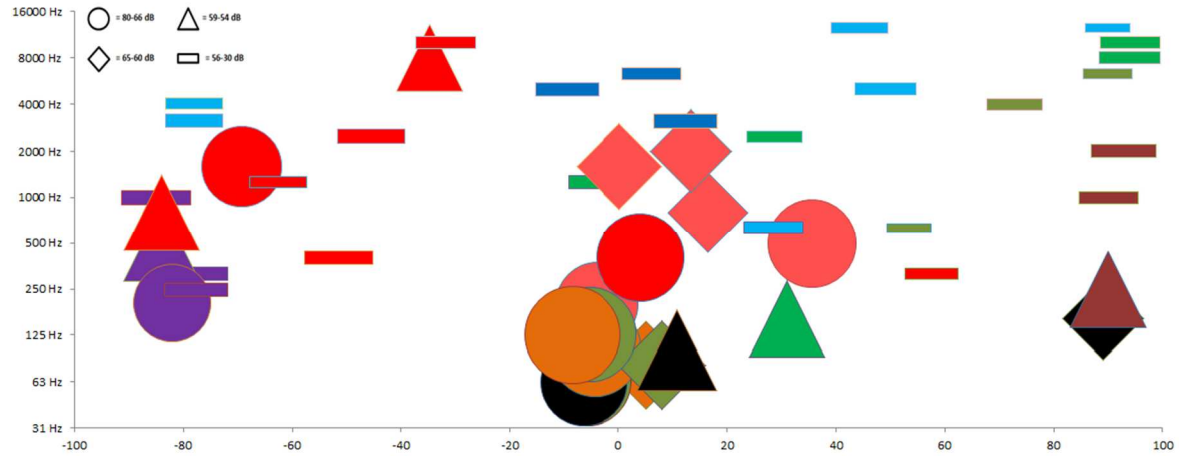


Figura 4: Mapa de constelaciones para un fragmento de la primera estrofa de Pinball Wizard (The Who), año 1969. Audio original obtenido del Remaster para CDDA, edición 20º aniversario.

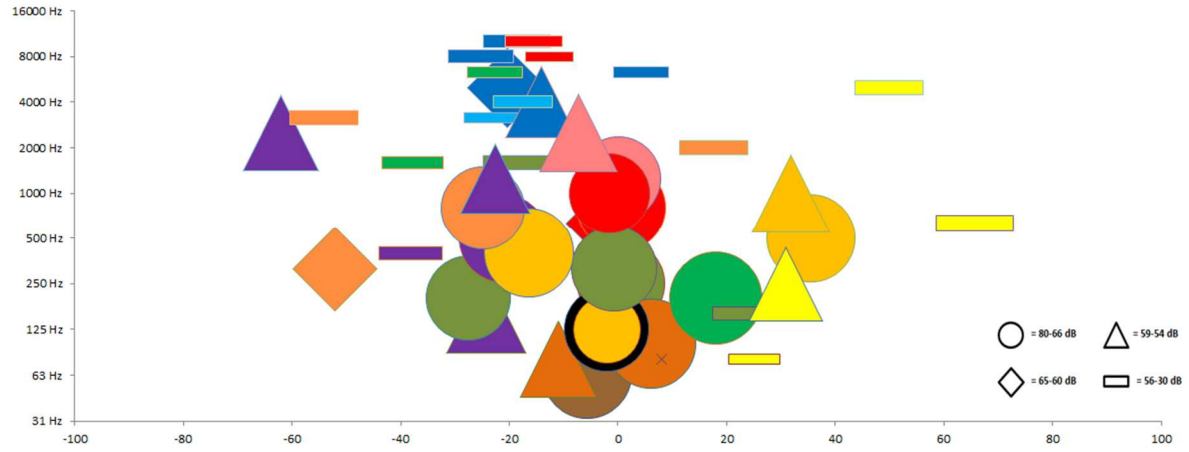


Figura 5: Mapa de constelaciones para un fragmento de la primera estrofa de Evil Woman (ELO), año 1975. Audio original obtenido del Remaster para CDDA, primera edición.

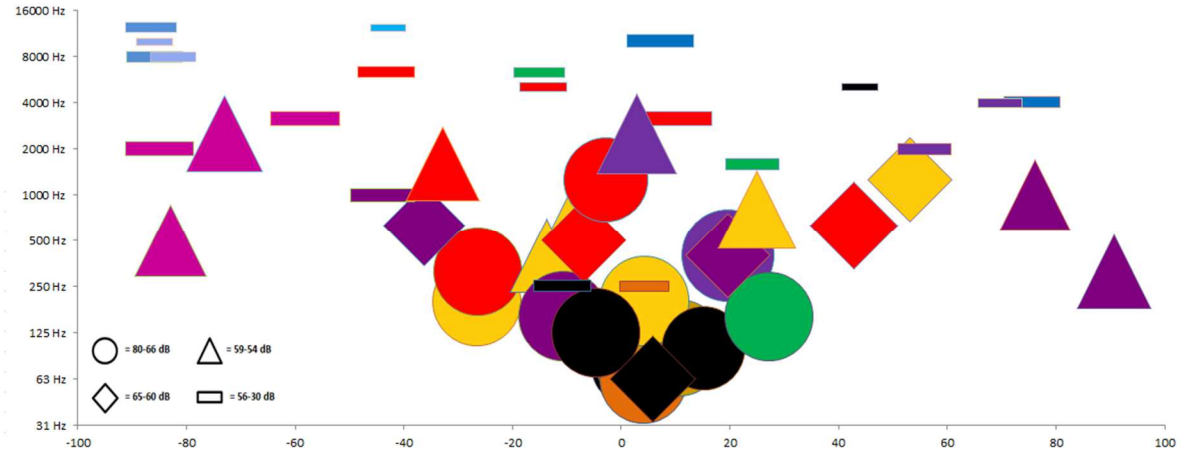


Figura 6: Mapa de constelaciones para un fragmento de la primera estrofa de Pictures Of You (The Cure), año 1989. Audio original obtenido de la edición original en CDDA.

Los mapas de las figuras 4, 5 y 6 determinan por color a las fuentes-instrumentos: en rojo tenemos la voz principal, en violeta guitarras, en amarillo teclados, en marrón al bajo eléctrico, en negro bombo, en verde tambor, en verde oliva toms y en distintas gamas de celeste y azul a los platillos (*hi hat, ride, crash*). La geometría indica nivel de presión sonora en rangos RMS dentro del rango dinámico digital: *forte* (círculos, 80-66 dB), *mezzoforte* (triángulos, 65-60 dB), *mezzopiano* (rombos, 59-54 dB) y *piano* (rectángulos, 54-30 dB), donde también existe una relación proporcional con el tamaño de la figura. A su vez, la posición en azimut tiene pasos de 20 puntos para indicar posición izquierda-derecha, donde -100 el *full* L (*left*) y 100 es full R (*right*) [4]. Estos 3 fragmentos de 3 canciones distintas representan modelos clásicos de mezcla para fines de los ´60, mediados de los ´70 y mediados-fines de los ´80 desde una perspectiva espacial dentro de la imagen estéreo, determinada por la posición en azimut. A fines de los ´60 el control panorámico por intensidad no estaba disponible o se usaba de manera radical (todo a L, todo a C –*center*-, o todo a R), en los 70´ comenzó a utilizarse con alto compromiso mono de reproducción –por ende se ubicaba todo alrededor de C- y en los 80´ ya el estéreo era mejor aprovechado porque se había convertido en el formato de consumo estándar a gran escala [5].

2. METODOLOGÍA

Utilizando los ejemplos mencionados, se plantearon dos experimentos psicofísicos: uno sobre una sola fuente (experimento 1) y otro sobre tres canciones distintas (experimento 2), donde cada sujeto experimental convocado realizó ambos. Los ejemplos utilizados fueron los mismos descriptos en la introducción (3 configuraciones de guitarra eléctrica y 3 fragmentos de fonogramas distintos).

Para las dos configuraciones experimentales se estableció el uso del método ABX de elección forzada, considerado adecuado por sobre otros para este tipo de trabajo orientado a la escucha humana, ya que se comporta de la misma manera tanto en sujetos experimentados como en los que no los son [6]. El mismo consiste en la configuración de opciones 3-intervalos/2-alternativas de elección forzada ((3I/2AFC, *Alternative Forced Choice*), donde para tres intervalos (A, B y X) sus dos únicas posibles respuestas equivalen a A=X o bien B=X [7].

Para una población total de 20 sujetos (10 mujeres, 10 hombres, edad promedio 40 años) se definieron 50 instancias (*trials*) para cada experimento, con 4 secuencias posibles de presentación de las mismas (AB-A, BA-B, BA-A y AB-B).

Cada secuencia fue utilizada 4 veces de manera premeditadamente aleatoria para eliminar sesgo [8], junto a la inclusión de 5 de esos 50 *trials* -en lugares estratégicos de la secuencia completa- donde nada de lo que sonaba era lo que se veía, manteniendo la lógica de la elección forzada. Puede verse en la figura 7 a la primera diapositiva junto con la primera instancia (*trial 01*) del Experimento 1, y en la figura 8 lo equivalente al Experimento 2.

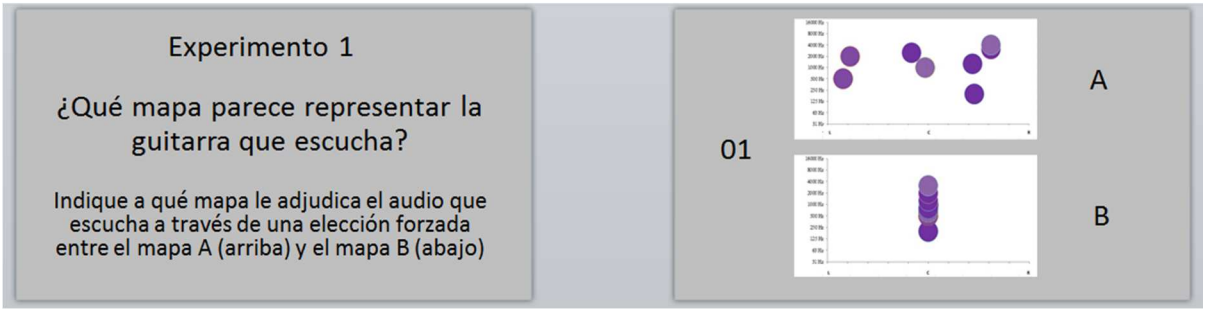


Figura 7: Diapositivas 1 y 2 del Experimento 1

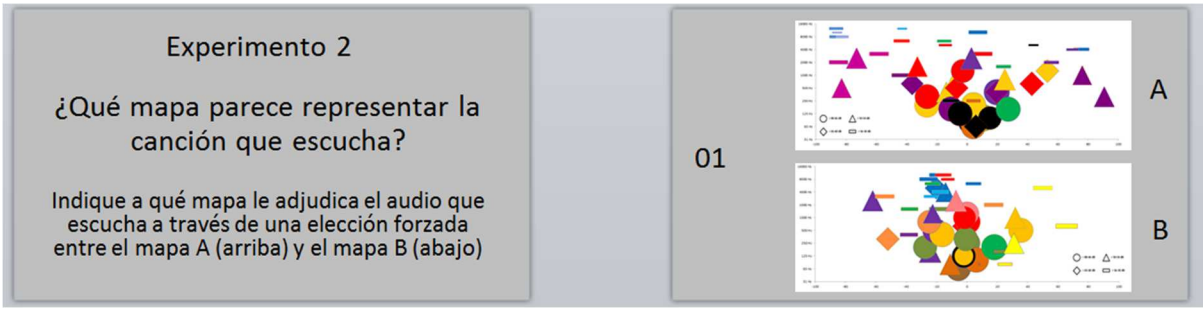


Figura 8: Diapositivas 1 y 2 del Experimento 2

Cada sujeto disparó una lista de reproducción que podía controlar a su antojo, mientras navegaban diapositivas que mostraban la elección forzada para cada instancia. La totalidad de la población otorgó siempre respuestas verbales en cada caso, siendo estas ingresadas por el experimentador dentro de una planilla de cálculo asociada a un ID individual. Esto supone una ventaja sobre el ingreso de la respuesta por algún método informático por parte del sujeto, que puede fallar o bien traer complicaciones que quiten fluidez a la tarea [9]. Además de explicarle este funcionamiento y mecánica de operación a cada sujeto, se hicieron comentarios específicos previos a cada experimento. En el experimento 1 solamente se indicó que el entramado gráfico interno dentro cada círculo (visible en las figuras 1 y 2) solamente se usó para destacar el solapamiento entre componentes, o sea, que no indicaba ningún parámetro. En cambio, se verbalizó el código geométrico y de colores utilizado para el experimento 2, ya mencionado en la introducción. Cada sujeto respondió 50 *trials* por experimento, (100 en total). La duración promedio de ambos experimentos resultó ser de 45 minutos, que sumados a los 10 minutos de la realización de una encuesta -donde entre otras cosas definen su formación y experiencia profesional en música y sonido, además de su ID y su estado de salud auditiva-, definen que cada sujeto estuvo aproximadamente una hora realizando todas las tareas asignadas.

Los experimentos fueron realizados en dos salas de control distintas, en las cuales el experimentador habitualmente suele trabajar como técnico de mezcla *freelance* y donde además obtuvo sus parámetros acústicos relevantes en ambos spots de escucha, ajustados a la norma ISO 3382-3. El nivel de presión sonora utilizado en todos los casos siempre fue ajustado previamente a 85 dBC utilizando ruido rosa enviado a nivel nominal 0 dBV (0,775 V) al sistema de monitoreo estéreo en cada caso [10]. En la figura 9 pueden verse dos fotos con dos sujetos distintos, uno en cada sala de control. Su tamaño en m3, su parámetros acústicos más relevantes y generales (en *broadband*) y el monitoreo utilizado pueden ser observados en la tabla 1.

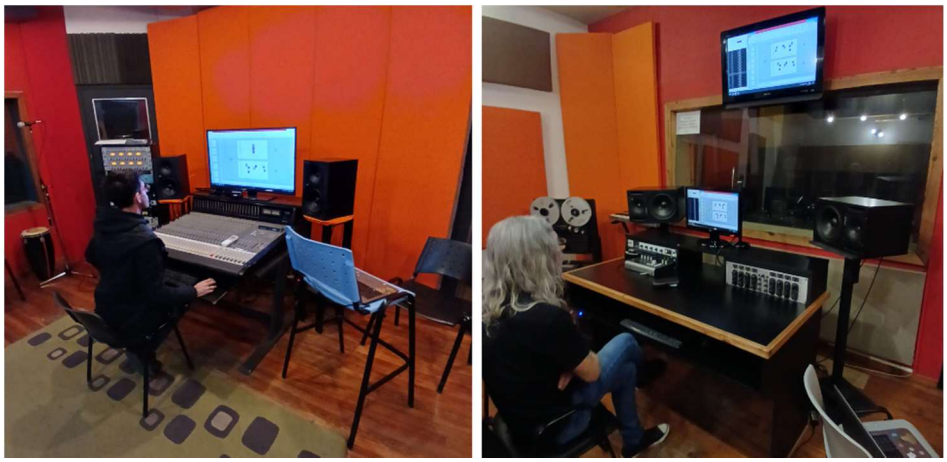


Figura 9: Sujetos realizando experimentos en dos diferentes salas de control (1 y 2)

Tabla 1: Volumen, parámetros acústicos y monitoreo en las salas de control utilizadas (1 y 2)

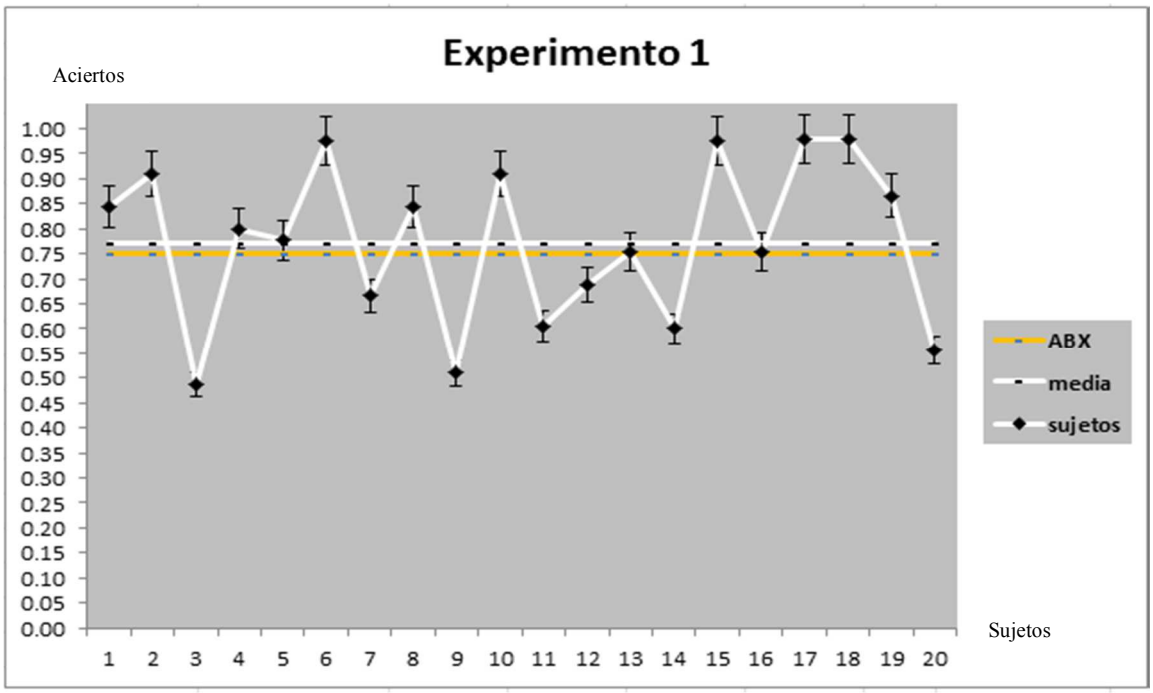
Control Room	T30	EDT	C40	IACC E	LF – LFC	STI	Monitores en estéreo
1 (66.6 m3)	0,34 s	0,11 s	10 dB	0,40	0,010 – 0,027	0,90	Mackie HR824
2 (70.5 m3)	0,68 s	0,16 s	5 dB	0,61	0,532 – 0,166	0,86	Genelec 1031A

3. RESULTADOS

3.1 Resultados del experimento 1

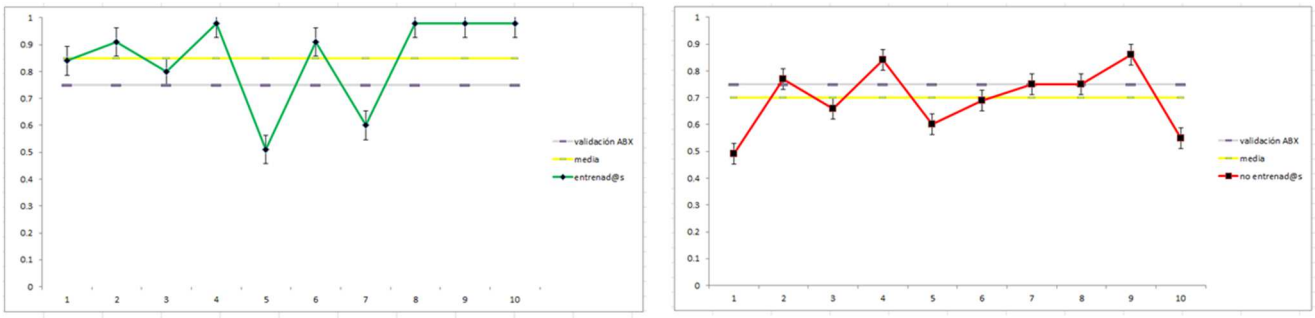
En la figura 10 se muestran los resultados del experimento 1, con la escala de aciertos determinada en 0.00/1.00 en función de la cantidad total de 20 sujetos (siendo estos 10 mujeres y 10 hombres con edad promedio 40 años para la totalidad de la población utilizada).

Figura 10: Resultados totales del Experimento 1: una sola guitarra eléctrica mezclada de 3 formas distintas (estéreo, estéreo espejado, mono)



La media de las respuestas obtenidas fue de 0,77, superando el valor de 0,75 que indica validación según el método ABX 3I/2AFC empleado [11]. Las respuestas a las preguntas realizadas en cada cuestionario posterior ya mencionado permitieron categorizar más resultados en función de una división determinada entre sujetos entrenados y no entrenados en lo relativo a educación en música y sonido, como así en la experiencia y educación en grabación y mezcla de fonogramas en particular. Se categorizaron a 10 sujetos como entrenados y 10 como no entrenados. En la figura 11 pueden observarse a las respuestas de los sujetos entrenados y no entrenados, categorizando así respuestas del experimento 1.

Figura 11: Resultados totales para sujetos categorizados como entrenados (en color verde, a la izquierda) y no entrenados (en color rojo, a la derecha) para el experimento 1. La media en cada caso se indica en amarillo y la validación ABX en gris. El eje vertical indica escala de aciertos y el horizontal el ID de cada sujeto.

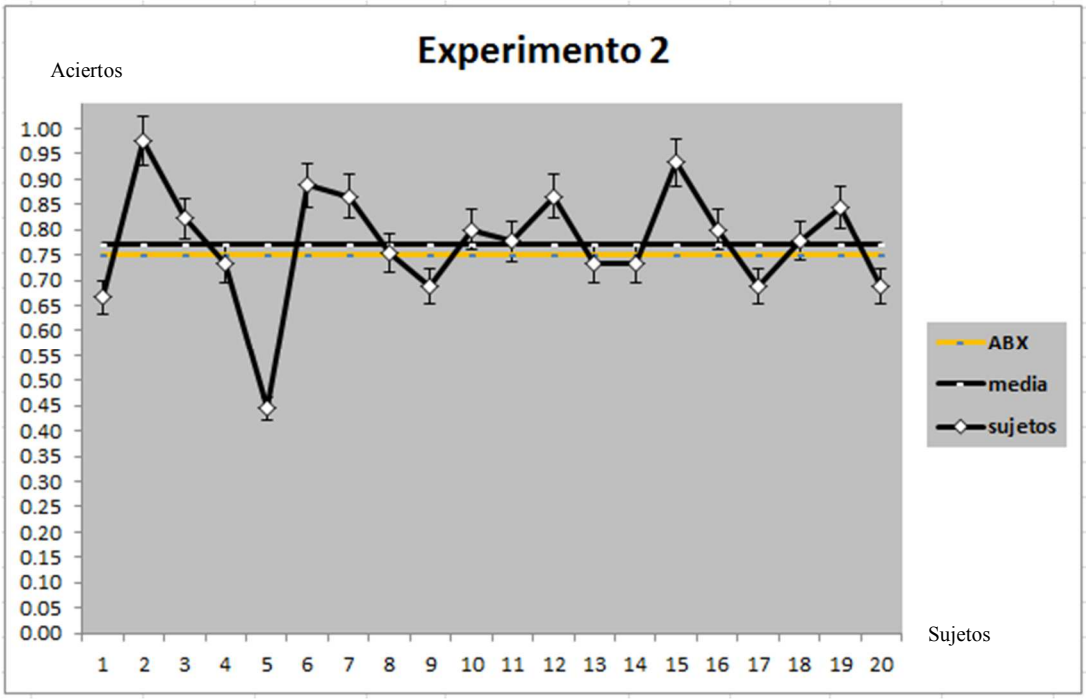


- La media de los sujetos entrenados en el experimento 1 se ubica en 0,85 (0,85 > 0,75).
- La media de los sujetos no entrenados en el experimento 1 se ubica en 0,70 (0,70 < 0,75).

3.2 Resultados del experimento 2

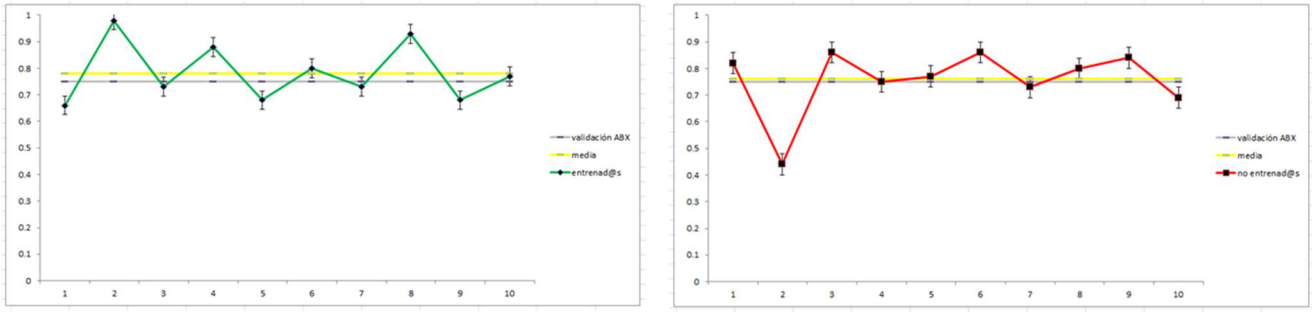
En la figura 12 se muestran los resultados totales del experimento 2, con la escala de aciertos determinada en 0.00/1.00 en función de la cantidad total de sujetos (20).

Figura 12: Resultados totales del Experimento 2, basado en las constelaciones de 3 fragmentos de distintos fonogramas - The Who (’69), ELO (’75) y The Cure (‘89)



Puede observarse que la media de las respuestas obtenidas supera el valor 0.75, el que propone validación dentro del método ABX 3I/2AFC utilizado, ya que se ubica en 0,77, exactamente igual que en el experimento 1. Utilizando la misma categorización entre sujetos entrenados y no entrenados determinada para el experimento 1 -esto es, los mismos sujetos categorizados como entrenados y como no entrenados-, se aplicó un análisis de resultados utilizando esa segmentación. En la figura 13 pueden observarse a las respuestas de los sujetos entrenados y no entrenados, categorizando así respuestas del experimento 2.

Figura 13: Resultados totales para sujetos categorizados como entrenados (en color verde, a la izquierda) y no entrenados (en color rojo, a la derecha) para el experimento 1. La media en cada caso se indica en amarillo y la validación ABX en gris. El eje vertical indica escala de aciertos y el horizontal el ID de cada sujeto.



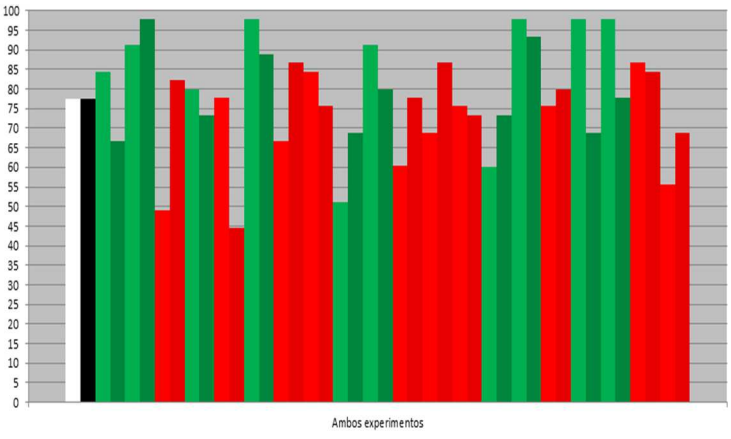
- La media de los sujetos entrenados en el experimento 2 se ubica en 0,78 (0,78 > 0,75).
- La media de los sujetos no entrenados en el experimento 2 se ubica en 0,76 (0,76 > 0,75).

3.3 Análisis de los resultados categorizados

Tabla 2: Resultados totales para sujeto categorizado

1	Entrenado	84,44	66,67
2	Entrenada	91,11	97,78
3	No entrenado	48,89	82,22
4	Entrenado	80,00	73,33
5	No entrenado	77,78	44,44
6	Entrenado	97,78	88,89
7	No entrenado	66,67	86,67
8	No entrenado	84,44	75,56
9	Entrenada	51,11	68,89
10	Entrenado	91,11	80,00
11	No entrenado	60,53	77,78
12	No entrenada	68,89	86,67
13	No entrenado	75,56	73,33
14	Entrenado	60,00	73,33
15	Entrenado	97,78	93,33
16	No entrenado	75,56	80,00
17	Entrenado	97,78	68,89
18	Entrenado	97,78	77,78
19	No entrenada	86,67	84,44
20	No entrenada	55,56	68,89
	Categoría	**Exp 1**	**Exp 2**
MEDIA	Ambas	**77,47**	77,44

Figura 14: Resultados totales para cada sujeto categorizado en la tabla 2



La visualización de los datos propuesta en la tabla 2 y figura 14 permitieron la construcción de dos análisis adicionales, uno por cada experimento y otro entre sujetos (entrenados totales y no entrenados totales).

En las figuras 15 y 16 puede observarse el detalle de los experimentos 1 y 2 respectivamente categorizados, y luego en las figuras 17 y 18 a los rendimientos de cada categoría en particular -entrenados y no entrenados- para ambas configuraciones experimentales.

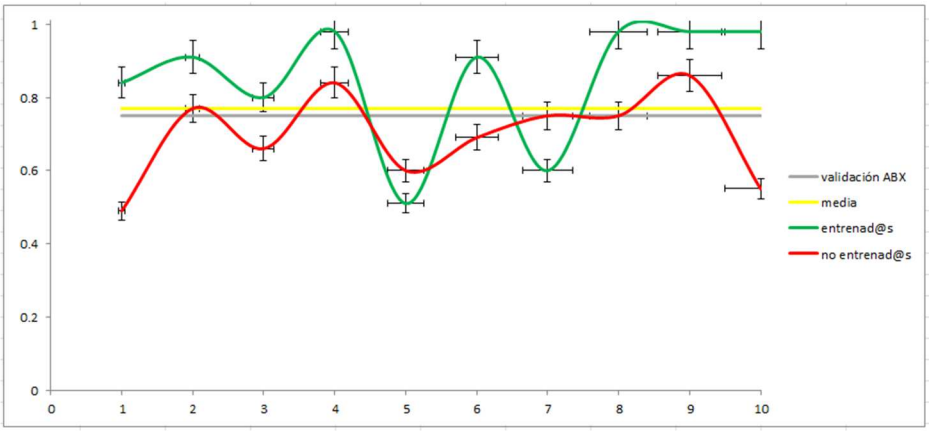


Figura 15: Resultados totales para el experimento 1 categorizado.

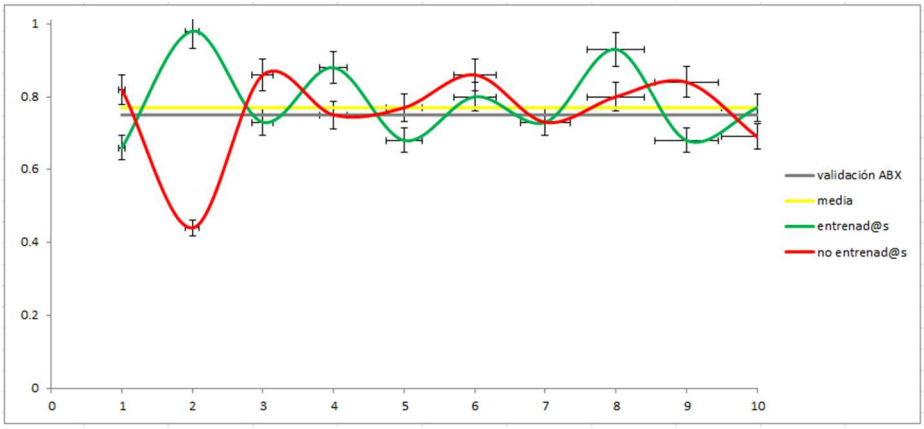


Figura 16: Resultados totales para el experimento 2 categorizado.

En la figura 15 puede observarse como los sujetos entrenados responden mejor que los no entrenados, más allá de que la media del total esté por encima de la validación ABX propuesta. En cambio en la figura 16 se observa que el rendimiento de respuestas es de alta paridad para este tipo de clasificación.

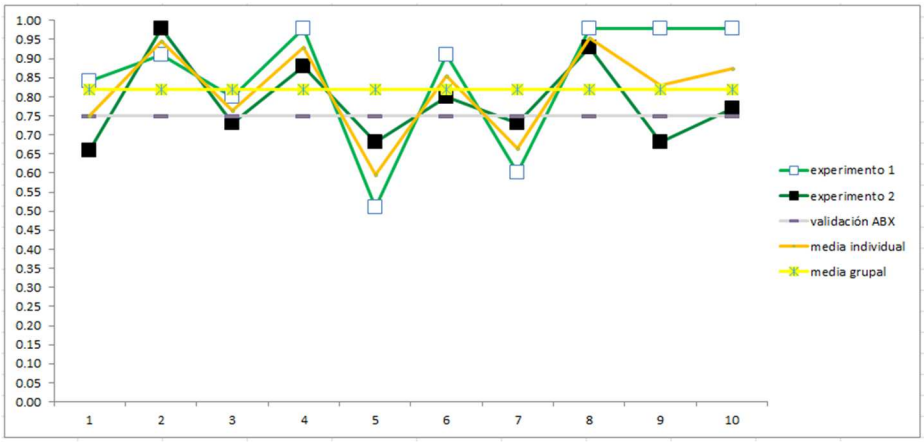


Figura 17: Resultados totales para sujetos categorizados como entrenados en ambos experimentos

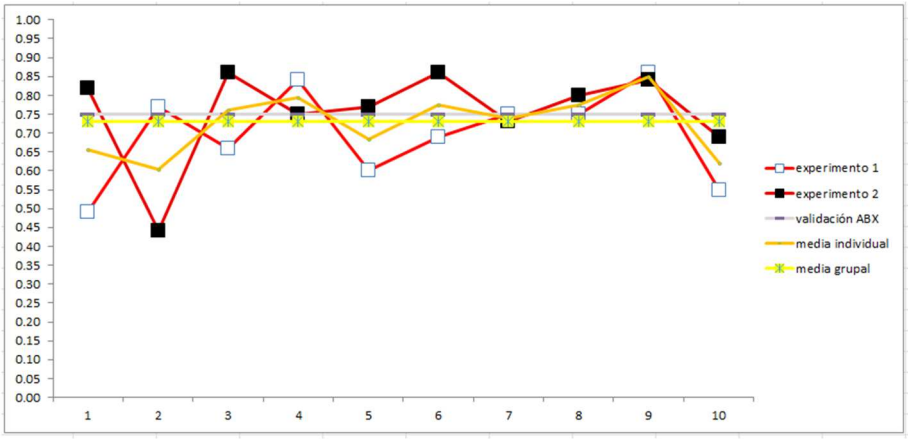


Figura 18: Resultados totales para sujetos categorizados como no entrenados en ambos experimentos

Respecto a la visualización de datos de las figuras 17 y 18, además de la media grupal destacada en cada descripción, se señala que salvo en 2 o 3 casos para cada categorización las medias individuales poseen mínimos y máximos menores en los sujetos entrenados en comparación a los no entrenados.

4. DISCUSIÓN

La media total de sujetos responde por encima del 0,75 de validación ABX en ambos experimentos, obteniendo 0,77 tanto en el experimento de constelaciones de guitarra como en el de fragmentos de distintos fonogramas. El perfil de las y los sujetos experimentales, relevado en una encuesta posterior, permitió una categorización entre sujetos entrenados (con experiencia en mezcla, profesionales) y no entrenados (estudiantes, o no profesionales). Aquí, los sujetos entrenados responden mejor en el experimento 1, algo esperable por la especificidad profesional y hábitos cotidianos [12]. Ahora, en el experimento 2 ambas categorías de sujetos responden de forma muy similar en comparación con el experimento 1, con una mínima diferencia a favor de los entrenados. Esto podría deberse a que la escucha de toda una canción con alto nivel de atención en el sonido y no en cuestiones musicales tradicionales (ritmo, melodía, armonía) no es solamente una cuestión de hábitos de mezcla de música, y por ende el entrenamiento en mezcla no tendría tanto peso, sino quizá más bien en la construcción aprendida in situ de objetos auditivos en entornos específicos que conforman la generación de una escena auditiva particular [13]. Si bien la media total de ambos experimentos arroja una superioridad de los sujetos entrenados contra los no entrenados, debería realizarse o bien una continuación de este experimento (con mayor cantidad de sujetos) o bien con una configuración nueva con otros estímulos (por ejemplo con otra fuente única y otras canciones) para comprobar si esto se mantiene o las categorías se funden como en el experimento 2. Estas reflexiones pueden ser de utilidad como una evaluación subjetiva de los resultados desde los datos provenientes de las respuestas de los sujetos para ambos experimentos. Para poder observar todo el detalle de los resultados y poder expandir esta discusión, se ofrece un conjunto de datos de investigación de toda la configuración experimental [14].

5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones del experimento 1

+ La media necesitada para validar el modelo se supera (0,77 > 0,75), siendo 11 sujetos los que respondieron por encima de la media.
+ Los sujetos experimentales categorizados como entrenados (10) responden de forma superior a la media de validación (0,85 > 0,75).
+ Los sujetos experimentales categorizados como no entrenados (10) responden por debajo de la media de validación (0,70 < 0,75).
+ Los sujetos experimentales categorizados como entrenados responden de forma sustancialmente superior a los no entrenados (la media de cada categoría equivale a 0,85 y 0,70 respectivamente).

5.1 Conclusiones del experimento 2

+ La media necesitada para validar el modelo se supera (0,77 > 0,75), siendo 11 sujetos los que respondieron por encima de la media.
+ Los sujetos experimentales categorizados como entrenados (10) responden de forma superior a la media de validación (0,78 > 0,75).
+ Los sujetos experimentales categorizados como no entrenados (10) responden de forma superior a la media de validación (0,76 > 0,75).
+ Los sujetos experimentales categorizados como entrenados y no entrenados responden de forma similar (la media de cada categoría equivale a 0,78 y 0,76 respectivamente).

5.3 Conclusiones finales para ambos experimentos

+Los resultados determinan que la media de todos los sujetos indica que las constelaciones de una única guitarra en el experimento 1 y las correspondientes a fragmentos de distintas canciones en el experimento 2 fueron percibidas como tales en configuraciones experimentales de elección forzada (ABX 3I/2AFC).

+La totalidad de los sujetos en función de su media supera la validación determinada en ambos experimentos, donde tanto en una única fuente como en tres fonogramas distintos se configuran distintas constelaciones de componentes.

+La población de sujetos categorizada como entrenada (profesional en mezcla de música) responde mejor que la no entrenada (no profesional) en el experimento 1, pero en el experimento 2 responden de forma similar.

+La segmentación entre sujetos entrenados y no entrenados es notoria y cobra sentido en el experimento 1, donde se trabaja con una única fuente. Cuando se trabaja en la comparación de fonogramas, la segmentación no es notoria y por ende no cobra sentido.

6. AGRADECIMIENTOS

Dentro del marco de una beca doctoral CONICET se agradece especialmente al co-director de la misma, el Dr. Ramiro Vergara, por sus sustanciales aportes en la configuración y puesta en marcha de los experimentos descriptos en este artículo, como a su vez al Dr. Pablo Di Liscia, director de la investigación “Desarrollo de escena estéreo bidimensional para detectar los componentes de una mezcla de audio”, RESOL-2020-129-APN-DIR_CONICET.

REFERENCIAS

[1] Rodríguez, L.E., “Spectral or Dynamic Constellations as Sound Sources in Maps”, SCT Proceedings in Interdisciplinary Insights and Innovations. Vol. 2, pp 65-79. 2024. DOI: 10.56294/piii2024276. Eprint: https://doi.org/10.56294/piii2024276

[2] Rodríguez, L. E., “Fuentes musicales como constelaciones de componentes dentro del espacio virtual”, en Actas de la Conferencia Latinoamericana de Audio AES LAC Buenos Aires, Avances del audio en Latinoamérica 2022, Audio Engineering Society Argentina, ISBN 978-631-00-2025-9.

[3] Rodríguez, L.E., Cálculo de datos para la construcción de constelaciones de fuentes sonoras en mapas bidimensionales. 2024. Repositorio Institucional CONICET Digital. Dataset: http://hdl.handle.net/11336/228443

[4] Rodríguez, L.E., “Construcción de mapas sonoros sobre música realizada en estéreo”. En “Investigaciones sobre audio espacial y estética del arte sonoro”, pp 7-46. Wolkowicz Editores, 2023. ISBN: 978-987-82872-6-3.

[5] Rodríguez, L.E., “Fuentes musicales como componentes espectrales o dinámicos”. Actas del IV Encuentro de Ciencia y Arte de Argentina INTI 2023 & Actas del Congreso Argentino de Acústica AdAA 2023. https://icomunicacion.inti.gob.ar/2025/publicaciones/ciencia_y_arte_25.pdf - https://euda.unq.edu.ar/xviii-congresoargentinodeacustica2023/

[6] F. Brinkmann, A. Lindau & S. Weinzierl, ‘On the authenticity of individual dynamic binaural synthesis’, JASA vol. 142, no. 4, pp. 1784–1795, Oct. 2017, DOI: 10.1121/1.5005606.

[7] M. J. Hautus & X. Meng, ‘Decision strategies in the ABX (matching-to-sample) psychophysical task’, Percept. Psychophys. vol. 64, no. 1, pp. 89–106, Jan. 2002, DOI: 10.3758/BF03194559.

[8] B. Rousseau, A. Meyer & M. O’Mahony. ‘Power and Sensitivity of the Same-Different Test: Comparison with Triangle and Duo-Trio Methods‘, J. Sens. Stud., vol. 13, no. 2, pp. 149–173, 1998, DOI: 10.1111/j.1745-459X.1998.tb00080.x.

[9] Ehrenstein, W. H. & Ehrenstein, A. ‘Psychophysical methods. In Modern techniques in neuroscience research’ (pp. 1211-1241). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.1999.

[10] Schneider, M., Selzer, J., Rissler, J., Wolff, A., & Schelle, F. ‘Uncertainties of ISO 3382-3 sound pressure level quantities’. Acta Acustica, 5, 27. 2021.

[11] Laming, D. ‘Contrast discrimination by the methods of adjustment and two-alternative forced choice’. Attention, Perception, & Psychophysics, 75, 1774-1782. 2013.

[12] Martin, F. L. ‘Sound localization training and auditory adaptation: a review’. In Audio Engineering Society Conference: 2020 AES International Conference on Audio for Virtual and Augmented Reality. Audio Engineering Society, Aug. 2020.

[13] Bregman, A. S. ‘Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound’. MIT Press, 2nd paperback edition, 1999.

[14] Rodríguez, L.E., Experimentos psicofísicos sobre constelaciones de fuentes sonoras en mapas bidimensionales. 2024. Repositorio Institucional CONICET Digital. Dataset: http://hdl.handle.net/11336/228443

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Interfaz Física para la Exploración en Tiempo Real de un Modelo Dinámico del Saxofón (AdAA2025)

Ruiz, D.[†‡,1]; Ortega Brook, A.[†‡,2]; Proscia, M.[†]; Eguía, M. C. [†‡,3]

[†] Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora, Universidad Nacional de Quilmes, Buenos Aires, Argentina

‡ CONICET, Buenos Aires, Argentina

[1] dario.ruiz@unq.edu.ar, [2] mortegabrook@uvq.edu.ar, [3] martin.proscia@unq.edu.ar, [4] meguia@unq.edu.ar

RESUMEN AMPLIADO

Resumen Este trabajo presenta un sistema interactivo para la implementación en tiempo real de un modelo dinámico del saxofón, basado en un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen la interacción no lineal entre la lengüeta, la presión en la boquilla y la acústica del tubo. El modelo es resuelto e integrado en tiempo real utilizando el lenguaje de programación Julia, optimizado para cómputo de alta performance. El control del sistema se realiza mediante una boquilla instrumentada con sensores de presión y fuerza, que permite mapear las condiciones físicas de ejecución a los parámetros del modelo. Este enfoque permite estudiar la dinámica de producción sonora, incluyendo fenómenos como los cambios dinámicos por registro y la producción de armónicos y multifónicos, en condiciones controladas y reproducibles. A diferencia de las simulaciones tradicionales, donde los parámetros son predefinidos y el modelo se ejecuta de forma autónoma, aquí el control se transfiere al intérprete, lo que habilita una nueva metodología de validación empírica basada en la interacción directa con el modelo. El sistema está orientado a la investigación en acústica musical y percepción, y puede ser extendido a estudios sobre control gestual, exploración de comportamientos no lineales y diseño de instrumentos virtuales por modelado físico.

Palabras clave: modelado dinámico, saxofón, boquilla instrumentada

1. INTRODUCCIÓN

El modelo dinámico empleado en este trabajo se basa en una lengüeta modelada como oscilador de un grado de libertad excitado por la diferencia de presión boca–boquilla, una ley no lineal de flujo derivada de Bernoulli para el canal de la lengüeta y una descripción modal de la impedancia del resonador. Esta formulación ha mostrado multiestabilidad de regímenes y su impacto en la producción sonora, aspecto central al estudiar saltos de registro y combinaciones de modos [1]. La caracterización de impedancia para distintas digitaciones se realiza mediante simulaciones con OpenWiND [2] y se integra al entorno de síntesis en tiempo real basado en RealTimeAudioDiffEq.jl, presentado por el grupo en JuliaCon 2024, lo que permite integración de EDOs y audio de baja latencia en un mismo flujo.

La instrumentación de boquillas y la captura de parámetros de control en vientos de lengüeta han permitido describir con detalle cómo se coordinan presión, fuerza labial y acción de la lengua en articulaciones y transitorios. En saxofón se han utilizado boquillas y cañas instrumentadas para estudiar la estrategia de ejecución de intérpretes expertos [3] y en clarinete se desarrollaron sistemas integrados de captura y análisis, como MIPCAT [4], que sincronizan señales de presión y contacto con descriptores temporales de la ejecución. Estudios de articulación muestran que legato, portato y staccato difieren de manera sistemática en la coordinación aire–lengua–dedos y en los perfiles de transitorio [5, 6, 7]. En la misma línea, experimentos controlados con una máquina de tocar clarinete han cuantificado el efecto de la presión de soplado, la fuerza labial y la lengua sobre los transitorios de ataque y final, evidenciando combinaciones de control que producen ataques más rápidos o cortes más

abruptos [8]. La influencia del tracto vocal sobre la producción en saxofón complementa este panorama, subrayando la riqueza del control gestual [9].

Estos antecedentes respaldan el enfoque experimental propuesto: medir presión y fuerza sobre la lengüeta durante gestos que exigen cambios de modo oscilatorio y coordinación fina de articulación, y comparar esos registros con la respuesta del modelo en tiempo real.

Finalmente, el equipo cuenta con experiencia específica en experimentos psicofísicos dentro de esta misma línea de trabajo sobre saxofón y multifónicos, lo que respalda la pertinencia metodológica del presente trabajo. En particular, se realizaron estudios sobre análisis musical, psicofísico y espectral de multifónicos y sobre morphings tímbricos en saxofón, que aportan procedimientos de medición, criterios de evaluación perceptual y estrategias de análisis de datos aplicables al estudio propuesto [12, 13].

2. METODOLOGÍA

Se instrumentó una boquilla Yamaha4C para saxofón alto con un sensor de presión (ASCX05DN) y un sensor de fuerza (FSR 402) (Figura 1). El sensor de presión toma los valores a través de una sonda que mide la presión dentro de la boca del instrumentista. El sensor de fuerza se adhiere a una lengüeta sintética G-Reeds, lo que garantiza la repetibilidad de mediciones al no verse afectada por la humedad como las lengüetas de caña tradicionales. La presión de soplado y la fuerza que determina la apertura del canal en el que oscila la lengüeta son los parámetros de control principales del modelo dinámico del saxofón.

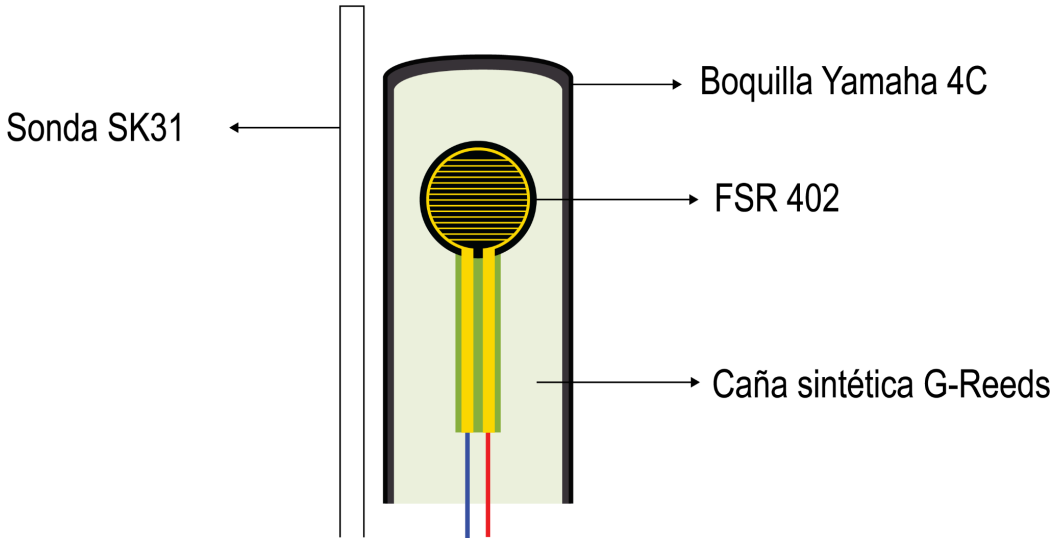


Figura 1: Esquema de la boquilla instrumentada utilizando una sonda y un sensor de fuerza, FSR 402 de Interlink Electronics.

Ambos sensores son amplificados, y luego convertidos utilizando un conversor analógico digital ADS1115 (Figura 2). Este se comunica vía el protocolo I2C con un Arduino, lo que permite registrar los valores obtenidos a través del sensor y controlar el modelo computacional del saxofón en tiempo real utilizando RealTimeAudioDiffEQ.jl en el lenguaje de programación Julia.

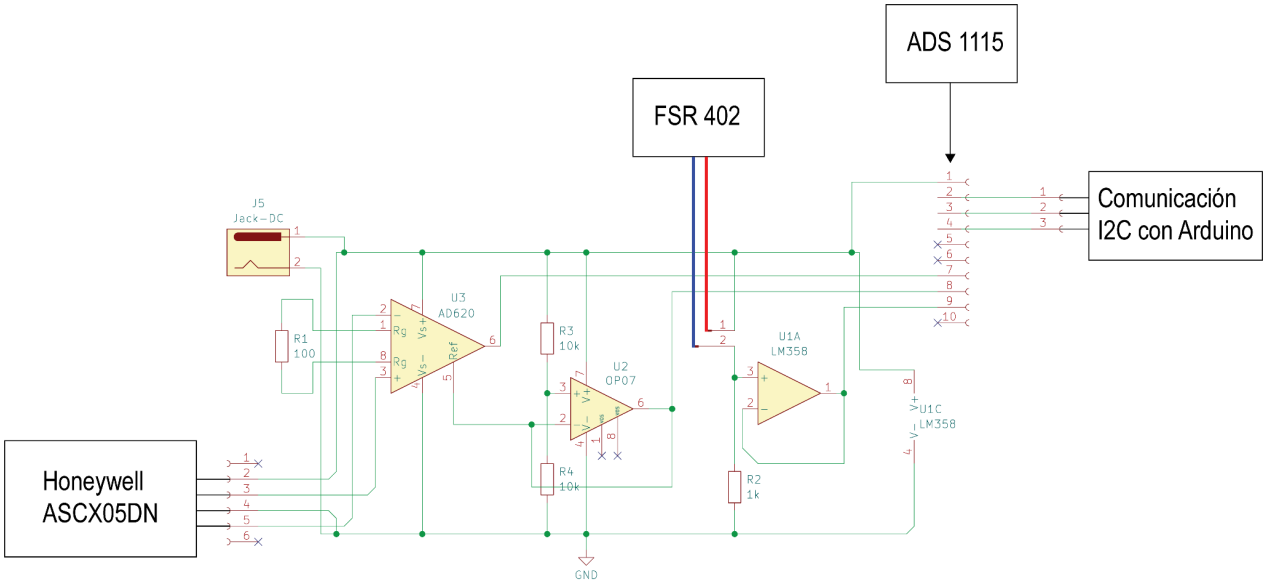


Figura 2: Circuito para la amplificación de los sensores de presión y fuerza, y su posterior conversión a valores digitales.

3. RESULTADOS

Se realizaron mediciones utilizando la boquilla instrumentada tocando un saxofón real y tocando el modelo del saxofón en tiempo real. Se observa una correlación en el gesto del salto de octava ascendente sin ligar al ejecutar el modelo (líneas sólidas) y al tocar con un saxofón real (líneas punteadas), para la digitación D# en el saxofón alto (Figura 3).

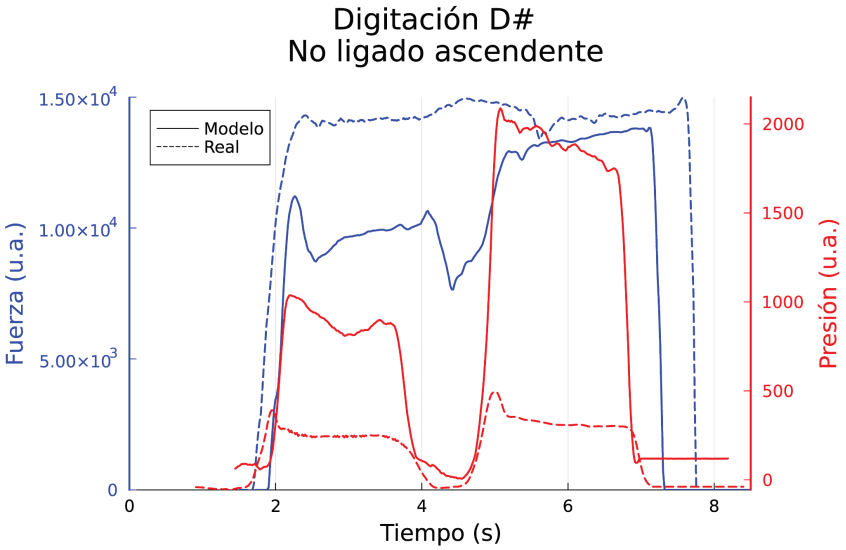


Figura 3: Valores adimensionales para el sensor de fuerza (azul, eje izquierdo) y el sensor de presión (rojo eje derecho) para el modelo del saxofón (líneas sólidas) y el saxofón real (líneas punteadas).

REFERENCIAS

[1] T. Colinot, C. Vergez, P. Guillemain, y J. B. Doc, “Multistability of saxophone oscillation regimes and its influence on sound production,” Acta Acustica, vol. 5, p. 33, 2021.

[2] J. Chabassier, A. Ernoult, O. Geber, A. Humeau, A. Thibault, R. Tournemenne, y T. Van Baarsel, “The virtual workshop OpenWiND,” en e-Forum Acusticum, 2020.

[3] P. Guillemain, C. Vergez, D. Ferrand, y A. Farcy, “An instrumented saxophone mouthpiece and its use to understand how an experienced musician plays,” Acta Acustica united with Acustica, vol. 96, no. 4, pp. 622–634, 2010.

[4] A. Almeida, W. Li, E. Schubert, J. Smith, y J. Wolfe, “Recording and analysing physical control variables used in clarinet playing: MIPCAT,” Frontiers in Signal Processing, vol. 3, 2023.

[5] A. Hofmann y W. Goebl, “Production and perception of legato, portato, and staccato in saxophone,” Frontiers in Psychology, vol. 5, 2014.

[6] M. Pàmies-Vilà, A. Hofmann, y V. Chatziioannou, “Analysis of Tonguing and Blowing Actions during Clarinet Performance,” Frontiers in Psychology, vol. 9, 2018.

[7] V. Chatziioannou y A. Hofmann, “Physics-Based Analysis of Articulatory Player Actions in Single-Reed Woodwinds,” Acta Acustica, vol. 101, no. 2, pp. 292–299, 2015.

[8] W. Li, A. Almeida, J. Smith, y J. Wolfe, “The effect of blowing pressure, lip force and tonguing on transients,” JASA, vol. 140, no. 2, pp. 1089–1100, 2016.

[9] G. P. Scavone, A. Lefebvre, y A. R. da Silva, “Measurement of vocal-tract influence during saxophone performance,” JASA, vol. 123, no. 4, pp. 2391–2400, 2008.

[10] G .M. Schmid. Evaluating the Experiential Quality of Musical Instruments. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.

[11] P. J. C. Reimer, A. Gupta, C. Guastavino, y M. M. Wanderley, “User experience with digital musical instruments,” Journal of New Music Research, 2023.

[12] P. E. Riera, M. Proscia, y M. C. Eguia, “A Comparative Study of Saxophone Multiphonics: Musical, Psychophysical and Spectral Analysis,” Journal of New Music Research, vol. 43, no. 2, pp. 202–213, 2014.

[13] M. Proscia, P. E. Riera, y M. C. Eguia, “A Timbral and Musical Performance Analysis of Saxophone Multiphonics Morphings,” en Proceedings of the 2017 International Symposium on Musical Acoustics (ISMA), 18–22 June, Montreal, Canada, 2017.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

DISTANCIAMIENTO FÍSICO Y SINCRONIZACIÓN: IMPACTO DE LA INFORMACIÓN VISUAL EN DÚOS DE GUITARRISTAS.

Acosta, A. D. [†,1]; Russell, N. G. [‡,2]; Lombera, E. N. [§,3]; Vergara, R. O. [†,4]; Calcagno, E. R. [⋆,5]

[†] Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo), Universidad Nacional de Quilmes (UNQ), CONICET, Bernal, Bs. As.

[‡] Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo), Universidad Nacional de Quilmes (UNQ), Bernal, Bs. As.

[§] Departamento de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), Sáenz Peña, Bs. As.

[⋆] Universidad Nacional de Quilmes (UNQ), CIC, Bernal, Bs. As., Universidad Argentina de la Empresa (UADE), CABA.

[1] aacosta29@uvq.edu.ar, [2] nrussell@uvq.edu.ar, [3] elombera@untref.edu.ar, [4] ramiro.vergara@unq.edu.ar, [5] ecalcagno@unq.edu.ar

Resumen

La interpretación musical grupal implica tanto cooperación como una coordinación compleja, donde la información visual cumple un rol clave. Este estudio analiza cómo la sincronización entre músicos populares se ve afectada por la presencia y ausencia de señales visuales así como por la duración de pasajes de silencio. Se evaluaron tres medidas: la asincronía en la primera entrada tras el silencio (*onsets*), el tiempo transcurrido hasta estabilizar la sincronización después de la primera entrada y el tempo estimado durante la ejecución respecto a un tempo sugerido. Veinte dúos de guitarristas de música popular, interpretaron material musical elemental con pasajes de diferentes silencios predefinidos. Los resultados muestran que la ausencia de información visual y la mayor duración del silencio aumentaron la asincronía de la primera entrada y el tiempo de estabilización, con menor efecto sobre el tempo. Además, estos efectos fueron modulados por el nivel de experiencia de los intérpretes. Los hallazgos contribuyen a comprender los mecanismos de sincronización musical y resaltan el papel de la información visual en la coordinación de músicos populares.

Palabras clave: Señales visuales, Músicos populares, Onset, Silencio.

Abstract

Group music-making involves both cooperation and complex coordination, where visual information plays a key role. This study examines how synchronization among popular musicians is affected by the availability of visual cues (with or without visual contact) and the duration of silent passages. Three measures were assessed: the asynchrony of the first onset after silence, the time required to stabilize synchronization following the first onset, and the tempo estimated during performance relative to a suggested tempo. Forty popular music guitarists performed in duos, playing elementary musical material with predefined passages of varying silence. The results show that the absence of visual information and longer silent passages increased first-onset asynchrony and stabilization time, with a smaller effect on tempo. Additionally, these effects were modulated by the performers' level of experience. The findings contribute to understanding the mechanisms underlying musical synchronization and highlight the role of visual information in coordinating popular musicians.

Keywords: Visual cues, Popular musicians, Onset, Silence.

1. INTRODUCCIÓN

La interpretación musical grupal requiere cooperación y coordinación entre músicos, incluyendo control del tempo, sincronización rítmica, dinámicas y entradas tras silencios [1]. La sincronización sensoriomotora permite alinear las acciones con los estímulos percibidos mediante procesos de anticipación, corrección y seguimiento de patrones de movimiento [2]. Los movimientos corporales de los músicos, como el balanceo e inclinaciones de cabeza, facilitan la coordinación temporal y expresiva a través de señales visuales [3], [4]. La sincronización en entradas tras silencios depende de señales auditivas y visuales para compensar variaciones en el tempo interno de cada músico [5], [6]. En la gran mayoría de grandes conjuntos de música formal y algunos ensambles de música popular, el director facilita la sincronización y cohesión mediante gestos corporales, faciales y contacto visual [7]-[9]. Sin embargo, en pequeños grupos sin director, como los ensambles de cámara [10] o de música popular [11], [12], los músicos tienden a depender de la interacción interpersonal para coordinar entradas, cambios de tempo y reentradas tras silencios. En este sentido, cuando las y los músicos están físicamente aislados y totalmente separados, lo que impide cualquier contacto visual directo, aumenta la dependencia de la información auditiva y dificulta momentos específicos de la performance como las reentradas y los cambios de tempo, entre otros [13]-[15]. Por lo tanto, este distanciamiento físico actúa como un modulador crítico de la coordinación grupal.

El presente estudio aborda cómo influye la información visual en contextos musicales informales, examinando su impacto en la coordinación de dúos de música popular sin liderazgo asignado. Investiga de qué manera la performance se ve afectada por la ausencia de señales visuales entre músicos acostumbrados a tocar en grupos sin director. Para responder esta pregunta, se diseñó una tarea musical simplificada para medir la asincronía del primer *onset* tras silencios, la estabilización de la sincronización y el tempo estimado a partir de un tempo sugerido, manipulando la información visual y los pasajes de silencio. Además, se examinó cómo el nivel de experiencia de los y las participantes moduló sobre el diseño descrito. Cuatro hipótesis guiaron el estudio: La presencia de señales visuales mejorará significativamente la sincronización de las entradas tras los silencios; facilitarán ajustes de tempo más precisos; reducirá el tiempo requerido para estabilizar la sincronización; y estos efectos serán modulados por la experiencia musical.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general:

Analizar el impacto de las señales visuales en la coordinación de músicos populares que actúan en conjuntos sin liderazgo formal, considerando la interacción entre la disponibilidad de información visual, la duración de los pasajes silenciosos y el nivel de experiencia de los intérpretes.

2.2 Objetivos específicos:

- Evaluar cómo la presencia y ausencia de información visual afecta la asincronía del primer *onset* tras un silencio.
- Determinar el efecto de las señales visuales sobre el tiempo necesario para estabilizar la sincronización después de la primera entrada.
- Examinar la influencia de la información visual en los ajustes de tempo durante la ejecución.
- Analizar de qué modo el nivel de experiencia modula a los efectos de la información visual y de la duración de los pasajes de silencio sobre las medidas de sincronización.

3. METODOLOGÍA

3.1 Participantes

Se incluyeron 40 guitarristas con distintos niveles de experiencia, divididos en dos grupos: con experiencia (WE) y sin experiencia (WoE), según años de formación formal, particular o práctica autodidacta. Los participantes señalaron tocar principalmente música popular. Cada guitarrista dentro del dúo fue denominado como GTR1 y GTR2.

3.2 Diseño experimental

Se manipularon dos variables independientes en un diseño de 4x2: condición visual *Together* (TC) donde los participantes podían verse; *Separated* (SC) donde no podían verse; y duración de pasajes de silencio entre repeticiones de una frase musical (SS: silencio corto, LS: largo, XLS: extra largo). Cada frase musical consistía en dos compases en 4/4 con notas corcheas, repetida cuatro veces, en el acorde de La. Se realizaron tres trials de cada situación por condición, y la secuencia tanto de de condiciones como situaciones fue aleatorizada.

3.3 Materiales y procedimiento

El experimento se realizó en el Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo). Los participantes tocaron usando auriculares para escuchar únicamente las guitarras, recibir instrucciones del operador y un conteo de dos compases de metrónomos antes de cada trial. No se proporcionó partitura, en búsqueda de replicar un contexto natural de ensayo y se les transfirió la secuencia musical de modo oral y práctico. En TC se les alentó a utilizar toda la información no verbal a disposición. En SC estuvieron separados por un panel acústico por lo que se les instruyó a no generar señales rítmicas corporales.

3.4 Extracción de datos y análisis estadístico

Se desarrollaron scripts en Python utilizando Essentia[1] [41] y Librosa[2] [42] para extraer *onsets* y tempo de cada grabación (ver Figura 1). Se verificó la precisión automática mediante muestreo manual. Se aplicaron modelos lineales y mixtos (LM y LMEM) para analizar efectos de condiciones visuales y silencios sobre *onsets* y tempo. También se ajustaron modelos exponenciales para estimar la estabilización de la sincronía después de cada silencio. Se excluyeron outliers mediante MAD. Los datos individuales anonimizados y los scripts, así como figuras y tablas, pueden ser vistos en este repositorio OSF .

[1] https://essentia.upf.edu/
[2] https://librosa.org/

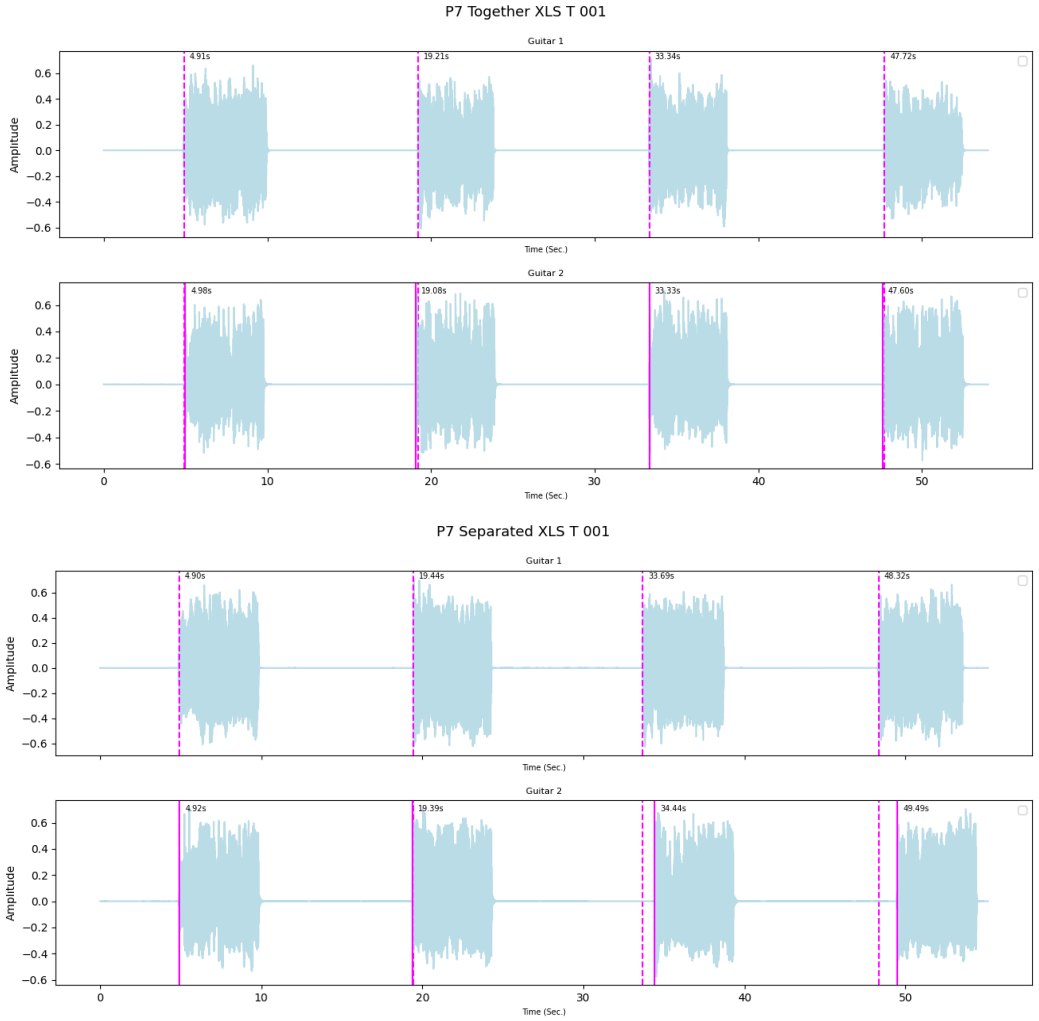


Figura 1. *Onsets* tras compases de silencio. Arriba TC. Abajo SC. *Onset* de GTR1: Línea punteada, *Onset* de GTR2: Línea solida

4. RESULTADOS

Se calcularon los promedios de las diferencias de onsets a lo largo de las ocho notas, considerando únicamente las secciones finales (ya que la primera incluía un metrónomo previo), a través de todas las situaciones (SS, LS y XSL) y condiciones (TC y SC) para obtener la media colapsada individual de cada dúo de guitarristas. Luego se calculó el umbral de estabilización para cada dúo según lo descrito en la sección de Análisis Estadístico. La Figura 2A presenta los puntos de datos colapsados para cada dúo a través de todas las situaciones y condiciones. Las líneas continuas representan el ajuste del modelo no lineal, mientras que las líneas discontinuas indican las asíntotas y el umbral de estabilización. Se realizó un modelo de efectos mixtos para analizar el umbral de estabilización como función de la condición (TC, SC) y situación (SS, LS, XSL), incluyendo un intercepto aleatorio para cada dúo con el fin de considerar la variabilidad interindividual. El análisis de efectos mixtos reveló que tanto la condición como la situación influyeron en el umbral de estabilización. La ANOVA Tipo III mostró un efecto principal significativo de la condición ($F(1,71.3) = 25.25$, $p < 0.001$) y de la situación ($F(2,68.5) = 5.93$, $p = 0.004$), indicando que la complejidad de la tarea modula el umbral de estabilización. Aunque la interacción general entre condición y situación no alcanzó significancia ($p = 0.064$), un contraste específico del análisis de efectos fijos reveló que el umbral de estabilización fue significativamente mayor en la condición Separated–XSL en comparación con el nivel de referencia

(p = 0.043), sugiriendo que el efecto de separación se volvió más pronunciado en la situación más compleja.

Se promediaron las diferencias entre los primeros onsets tras los silencios a través de todas las situaciones (SS, LS y XLS) para obtener la media colapsada individual de cada dúo bajo cada condición. En la Figura 2B se muestran los puntos de datos individuales para cada dúo bajo cada condición junto con la media y el error estándar (SEM). Se observó una diferencia de onset menor cuando los dúos podían verse (TC: M = 86 ms, IC 95% = [49; 123] ms) en comparación con cuando estaban separados (SC: M = 243 ms, IC 95% = [155; 332] ms). Para tener en cuenta la variabilidad en el desempeño basal entre los pares, las diferencias de onset se convirtieron a valores porcentuales antes del ajuste del modelo. Tras ajustar un modelo lineal con la condición como efecto fijo, se confirmó que los participantes mostraron diferencias significativamente menores cuando podían verse en comparación con cuando estaban separados (β = 15.7%, IC 95% = [10.6; 20.9]%, prueba de efectos fijos: $F(1,32) = 38.75$, $p < 0.001$). En la Figura 2C se presentan las diferencias de onset tras los silencios en función de las situaciones para ambas condiciones. Se observó que, a medida que los períodos de silencio aumentaban, la diferencia de onset entre cada dúo de guitarristas se mantuvo constante cuando podían verse (TC). En contraste, cuando no podían verse (condición separada), esta diferencia aumentó a medida que creció la duración del silencio. Para cuantificar estas relaciones, se ajustó un modelo lineal de efectos mixtos (LMEM) con condición y situación como efectos fijos e interceptos y pendientes aleatorias para cada dúo. Tanto las estimaciones de los parámetros como los valores p indican que la pendiente es responsable de las diferencias encontradas entre condiciones (pendiente = 7.7, IC 95% = [-26.3; 41.7] para TC, y pendiente = 104.5, IC 95% = [24.5; 184.7] para SC). La interacción de segundo orden (condición*situación) fue de 96.8 (IC 95% = [50.8, 143]), y su efecto asociado es estadísticamente significativo (prueba de efectos fijos: $F(1,72) = 17.44$, $p = 0.003$).

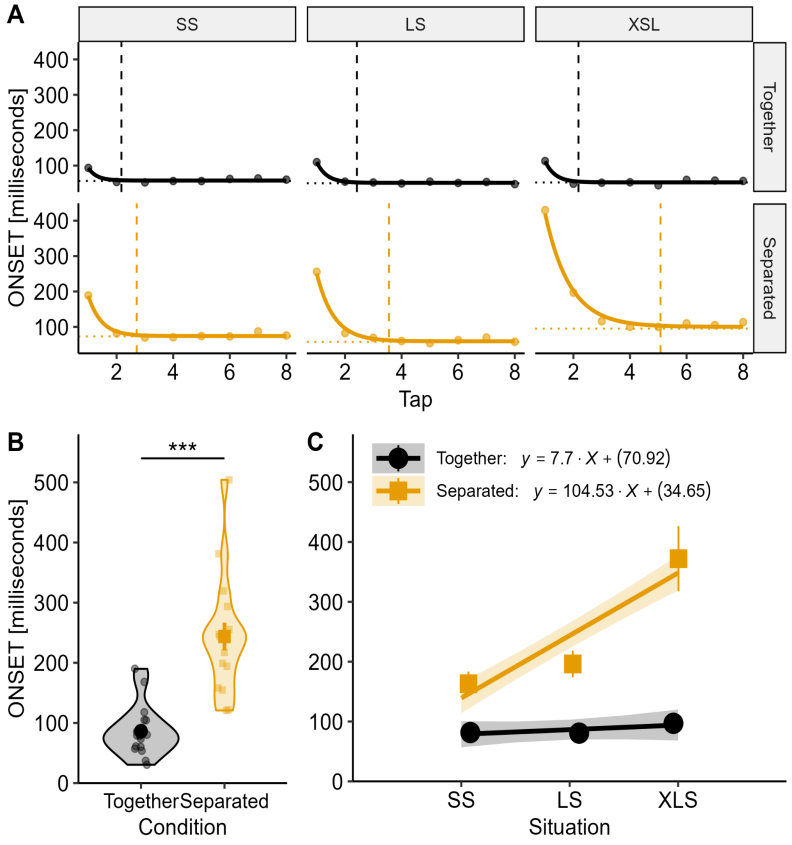


Figura 2. Promedios de diferencias de onsets. 2A: Por umbral de estabilización colapsado a través de situaciones. 2B: Por condición. 2C: Por condición y situación.

Se calcularon los promedios de las diferencias de BPM a través de todas las situaciones (WS, SS, LS y XLS) para obtener la media colapsada individual de cada dúo bajo cada condición. En la Figura 3A se muestran los puntos de datos individuales para cada dúo bajo cada condición, junto con la media y el error estándar (SEM). No se observaron diferencias significativas para TC (TC: M = 87.4, IC 95% = [85; 89.9]) en comparación con cuando estaban separados (SC: M = 87.2, IC 95% = [84.8; 89.7]%). Tras ajustar un modelo lineal con la condición como efecto fijo, se confirmó que los participantes no mostraron diferencias significativas en el tempo entre ambas condición (β = 0.2%, IC 95% = [3.2; 3.6]%, prueba de efectos fijos: F(1,38) = 0.013, p = 0.91). En la Figura 3B se presentan las diferencias de BPM en función de las situaciones para ambas condiciones. No se observaron variaciones entre las situaciones a medida que aumentaba el número de compases de silencio en ambas condiciones. Para cuantificar estas relaciones, se ajustó un modelo lineal de efectos mixtos (LMEM) con condiciones y situaciones como efectos fijos e interceptos y pendientes aleatorias para cada dúo. Tanto las estimaciones de parámetros como los valores p indican que ni la pendiente ni la interacción mostraron diferencias significativas entre condiciones (condición: prueba de efectos fijos, F(1,97) = 2.34, p = 0.12; situación: prueba de efectos fijos, F(1,65) = 1.85, p = 0.17). La interacción entre situación y condición no fue estadísticamente significativa (F(1,115.2) = 3.61, p = 0.060). Estos hallazgos sugieren que no se observó una modulación clara de las diferencias de BPM en función de la situación o la condición en la muestra actual.

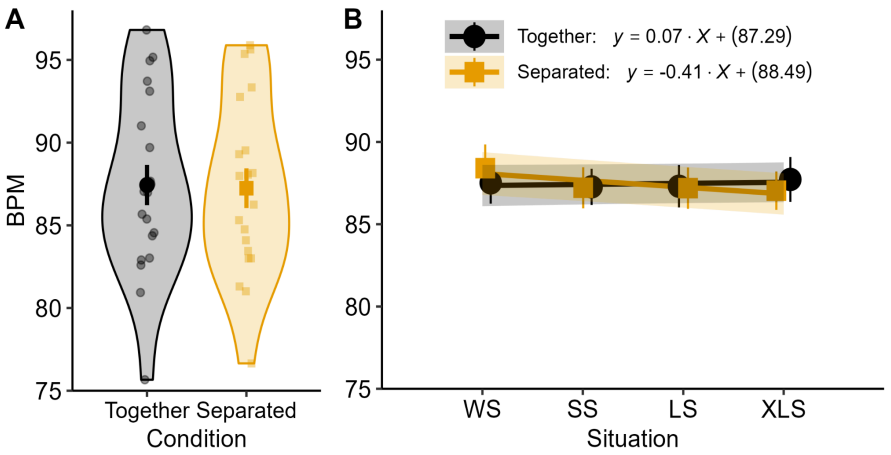


Figura 3. Promedio de tempo de dúos. 3A: por condición. 3B: Por condición y situación.

Para investigar más a fondo el papel de la experiencia musical en la tarea de sincronización, se realizó una prueba de Mann-Whitney U (Wilcoxon rank sum test) para comparar la estabilidad de la sincronización (umbral de estabilización) entre los dúos Con Experiencia (WE) y Sin Experiencia (WoE) dentro de cada condición. Esta prueba no paramétrica se eligió porque no asume normalidad y es robusta ante posibles desviaciones de distribuciones gaussianas. Los resultados no revelaron diferencias significativas entre WE y WoE en la condición TC (W = 321, p = 0.5385), lo que indica que la experiencia musical no impacta la estabilidad cuando se interpreta presencialmente. Sin embargo, en la condición SC se encontró una diferencia significativa (W = 390, p = 0.04593), lo que

sugiere que los dúos con mayor experiencia musical lograron una sincronización más estable. Estos resultados se ilustran en la Figura 4A, donde se muestran los valores del umbral de estabilización por separado para WE y WoE, siguiendo los mismos procedimientos utilizados en el análisis de la Figura 2A. Se realizó además un análisis para comprender si la experiencia musical de cada dúo influye en las magnitudes del primer onset después del silencio y en el tempo para ambas condiciones. Para ello se agregó el factor de experiencia musical en el análisis. Se promediaron las diferencias de onset y tempo a través de las situaciones para obtener la media individual colapsada de cada dúo bajo cada condición y nivel de experiencia. En la Figura 4 se presentan los puntos de datos individuales (onset: Figura 4B, tempo: Figura 4C) de cada dúo bajo cada condición y nivel de experiencia, junto con la media y el error estándar (SEM). Tras ajustar un modelo lineal con condición y experiencia musical como efectos fijos, se observó que los dúos con mayor experiencia musical exhibieron diferencias menores en onset y tempo entre condiciones, con onset ($\beta = 9.4$ %, IC 95 % = \[0.7; 18] %, prueba de efectos fijos: $F(1,28) = 5.11$, $p < 0.03$) y tempo ($\beta = 4.6$ %, IC 95 % = \[1.9; 9.4] %, prueba de efectos fijos: $F(1,30) = 8.38$, $p < 0.001$). En el análisis de tempo no se observaron otras diferencias significativas, lo que indica que la experiencia musical del dúo no moduló TC y SC. Por el contrario, esta diferencia es significativa en el análisis de onset (pendiente = 0 ms, IC 95 % = \[-60; 60] ms para TC, y pendiente = 94.1 ms, IC 95 % = \[8; 180] ms para SC), lo que sugiere que los dúos con experiencia musical muestran un desempeño significativamente mejor en esta variable.

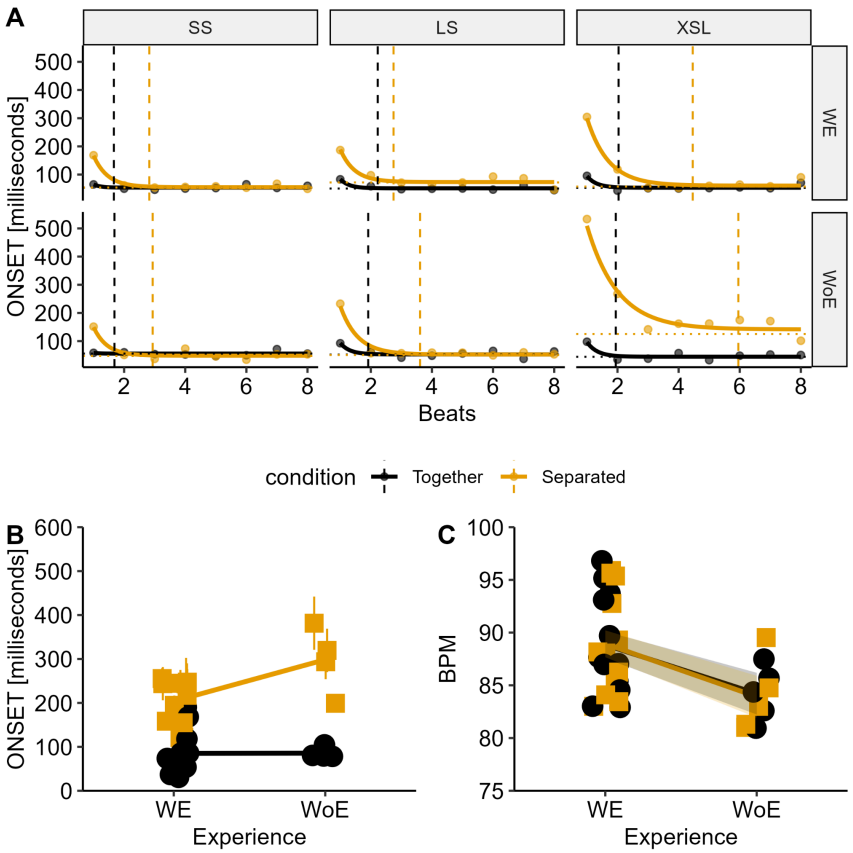


Figura 4. Promedios según experiencia. 2A: Por umbral de estabilización colapsado a través de situaciones. 2B: Por condición. 2C: Por condición y situación.

5. DISCUSIÓN

Este estudio examinó cómo las condiciones visuales influyen en la sincronía del primer ataque tras silencios, el tiempo necesario para estabilizar la sincronización y el tempo estimado en dúos de guitarristas de música popular con distintos niveles de experiencia. Se analizó la presencia o ausencia de contacto visual en la interpretación de una frase musical, un contexto relevante en géneros donde no suele haber partituras ni directores y donde la improvisación demanda coordinación flexible y espontánea.

Los resultados mostraron que, en la condición separada (SC), la falta de visión incrementó significativamente la asincronía del primer onset después del silencio frente a la condición juntos (TC) (Figura 2B), con una relación lineal entre la duración del silencio y la asincronía: cerca de 100 ms en silencios breves y más de 300 ms en los extra-largos (Figura 2C). En TC, la asincronía no dependió de la duración. La estabilización tras el silencio (ocho pulsos posteriores) alcanzó un umbral de ≈2 pulsos en TC (WS = 1.81, LS = 1.95, XLS = 2.17), con asincronía estable cercana a 51 ms. En SC, el umbral se retrasó a 2.75, 2.97 y 4.65 pulsos (WS, LS, XLS), superando en XLS la precisión de TC y coincidiendo con Konvalinka et al. 2010 (≈6 pulsos). En XLS sin visión, la asincronía media permaneció elevada.

Estos valores concuerdan con estudios previos: Bishop & Goebl [16], hallaron <40 ms en dúos de violín y ≈60 ms en piano; Kawase [14], reportó ≈50 ms con visión y >150 ms sin visión; D'Amario *et al.* [17] encontraron 64.2 ms vs 113.4 ms; Levine [18], informó 76–90 ms con visión y hasta 362 ms sin visión. Tales datos confirman la relevancia de la señal visual para mantener asincronías <100 ms, umbral ligado a la percepción de latencia [19]-[24].

El contacto visual no modificó la percepción de la duración de los silencios, a diferencia de Kawase [14], posiblemente por diferencias metodológicas. Tampoco alteró el tempo global: el promedio fue 87.4 bpm en TC y 87.2 bpm en SC (Fig.3A-B), sin diferencias significativas ($F(1,38)=0.013$, $p=0.91$). La estabilidad del tempo se mantuvo sólo con información auditiva, encontrándose en línea con varios estudios [6], [9], [25]-[28]. Se observó además una tendencia general a tocar por debajo de los 100 bpm sugeridos, probablemente asociada al "spontaneous motor tempo" estudiado por Desbernats *et al.*, [29] y no a falta de precisión, contrariamente al "joint rushing" descrito por Wolf *et al.*, [30]. En relación a la disminución del tempo, estudios previos muestran comportamientos similares [31], [32], aunque otros evidencian un mantenimiento del tempo sugerido [33], [34].

La experiencia musical moduló fuertemente los resultados. En SC, los dúos sin experiencia (WoE) presentaron mayor asincronía inicial que los experimentados (WE) (Figura 4B) y una disminución de tempo más marcada (Figura 4C). Tras silencios extra-largos, WoE mantuvo una asincronía media de 125 ms frente a 57.4 ms de WE (Figura 4A). Estos hallazgos evidencian que la mayor experiencia reduce la variabilidad y mejora la capacidad de re-sincronización en contextos sin señales visuales o con silencios prolongados, lo cual es coherentes con diversos trabajos que han abordado la experiencia en función de la sincronización [35]-[39].

En conjunto, los datos indican que la visión es crítica para limitar la asincronía del primer ataque a niveles musicalmente aceptables y que la experiencia musical potencia la recuperación de la sincronización cuando la información visual está ausente o las pausas son extensas.

6. CONCLUSIÓN

En este estudio, se evidenció que la falta de información visual afecta principalmente al primer onset que sigue a los silencios, mostrando una relación lineal entre la duración del silencio y la diferencia del valor del primer onset. Sin embargo, los resultados indican que la visión no influye significativamente ni en el tempo ni en los períodos estables durante la ejecución musical. No obstante, estos hallazgos sugieren que la información visual es crucial en situaciones donde ocurren cambios significativos en la pieza musical, como los silencios. Una vez superados estos momentos críticos, los músicos pueden mantener una interpretación estable únicamente mediante la interacción auditiva. Los resultados obtenidos podrían tener relevancia práctica en el diseño de aplicaciones para ensayos remotos, como las plataformas de interpretación musical en línea, por ejemplo, Ságora[3] [40], que permite a los músicos conectarse a través de Internet y lograr transmisiones de audio de baja latencia. Sin embargo, la diferencia de latencia entre audio y video sigue siendo considerable, lo que limita la posibilidad de contar con un entorno visual que proporcione información adicional útil para la sincronización. Creemos que esta limitación podría superarse mediante el uso estratégico de información visual mínima, como luces o gráficos virtuales, que podría mejorar la interacción entre músicos en entornos remotos. A través de este trabajo, buscamos avanzar en la comprensión de cómo distintos niveles de acceso visual en diversas situaciones de ensayo pueden influir en la interpretación musical, contribuyendo así al desarrollo de herramientas que optimicen la coordinación en entornos virtuales y de colaboración a distancia.

[3] https://sagora.org/

7. REFERENCIAS

[1] HEGGLI, O. A., CABRAL, J., KONVALINKA, I., VUUST, P., & KRINGELBACH, M. L. (2019). A Kuramoto model of self-other integration across interpersonal synchronization strategies. *PLoS Computational Biology*, 15(10), e1007422.

[2] COLLEY, I. D., VARLET, M., MACRITCHIE, J., & KELLER, P. E. (2018). The influence of visual cues on temporal anticipation and movement synchronization with musical sequences. *Acta Psychologica, 191,* 190–200.

[3] BISHOP, L., CANCINO-CHACÓN, C., & GOEBL, W. (2019a). Moving to communicate, moving to interact: Patterns of body motion in musical duo performance. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal, 37*(1), 1–25. https://doi.org/10.1525/mp.2019.37.1.1

[4] YAMAZAKI, R., & USHIYAMA, J. (2024). Head movements induced by voluntary neck flexion stabilize sensorimotor synchronization of the finger to syncopated auditory rhythms. *Frontiers in Psychology, 15*, 1335050.

[5] KELLER, P. E., NOVEMBRE, G., & HOVE, M. J. (2014). Rhythm in joint action: Psychological and neurophysiological mechanisms for real-time interpersonal coordination. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 369* (1658), 20130394.

[6] BISHOP, L., & GOEBL, W. (2015). When they listen and when they watch: Pianists' use of nonverbal audio and visual cues during duet performance. *Musicae Scientiae, 19*(1), 84–110. https://doi.org/10.1177/1029864915570355

[7] FREDRICKSON, W. E. (1992). Research on eye contact with implications for the conductor: A review of literature. Update: *Applications of Research in Music Education, 11*(1), 25-31.

[8] CHANG, A., LIVINGSTONE, S. R., BOSNYAK, D. J., & TRAINOR, L. J. (2017). Body sway reflects leadership in joint music performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114*(21), E4134–E4141.

[9] COLLEY, I., VARLET, M., MACRITCHIE, J., & KELLER, P. E. (2020). The influence of a conductor and co-performer on auditory-motor synchronization, temporal prediction, and ancillary entrainment in a musical drumming task. *Human Movement Science, 72*, 102653.

[10] GALIANO PÉREZ, J. (2016). *Aprendizaje de la comunicación no verbal en la música de cámara* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia]. *e-Spacio*. https://e-spacio.uned.es/entities/publication/015bd6f2-e80a-4c99-82e1-80f8864abc30

[11] KAWASE, S. (2009). *An exploratory study of gazing behavior during live performance* [Tesis]. https://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-2009411266

[12] ALIMENTI BEL, D. (2023). El gesto y el sonido en la comunicación musical de un dúo de tango. En *I Congreso de Psicología de la Música y Cognición Musical (1er CIPMUS)*, 118–127. Universidad Nacional de La Plata. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/165293

[13] GOEBL, W., & PALMER, C. (2009). Synchronization of timing and motion among performing musicians. *Music Perception, 26*(5), 427-438. https://doi.org/10.1525/mp.2009.26.5.427

[14] KAWASE, S. (2014). Gazing behavior and coordination during piano duo performance. *Atten Percept Psychophys*, 76, 527–540. https://doi.org/10.3758/s13414-013-0568-0

[15] FULFORD, C., HOPKINS, G., SEIFFERT, J., & GINSBORG, J. (2018). Reciprocal auditory attenuation affects looking behaviour and playing level but not ensemble synchrony: A psychoacoustical study of violin duos. *Musicae Scientiae*. https://doi.org/10.1177/1029864918785941

[16] BISHOP, L., & GOEBL, W. (2018). Beating time: How ensemble musicians' cueing gestures communicate beat position and tempo. *Psychology of Music, 46*(1), 84–106. https://doi.org/10.1177/0305735617702971

[17] D'AMARIO, S., DAFFERN, H., & BAILES, F. (2018). Synchronization in singing duo performances: The roles of visual contact and leadership instruction. *Frontiers in Psychology, 9*, 1208. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01208

[18] LEVINE, M. F. (2010). *Copresence and coordination in jazz musicians' collaborative music-making* [Tesis doctoral, New School University]. *ProQuest Dissertations & Theses*. 3403447.

[19] SCHUETT, N. (2002). *The Effects of Latency on Ensemble Performance* [Tesis de maestría, Stanford University].

[20] CHEW, E., ZIMMERMANN, R., SAWCHUK, A. A., KYRIAKAKIS, C., PAPADOPOULOS, C., FRANÇOIS, A. R. J., & VOLK, A. (2004). Musical interaction at a distance: Distributed immersive performance. En *Proceedings of the MusicNetwork Fourth Open Workshop on Integration of Music in Multimedia Applications* (pp. 15–16). MusicNetwork.

[21] CHAFE, C., CACERES, J. P., & GUREVICH, M. (2010). Effect of temporal separation on synchronization in rhythmic performance. *Perception, 39*(7), 982–992.

[22] FARNER, S., SOLVANG, A., SÆBO, A., & SVENSSON, U. P. (2009). Ensemble hand-clapping experiments under the influence of delay and various acoustic environments. *Journal of the Audio Engineering Society, 57*(12), 1028-1041.

[23] HORIUCHI, Y., MITSUI, S., IMIYA, A., & ICHIKAWA, A. (1996). Recording performances by two players and its analysis. In *IEICE Technical Report 96 (pp. 21-26). Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers*.

[24] BARTLETTE, C., HEADLAM, D., BOCKO, M., & VELIKIC, G. (2006). Effect of network latency on interactive musical performance. *Music Perception, 24*(1), 49–62. https://doi.org/10.1525/mp.2006.24.1.49

[25] PALMER, C., SPIDLE, F., KOOPMANS, E., & SCHUBERT, P. (2019). Ears, heads, and eyes: When singers synchronise. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 72*(9), 2272-2287.

[26] ITO, K., WATANABE, T., HORINOUCHI, T., MATSUMOTO, T., YUNOKI, K., ISHIDA, H., & KIRIMOTO, H. (2023). Higher synchronization stability with piano experience: Relationship with finger and presentation modality. *Journal of Physiological Anthropology, 42*(1), 10.

[27] KELLER, P. E., & APPEL, M. (2010). Individual differences, auditory imagery, and the coordination of body movements and sounds in musical ensembles. *Music Perception, 28*(1), 27-46.

[28] REPP, B. H. (2003). Rate limits in sensorimotor synchronization with auditory and visual sequences: The synchronization threshold and the benefits and costs of interval subdivision. *Journal of Motor Behavior, 35*, 355–370.

[29] DESBERNATS, A., MARTIN, E., & TALLET, J. (2023). Which factors modulate spontaneous motor tempo? A systematic review of the literature. *Frontiers in Psychology, 14*, 1161052.

[30] WOLF, T., VESPER, C., SEBANZ, N., KELLER, P. E., & KNOBLICH, G. (2019). Combining phase advancement and period correction explains rushing during joint rhythmic activities. *Scientific Reports, 9*(1), 9350.

[31] RASCH, R. A. (1988). Timing and synchronization in ensemble performance.

[32] HAMMERSCHMIDT, D., WÖLLNER, C., LONDON, J., & BURGER, B. (2021). Disco time: The relationship between perceived duration and tempo in music. *Music & Science, 4*. https://doi.org/10.1177/2059204320986384

[33] REPP, B. H., & KELLER, P. E. (2008). Sensorimotor synchronization with adaptively timed sequences. *Human Movement Science, 27*(3), 423-456.

[34] VIGL, J., KOEHLER, F., & HENNING, H. (2024). Exploring the accuracy of musical tempo memory: The effects of reproduction method, reference tempo, and musical expertise. *Memory & Cognition, 52*, 1299–1312. https://doi.org/10.3758/s13421-024-01543-6

[35] DRAKE, C., & PALMER, C. (2000). Skill acquisition in music performance: relations between planning and temporal control. *Cognition, 74*(1), 1-32.

[36] VIBELL, J., LIM, A., & SINNETT, S. (2021). Temporal perception and attention in trained musicians. Music Perception: *An Interdisciplinary Journal, 38*(3), 293-312. https://doi.org/10.1525/mp.2021.38.3.293

[37] LOEHR, J. D., LARGE, E. W., & PALMER, C. (2011). Temporal coordination and adaptation to rate change in music performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 37*(4), 1292.

[38] PECENKA, N., & KELLER, P. E. (2009). Auditory pitch imagery and its relationship to musical synchronization. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 282–286. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04785.x

[39] REPP, B. H., LONDON, J., & KELLER, P. E. (2012). Systematic distortions in musicians' reproduction of cyclic three-interval rhythms. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal, 30*(3), 291-305.

[40] ROMERO MASCARÓ, D., & CALCAGNO, E. (2020). SÁGORA: *Software libre para ensayos musicales en tiempo real.* Universidad Nacional de Quilmes. https://www.sagora.org

[41] BOGDANOV, D., WACK, N., GÓMEZ GUTIÉRREZ, E., GULATI, S., BOYER, H., MAYOR, O., & SERRA, X. (2013). Essentia: An audio analysis library for music information retrieval. En A. Britto, F. Gouyon, & S. Dixon (Eds.), *14th Conference of the International Society for Music Information Retrieval (ISMIR); 2013 Nov 4-8; Curitiba, Brazil* (pp. 493–498). ISMIR.

[42] MCFEE, B., MCVICAR, M., RAFFEL, C., LIANG, D., NIETO, O., MOORE, J., ELLIS, D., REPETTO, D., VIKTORIN, P., SANTOS, J. F., & HOLOVATY, A. (2015). *Librosa: v0.4.0* [Software]. *Zenodo*. https://doi.org/10.5281/zenodo.18369

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Percepción espectromorfológica de materiales sonoros en entornos acústicos simulados para composiciones para sitio específico (AdAA2025)

Echarren, Ariel.[†,1]; Accolti, Ernesto. [‡,2];

[†] Instituto Superior de Música, UNL, Santa Fe

‡ Instituto de Automática, UNSJ-CONICET, San Juan

[1] aecharren@ism.unl.edu.ar, [2] eaccolti@inaut.unsj.edu.ar,

Resumen Entendemos por música para sitio específico a aquellas creaciones que, desde su origen, consideran las particularidades topológicas del espacio, su carga simbólica y los diferentes vínculos con las fuentes sonoras y el público. Aunque es común que los compositores incorporen al espacio como variable compositiva, persiste una vacancia en torno a la relación entre las propiedades acústicas de los recintos y la percepción espectromorfológica de los materiales sonoros que conforman la obra. Con el fin de contribuir en describir estos efectos, el presente trabajo presenta simulaciones auditivas mediante el software RAVEN —basado en trazado de rayos sonoros— a partir de un objeto sonoro que contiene un variado rango de fuerza de fluctuación, inmerso en modelos correspondientes a tres recintos reales. El objetivo es observar la transformación de lo cualitativo en función de lo cuantitativo a partir del modelado psicoacústico de los materiales componentes de la textura musical. Este enfoque propone una alternativa metodológica para compositores mediante un estudio de laboratorio que evalúe los materiales sonoros antes del despliegue de la instalación en el sitio real.

Palabras clave: acústica arquitectónica, percepción sonora, espectromorfología, música para sitio específico, simulación binaural.

Abstract We understand site-specific music as creations that, from their inception, consider the topological particularities of space, its symbolic significance, and the different connections between sound sources and the audience. Although it is common for composers to incorporate space as a compositional variable, a gap persists regarding the relationship between the acoustic properties of rooms and the spectromorphological perception of the sound materials that constitute the music. To contribute to describing these effects, this work presents auditory simulations using RAVEN software —based on acoustic ray tracing— on a sound object containing a wide range of fluctuation strength, embedded in models corresponding to three real rooms. The objective is to observe the transformation of the quantitative aspects into qualitative ones through psychoacoustic modeling of the materials that compose the musical texture. This approach proposes a methodological alternative for composers through a laboratory study that evaluates the sound materials before their deployment in the actual site.

Palabras clave: room acoustics, sound perception, spectromorphology, site-specific music, binaural simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo busca ampliar las herramientas compositivas a partir de analizar el parámetro psicoacústico fuerza de fluctuación en ambientes sonoros simulados. El paradigma de trabajo se sitúa en la intersección entre arte, ciencia y tecnología, entendidas como instancias interdependientes dentro de un circuito creativo en el que cada una cumple un rol específico.

Neri Oxman [1] propone que la ciencia, mediante la observación y el registro, produce conocimiento; la ingeniería lo traduce en utilidad aplicada; el diseño lo incorpora como comportamiento cotidiano; y el arte, finalmente, toma esa experiencia y produce nueva información culturalmente sensible y

accesible capaz de inspirar nueva investigación científica. De este modo, el arte funciona como mediador y lenguaje fundamental en la transmisión de conocimiento, haciendo visible y experienciable aquello que, de otro modo, permanecería oculto. A este ciclo, Neri Oxman lo llama "Krebs Cycle of Creativity", inspirado en el ciclo metabólico celular, pero aplicado a la energía creativa. La investigación que aquí se presenta busca expandir los límites de la percepción humana a través del estudio de fenómenos físicos y sonoros, donde el artista es concebido como un navegante de mundos, capaz de entrelazar disciplinas y devolverlas en experiencias estéticas. Una de las preguntas que guía el trabajo es: ¿dónde se encuentra la sustancia musical? Frente a la tradición pedagógica centrada en alturas y duraciones, se plantea la relevancia de dimensiones habitualmente marginalizadas, como el timbre y la espacialidad.

El compositor argentino Dante Grel H. [2] ha conceptualizado como "discurso matérico" a las músicas que se enfocaron en la sustancia sonora misma en contraste con el paradigma sintáctico predominante, reconociendo a Debussy como un pionero de este planteo. Dicho en palabras del compositor: "En los discursos matéricos, la materia sonora no es moldeada para responder a relaciones abstractas (notas discretas, acordes, funciones tonales), sino que se erige como protagonista de la obra". Esta perspectiva adapta la noción de "objetos sonoros" propuesta por Pierre Schaeffer [3], entendiéndolos como unidades básicas de la experiencia musical, pasibles de ser transformadas durante el proceso compositivo. A ello se suma el marco de la espectromorfología [4] [5], que provee categorías para describir procesos sonoros en sus dimensiones espectrales y temporales, constituyendo una herramienta analítica y compositiva fundamental. Estos aportes permiten articular una construcción de sentido protagonizada por la materia sonora, enriquecida con atributos perceptivos del timbre y espaciales, vinculados a la experiencia de escucha.

El trabajo aborda el estudio del campo acústico desde una perspectiva crítica y descolonial. Se cuestiona la centralidad de los formatos escénicos institucionalizados y se propone la exploración de espacios no convencionales como territorios legítimos de expresión. La noción de "música para sitio específico", retomando los aportes de Liut, Corrado, Xenakis y Barber [6], enfatiza la integralidad de la relación entre espacio, carga simbólica y comunidad, así como la interacción entre obra, fuentes y campo acústico. En estas prácticas, el espacio deviene en una variable compositiva estructural: la obra no puede desligarse del lugar en el que se interpreta, dado que allí radica su identidad. Para ello, el diagnóstico acústico y las mediciones de parámetros como tiempo de reverberación (TR) y claridad (C80), resultan esenciales. La calidad acústica se entiende como vínculo entre fenómenos físicos y percepciones subjetivas, lo cual habilita modelos de predicción que permiten validar a los materiales sonoros antes de su instalación en el sitio real.

En este marco, se introduce la fuerza de fluctuación [7] como parámetro psicoacústico relevante. Esta describe la intensidad perceptual de variaciones lentas en amplitud o frecuencia, estrechamente asociadas con el habla y con mecanismos auditivos de segregación de fuentes. La investigación propone considerarla como un nivel de abstracción capaz de caracterizar procesos musicales desde el punto de vista de la psicoacústica, complementando las tipologías de la espectromorfología. De esta forma, se plantea que definir lo musical como una red de fluctuaciones abre un camino fértil para el análisis y el diseño experimental, especialmente en relación al sitio específico.

Finalmente, se desarrolla el concepto de materiales musicales ampliados. Mientras los estudios previos [8] [9] se han enfocado en cómo los recintos modelan globalmente las obras, esta investigación busca precisar cuánto se transforman los parámetros sonoros de distintas categorías de materiales en función de su propagación en espacios específicos. Para ello se utiliza el software de auralización RAVEN, que permite incorporar virtualmente la respuesta sonora de una sala simulada usando tanto su geometría y las propiedades acústicas de sus materiales, como la ubicación y orientación de fuentes sonoras y receptores. Este abordaje posibilita experimentar con la interacción entre material, fuente y campo acústico en entornos controlados, habilitando tanto el análisis cuantitativo como la exploración estética.

En síntesis, el trabajo articula un recorrido que parte de la concepción del arte como mediador de conocimiento, transita por la centralidad de la materia sonora en el discurso musical, incorpora marcos analíticos y perceptivos contemporáneos, y se proyecta hacia la experimentación en espacios no convencionales mediante modelos físicos acústicos y simulaciones. El resultado es una propuesta que entiende al arte sonoro-musical como un campo expandido en el que convergen ciencia, tecnología y estética, con el objetivo de ampliar las posibilidades de percepción y creación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se generó un objeto sonoro de 30 segundos de duración, compuesto por un complejo sostenido, de timbre inarmónico y modulado en amplitud. La muestra se importó como fuente sonora dentro en tres recintos simulados para obtener las respectivas señales binaurales. Por último se comparó la fuerza de fluctuación percibida de las tres simulaciones respecto de la muestra.

2.1 Sobre los objetos sonoros

El marco teórico del cual surge el material sonoro como objeto de estudio, es el de la espectromorfología. A partir de este enfoque se establecen categorías y definiciones de material musical, de las cuales se derivan parámetros del sonido susceptibles de ser medidos cuantitativamente. Esto permite definir las cualidades del material sonoro a considerar, con el fin de desarrollarlas, simularlas y evaluarlas de manera sistemática.

A modo de material inicial se compuso un objeto sonoro monofónico de 30 segundos de duración, de espectro inarmónico, con balance espectral selectivo, más bien brillante, y una modulación de amplitud con frecuencia creciente desde f_{mod} = 0,25 Hz hasta f_{mod} = 32 Hz, con una profundidad de modulación máxima durante todo el barrido. El diseño del timbre está compuesto por un complejo de 10 ondas senoidales dispuestas en forma inarmónica (ninguna frecuencia es múltiplo entero de la fundamental) y con una envolvente espectral que prioriza el balance de bajos-medios-agudos, según

$$x = 0,5\,(1 + sin(2\pi f_{mod}\, t)\sum_{i=1}^{10} a_i sin(2\pi f_i\, t), \qquad (1)$$

donde los valores de a_i y f_i se dan en la Tabla A.1 del **apéndice A**.

La Figura 1 muestra un espectrograma de x, donde se puede observar la frecuencia de los parciales y la envolvente espectral. La curva de aceleración de la frecuencia de modulación se ajustó para pasar por 4 Hz en la mitad de la muestra (t = 15 s), ya que se prevé justo en esta zona el pico de fuerza de fluctuación. Las 4 fluctuaciones por segundo de esta zona pico equivale a la duración de la corchea en un tempo de 120 pulsos por minuto.

2.2 Los recintos

En cuanto al criterio de selección de los recintos, se intentó reunir un grupo heterogéneo, de características acústicas muy diferentes, con la intención de conseguir resultados contrastantes. En ese sentido, para este experimento el interés se centró en tres: la vieja estación de trenes del ferrocarril Belgrano de la ciudad de Santa Fe, el aula 7 del aulario común de la Ciudad Universitaria - Paraje el Pozo de la UNL, también de Santa Fe y el espacio/auditorio El Tanque sito en el Campus Miguelete de la UNSAM, provincia de Buenos Aires (Figura 2). En la selección de los recintos se ponderó el hecho de ser entornos de los que se disponían previamente de los planos y de mediciones acústicas ya realizadas, y a la vez por ser recintos no-convencionales para música, siendo este uno de los focos de interés de este trabajo.

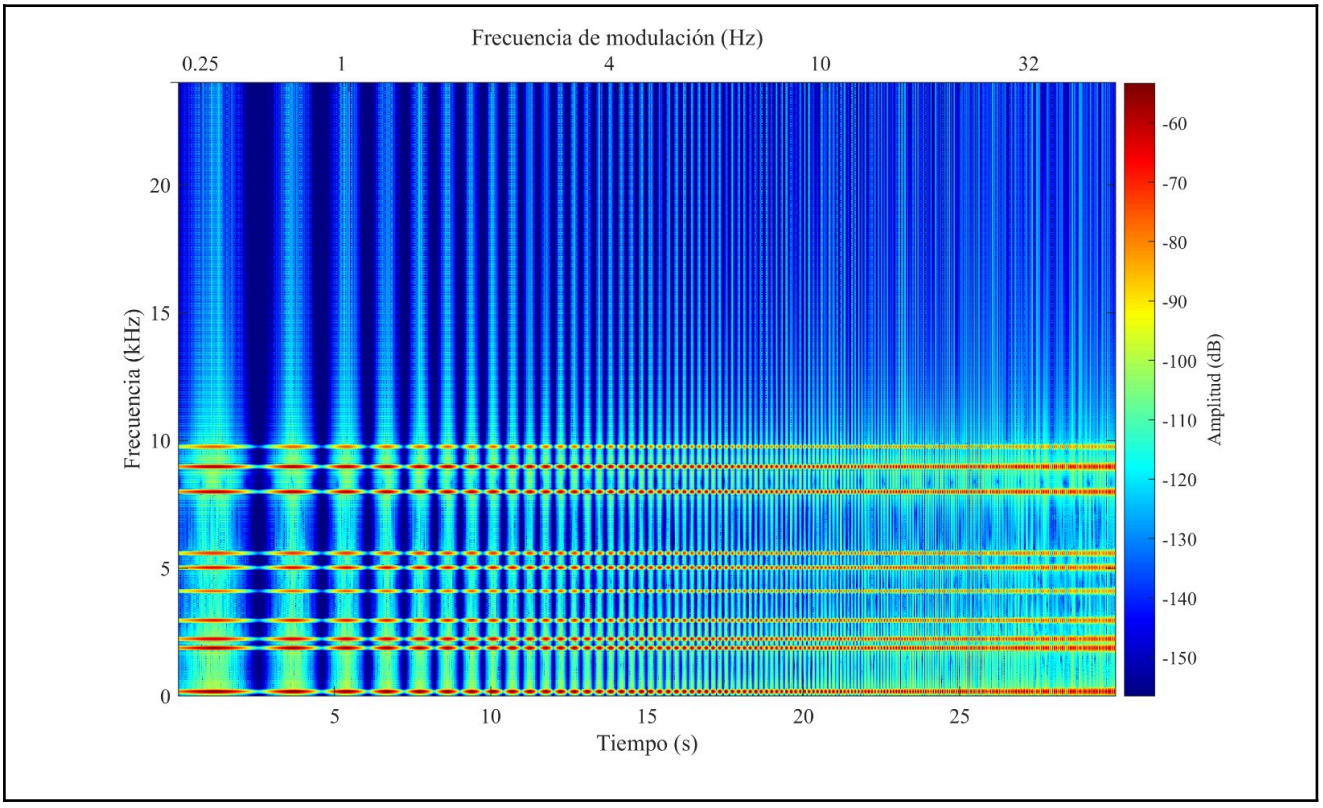


Figura 1: Espectrograma del objeto sonoro

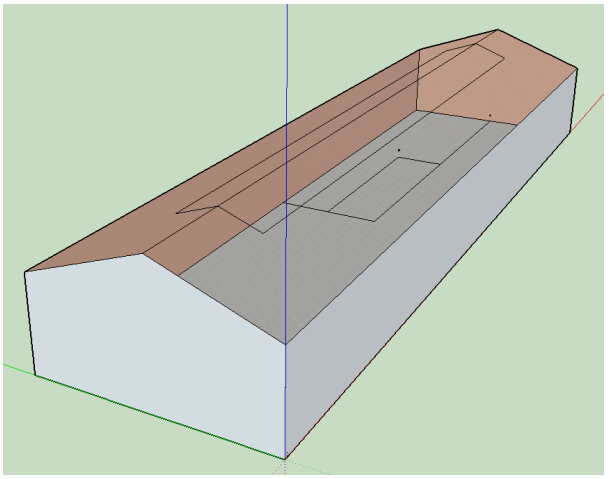
2.2.1 Nave de la Estación Belgrano

Es un edificio muy importante por su historia, ya que pertenece a una etapa productiva del desarrollo del país y de la región, y por su escala prácticamente única dentro de la ciudad de Santa Fe. Hoy es un espacio recuperado como centro de convenciones. La parte trasera de la estación, correspondiente a la nave, tiene la fisonomía de una gran nave industrial del siglo XIX, de 147 m de largo por 40 m de ancho y 23 m de altura máxima. Una estructura porticada de hierro cubierta de chapa acanalada, que era la que permitía la entrada y salida a los andenes por parte de las formaciones ferroviarias. Sus muros portantes son de ladrillo, con espesores de hasta 0,60 m en la fachada sur. El piso original fue reemplazado por un hormigón llaneado y armado, con terminación de microcemento alisado encerado, para cubrir aproximadamente 6.000 m² libres de columnas.

2.2.2 Aula 7 - aulario común - UNL

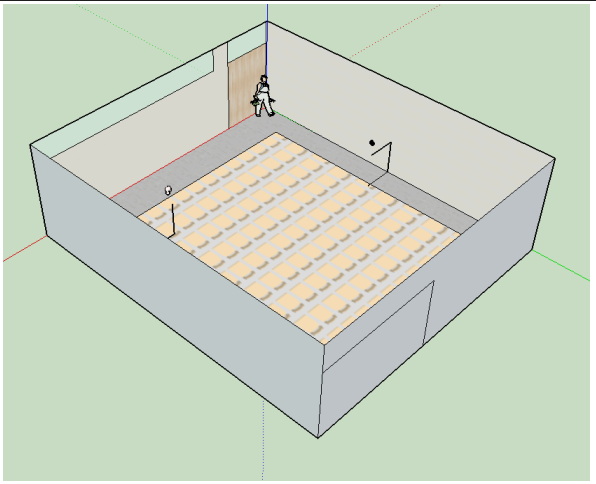
El Aula 7 se encuentra situada en el tercer piso del nuevo aulario común de la UNL, La misma se destina al desarrollo de clases, tiene una capacidad para 75 alumnos y posee las siguientes dimensiones: 9,60 m de largo, 10,85 m de ancho y 3,40 m de alto. El recinto cuenta con piso de mosaico granítico pulido y divisiones interiores de tabiques de roca-yeso con estructura metálica y lana de vidrio. El tabique hacia el pasillo combina vidrio simple y puerta doble de madera con paños vidriados. El cielorraso está formado por placas de roca-yeso sobre perfilería de aluminio con cámara de aire. La envolvente exterior incluye tabiques opacos con lana de vidrio y aberturas de aluminio con doble vidrio hermético (DVH). El mobiliario consiste en 75 pupitres de madera de 0,8 m² cada uno.

a) Foto de la Estación Belgrano



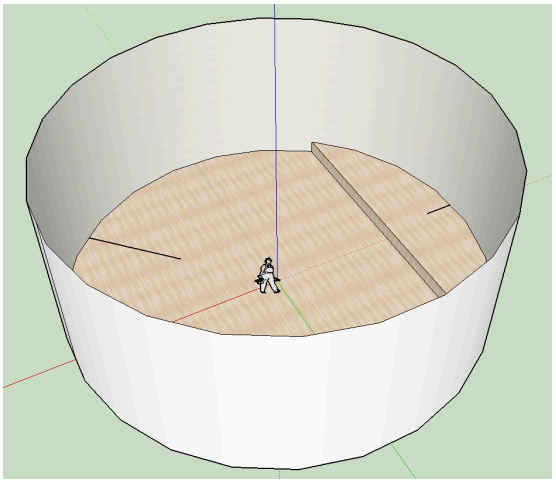
b) Modelo 3D de la Estación Belgrano

c) Foto del Aula 7 - UNL



d) Modelo 3D del Aula 7 - UNL

e) Foto del Tanque UNSAM



f) Modelo 3D del Tanque UNSAM

Figura 2: Fotos y modelos 3D de los recintos.

2.2.3 Tanque - UNSAM

El espacio fue el depósito de combustible gasoil que era utilizado en los ferrocarriles argentinos. En 2009 se inaugura como auditorio del campus y tuvo un rediseño del interior y su correspondiente tratamiento acústico que consta principalmente de una pared realizada en una doble placa de roca de vidrio con estructura de tubos de hierro, este tratamiento tiene aproximadamente unos 30 cm. de espesor sobre todo el perímetro y del techo pende una estructura de perfiles que es esqueleto de un falso techo que sirve de soporte de los paneles acústicos de espuma levemente absorbente. Este último tratamiento modifica la forma elíptica y abovedada y la convierte en una forma piramidal de catorce lados pero, dado que este tipo de materiales absorbentes no aísla, la cúpula original metálica sigue actuando. A su vez a nivel de la altura mayor del cilindro (unos 5,35 mts.) hay una serie de tensores de hierro que contienen la estructura, todos anclados a una placa circular central fijada con una barra de hierro al centro de la bóveda, en cuanto al piso está recubierto con el sistema de "piso flotante". Para más detalles se puede acceder a la página web del "Proyecto Tanque" [10].

2.3 Auralizaciones

2.3.1 El modelado y la configuración general

La acústica virtual puede lograrse mediante síntesis binaural dinámica con reproducción por auriculares. Esta técnica es muy eficaz en cuanto a la calidad sonora alcanzable y la verosimilitud de la simulación. Para llevar a cabo los simulacros que guían esta investigación, se utiliza el software de auralización de entornos virtuales RAVEN, desarrollado por la Universidad RWTH (Aachen, Alemania) y con licencia de uso académico. RAVEN simula la propagación del sonido dentro de recintos, aplicando métodos de acústica geométrica para una síntesis de alta calidad de estímulos auditivos [11]. Se modelaron los recintos en el software Sketchup, un programa de modelado en 3D, que con el agregado de RAVEN como extensión, permite simular el comportamiento del objeto sonoro descrito en el apartado 2.1, inmerso en cada uno de los entornos y desde diferentes puntos de escucha. En la Figura 2 se pueden visualizar los recintos modelados.

Se utilizó fuentes imágenes hasta 2^{do} orden y trazado de rayos con 1×10^6 partículas por banda. La directividad de la fuente es tipo cardioide. Para la función de transferencia de la cabeza se utilizó el modelo ITA-Kunstkopf que corresponde a la de un maniquí con micrófonos en la entrada del canal auditivo bloqueado.

2.3.2 Ubicación de fuentes y receptores

A continuación se describe la configuración que se utilizó para este experimento. Para cada recinto se eligió una de las cuatro paredes perimetrales como frente y se ubicó a la fuente en el punto medio de la pared frontal, a una distancia de 1m de la misma, a una altura de 1,75 m e irradiando hacia el centro del recinto de forma perpendicular a la pared frontal. El receptor binaural se colocó en un punto equidistante entre el centro de la sala y la pared lateral izquierda, y orientado mirando a la fuente. De manera que en los 3 casos el receptor percibe a la fuente desde una diagonal proveniente de una zona frontal-derecha. En la Figura 3 están representados la fuente con un parlante y el receptor binaural con una cabeza.

2.3.3 Respuestas al impulso y convolución

Por medio de RAVEN, se obtuvieron las respuestas binaurales al impulso h respectivas a las tres situaciones de escucha descriptas anteriormente. Para generar el audio binaural y se simula el paso del objeto sonoro x por la sala mediante

$$y = x * h, \tag{2}$$

donde $*$ es el operador convolución. Para el procesamiento de reverberación por convolución se utilizó el plugin ReaVerb, que forma parte de la librería de efectos nativos de REAPER. Se importó el objeto sonoro x diseñado para el experimento y se lo procesó con cada una de las respuestas al impulso mencionadas. Por último se exportaron las versiones a archivos de audio en formato WAV de 48k de frecuencia de muestreo y 24 bits de resolución.

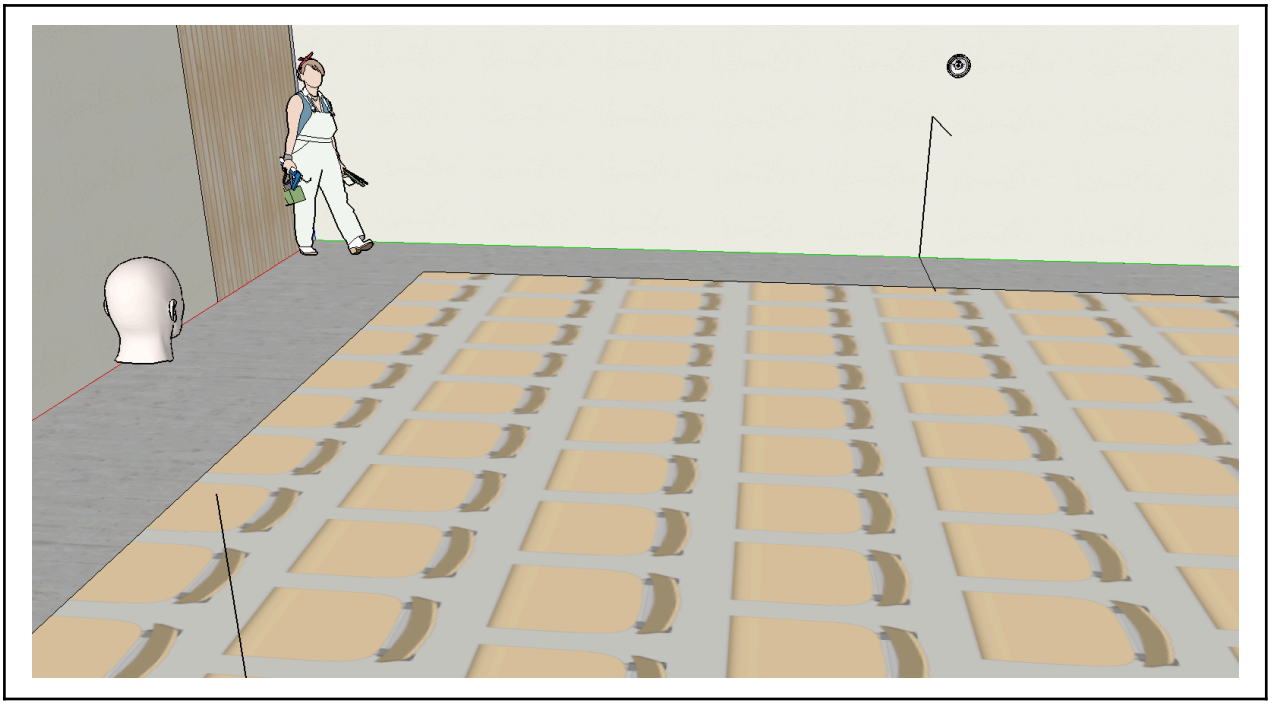


Figura 3: Representación de la fuente y el receptor binaural dentro del modelo del Aula 7 - UNL

2.4 Parámetros acústicos de las salas simuladas

Se obtuvieron mediciones a partir de las respuestas al impulso generadas con RAVEN. Estas fueron analizadas con el software Room Eq Wizard (REW), el cual permite importar un archivo correspondiente a la grabación de una respuesta al impulso obtenida con el método impulsivo y permite realizar el procesamiento digital necesario para poder extraer varios de los parámetros acústicos de mayor relevancia. Para el caso se extrajeron los datos de: EDT(s) y C80 (dB) en las bandas de octava centradas entre 63 Hz y 8 kHz de cada respuesta al impulso. Ambos descriptores pueden observarse en la Figura 4 y en la Tabla 1, respectivamente.

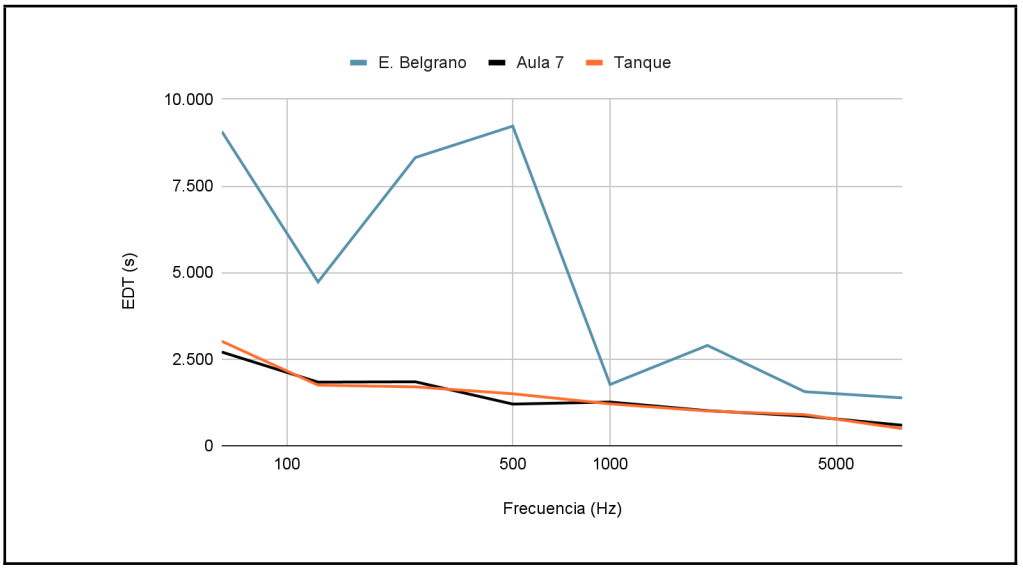


Figura 4: EDT (s) de los tres recintos.

Tabla 1: C80 (dB) de los tres recintos

	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
E. Belgrano	-6,17	-5,33	-4,90	-5,45	-3,28	0,84	1,43	2,54
Aula 7	-4,23	-1,62	0,53	2,04	1,75	4,10	5,76	7,14
Tanque	1,05	-3,19	0,71	3,00	3,67	5,71	6,12	8,61

2.5. Fuerza de Fluctuación

La fuerza de fluctuación es un parámetro psicoacústico que describe la percepción de la fuerza con la cuál fluctúa la envolvente del sonido. Es por lo tanto un parámetro subjetivo o perceptual. La unidad de la fuerza de fluctuación es el vacil (unidad subjetiva, no derivada de una magnitud física directa). Por definición, 1 vacil corresponde a la fuerza de fluctuación percibida al escuchar un tono puro de 1 kHz, modulado en amplitud al 100 %, con una frecuencia de modulación de 4 Hz y un nivel de presión sonora de 60 dB SPL [7].

Existen modelos que lo estiman para tonos sinusoidales modulados en frecuencia o amplitud (FM o AM), así como para ruidos de banda ancha modulados en amplitud. Estos modelos dependen de los patrones de enmascaramiento en frecuencia que ocurren entre el máximo y el mínimo local de la envolvente, como así también del intervalo temporal entre los tiempos donde estos máximos y mínimos ocurren. La máxima fuerza de fluctuación se observa en torno a una frecuencia de modulación de 4 Hz, valor que coincide con la variación de la envolvente temporal del habla fluida: a una velocidad de elocución normal suelen producirse unas cuatro sílabas por segundo, generando una modulación de la envolvente temporal en esa misma frecuencia. Esta correlación evidencia la estrecha relación entre el habla y el sistema auditivo.

Para la medición de la fuerza de fluctuación se empleó SQAT (Sound Quality Analysis Toolbox), una herramienta de código abierto para MATLAB utilizada en la evaluación de la calidad sonora basada en métricas psicoacústicas. Esta librería implementa medidas clave como sonoridad (ISO 532-1:2017), agudeza o sharpness (DIN 45692:2009), rugosidad (algoritmo de Daniel & Weber), fuerza de fluctuación (algoritmo de Osses et al.) y tonalidad (algoritmo de Aures) [12]. En la siguiente sección se exponen los resultados. El código usado para obtener la fuerza de fluctuación para las señales de audio *y* correspondientes a cada sala se detalla en el **apéndice B**.

3. RESULTADOS

Las Figuras 5 y 6 muestran los resultados obtenidos. La fuerza de fluctuación del objeto sin la influencia de las salas, llamado muestra anecoica, presenta una curva equivalente a los resultados de los experimentos de la literatura específica, es decir, presenta un valor máximo en torno a los 4Hz de frecuencia de modulación. A diferencia con estudios previos, este trabajo utiliza como fuente un objeto sonoro de espectro inarmónico, mientras que dichos experimentos previos fueron realizados abordando tonos puros y ruido de banda ancha modulados en AM y/o FM.

En el caso de la estación Belgrano el pico se anticipó al momento en que la frecuencia de modulación alcanzaba los 2,5 Hz. Por su parte, el análisis del Aula 7 mostró el pico de la fuerza de fluctuación mientras la frecuencia de modulación indicaba 1,8 Hz. Por último, el Tanque presenta un resultado interesante que consiste en la anticipación de un pico principal en torno a f_{mod} = 1,3 Hz y la aparición de un segundo pico de menor amplitud donde f_{mod} = 7,2 Hz. Este efecto se debe a que el decaimiento debido a la reverberación corre temporalmente el mínimo de la envolvente original, haciendo que éste suceda más próximo al siguiente máximo, aumentando la frecuencia de modulación resultante.

Con respecto al efecto tímbrico, las salas colorearon de manera diversa al contenido espectral del objeto sonoro. En el caso de la Estación Belgrano se resaltan más las frecuencias de la banda crítica de 16 Bark por sobre las restantes. El Aula 7 enfatiza las frecuencias de las bandas de 12 Bark y 18 Bark mientras que atenúa la banda de 16 Bark. Por su parte, el Tanque de la UNSAM muestra una pérdida total de la banda de 16 Bark, un énfasis modesto en torno a los 18 Bark, y zonas puntuales donde se resaltan las bandas de los 14 Bark y los 16 Bark en función de la frecuencia de modulación. Esto se debe en gran parte a las propiedades de absorción sonora de los diferentes materiales que revisten las superficies de las salas, y también de su geometría y configuración de fuente y receptores.

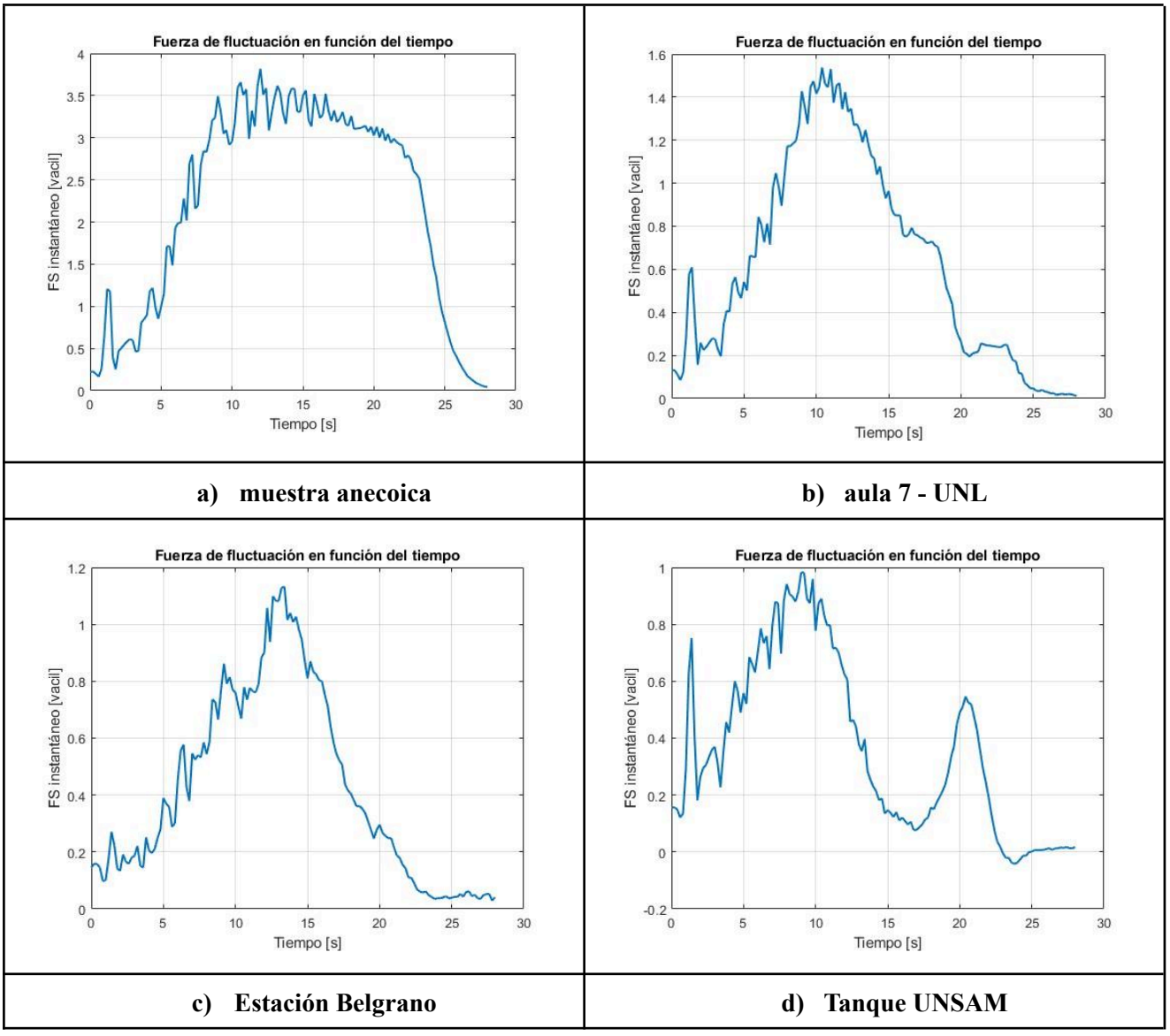


Figura 5: Fuerza de fluctuación en función del tiempo

Resulta de interés articular este efecto con la posibilidad de una sala de alterar duraciones no solo a nivel local sino también en la macroescala temporal. Estudios previos [13] sugieren que la cantidad de eventos sonoros, posiblemente asociable a la frecuencia de modulación, se relacionan con la duración subjetiva.

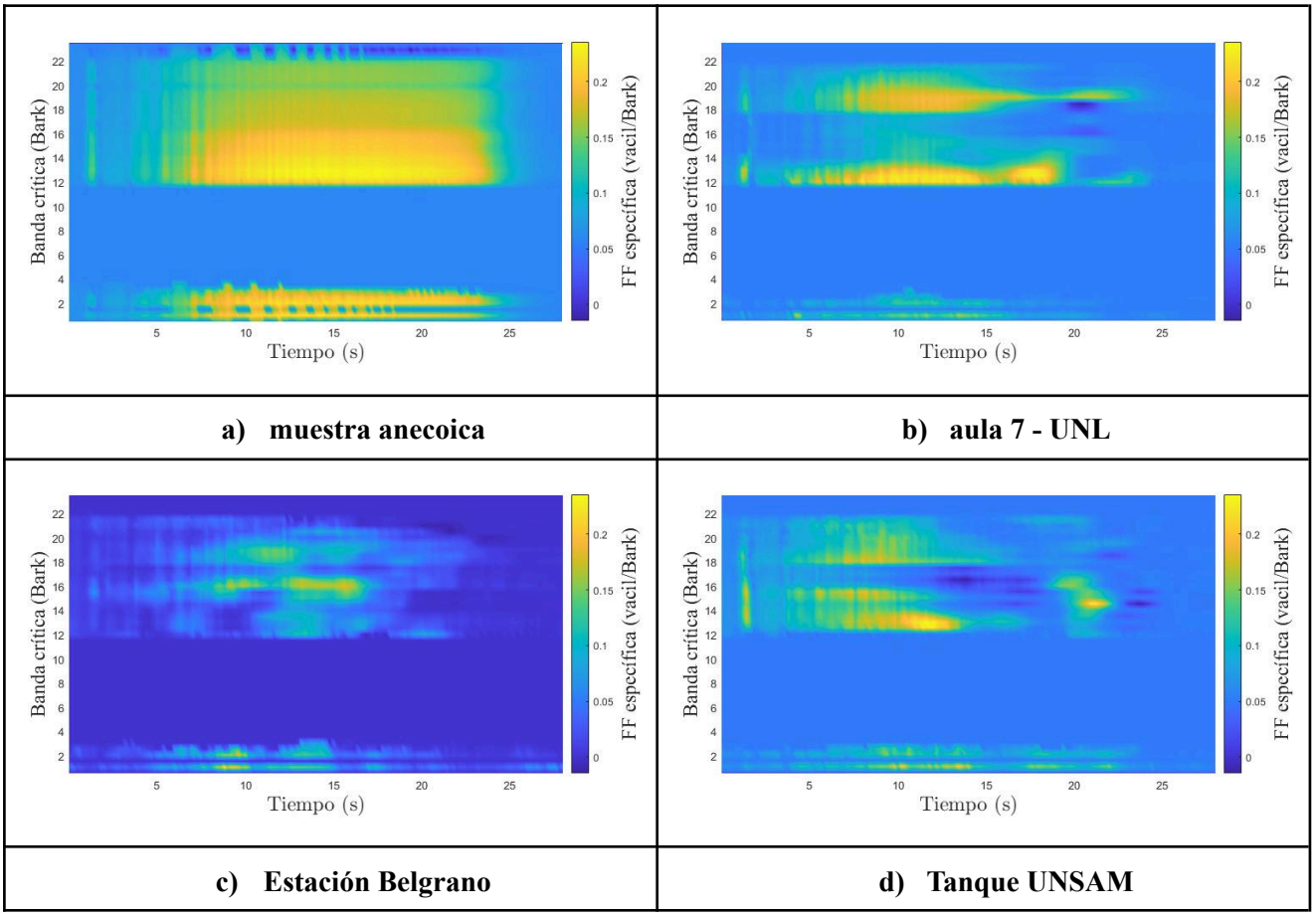


Figura 6: Fuerza de fluctuación específica

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un experimento orientado a estudiar en qué medida se transforman los parámetros sonoros de distintas categorías de materiales musicales en función de los recintos en los que se reproducen. Se analizó la influencia de las características acústicas de las salas sobre la percepción de la fuerza de fluctuación de un material sonoro predefinido, de 30 segundos de duración, cuya configuración espectromorfológica se caracterizó por su espectro inarmónico y por un aumento progresivo de la frecuencia de modulación de amplitud.

Aun con una muestra pequeña, se observaron efectos significativos en la interacción del objeto sonoro con los distintos recintos. El hallazgo principal fue el desplazamiento del pico de fuerza de fluctuación hacia zonas de menor frecuencia de modulación de amplitud. Asimismo, se detectó el desdoblamiento de picos o la aparición de un segundo pico de menor amplitud, lo cual también resulta relevante. La desviación de este parámetro sugiere una posible relación entre las tipologías arquitectónicas de las salas y la calidad acústica con la que se perciben las tipologías espectromorfológicas.

En cuanto a trabajos futuros, se considera pertinente ampliar el número de muestras, los modelos de sala y los puntos de escucha. También resultará valioso incorporar gradualmente fluctuaciones de tipo FM o paneos entre múltiples fuentes [14], junto con valoraciones subjetivas de los materiales constitutivos de la textura musical y duraciones subjetivas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) y la Universidad Nacional del Litoral (UNL).

REFERENCIAS

[1] N. Oxman, "Age of entanglement," *Journal of Design and Science*, Jan. 2016. [Online]. Disponible en: https://doi.org/10.21428/7e0583ad

[2] D. Grela H., "La consideración analítica del espacio en las formas sonoras," *Revista del Instituto Superior de Música*, vol. 11, pg. 87–98, Mar. 2007, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe.

[3] P. Schaeffer, *Tratado de los objetos musicales*. Madrid, Spain: Alianza Música, 2003. (Obra original publicada en francés en 1966, trad. A. Cabezón de Diego).

[4] D. Smalley, "Spectromorphology: Explaining sound-shapes," *Organised Sound*, vol. 12, n. 2, pg. 129–141, 1997.

[5] L. Thoresen, "Spectromorphological analysis of sound objects: An adaptation of Pierre Schaeffer's typomorphology," *Organised Sound*, vol. 12, n. 2, pg. 129–141, 2007.

[6] M. Liut, "Música para sitios específicos: nuevas correlaciones entre espacio acústico, público y fuentes sonoras," in *Música y espacio: ciencia, tecnología y estética*. Bernal, Argentina: UNQ, 2009.

[7] E. Zwicker y H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and Models*, 2nd ed. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1999.

[8] Z. S. Kalkandjiev and S. Weinzierl, "The influence of room acoustics on solo music performances: An empirical investigation," *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, vol. 25, no. 3, pg. 195–207, 2015.

[9] D. Baumann, *Music and Space: A Systematic and Historical Investigation into the Impact of Architectural Acoustics on Performance Practice Followed by a Study of Handel's Messiah*. Bern; Berlin; Bruxelles; Frankfurt am Main; New York; Oxford; Wien: Peter Lang, 2011.

[10] "Proyecto Tanque – Convocatoria Música para Sitio Específico," *ProyectoTanque*, Wix. [Online]. Disponible en: https://convocatoriaproyec.wixsite.com/proyectotanque. [Accedido: Oct. 01, 2025].

[11] D. Schröder and M. Vorländer, "RAVEN: A real-time framework for the auralization of interactive virtual environments," en *Forum Acusticum*, pg. 1541–1546, Denmark, 2011.

[12] G. F. Greco, R. Merino Martinez, A. Osses, and S. C. Langer, "SQAT: a MATLAB-based toolbox for quantitative sound quality analysis," en *Proc. 52nd Int. Congr. Exposition Noise Control Engineering (INTER-NOISE)*, 2023.

[13] S. Santi, E. Accolti, D. Grela, F. di Sciscio. "The effect of entropy and duration in the temporal perception of a sequence of sound events," en International Symposium on Musical and Room Acoustics ISMRA 2016, La Plata, 2016.

[14] E. Accolti y F. Miyara "Fluctuation strength of mixed fluctuating sound sources" *Mecánica Computacional*, *28*(2), pp.9-22, 2009.

Apéndice A.

Tabla A.1: componentes espectrales del objeto sonoro

	Frecuencia (Hz)	Amplitud (dB)	Amplitud
f_1	169	0,0	1,00
f_2	1888	-3,5	0,45
f_3	2227	-7,9	0,16
f_4	2965	-13,8	0,04
f_5	4100	-20,8	0,01
f_6	5027	-11,2	0,08
f_7	5591	-16,3	0,02
f_8	7989	-6,6	0,22
f_9	8972	-3,3	0,47
f_{10}	9763	-20,2	0,01

Apéndice B.

Código 1. Código de Matlab para calcular la fuerza de fluctuación

```
%% === Test Fluctuation Strength con tu WAV ===
startup_SQAT

%% Cargar y analizar mi audio con SQAT
fname = 'file_name.wav';   % tu archivo de prueba
dBFS = 94;                 % nivel sonoro al que corresponde el fondo de escala
method = 1;                % 1 = análisis temporal (ventanas de 2 s)
time_skip = 0;             % segundos a omitir al inicio
show = true;               % mostrar gráficos automáticos

OUT = FluctuationStrength_Osses2016_from_wavfile(fname, dBFS, method, time_skip, show);

%% Ver algunos resultados en consola
disp('--- Resultados de Fluctuation Strength ---');
disp(['FS medio: ' num2str(OUT.FSmean) ' vacil']);
disp(['FS máximo: ' num2str(OUT.FSmax) ' vacil']);

%% Graficar Fluctuation Strength instantáneo
figure;
plot(OUT.time, OUT.InstantaneousFluctuationStrength, 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('FS instantáneo [vacil]');
title('Fuerza de fluctuación en función del tiempo');
grid on;
```

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Evaluación Acústica Experimental de Maderas para Guitarras

Velis, Ariel Gustavo Velis[†,1] ; Posse, Carlos Manuel.[†,2]; Zerbino, Raúl Luis[‡,3]; Basso, Gustavo[§,4]

[†] Laboratorio de Acústica y Luminotecnia – Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires - La Plata - Argentina

‡ Departamento de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata - La Plata Argentina

[§] IPEAL, Facultad de Artes, Universidad Nacional de La Plata - La Plata - Argentina

[1] arielgvelis@gmail.com, [2] charlyposse@gmail.com, [3] zerbino@ing.unlp.edu.ar, [4] gusjbasso@gmail.com

Resumen Este trabajo presenta una estrategia experimental para evaluar las propiedades acústicas de maderas empleadas en la construcción de guitarras. El propósito es disponer de un protocolo práctico y reproducible que permita identificar diferentes especies a partir de su comportamiento ante impactos controlados. El enfoque se basa en el uso de placas normalizadas, golpes estandarizados y registros en condiciones anecoicas. Se exploraron diversas configuraciones de montaje, comprobando su influencia sobre la frecuencia fundamental y la evolución temporal del primer armónico. Los resultados obtenidos demostraron la capacidad del método para distinguir maderas según su calidad sonora, aportando una herramienta valiosa para la luthería y estudios comparativos.

Palabras clave: acústica de guitarras; respuesta impulsiva maderas; caracterización vibratoria, tapas armónicas.

Abstract This work presents an experimental strategy to evaluate the acoustic properties of woods used in guitar construction. The purpose is to establish a practical and reproducible protocol that enables the identification of different species based on their response to controlled impacts. The approach relies on standardized plates, uniform strikes, and recordings under anechoic conditions. Various mounting configurations were explored, verifying their influence on the fundamental frequency and the temporal evolution of the first harmonic. The results demonstrated the method's ability to distinguish woods according to their sound quality, providing a valuable tool for lutherie and comparative studies.

Palabras clave: musical instrument acoustics; impulse response in wood; vibrational characterization of soundboards.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad acústica de una guitarra depende en gran medida del comportamiento vibratorio de la madera utilizada en su construcción [1]. La tapa armónica, en particular, es el elemento que mayor influencia ejerce sobre la respuesta tonal final. Por esta razón, luthiers e investigadores han buscado históricamente métodos para evaluar y comparar maderas antes de utilizarlas en instrumentos.

Si bien existen técnicas avanzadas como ultrasonido, tomografía o espectroscopía, su costo y complejidad limitan su aplicación en contextos de producción artesanal o en estudios intermedios. En consecuencia, surge la necesidad de protocolos experimentales más simples, reproducibles y accesibles, que permitan obtener información confiable sobre el comportamiento acústico de distintas especies.

En este trabajo se presenta y valida un procedimiento experimental basado en la respuesta impulsiva de placas normalizadas, cuyo objetivo es ofrecer un método económico y sistemático para caracterizar maderas utilizadas en luthería. El protocolo fue diseñado para comparar especies locales con respecto a una madera patrón reconocida internacionalmente: el abeto alemán (Picea abies).

2. METODOLOGÍA

2.1. Desarrollo inicial y antecedentes

Como primer paso se exploró un método de vibraciones en varillas, en el cual pequeñas piezas de madera se sometían a excitación sinusoidal mediante un transductor tipo *shaker*. La visualización de los modos de vibración se realizaba con luz estroboscópica y cámara fotográfica.

Este enfoque permitió observar nodos y antinodos característicos de cada muestra. Sin embargo, la dificultad para cuantificar distancias entre nodos y mantener condiciones constantes de excitación limitó su reproducibilidad. Estas restricciones motivaron el desarrollo de un segundo enfoque más robusto, centrado en la respuesta impulsiva de placas.

La Figura 1 muestra un esquema del montaje experimental empleado para la visualización de los modos vibratorios. Allí se observa la disposición del transductor, la varilla de madera y el sistema óptico de captura.

Figura 1. Esquema de visualización de modos en varillas

En la Figura 12 se muestran fotografías tomadas durante los ensayos, en las que se distinguen con claridad los patrones vibratorios que se generan en las varillas bajo una excitación controlada. Dichas imágenes sirvieron para corroborar la aparición de modos propios característicos según el tipo de madera analizada.

Figura 2. Imágenes de modos vibratorios de las varillas

2.2. Método propuesto: Respuesta impulsiva de placas

El nuevo protocolo se basó en someter placas de madera a impactos controlados, registrando la respuesta acústica en condiciones anecoicas. Las dimensiones de las muestras fueron estandarizadas en 55 mm × 124 mm × 3 mm, semejantes a cortes reales empleados en tapas de guitarra.

Se analizaron tres especies de características contrastantes:

- ***Abeto alemán (Picea abies):*** liviano, de baja densidad (<0,45 g/cm³) y alta homogeneidad, ampliamente reconocido en luthería.

- ***Pino Brasil*** (Araucaria angustifolia): de densidad intermedia (0,45–0,60 g/cm³), con anillos de crecimiento más anchos, representando una alternativa viable pero de calidad moderada.
- ***Terciado de guatambú*** (Balfourodendron riedelianum): madera semipesada (0,78–0,82 g/cm³), estructuralmente heterogénea, considerada de baja aptitud acústica.

2.3. Sistema de medición

Los ensayos se realizaron en la cámara anecoica del Laboratorio de Acústica y Luminotecnia (CIC). Se empleó un martillo calibrado para generar impactos y un micrófono de condensador (Brüel & Kjær Type 4189) con preamplificador, conectado a una interfaz digital y software de registro (ver Figura 3).

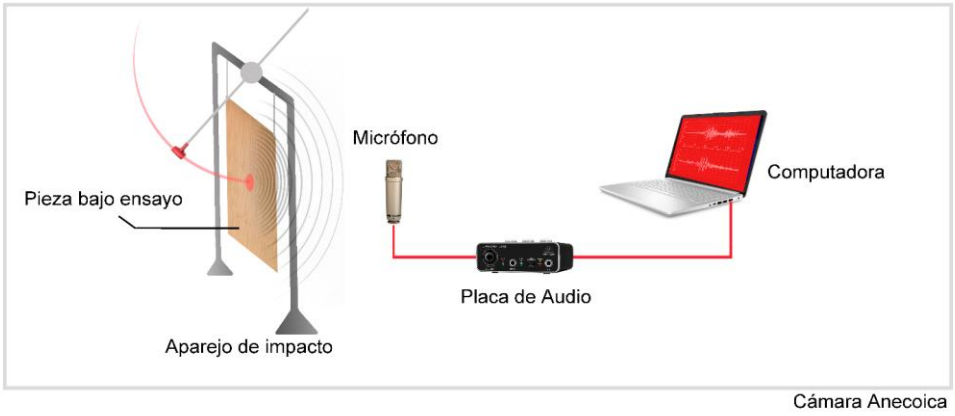


Figura 3. Esquema del sistema de medición mediante el método impulsivo

El análisis espectral de las señales se realizó con software especializado, enfocándose en el rango de 25–200 Hz, donde se concentran las frecuencias fundamentales de interés. La Figura 4 muestra una fotografía real del montaje experimental.

2.4. Configuraciones de montaje

Un aspecto central fue evaluar cómo la forma de sujeción de la muestra afecta su vibración. Se ensayaron cuatro configuraciones principales. La hipótesis inicial fue que los modos propios de resonancia podrían amplificarse o atenuarse según el tipo de sujeción utilizado. Las configuraciones ensayadas se muestran en la Figura 5, y fueron:

- A: un punto en posición vertical.
- B: dos puntos en posición vertical.
- C: cuatro puntos en posición horizontal.
- D: suspensión sobre bandas elásticas.

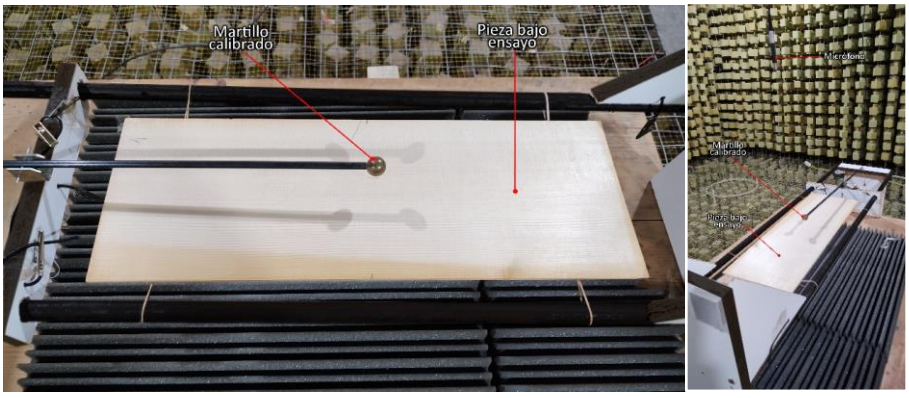


Figura 4. Fotografía del aparejo de impacto situado en la Cámara

Cada configuración fue sometida a múltiples impactos, registrando las variaciones en frecuencia fundamental y en el decaimiento temporal del primer armónico.

2.5. Procesamiento de Datos

El análisis de las respuestas digitales fue confinado a una banda de frecuencias apropiado para evaluar exclusivamente la frecuencia fundamental y los primeros modos de vibración de las piezas bajo ensayo. Para ello, y evaluando los espectros para cada muestra, se estableció como banda de interés el rango entre 25 Hz y 200 Hz. En dicha banda se observó claramente que concurrían las frecuencias de resonancia fundamentales de cada especie.

Como primer paso, y para para garantizar la calidad del análisis en la banda de frecuencias de interés, se aplicó a todas las respuestas un filtro digital de fase lineal pasa banda con un corte inferior de -3 dB en 25 Hz. y corte superior de -3 dB en 200 Hz, con una pendiente de atenuación de 24 dB/octava. Este filtrado eliminó componentes de baja y alta frecuencia no deseadas, que podrían haber dificultado la interpretación de los resultados.

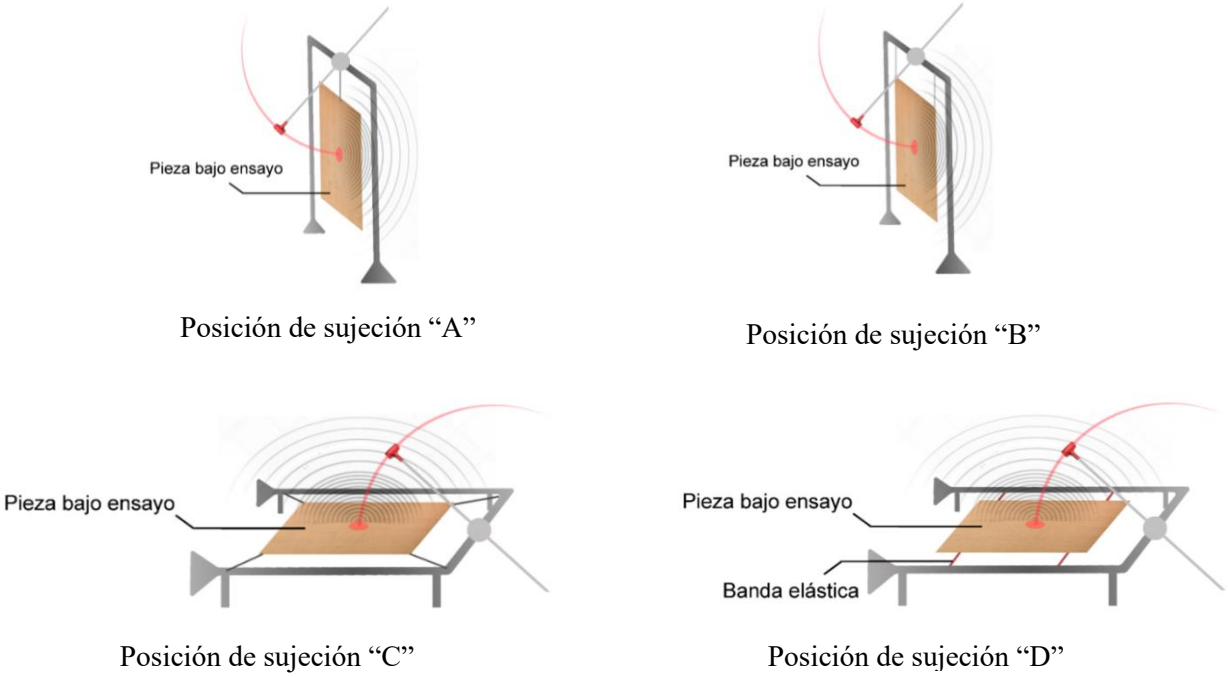


Figura 5. Diferentes modos de montaje ensayados

Para obtener con precisión las frecuencias de resonancia, los archivos de audio en formato WAV fueron analizados utilizando el software Sonic Visualiser. Se generaron espectrogramas de los trenes de respuestas acústicas, que luego fueron exportados a planillas de cálculo aplicando los siguientes parámetros de configuración: Window size: 32768; Window overlap: 93.75 %; Oversampling: 8x.

Estos parámetros tuvieron un impacto significativo en la precisión de la extracción de frecuencias. El tamaño de ventana grande permitió alcanzar una alta resolución espectral, reduciendo la dispersión en frecuencia y mejorando la exactitud de las mediciones. El alto solapamiento (93,75 %) favoreció la continuidad temporal del análisis, minimizando discontinuidades entre ventanas consecutivas. Por su parte, el factor de oversampling 8x aumentó la densidad de puntos de muestreo en el dominio de la frecuencia, refinando la detección de picos de resonancia.

Una vez exportados los datos, se aplicaron fórmulas de cálculo y formato condicional en la planilla de cálculo para detectar con precisión los valores máximos de amplitud y sus respectivas frecuencias. Posteriormente, se graficaron los niveles correspondientes a la frecuencia del primer armónico,

normalizados al valor pico, para todos los impactos, todas las especies de madera y todos los tipos de sujeción, permitiendo así una comparación detallada entre ellos.

La resolución temporal obtenida en la planilla fue de 0,042 segundos, mientras que la resolución en frecuencia alcanzó 0,1831 Hz, lo que garantizó una identificación precisa de las frecuencias fundamentales y de sus armónicos.

3. RESULTADOS

3.1. Influencia de la sujeción

Como punto de partida, se analizaron los espectros de las respuestas obtenidos mediante el software Voxengo SPAN Plus, configurado en el modo de operación "MAX". Este modo genera un espectro de potencia máxima acumulada, manteniendo la retención de los picos a lo largo del tiempo, lo que facilita identificar con claridad las componentes más dominantes de la señal.

Se comprobó que el tipo de sujeción afecta tanto la relación de amplitudes entre la frecuencia fundamental y los armónicos superiores como los valores de frecuencia de estos últimos, incluso cuando se utiliza una misma muestra de madera. Este resultado es consistente con lo esperado, dado que los modos de vibración dependen directamente de las condiciones impuestas por los puntos de anclaje. En efecto, una modificación en las condiciones de contorno —aun en una placa simple— puede alterar de forma significativa las frecuencias de resonancia y sus correspondientes modos [2].

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra ejemplos representativos de estos espectros para las especies Abeto Alemán y Pino Brasil, bajo diferentes configuraciones de sujeción. Dado que la cuantificación sistemática de las variaciones espectrales producidas por cada tipo de sujeción resultaba sumamente compleja, en esta etapa se decidió focalizar el estudio únicamente en el primer armónico del espectro de respuesta, que constituye el objetivo principal del presente trabajo.

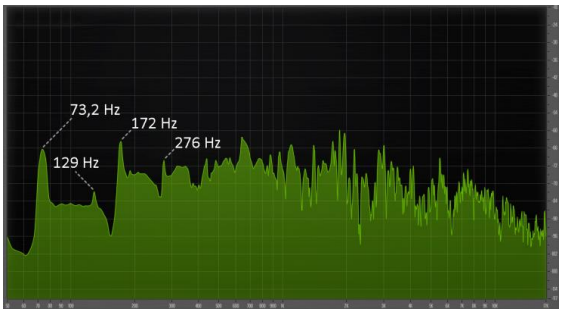
3.2. Repetibilidad del Método

La repetibilidad del método se evaluó mediante el análisis de la dispersión estadística de dos parámetros derivados de la respuesta acústica frente a una serie de impactos consecutivos:

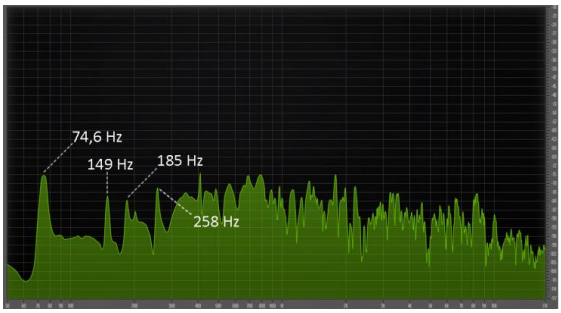
- La **estabilidad de la frecuencia** correspondiente al primer armónico.
- La **evolución temporal de su amplitud**.

Para este estudio se procesaron 100 espectrogramas generados con el software Sonic Visualiser, correspondientes a 100 impactos consecutivos aplicados sobre una misma muestra. Los datos obtenidos se exportaron a una planilla de cálculo, donde cada fila representó una ventana temporal (una FFT) y cada columna, un bin de frecuencia. Esta disposición permitió examinar en detalle la evolución espectral de la señal a lo largo del tiempo. A partir de esta matriz de datos, se destacaron mediante color los valores máximos de cada fila (es decir, los picos de amplitud en cada instante), lo que posibilitó no solo cuantificar las amplitudes sino también visualizar gráficamente la variación temporal de la frecuencia fundamental. La Figura 7 ilustra este procedimiento para el caso de tres impactos consecutivos.

En relación con el primer parámetro —la estabilidad de la frecuencia del primer armónico—, se identificaron las columnas donde se concentraban los máximos. Se anticipaba una cierta dispersión entre impactos, que permitiría representar estadísticamente la variabilidad de los resultados. Sin embargo, con la resolución espectral empleada, el 100% de los valores se concentró en solo dos bines contiguos, impidiendo generar una distribución estadística significativa dentro de esos límites. Este fenómeno puede apreciarse claramente en la Figura 7, donde se observa una marcada concentración de energía en un mismo bin de frecuencia.

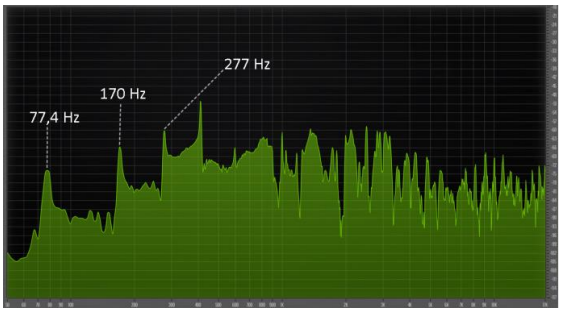


Abeto Alemán sujeción “A”

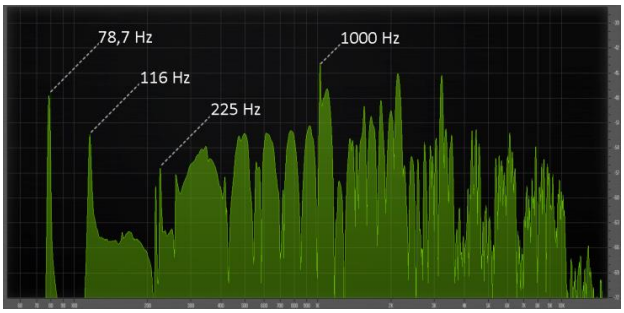


Abeto Alemán sujeción “B”

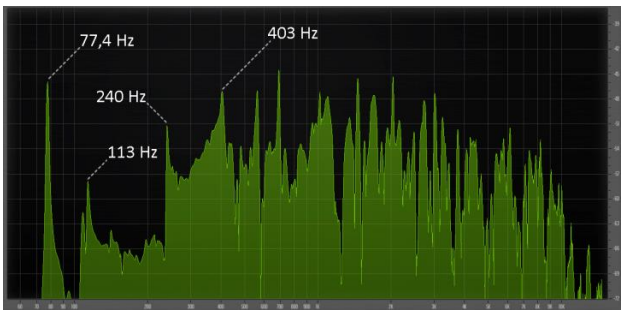
Abeto Alemán sujeción “C”



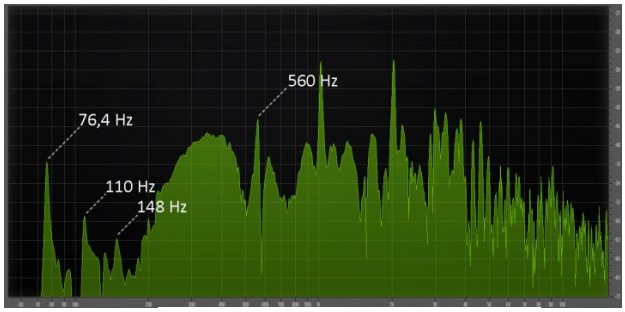
Abeto Alemán sujeción “D”



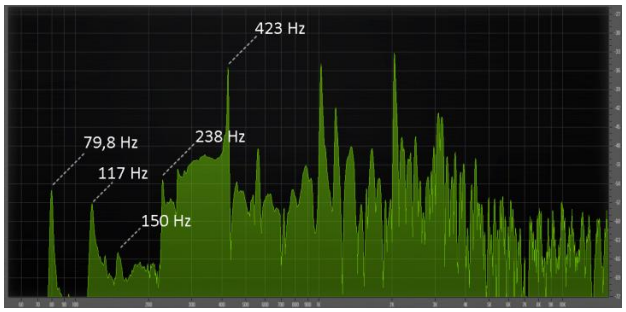
Pino Brasil sujeción “A”



Pino Brasil sujeción “B”



Pino Brasil sujeción “C”



Pino Brasil sujeción “D”

Figura 6. Espectros Obtenidos con una muestra de Abeto alemán y otra de Pino Brasil con los 4 modos de sujeción

Para el segundo parámetro —el comportamiento temporal de la amplitud del primer armónico—, se extrajeron las amplitudes de los bines identificados y se graficaron en función del tiempo. Las curvas resultantes se normalizaron al valor máximo con el fin de facilitar la comparación entre los distintos impactos. Este procedimiento se aplicó a las tres especies de madera analizadas.

La Figura 8 presenta los resultados correspondientes a tres impactos consecutivos. Si bien se registraron leves diferencias entre ellos, estas fueron significativamente menores que las variaciones observadas entre especies. La coincidencia en las curvas de decaimiento temporal respalda la consistencia y reproducibilidad del método propuesto, así como su utilidad para la caracterización comparativa de materiales.

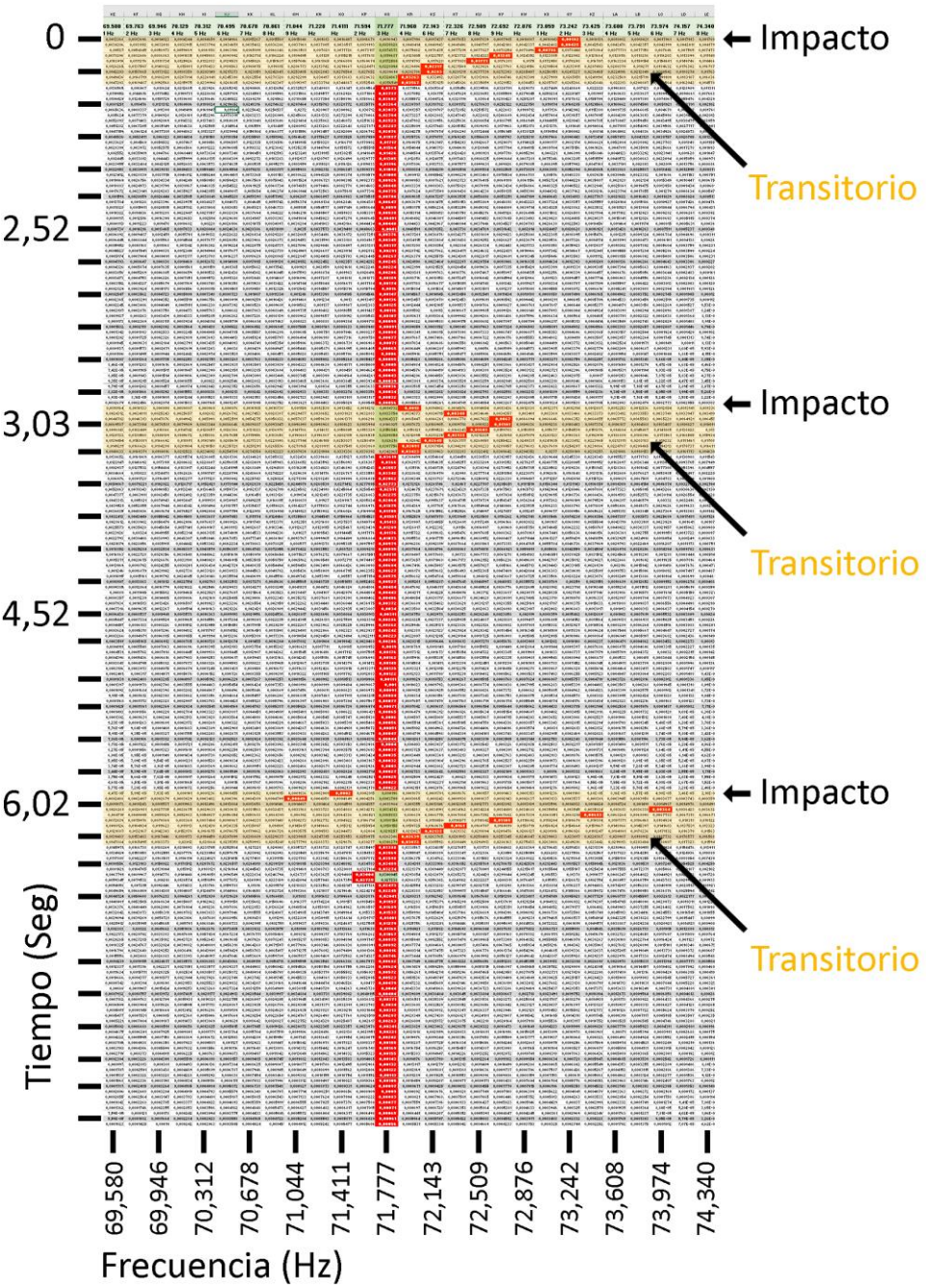


Figura 7. Coloreado de bines máximos en el espectrograma temporal de tres impactos consecutivos.

Es importante señalar que los extremos temporales de cada registro (inicio y fin) corresponden a transitorios no estacionarios, por lo que fueron excluidos del cálculo de la frecuencia fundamental. Finalmente, para la alineación temporal de los gráficos, se consideró el punto de máxima amplitud como referencia y se estableció el origen temporal en t = 0 correspondiente a la muestra -12 (doce muestras previas al pico). La ventana total analizada comprendió 80 muestras, equivalentes a 3,41 s, con el máximo centrado en el instante 0,51 s.

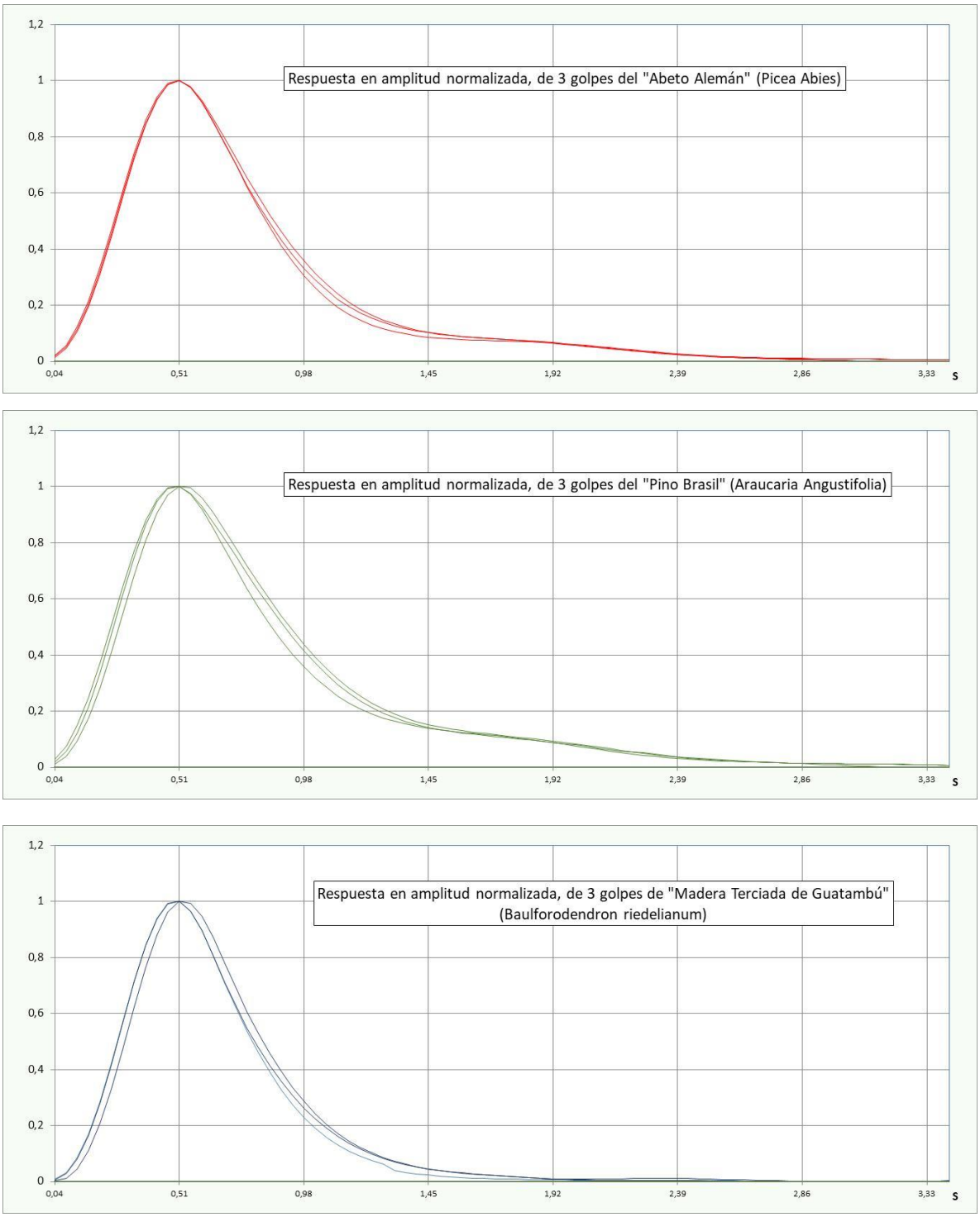


Figura 8. Variación entre 3 golpes para un mismo tipo de sujeción

3.3. Tipo de Sujeción y Primer Armónico

La forma de sujeción de la muestra durante el impacto ejerce una influencia decisiva sobre su comportamiento vibratorio, afectando tanto la frecuencia fundamental como el decaimiento temporal del primer armónico. En el caso de las maderas más homogéneas (Abeto Alemán y Pino Brasil), se observó una correlación directa entre el grado de restricción mecánica y la frecuencia de resonancia: al modificar los puntos de anclaje, se producen variaciones notables en la frecuencia fundamental registrada.

Asimismo, el tipo de sujeción tuvo un efecto significativo en la dinámica temporal de la vibración. Las configuraciones con mayor restricción —como la C, correspondiente a la sujeción en cuatro puntos— mostraron un amortiguamiento más rápido, mientras que la D, basada en la suspensión mediante bandas elásticas, permitió una mayor duración de la vibración.

Este comportamiento concuerda con el papel que desempeñan las condiciones de frontera sobre los modos naturales de vibración. Cuando los puntos de sujeción coinciden con nodos (zonas de mínimo desplazamiento), su influencia resulta limitada; en cambio, si se ubican sobre antinodos, restringen de manera considerable la respuesta dinámica del sistema.

La Figura 9 presenta la evolución temporal del primer armónico para las tres especies de madera bajo las cuatro configuraciones de sujeción, mostrando simultáneamente la variación en frecuencia y el comportamiento del decaimiento temporal.

Los resultados indican que la sujeción no solo modifica los valores de frecuencia y amortiguamiento, sino que también puede alterar la definición espectral de los modos superiores. Por esta razón, se adoptó la configuración D como referencia estándar para las comparaciones entre especies. Esta elección se sustentó en su capacidad de ofrecer una sujeción estable pero mínimamente intrusiva, reduciendo las interferencias mecánicas que podrían distorsionar los modos naturales de vibración. Además, su diseño favoreció una alta repetibilidad entre impactos, tanto en términos de frecuencia como de comportamiento temporal, convirtiéndola en una condición de referencia confiable para la caracterización comparativa de distintos tipos de madera.

3.4 Análisis temporal en cada configuración

Para cada una de las especies de madera analizadas, se llevó a cabo un estudio detallado de la evolución temporal del primer armónico generado por un impacto, aplicando el procedimiento descrito en la sección 2.5. Las muestras fueron ensayadas bajo las cuatro configuraciones de sujeción, y en todos los casos la amplitud se normalizó respecto del valor pico, tanto para las tres especies como para las cuatro condiciones de soporte, con el objetivo de posibilitar una comparación directa entre resultados.

En los gráficos temporales (ver Figura 9) se observa la variación de la amplitud de vibración en función del tiempo, evidenciando diferencias en la tasa de amortiguamiento según el modo de sujeción de la muestra. Los gráficos de barras, por su parte, muestran la variación de la frecuencia del primer armónico (en Hz) correspondiente a cada configuración de soporte.

Del análisis de estos resultados se desprende lo siguiente:

Abeto Alemán (Picea abies): la frecuencia presenta variaciones leves entre configuraciones, con un mínimo en la sujeción C (71,78 Hz) y un máximo en la sujeción D (77,27 Hz). Las curvas de decaimiento muestran diferencias sutiles pero consistentes, lo que indica que el tipo de sujeción influye principalmente en la duración de la vibración, más que en la frecuencia propiamente dicha.

Pino Brasil (Araucaria angustifolia): se observa un comportamiento similar al del abeto, con frecuencias cercanas entre sí (de 76,17 Hz a 79,28 Hz), aunque con mayor amplitud general. Las curvas muestran una caída más suave en la sujeción D, lo que sugiere una menor amortiguación en esta condición.

Madera Terciada de Guatambú (Balfourodendron riedelianum): a diferencia de las anteriores, esta madera muestra frecuencias más bajas (alrededor de 49-50 Hz), como era esperable por su estructura compuesta y mayor densidad. Las curvas de respuesta tienen un decaimiento más rápido,

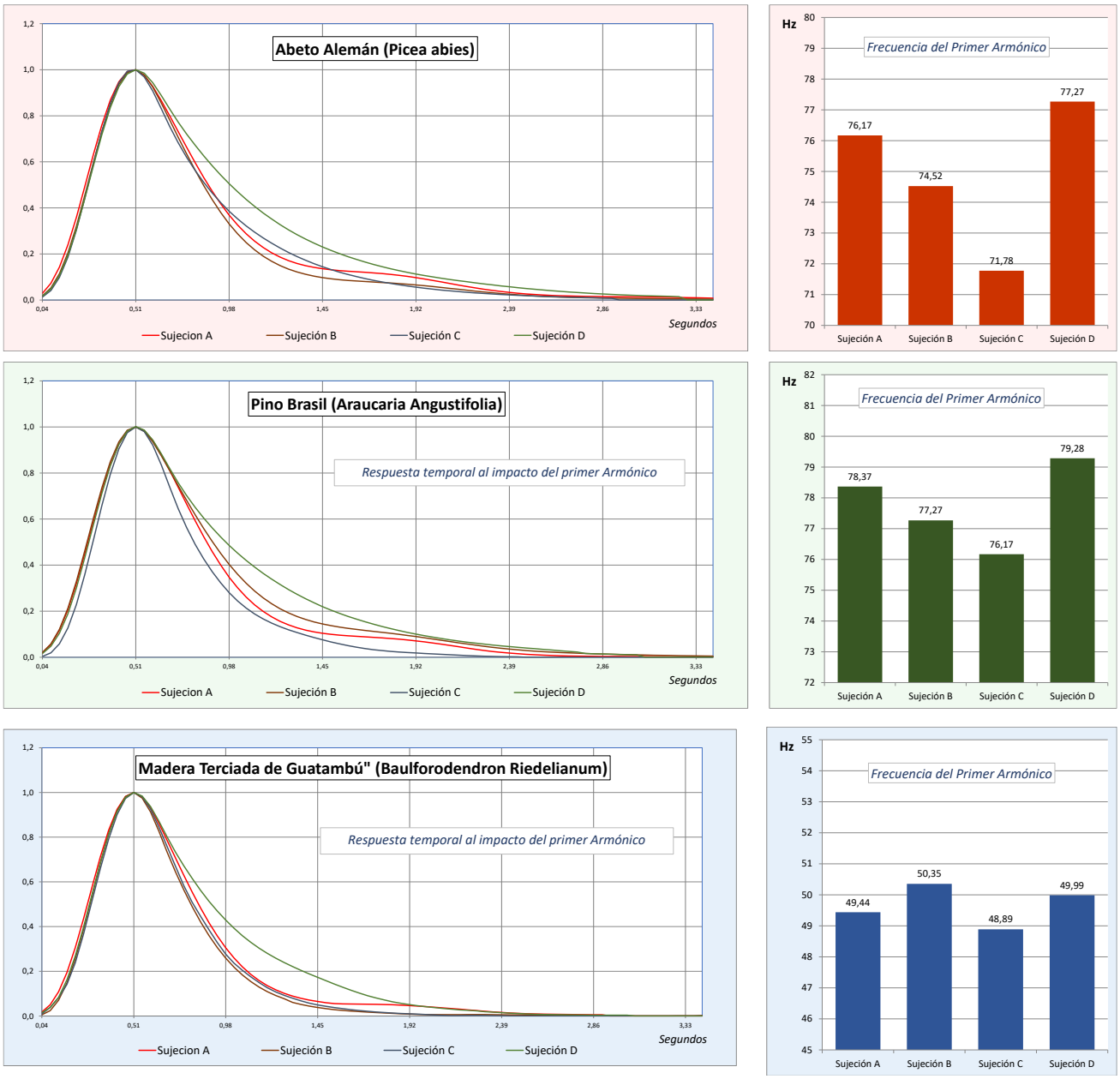


Figura 9. Evolución temporal del primer armónico en las 3 maderas y los 4 tipos de sujeción

con menor energía vibratoria sostenida, indicando una capacidad resonante inferior en comparación con las otras maderas.

En relación con las formas de sujeción, se identificaron los siguientes comportamientos:

• Sujeción en cuatro puntos (disposición horizontal)

Cuando la muestra se fija en cuatro puntos, se introducen restricciones mecánicas significativas que limitan la amplitud de vibración en distintas zonas del material. El efecto de esta restricción depende de la posición relativa de los puntos de sujeción respecto de los nodos de resonancia. Si los anclajes coinciden con nodos, donde el desplazamiento es mínimo, la perturbación resultante es leve; en cambio, si se ubican sobre antinodos —regiones de máximo desplazamiento—, la restricción se intensifica y provoca una reducción más pronunciada de la frecuencia fundamental.

• Sujeción en dos puntos (disposición vertical)

En esta configuración, la restricción mecánica es menor que en el caso de cuatro puntos, lo que otorga a la muestra mayor libertad de movimiento y favorece ciertos modos de vibración que permanecen parcialmente inhibidos en configuraciones más rígidas.

• Sujeción en un punto (disposición vertical)

Al suspender la muestra de un único punto, la limitación del movimiento resulta moderada desde el punto de vista estructural. La madera conserva una cierta capacidad de oscilación alrededor del punto de suspensión, permitiendo una respuesta intermedia entre rigidez y libertad vibratoria.

• Soporte mediante bandas elásticas

En esta disposición —válida especialmente para maderas de estructura homogénea—, la restricción mecánica es mínima, lo que permite que la pieza vibre libremente siguiendo sus modos naturales con escasa interferencia externa.

El análisis global confirma que la configuración de sujeción influye de manera determinante en la respuesta vibratoria de la muestra. Los resultados obtenidos indican que la configuración D (suspensión con bandas elásticas) ofrece condiciones cercanas al ideal experimental, al combinar una mínima interferencia mecánica, alta repetibilidad entre impactos y una representación fiel de los modos propios del material. Por estas razones, fue adoptada como condición estándar de referencia para las comparaciones entre especies, al garantizar mediciones objetivas, reproducibles y comparativamente consistentes.

Los resultados evidencian que el Abeto Alemán (Picea abies) posee las propiedades más favorables para su utilización en tapas armónicas de instrumentos musicales, combinando alta elasticidad, baja densidad y fricción interna [3].

4. DISCUSIÓN

El método de respuesta impulsiva desarrollado permite comparar distintas especies de madera bajo condiciones reproducibles y controladas. La configuración de sujeción D resulta especialmente adecuada, ya que minimiza las restricciones mecánicas, y el decaimiento temporal junto con la frecuencia del primer armónico se muestran como indicadores confiables para la caracterización de las muestras. Cabe destacar que el objetivo de este estudio no es calificar la calidad de las maderas, sino desarrollar y validar una metodología experimental objetiva y replicable que permita identificar diferencias y similitudes entre especies. Por el momento, el análisis se ha centrado únicamente en el primer armónico, aunque en etapas futuras se propone extender la evaluación a modos superiores, optimizar los procedimientos de medición y garantizar que el método pueda ser reproducido en distintos laboratorios bajo condiciones equivalentes. Si bien este trabajo no aborda variaciones intraespecíficas (por ejemplo, la orientación de corte dentro de un mismo tronco), la metodología podría adaptarse para este tipo de estudios. Se recomienda, además, incrementar el número de muestras y considerar estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, coeficiente de variación) para fortalecer la robustez de los resultados.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo de esta metodología constituye un avance relevante para la evaluación objetiva de materiales en el ámbito de la luthería. Su aplicación permite caracterizar de manera controlada tanto las propiedades acústicas como las mecánicas de diversas maderas. En el futuro, este enfoque podrá utilizarse para identificar materiales alternativos y optimizar el diseño de instrumentos musicales.

Las principales conclusiones derivadas de este estudio son:

- El método de respuesta impulsiva permite diferenciar especies en función de su comportamiento vibratorio.
- La forma de sujeción tiene un impacto significativo en las frecuencias observadas y en los decaimientos temporales.
- La configuración con suspensión sobre bandas elásticas resultó óptima para comparaciones entre especies.
- La frecuencia del primer armónico y su duración se muestran como indicadores fiables de la capacidad resonante de la madera.
- Entre las especies evaluadas, el Abeto Alemán presentó la mejor respuesta vibratoria, seguido por el Pino Brasil, mientras que el Terciado mostró una aptitud acústica menor, tal como era previsible.

6. PROYECCIONES FUTURAS

- Extender el análisis a armónicos superiores.
- Incorporar estadísticas robustas en los resultados.
- Evaluar la discriminación entre cortes distintos de una misma especie.
- Explorar otras especies nativas con potencial en luthería.
- Mejoras en el aparejo de impacto.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la CIC por facilitar las instalaciones.
A la Facultad de Ingeniería de la UNLP por el soporte técnico y logístico brindado.
Al Luthier Alejandro Donnantuoni por su generosa colaboración en el acondicionamiento de las muestras.
Al Luthier Julio Malarino por el intercambio de ideas, su permanente aliento y su generosa colaboración al facilitarnos las tablas de Pino Abeto.
Al INTA Misiones y al Ing. Hugo Fassola por su gestión para la obtención de las muestras de Araucaria y Pino Resinoso.

8. REFERENCIAS

[1] Iris Brémaud (2013). Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned Idiophones: Biological and cultural diversity. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00808347

[2] Richard Mark French (2008). Engineering the Guitar. Purdue University Department of Mechanical Engineering Technology Knoy Hall of Technology West Lafayette, IN 47907-2021. ISBN: 978-0-387-74368-4 e-ISBN: 978-0-387-74369-1 DOI: 10.1007/978-0-387-74369-1

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Enfrentando a la ISO: Sobre el uso del símbolo dBA para los niveles sonoros con ponderación A

Miyara, F.[†,1]

[†] Laboratorio de Acústica y Electroacústica, UNR, Rosario
[1] fmiyara@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN AMPLIADO

Resumen La Organización Internacional de Normalización (ISO) recomienda el símbolo dB para todas las instancias de uso de unidades de decibel, en particular en los casos de de cantidades como el nivel de presión sonora con ponderación A y C, censurando los símbolos dBA y dBC. En este trabajo se argumenta por qué ello es un error atendiendo al hecho de que el prefijo dB se utiliza en los símbolos de muchas unidades sustancialmente diferentes y a la existencia de ejemplos de situaciones donde se sigue un criterio similar al propuesto.

Palabras clave: ISO, simbología, unidades, decibel A.

Abstract The International Organization for Standardization (ISO) recommends the symbol dB for all instances where decibel units are used, particularly in the cases of quantities such as the A-weighted and C-weighted sound pressure levels, ruling out the symbols dBA y dBC. In this paper several arguments are put forward as to why such recommendation is mistaken and should be revised, taking into account that the dB prefix is used in the symbols of many substantially different units as well as the fact that there are examples of situations where the criterion hereby proposed is accepted.

Keywords: ISO, symbols, units, decibel A.

1. INTRODUCCIÓN

La Organización Internacional de Normalización (ISO) recomienda el uso del símbolo dB para todas las instancias de uso del decibel, lo cual se aplica al nivel de presión sonora ponderado A y C.

Para indicar que el valor está ponderado A, la prescripción indica que ello se debe expresar como un subíndice en el símbolo de la cantidad, no en el símbolo de la unidad; por ejemplo,

$$L_{\mathrm{Aeq}} = 85\ \mathrm{dB} \tag{1}$$

La definición de decibel y su símbolo dB se dan en la norma ISO 80000-3, mientras que la recomendación de no agregar ningún sufijo indicativo de la ponderación se establece en la norma ISO 80000-8:2006:

> "NOTA: El agregado de un sufijo para indicar la ponderación de frecuencia, por ejemplo dB(A), es incorrecto. Esta información debería incluirse en el símbolo de la cantidad, por ejemplo L_A" (traducción propia)

Esta recomendación remite al manual de estilo del Sistema Internacional de Unidades, SI, que indica que los símbolos de las unidades no deben llevar aditamentos que confieran información sobre la cantidad a representar, sino que tal información debe incluirse en el símbolo de la cantidad (BIPM, 2006, p. 132):

> "(...) el símbolo de unidad no debe utilizarse para proporcionar información específica sobre la cantidad y nunca debe ser la única fuente de información

> sobre la cantidad. Las unidades nunca se califican con información adicional sobre la naturaleza de la cantidad; cualquier información adicional sobre la naturaleza de la cantidad debe incluirse en el símbolo de cantidad y no en el símbolo de unidad." (traducción propia)

Similar criterio se expresa en el documento de la Organización Internacional de Metrología Legal OIML D 2:

> "No se permite agregar ningún tipo de adjetivo o signo a los nombres legales o símbolos legales de las unidades (por ejemplo, la potencia eléctrica se expresa en watts, W, no en watts eléctricos, We" (traducción propia).

Estas prescripciones son correctas pues se basan en un principio de economía, al desaconsejar asignar diferentes símbolos a una misma unidad. La cuestión es, entonces, si *en el caso que nos ocupa* se están aplicando correctamente. Responderemos a este interrogante en la próxima sección.

2. APLICACIÓN INADECUADA DE UN CRITERIO

Consideramos que aplicar estas prescripciones al caso del decibel A y otros es un error que se arrastra desde hace tiempo y que debería enmendarse adoptando símbolos más apropiados tales como dBA, dBC, etc., como era la práctica décadas atrás, y sigue siéndolo en buena parte de la literatura científica y técnica, la normativa y la legislación. En lo que sigue se tratará de explicar la razonabilidad de esta propuesta.

En primer lugar no estamos en la misma situación ejemplificada en la publicación arriba citada del BIPM, a saber, que para indicar que una cantidad U es el valor máximo de una señal oscilante no sería correcto escribir

$$U = 1000\ \text{Vmáx} \tag{2}$$

sino

$$U_{\text{máx}} = 1000\ \text{V} \tag{3}$$

En este caso las unidades simbolizadas V y Vmáx; son exactamente la misma unidad, por lo que es razonable evitar el uso del símbolo Vmáx cuando ya existe la unidad cuyo símbolo es V.

En nuestro caso el decibel A no es lo mismo que el decibel. Por empezar, el nivel de presión sonora no es sólo una forma logarítmica del cociente entre dos presiones sonoras, como es el caso de la expresión logarítmica de una ganancia o una relación señal/ruido, es decir, cantidades relativas, que además es la única situación en que el dB es aceptado como unidad fuera del SI para su uso con el SI (BIPM, 2019). Antes bien, se trata de una unidad absoluta utilizada para expresar unívocamente una cantidad física, del mismo modo que el metro no es una unidad para representar el cociente entre dos longitudes (la longitud a medir y la longitud de referencia o metro patrón), sino para representar el valor de una longitud o una distancia. Esto es así porque existe una referencia concreta, a diferencia de lo que sucede en el caso de una ganancia, que en un sistema lineal es independiente de los valores particulares de las señales de entrada y salida.

Para clarificar este concepto, el decibel utilizado en acústica es una unidad para expresar lo que se conoce como *nivel de una cantidad de campo*, donde existe una referencia concreta, 20 µPa, convenida universalmente y definida en numerosas normas, que vincula los niveles de presión sonora expresados en esta unidad con la unidad pascal del SI. Otro ejemplo es el dBV, utilizado en audio, que por convención utiliza una referencia de 1 V. Difícilmente podríamos sostener que la "V" que acompaña a la partícula "dB" en el símbolo dBV es un aditamento que sólo aclara la naturaleza de la cantidad, como sería el caso del símbolo Vmáx para connotar una tensión máxima.

De igual modo, el decibel acústico no es sólo la unidad para el logaritmo del cociente adimensional entre dos valores genéricos de presión sonora sino entre el valor a cuantificar y una referencia concreta. El que por razones históricas sigamos utilizando el símbolo dB para esta unidad es un hecho desafortunado, pues da lugar a confusiones, incluyendo aquella a la que nos estamos refiriendo. Se lo

tolera atendiendo a la larga tradición que se remonta a los orígenes de la metrología acústica. Podría utilizarse como símbolo dBp, o, como acostumbran muchos autores, dBSPL.

Ahora bien, usar el mismo símbolo dB para el nivel de presión sonora ponderado A es doblemente confuso, ya que nos estamos refiriendo a un tipo de medición fundamentalmente diferente, donde hay un proceso de filtrado que lleva a que, por ejemplo, dos señales acústicas cuyo nivel de presión sonora coincide puedan tener diferentes niveles ponderados y viceversa. Por ejemplo, dos sonidos de 200 Hz y 2000 Hz, ambos de 60 dB, poseen niveles ponderados de 49 dBA y 61 dBA respectivamente, en tanto que un sonido de 100 Hz y 59 dB tiene un nivel ponderado de 40 dBA, igual que uno de 630 Hz y 42 dB.

Nótese que la "A" adosada al símbolo dB no brinda información sobre la cantidad sino sobre su dimensión, de igual modo que en el símbolo °C se agrega una "C" al símbolo ° sin que la C califique a este último. Se agrega para denotar que son unidades diferentes dado que el ángulo y la temperatura Celsius son cantidades dimensionalmente diferentes. Igual que en el caso del dB, en este caso el ° se ha utilizado tradicionalmente para ángulos y temperaturas, lo que es también desafortunado pero responde a la tradición.

3. UN SÍMBOLO PARA MUCHAS UNIDADES

Lo que sucede es que numerosas unidades han ido surgiendo con el prefijo dB sólo porque hay un proceso logarítmico involucrado en el cálculo de sus valores, no porque sean variantes informativas de una misma unidad. Pretender utilizar el mismo símbolo para unidades tan diversas como el dB de nivel de presión sonora, el dB de intensidad sonora, el dB de nivel espectral, el dB de ganancia, atenuación o relación señal/ruido, el dB de tensión, el dB de potencia eléctrica es un error. El uso de una sola unidad para todos ellos debido a una interpretación fundamentalista del texto del BIPM sólo introduce confusión, especialmente en disciplinas como la tecnología de sonido donde conviven varias de estas cantidades diferentes.

4. UN CASO SIMILAR EN ÓPTICA

Para poner la cuestión en otra perspectiva veamos un caso extremo en una disciplina afín, la óptica, y su rama tecnológica, la luminotecnia. Aquí nos encontramos con el caso de la candela, unidad de intensidad luminosa utilizada para cuantificar el brillo de una fuente luminosa. Dimensionalmente es similar al W/sr, es decir la unidad de intensidad radiante, pero la candela es en realidad una unidad completamente diferente, dado que la intensidad luminosa es el resultado de una ponderación frecuencial que pondera la señal radiante según el grado de sensibilidad visual para cada frecuencia (o longitud de onda).

Lo más notable del caso es que la candela no sólo tiene estatus de unidad independiente con su propio símbolo incluido, cd, ¡sino que ha sido adoptada como una de las siete unidades fundamentales del SI!

La aceptación de la candela como unidad fundamental del SI reconoce implícitamente que la ponderación frecuencial (filtrado previo a la medición efectiva) requiere una unidad diferente. Lo mismo sucede en el caso del nivel de presión sonora ponderado, y si bien no se pretende llegar al extremo de instaurar la unidad correspondiente como unidad fundamental del SI, sí al menos reconocer que la unidad merece un símbolo propio, el dBA.

La discusión queda empantanada por el desafortunado hecho de que los símbolos dB y dBA comienzan con el mismo prefijo, por lo cual parecería que la A es un sufijo aclaratorio cuando no lo es.

5. EL dBA EN LA LITERATURA Y OTROS DOCUMENTOS

Por otro lado el uso del dBA es habitual en muchas fuentes bibliográficas, incluidos muchos libros (Cowan, 2016; Manik, 2017), algunos de gran predicamento en el mundo de la acústica (Beranek, 1988). Otros autores prefieren notarlo dB(A) (Harris, 1994; Fritschi et al., 2011), lo cual es menos económico e introduce innecesariamente signos no alfabéticos, pero reconoce la necesidad de un

símbolo de unidad diferente. En Beranek et al. (1992) se utilizan las tres convenciones (dB, dB(A) y dBA) según el autor de cada capítulo. También en publicaciones científicas se suele encontrar esta simbología (Waughm, 1973), así como en tesis doctorales (Ballesteros Garrido, 2014).

En documentos de organismos como la Organización Mundial de la salud (OMS) también es habitual el uso de estas unidades, por ejemplo en Berglund et al. (1995) se usa principalmente dBA, en Berglund et al. (2000) se usa dBA y dB(A) y en Fritschi et al. (2011) se utiliza dB(A). También hay muchos ejemplos en la legislación, por ejemplo la Ley 1540 de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires utiliza tanto dBA como dB(A), y el documento básico de protección contra el ruido vigente en España utiliza dBA.

Incluso en la normativa ISO reciente (si bien puede tratarse de casos residuales) hay ejemplos donde se utiliza el dBA como símbolo, por ejemplo ISO/IWA 24:2016 e ISO 16976:2023. También varias normas ITU utilizan el símbolo dBA (ITU-R BS.1771-1, ITU-T H.872). Existe incluso una recomendación ITU V.574-5 que estipula explícitamente en su cláusula 8 sobre notaciones especiales

> "Para nivel de presión acústica absoluta (ver § 6.8)
> dBA, dBB o dBC: Nivel de presión acústica ponderada con respecto a 20 µPa, mencionando la curva de ponderación usada (curvas A, B o C, ver norma internacional IEC 61672)." (traducción propia)

La norma IEC 60268-16 utiliza una variante atípica: dB A, separando la A de la partícula "dB", lo cual no recomendamos.

Varios de los argumentos anteriores fueron remitidos reiteradamente por el autor a la ISO. La respuesta ha variado en cuanto a la consideración que han recibido las observaciones, pero no en cuanto a la respuesta final, que siempre ha sido monolítica en su rechazo a la propuesta (Neilsen, 2011; Kornprobst, 2018). En algunos casos, luego de la réplica con mayor argumentación ante la negativa a considerar la cuestión el autor ya no recibía respuesta.

6. CONCLUSIÓN

Podemos concluir que el uso, tanto en textos académicos como reglamentarios y normativos, de un símbolo específico (dBA o dB(A), con preferencia del primero) para expresar las cantidades resultantes de una ponderación frecuencial está bastante difundido, señalando que muchos especialistas reconocen la necesidad de diferenciar ambos tipos de decibel y que dicha simbología es una respuesta a esa necesidad. La ISO y otros organismos normalizadores nacionales e internacionales deberían revisar la postura que proscribe el uso de símbolos como dBA o dBC.

REFERENCIAS

Ballesteros Garrido, María Jesús (2014) *Análisis del ruido de ocio, propuesta de procedimientos y herramientas de gestión*. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid https://oa.upm.es/32847/1/MARIA_JESUS_BALLESTEROS_GARRIDO.pdf

Beranek, Leo (comp.) (1988) *Noise and Vibration Control*. Institute of Noise Control Engineers

Beranek, Leo; Vér, István (comps.) (1992) *Noise and Vibration Control Engineering*. Principles and Applications. John Wiley & Sons, Inc.

Berglund, Birgitta; Lindvall, Thomas (1995) *Community Noise*. Stockholm University and Karolinska Institute https://docs.wind-watch.org/WHO-communitynoise.pdf

Berglund, Birgitta; Lindvall, Thomas, Schella, Dietrich; Goh, Kee-Tai (2000) *Guidelines for Community Noise*. World Health Organisation. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/66217/a68672.pdf?sequence=1&isAllowed=y

BIPM (2006). *The International System of Units (8th edition)*, p. 132 https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/si_brochure_8.pdf/

Cowan, James P. (2016) *The Effects of Sound on People*. John Wiley & Sons, Inc.

Ferrero, Alejandro; Campos, Joaquín (2021) *¿Es la intensidad luminosa la magnitud más fundamental para medir la luz?* Instituto de Óptica "Daza de Valdés" (IO, CSIC). e-medida N° 18- https://www.e-medida.es/numero18/es-la-intensidad-luminosa-la-magnitud-mas-fundamental-para-medir-la-luz/

Fritschi, Lin; Brown, A. Lex; Kim, Rokho; Schwela, Dietrich; Kephalopoulos, Stelios (comp) (2011) *Burden of disease from environmental noise Quantification of healthy life years lost in Europe*. World Health Organization. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/326424/9789289002295-eng.pdf?sequence=1

Harris, Cyril (comp.) (1994) *Handbook of Noise Control and Acoustical Measurements.*

IEC 60268-16:2011 *Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*

ISO/IWA 24:2016(en) *Non-sewered sanitation systems — General safety and performance requirements for design and testing* https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:iwa:24:ed-1:v1:en:fn:1

ISO 16976:2023 R*espiratory protective devices — Human factors — Part 7: Hearing and speech* https://cdn.standards.iteh.ai/samples/82900/e8693e672dc54fd68794937a154a0d2f/ISO-16976-7-2023.pdf

ISO 80000-3:2006 *Quantities and units — Part 3: Space and time*

ISO 80000-8:2006 *Quantities and units — Part 8: Acoustics*

ITU-R BS.1771-1 (01/2012) *Requirements for loudness and true-peak indicating meters* https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/r-rec-bs.1771-1-201201-i!!pdf-e.pdf

ITU-R V.574-5 (08/2015) *Use of the decibel and the neper in telecommunications* https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.574-5-201508-I!!PDF-E.pdf

ITU-T H.872 (10/2024) *E-health multimedia systems, services and applications – Safe listening. Safe listening for video gameplay and esports* https://www.itu.int/rec/T-REC-H.872-202410-I/en

Kornprobst, Hans-Joachim (2018-01-18) *Comunicación personal por correo electrónico*

LEY L - N° 1.540 *Control de la contaminación acústica en la ciudad autónoma de Buenos Aires* (texto consolidado 2017) https://digesto.buenosaires.gob.ar/documento/download/Ley%20Ciudad-1540__8bbd883db98dac7a993dcf777998ddad503e4ca7.pdf

Manik, Dhanesh N. (2017) *Vibro-Acoustics: Fundamentals and Applications*. CRC Press

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2019) *Documento Básico HR Protección frente al ruido* https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HR/DBHR.pdf

Nielsen Leif (2011-01-12) *Comunicación personal por correo electrónico*.

OIML D 2 Consolidated Edition 2007 (E) Legal units of measurement https://www.oiml.org/en/publications/documents/en/files/pdf_d/d002-e07.pdf

Waughm R. (1973) *dBA attenuation of ear protectors*. J. Acoust. Soc. Am. 53, 440–447. https://doi.org/10.1121/1.1913341

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Influencia de la modalidad visual en la percepción auditiva del tiempo de reverberación de una sala

Nocetti, F. [†,1]**; Gerez, F.** [†]**; Cerviño, J.** [†‡]**; Vergara, R. O.** [‡]**; Lombera, E.** [†]

[†] Grupo de Investigación en Acústica y Psicoacústica, Departamento de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), Sáenz Peña, B1678, Argentinartamento, Universidad A, Ciudad A

‡ Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo), Universidad Nacional de Quilmes, CONICET, Bernal, Buenos Aires, B1876, Argentina

[1] fabri.nocetti@gmail.com

Resumen La percepción del entorno es un proceso multisensorial en el que el cerebro integra información de distintos sentidos para generar una experiencia coherente. En este marco, estudios han demostrado que la percepción auditiva puede verse influida por estímulos visuales, como la apariencia de una sala. En particular, se ha observado que salas visualmente más absorbentes tienden a asociarse con menor reverberación, aunque los resultados varían. Este estudio investigó dicho efecto mediante un experimento en realidad virtual, utilizando combinaciones de estímulos visuales (salas con distintos objetos y revestimientos) y auditivos (grabaciones binaurales con diferentes tiempos de reverberación correspondientes a esas salas). Los participantes evaluaron la congruencia entre lo visto y lo oído. La hipótesis fue que un mayor grado de revestimiento visible induciría la percepción de menor reverberación, incluso cuando el estímulo auditivo se mantenía constante. Los resultados confirman esta hipótesis y muestran, además, que existe un límite a partir del cual los participantes dejan de considerar que el revestimiento visible influya en la percepción del tiempo de reverberación.

Palabras clave: multimodal, reverberación, percepción.

Abstract Perception of the environment is a multisensory process in which the brain integrates information from different senses to generate a coherent experience. Within this framework, studies have shown that auditory perception can be influenced by visual stimuli, such as the appearance of a room. In particular, visually more absorbent rooms have been associated with lower perceived reverberation, although results vary. This study investigated this effect through a virtual reality experiment, using combinations of visual stimuli (rooms with different objects and surface materials) and auditory stimuli (binaural recordings with different reverberation times corresponding to those rooms). Participants evaluated the congruence between what they saw and what they heard. The hypothesis was that a greater amount of visible acoustic treatment would induce the perception of lower reverberation, even when the auditory stimulus remained constant. The results confirmed this hypothesis and further showed that there is a threshold beyond which participants no longer consider visible absorption to influence the perception of reverberation time.

Palabras clave: multimodal, reverberation, perception.

1. INTRODUCCIÓN

La percepción humana del entorno es un proceso complejo que integra información proveniente de distintos sistemas sensoriales. Los sentidos del olfato, gusto, tacto, audición y visión permiten construir una experiencia coherente y estable del mundo. Aunque tradicionalmente se han estudiado de forma independiente, en la vida cotidiana la información sensorial se recibe de manera conjunta, lo que hace esencial comprender cómo el cerebro combina y pondera múltiples fuentes para generar una percepción unificada y precisa del entorno.

Entre las interacciones sensoriales, la relación entre audición y visión reviste un interés especial. Esta interacción resulta fundamental tanto para entender los mecanismos perceptivos como para el desarrollo de tecnologías inmersivas —como la realidad virtual y aumentada— que buscan reproducir

experiencias realistas en entornos simulados. La coherencia audiovisual favorece la localización espacial, la credibilidad perceptiva y la naturalidad en la interacción, por lo que un conocimiento profundo de cómo los sentidos se combinan es crucial para optimizar el diseño de estos sistemas. Numerosos estudios han demostrado que la información visual puede influir en la percepción auditiva. Un ejemplo clásico es el efecto McGurk [1], donde el cerebro integra señales visuales y auditivas conflictivas para generar una percepción intermedia, evidenciando que la audición no depende exclusivamente del sonido sino también del contexto visual. Investigaciones posteriores confirmaron que la visión puede modificar atributos auditivos como la intensidad percibida, la localización o la duración [2-4]. Estos hallazgos enmarcan la percepción como un proceso de integración multimodal, donde el sistema nervioso combina señales congruentes o conflictivas provenientes de distintas modalidades [5,6]. En condiciones congruentes, la redundancia sensorial mejora la precisión perceptiva; en condiciones conflictivas, puede generar ilusiones o sesgos intersensoriales [7,8].

En el ámbito acústico, la percepción del sonido en un espacio cerrado depende no solo de la señal directa de la fuente, sino también de las reflexiones que se producen en las superficies del recinto. Este fenómeno, conocido como reverberación, afecta la claridad, la inteligibilidad y la percepción espacial del sonido [9]. Su correcta reproducción es fundamental tanto en el diseño arquitectónico como en la simulación binaural de entornos tridimensionales [10]. En este contexto, la información visual puede aportar claves sobre las dimensiones, materiales y geometría de un recinto, influyendo potencialmente en la percepción auditiva de su reverberación.

Diversos estudios han abordado la interacción entre visión y audición en entornos arquitectónicos o simulados. Traer y McDermott (2016) [11] mostraron que los oyentes utilizan el conocimiento previo sobre las características de la reverberación real para interpretar mejor los sonidos, y [12] Brandewie y Zahorik (2010) observaron que la exposición previa a un entorno reverberante mejora la inteligibilidad del habla. Sandvad (1999) [13] halló que los participantes podían asociar grabaciones reverberantes con fotografías de los recintos correspondientes, sugiriendo que las claves visuales ayudan a inferir propiedades acústicas. Cabrera et al. (2004) [14] reportaron consistencia entre la percepción visual y auditiva de atributos espaciales, mientras que Valente y Braasch (2010) [15] demostraron que la apariencia visual de un entorno puede generar expectativas que modifican la estimación del tiempo de reverberación y la relación directo-reverberado.

No obstante, otros trabajos han encontrado efectos más limitados. Schutte et al. (2019) [16], en un entorno de realidad virtual, no observaron diferencias significativas en la percepción de la reverberación entre condiciones audiovisuales congruentes e incongruentes, sugiriendo que los participantes se basaron principalmente en la información auditiva. Estas discrepancias ponen de manifiesto que la influencia visual puede depender de factores metodológicos como el entrenamiento previo, el realismo de la escena o la saliencia de los estímulos.

En conjunto, la literatura sugiere que la visión puede modificar la interpretación auditiva de un espacio, aunque la magnitud y dirección de ese efecto varían según las condiciones experimentales. Se ha demostrado que la información visual genera expectativas sobre las propiedades acústicas de un entorno [17] y que imágenes coherentes con la reverberación mejoran la precisión perceptiva [18]. Sin embargo, pese a la abundancia de estudios sobre congruencia audiovisual, ninguno se ha centrado en evaluar de manera específica cómo una característica visual concreta, como el revestimiento de las superficies de una sala, afecta la percepción subjetiva del tiempo de reverberación.

Considerando que el nivel de revestimiento visible de un recinto puede generar expectativas sobre su grado de absorción sonora, resulta relevante examinar cómo estas señales visuales influyen en la percepción acústica. En este marco, la presente investigación se propone analizar la influencia de las características visuales de una sala, particularmente el revestimiento, sobre las estimaciones subjetivas de su tiempo de reverberación. Para ello, se diseñó un experimento en realidad virtual que combina estímulos visuales —salas con diferentes objetos y materiales— con estímulos auditivos —grabaciones binaurales con distintos tiempos de reverberación—. Los participantes evaluaron la congruencia entre lo visto y lo oído, permitiendo explorar hasta qué punto la información visual modula la percepción de la reverberación y si existe un límite a partir del cual el recubrimiento visible

deja de influir en la experiencia auditiva. Este abordaje busca aportar evidencia empírica sobre los mecanismos de integración audiovisual y contribuir al diseño de entornos virtuales más coherentes y realistas desde el punto de vista perceptivo.

2. MÉTODO

2.1 Participantes

Participaron veinte personas adultas (17 hombres y 3 mujeres), con edades comprendidas entre 23 y 42 años (media = 30,1 ± 5,6 años). Todos los participantes reportaron poseer audición normal y no presentar antecedentes de patologías auditivas.

El tamaño muestral se determinó mediante un análisis de potencia estadística basado en un estudio piloto previo, adoptando un nivel de potencia (1–β) entre 0,8 y 0,9, lo que garantiza una probabilidad de error tipo II (β) inferior a 0,2.

El estudio se llevó a cabo conforme a los principios éticos de la Declaración de Helsinki y a la Guía para Investigaciones en Salud Humana (Resolución 1480/11). La información personal fue resguardada de acuerdo con la Ley Argentina de Protección de Datos Personales N.º 25.326. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado aprobado por el Comité de Ética de la Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF) y fueron mayores de edad al momento de la participación.

2.2 Entorno experimental

El experimento se realizó en una sala perteneciente a la Secretaría de Investigación y Desarrollo de la sede Aromos de la Universidad Nacional de Tres de Febrero (Ciudad Jardín Lomas del Palomar, Provincia de Buenos Aires).

El espacio fue acondicionado para asegurar un ambiente controlado, libre de interferencias externas y adecuado para la presentación de los estímulos audiovisuales. Los participantes permanecieron sentados durante toda la sesión y contaron con libertad de movimiento de cabeza dentro de los límites del sistema de visualización.

Los estímulos se presentaron mediante un visor de realidad virtual (HMD Oculus Meta Quest 2) y auriculares circumaurales Sennheiser HD800 conectados al visor. La presentación de los entornos visuales y auditivos, así como el registro de las respuestas, fue controlada por un software desarrollado en Unreal Engine, el cual permitió la sincronización precisa entre ambas modalidades y la aleatorización de los ensayos.

2.3. Obtención de estímulos

Los estímulos auditivos y visuales se obtuvieron en una habitación cerrada de una vivienda, de dimensiones 2,94 m × 2,80 m × 2,6 m, compuesta por paredes, techo, piso, una ventana, una puerta, un placard de dos hojas y un artefacto de iluminación central.

Para los registros auditivos se utilizó un maniquí estandarizado de cabeza y torso G.R.A.S. Kemar Type 45BA, equipado con micrófonos binaurales DPA 4560 ubicados en los canales auditivos (Mic L y Mic R). Siguiendo el procedimiento recomendado en investigaciones previas [19,20], se implementó un bloqueo parcial del canal auditivo mediante tapones reducidos a la mitad, sobre los cuales se colocaron los micrófonos. Esta configuración, validada en ensayos preliminares [21], permitió una representación espacial más precisa de las señales capturadas.

El maniquí se colocó sobre una silla, con las orejas a 1,30 m del piso y a 0,30 m de las paredes adyacentes, orientado frontalmente hacia la fuente sonora. La fuente sonora fue un altavoz Genelec 8020B, ubicado a 1,90 m del receptor, y conectado a una interfaz de audio RME Fireface UCX para la conversión AD/DA.

Las fotografías 360° de los entornos visuales se capturaron con una cámara Kandao Qoocam 8k, ubicada en la misma posición del receptor, de modo que cada imagen correspondiera directamente a la condición acústica registrada.

Para cada configuración de la sala, se combinaron distintos elementos domésticos (sábanas, acolchados, almohadas, colchones, mesas de luz), modificando progresivamente el nivel de revestimiento y, por tanto, la absorción acústica. Se registraron 13 configuraciones, y para cada una se tomaron simultáneamente una fotografía panorámica y la respuesta al impulso (IR) de la sala mediante el método LSS – Log Sine Sweep [22].

Cada registro binaural capturó la Head-Related Transfer Function (HRTF) correspondiente a la posición del receptor, reflejando la interacción del sonido con la cabeza y el torso del maniquí.

De las 13 configuraciones registradas, se seleccionaron cinco (ver Figura 1) que representaban un incremento progresivo en el grado de revestimiento, denominadas A (Completo), B (Mucho), C (Normal), D (Poco) y E (Sin revestimiento).

Figura 1: Recorte de las fotografías panorámicas seleccionadas para el experimento principal. Estas fotografías son representativas de los entornos obtenidos con la cámara de 360°. Los mismos se representan como A, B, C, D y E en función de la cantidad de revestimiento: “Completo”, “Mucho”, “Normal”, “Poco” y “Sin” respectivamente.

A partir de las respuestas al impulso de estas cinco configuraciones se calcularon los tiempos de reverberación T30 y Tmid (promedio entre 500 y 1000 Hz). Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: T30 y Tmid, en segundos de los entornos registrados. Etiquetas de estímulos auditivos registrados y etiquetas de entornos visuales. Referencia de cantidades de revestimiento según el entorno.

Entorno visual	Estímulo auditivo	Revestimiento	T30 [s]	Tmid [s]
A	TR A	Completo	0,244	0,340
B	TR B	Mucho	0,341	0,490
C	TR C	Normal	0,615	0,893
D	TR D	Poco	0,817	1,026
E	TR E	Sin	1,224	1,993

Los estímulos auditivos fueron generados mediante la convolución de una grabación musical anecoica (voz y guitarra acústica; Bernschutz, 2013) con las respuestas al impulso de cada condición. Con el fin de simplificar la tarea experimental y evitar correspondencias directas, se seleccionaron solo tres estímulos auditivos representativos —TR 1, TR 2 y TR 3— correspondientes a las condiciones A, C y E, que cubrían el rango completo de reverberación registrado.

Las imágenes intermedias B y D se mantuvieron únicamente como estímulos visuales para evaluar el efecto del entorno observado sobre la percepción auditiva.

2.4. Procedimiento

El experimento consistió en un test de elección forzada binaria, en el que los participantes debían juzgar si el sonido escuchado “pertenecía o no” a la sala visualizada.

Cada sesión comenzó con la lectura de un documento de instrucciones y la firma del consentimiento informado. Previo al experimento principal, se realizó un test audiológico siguiendo los criterios de la ANSI y la American Speech-Language-Hearing Association (ASHA) para confirmar la audición normal de los participantes.

Una vez equipado con el visor HMD y los auriculares, el participante seleccionaba en el menú virtual la opción “Comenzar el experimento”, lo que iniciaba una cuenta regresiva de tres segundos antes del primer ensayo.

Durante cada ensayo se presentaba un entorno visual (una de las cinco configuraciones de revestimiento) junto con uno de los tres estímulos auditivos. La secuencia total incluyó 15 combinaciones audiovisuales, repetidas 5 veces cada una, resultando en 75 ensayos por participante, presentados en orden aleatorio.

En cada ensayo, el participante disponía de unos segundos para explorar libremente el entorno visual mediante movimientos de cabeza. Luego, debía fijar su mirada en el altavoz virtual visible en la escena, lo que estabilizaba su orientación. Dos segundos después se reproducía el estímulo auditivo, durante el cual se pedía mantener la cabeza fija, garantizando la coincidencia con la posición de registro binaural.

Tras la reproducción, aparecía en el visor la pregunta “¿El sonido que escuchó corresponde a la sala que observa?”, y el participante debía responder seleccionando “Sí” o “No” con el puntero láser del controlador del HMD. La transición entre ensayos incluía una breve atenuación visual para evitar saltos abruptos.

Cada sesión tuvo una duración aproximada de 30 minutos. Las respuestas se almacenaron automáticamente en el software de control y se exportaron al finalizar cada sesión para su análisis estadístico posterior.

2.5 Análisis estadístico

El análisis de los juicios de coincidencia se realizó mediante un modelo lineal generalizado de efectos mixtos (GLMM) con distribución binomial y enlace logit, implementado en el paquete lme4 de R (R Core Team, 2021). Las respuestas se codificaron como binarias (0 = "Coinciden", 1 = "No coinciden").

El enlace logit transforma las probabilidades de respuesta en log-odds, definidos como el logaritmo de la razón entre la probabilidad de responder "No coinciden" y la de responder "Coinciden". Esta transformación permite modelar linealmente una variable que en la escala original está restringida al intervalo [0, 1]. Los coeficientes del modelo se estimaron en log-odds y posteriormente se transformaron mediante la función logística inversa, de modo que los resultados pudieran expresarse en probabilidades de respuesta.

El modelo incluyó como efectos fijos el Revestimiento (cinco niveles: Completo, Mucho, Normal, Poco y Sin) y el TR (tres niveles: 0.22, 0.62 y 1.22 s), así como su interacción. Como efectos aleatorios se especificaron interceptos y pendientes por sujeto, con el fin de capturar la variabilidad interindividual.

La significancia de los efectos fijos se evaluó mediante pruebas de razón de verosimilitud (χ^2 de Wald) a partir de un ANOVA tipo III (paquete car). Las comparaciones post hoc se realizaron con el paquete emmeans, aplicando la corrección de Holm–Bonferroni para controlar el error por comparaciones múltiples. Los supuestos del modelo se verificaron mediante la inspección visual de residuos y de los efectos aleatorios.

3. RESULTADOS

Como primer paso, se evaluó la calidad del ajuste del modelo lineal generalizado mixto (GLMM) sobre las respuestas de coincidencia. La inspección de los residuos de Pearson mostró una distribución centrada en cero y mayormente contenida en el rango esperado −2, 2, solo un número reducido de observaciones superó el umbral de ±3; dichas observaciones fueron casos aislados sin patrón sistemático atribuible a participantes o condiciones específicas. En consecuencia, se conservaron todas las observaciones para el análisis final, reforzando la validez de los resultados subsiguientes.

El análisis de varianza del GLMM (pruebas del Wald tipo III) reveló efectos significativos tanto de entornos visuales (revestimiento), X^2 (4) = 89,35, p< 0,001, como de estímulos auditivos, X^2 (2) = 81,12, p < 0,001. Asimismo, se observó una interacción altamente significativa entre ambos factores X^2 (2) = 365,03, p < 0,001, lo que indica que la influencia del entorno visual sobre las respuestas de coincidencia dependió del estímulo auditivo, asociado a un tiempo de reverberación, y viceversa.

Las probabilidades estimadas a partir del modelo se presentan en la Tabla 2 y en la Figura 2. En términos generales, los participantes respondieron que el entorno visual y estímulo auditivo coinciden con alta probabilidad en condiciones en donde ambos estímulos eran congruentes (TR 1 con entorno visual A, TR 2 con el C y el TR 3 con el E), mientras que la probabilidad disminuyó de manera marcada en condiciones incongruentes. Por ejemplo, con revestimiento completo (A) y TR 1 la probabilidad estimada de responder que coinciden fue de 0,89 (IC95%: 0,78-0,95) mientras que en el entorno E (revestimiento completo) y TR 1 esta probabilidad se redujo a apenas 0,06 (IC95%: 0,02-0,14). En contraste, bajo la condición del entorno C con TR 2, la probabilidad de coincidencia superó el 0,85.

La Figura 2 muestra claramente estas diferencias, representando las probabilidades de respuesta en función del TR y diferencias por nivel de revestimiento. En las condiciones de mayor cantidad de revestimiento, la probabilidad de coincidencia decreció rápidamente a medida que el tiempo de reverberación de los estímulos auditivos aumentaba, reflejando la expectativa de que entornos más revestidos deben representar reverberaciones más cortas. Por el contrario, en los entornos menos revestidos (entornos D y E), la probabilidad de coincidencia fue más elevada en TRs largos, lo que

refleja la expectativa opuesta: espacios visualmente más reverberantes, deberían presentar colas de reverberación más extensas.

Tabla 2: Resultados por entorno visual y tiempo de reverberación. La columna Revestimiento indica el nivel de tratamiento acústico aplicado (A, B, C, D o E) junto con el valor de TR asociado en segundos. La columna TR corresponde al tiempo de reverberación de referencia considerado en el análisis. La columna Probabilidad muestra la probabilidad estimada de coincidencia bajo cada condición, mientras que SE corresponde al error estándar de dicha estimación. Las columnas IC95% inferior y IC95% superior representan, respectivamente, los límites inferior y superior del intervalo de confianza asintótico al 95% para la probabilidad estimada.

Entorno Visual	Estímulo Auditivo	Probabilidad	SE	IC95% inferior	IC95% superior
A	TR 1	0,89	0,04	0,78	0,95
B	TR 1	0,71	0,06	0,57	0,81
C	TR 1	0,18	0,05	0,10	0,31
D	TR 1	0,20	0,05	0,11	0,32
E	TR 1	0,06	0,03	0,02	0,14
A	TR 2	0,02	0,01	0,01	0,08
B	TR 2	0,18	0,05	0,11	0,30
C	TR 2	0,90	0,03	0,81	0,95
D	TR 2	0,85	0,04	0,74	0,92
E	TR 2	0,86	0,05	0,73	0,93
A	TR 3	0,07	0,03	0,03	0,17
B	TR 3	0,16	0,05	0,09	0,27
C	TR 3	0,86	0,04	0,75	0,93
D	TR 3	0,87	0,04	0,77	0,93
E	TR 3	0,92	0,03	0,82	0,96

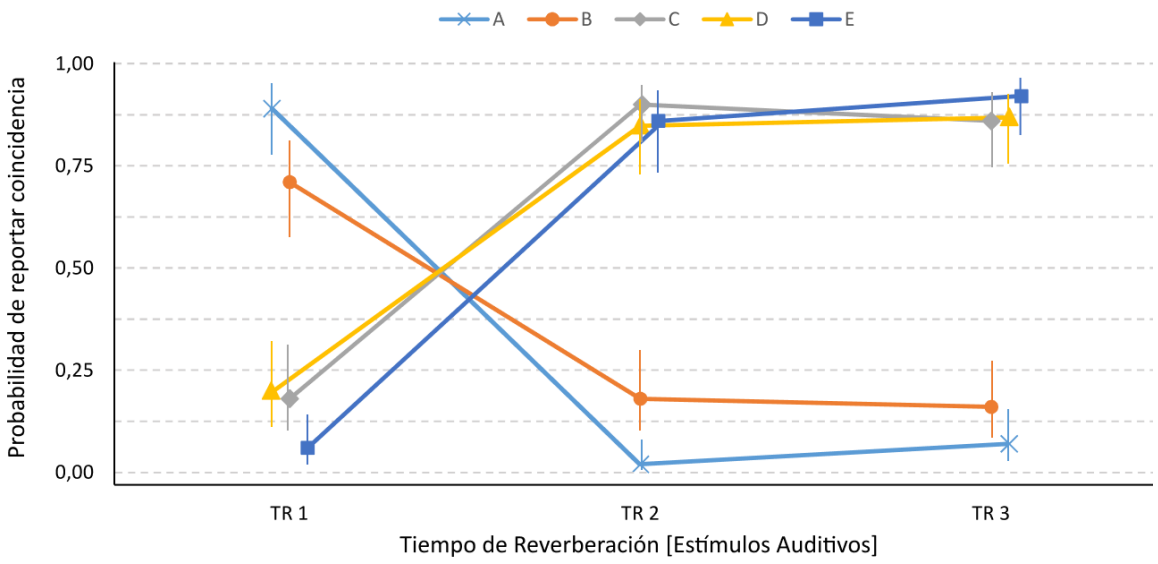


Figura 2: Probabilidades estimadas de responder que los estímulos coinciden en función del tiempo de reverberación. En el eje horizontal se muestran TR 1, TR 2 y TR 3 y en el eje vertical la probabilidad estimada. Las líneas y puntos corresponden a cada condición de revestimiento visual (A, B, C, D y E), diferenciadas por color. Las barras verticales representan los intervalos de confianza asintóticos al 95% para cada estimación.

Un patrón particular emergió en los los entornos C, D y E (revestimiento normal, poco y sin), las respuestas para TR 2 y TR 3 resultaron con probabilidades de coincidencia más cercanas entre sí (C = 0,86, D = 0,87 y E = 0,92 para TR 3 y C = 0,90, D = 0,85, E = 0,86 para TR 2). Este hallazgo puede interpretarse de dos maneras. Por un lado, podría estar indicando que los participantes no fueron capaces de discriminar perceptualmente la diferencia entre un estímulo auditivo con un tiempo de reverberación medio (TR 2) de otro mayor (TR 3) en la tarea de coincidencia audiovisual. Por otro

lado, podría reflejar que los entornos visuales correspondientes a estos tres niveles de revestimiento (C, D y E) no fueron percibidos claramente como distintos entre sí, limitando su capacidad para generar expectativas diferenciadas sobre el tiempo de reverberación. Una explicación integradora sugiere que ambos factores pueden haber contribuido simultáneamente, lo que llevó a que estas condiciones resultaran perceptualmente equivalentes. Este aspecto se abordó en los experimentos de control, uno exclusivamente visual y otro exclusivamente auditivo, diseñados para evaluar específicamente la sensibilidad de los participantes entre estos estímulos.

Las comparaciones post-hoc realizadas (ajustadas por Holm-Bonferroni) confirmaron diferencias significativas entre estímulos auditivos de tiempo de reverberación corto (TR 1) y largo (TR 3) dentro de cada nivel de revestimiento, con efectos particularmente marcados en las condiciones A y E, donde el contraste entre TR 1 y TR 3 alcanzaron valores p ajustados menores a 0,001. La magnitud de estas diferencias refuerza la conclusión de que la congruencia entre la información visual y auditiva determina de manera significativa las respuestas de coincidencia.

En conjunto, estos resultados muestran que las respuestas de coincidencia estuvieron considerablemente moduladas por la interacción entre el entorno visual y los estímulos auditivos, confirmando que la percepción multimodal del espacio acústico no depende únicamente de las propiedades físicas de los estímulos, sino también de las expectativas generadas por las claves visuales.

3.1. Experimentos control

3.1.1 Visual

El experimento de control visual tuvo como finalidad evaluar la capacidad de los participantes para discriminar entre los distintos entornos visuales utilizados en el experimento principal, con el objetivo de determinar si la similitud observada entre algunas condiciones se debía a una limitación perceptiva visual.

Se utilizaron los mismos entornos del experimento principal, pero sin el altavoz visible, correspondientes a cinco niveles de revestimiento progresivo del recinto: A (Completo), B (Mucho), C (Normal), D (Poco) y E (Sin revestimiento).

Participaron 15 personas (11 hombres y 4 mujeres; edad media = 25,9 ± 6 años), todas con audición normal. El procedimiento siguió los mismos lineamientos éticos y técnicos que el experimento principal.

Durante la tarea, los participantes observaron pares de entornos consecutivos y debían indicar si creían que “sonarían iguales o diferentes”, valorando también su grado de seguridad en la respuesta. Se presentaron 10 combinaciones posibles entre los cinco entornos, repetidas cinco veces, totalizando 50 ensayos por participante.

El análisis de las respuestas binarias se realizó mediante un modelo lineal generalizado mixto (GLMM) con distribución binomial, enlace logit y un intercepto aleatorio por participante.

El análisis de varianza del GLMM mostró un efecto significativo del par de entornos visuales comparados, $\chi^2(9) = 187{,}70$, $p < 0{,}001$, lo que indica que la probabilidad de considerar dos entornos como “iguales” varió sistemáticamente según la combinación presentada.

Los pares con diferencias extremas de revestimiento (por ejemplo, A–E, A–C, A–D, B–E) obtuvieron probabilidades muy bajas o nulas de ser considerados equivalentes ($\leq 0{,}02$). En cambio, los pares intermedios (A–B, B–C, B–D) mostraron valores moderados ($\approx 0{,}15$–$0{,}25$), mientras que los pares con escaso o nulo revestimiento (C–D, C–E y D–E) alcanzaron las mayores probabilidades de coincidencia ($\approx 0{,}56$–$0{,}77$).

En conjunto, estos resultados demuestran que los participantes discriminan eficazmente las diferencias visuales cuando el contraste entre entornos es marcado, pero tienden a percibir como equivalentes aquellos con niveles bajos o similares de revestimiento. Por tanto, el experimento confirma que la

falta de diferenciación visual entre los entornos C, D y E contribuyó a su equivalencia perceptiva en el experimento principal, explicando la similitud de respuestas observada en esas condiciones.

3.1.2 Auditivo

Con el objetivo de verificar si la similitud observada entre las condiciones Normal, Poco y Sin revestimiento del experimento principal podía deberse a una limitación auditiva, se realizó un test ABX con los tres estímulos auditivos (TR 1, TR 2 y TR 3).

Los participantes escuchaban dos referencias (A y B) y luego un tercer estímulo (X), debiendo indicar si coincidía con A o con B. Tras la participación de cinco sujetos, todos obtuvieron un 100 % de aciertos en todas las comparaciones.

Estos resultados confirman que los tres estímulos auditivos eran fácilmente distinguibles, descartando que la similitud observada en el experimento principal se debiera a una falta de discriminación auditiva.

4. DISCUSION

Nuestros resultados sugieren que la percepción visual del nivel de revestimiento de una sala puede influir en la forma en que los participantes interpretan el tiempo de reverberación (TR). En particular, observamos que condiciones con mayor revestimiento tendieron a asociarse con respuestas compatibles con TR más cortos, mientras que en condiciones con menor revestimiento las respuestas se desplazaron hacia TR más largos. Considerando nuestro procedimiento experimental, este patrón parece indicar que los participantes integran la información visual sobre el entorno como un indicio para estimar la reverberación acústica.

Este hallazgo se vincula con lo planteado por [17], quienes encontraron que los participantes eran más propensos a juzgar como coincidentes estímulos audiovisuales cuando compartían tiempos de reverberación similares. En nuestro caso, la similitud de respuestas observada para TR = 0.62 y TR = 1.22 en los niveles de revestimiento Normal, Poco y Sin podría responder a un mecanismo comparable: cuando los estímulos visuales no ofrecen diferencias suficientemente claras, la capacidad de generar expectativas distintas sobre el TR se ve reducida.

Los experimentos de control complementan esta interpretación. En el control auditivo, los tres TR (0.22, 0.62 y 1.22 s) fueron discriminados sin dificultad, lo que sugiere que la ambigüedad observada no proviene de limitaciones auditivas. En cambio, en el control visual, los entornos con menor nivel de revestimiento no fueron diferenciados de manera clara, lo que apoya la idea de que la similitud perceptiva en el experimento principal se origina en la dimensión visual.

En conjunto, y en relación con estudios previos que han documentado la influencia de la visión sobre la percepción acústica [18-23], nuestros resultados podrían aportar evidencia de que la visión no solo genera expectativas generales, sino que también puede modular de forma sistemática la percepción subjetiva del TR. No obstante, es importante destacar que estas conclusiones deben interpretarse en el marco del diseño experimental empleado, y que futuros trabajos podrían explorar con mayor precisión el grado en que diferentes características visuales —como el nivel de absorción aparente o la configuración geométrica del recinto— contribuyen a este efecto.

REFERENCIAS

[1] McGurk, H., & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. Nature (London), 264, 746–748.
[2] Rosenblum, L. D., & Fowler, C. A. (1991). Audiovisual investigation of the loudness–effort effect for speech and nonspeech events. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 17(4), 976–985.
[3] Bertelson, P., & Aschersleben, G. (1998). Automatic visual bias of perceived auditory location. Psychonomic Bulletin & Review, 5(3), 482–489.
[4] Schutz, M., & Lipscomb, S. (2007). Hearing gestures, seeing music: Vision influences perceived tone duration. Perception, 36(6), 888–897.

[5] Calvert, G. A., Spence, C., & Stein, B. E. (eds.) (2004). The handbook of multisensory processes. Cambridge, MA: MIT Press.

[6] Spence & J. Driver (eds.), Crossmodal space and crossmodal attention (pp. 179–220). Oxford, UK: Oxford University Press.

[7] Stein, B. E., & Meredith, M. A. (1993). The merging of the senses. Cambridge, MA: MIT Press.

[8] De Gelder, B., & Bertelson, P. (2003). Multisensory integration, perception and ecological validity. Trends in Cognitive Sciences, 7(10), 460–467.

[9] Harris, R. W., & Reitz, M. L. (1985). Effects of room reverberation and noise on speech discrimination by the elderly. Audiology, 24, 319–324.

[10] Blauert, J. (1997). Spatial hearing: The psychophysics of human sound localization. Cambridge, MA: MIT Press.

[11] Traer, J., & McDermott, J. H. (2016). Statistics of natural reverberation enable perceptual separation of sound and space. Proc. Natl Acad. Sci. U. S. A., 113, E7856–E7865.

[12] Brandewie, E., & Zahorik, P. (2010). Prior listening in rooms improves speech intelligibility. J. Acoust. Soc. Am., 128, 291–299.

[13] Sandvad, J. (1999). Auditory perception of reverberant surroundings. J. Acoust. Soc. Am., 105, 1193.

[14] Cabrera, D., Nguyen, A., & Choi, Y. J. (2004). Auditory versus visual spatial impression: A study of two auditoria. In Proceedings of the 10th International Conference on Auditory Display (ICAD), Sydney, Australia (pp. 235–242).

[15] Valente, D. L., & Braasch, J. (2010). Subjective scaling of spatial room acoustic parameters influenced by visual environmental cues. The Journal of the Acoustical Society of America, 128(4), 1952-1964.

[16] Schutte, M., Ewert, S. D., & Wiegrebe, L. (2019). The percept of reverberation is not affected by visual room impression in virtual environments. J. Acoust. Soc. Am., 145, EL229.

[17] Tsang, K. Y., & Mannion, D. J. (2022). Relating sound and sight in simulated environments. *Multisensory Research*, *35*(7-8), 589-622.

[18] Defays, A., Safin, S., Billon, A., Decaestecker, C., Warzée, N., Leclercq, P., & Nyssen, A. (2014). Bimodal interaction: The role of visual information in performing acoustic assessment in architecture. Ergonomics Open Journal, 7, 13–20.

[19] Hiipakka, M., Kinnari, T., y Pulkki, V. (2012). Estimating head-related transfer functions of human subjects from pressure–velocity measurements, J. Acoust. Soc. Am. 131 (5), 4051–4061.

[20] Cardona, A., Garelli, L., y Gimenez, J.M. (2019). Individual HRTF measurement systems: A review of the state of art and developments in Argentina. Mecánica Computacional Vol XXXVII. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Santa Fe, 5–7.

[21] Lombera, E. N., Cerviño, J., Piceda, L. B., Viskovic, M., & Vergara, R. O. (2025). Comparison of perceived auditory distance between real and virtual sound sources. Applied Acoustics, 231, 110519.

[22] Farina, A. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, AES 108th Convention, Parma, Italy, 5099–5113 (2000).

[23] Calcagno, E. R., Abregú, E. L., Eguía, M. C., & Vergara, R. (2012). The role of vision in auditory distance perception. Perception, 41, 175–192.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Impacto de la incongruencia acústica en la percepción de distancia auditiva en entornos virtuales

Lombera, E.[†,1]; Cerviño, J. [†, ‡,2]; Piceda, Berenice, L. [‡,3]; Viskovic, M.[†]; Vergara, R. [‡,4]

[†] Grupo de Investigación en Acústica y Psicoacústica, Departamento de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), Sáenz Peña, B1678, Argentina

‡ Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo), Universidad Nacional de Quilmes, CONICET, Bernal, Buenos Aires, B1876, Argentina

[1] elombera@untref.edu.ar,[2] joaquin.cervino@unq.edu.ar, [3] laura.piceda@unq.edu.ar, [4] ramiro.vergara@unq.edu.ar

Resumen Este estudio investigó cómo la incongruencia acústica entre la sala de grabación y la sala de reproducción afecta la percepción de distancia auditiva en entornos virtuales. Se utilizaron respuestas impulsivas binaurales de sala (BRIRs) medidas previamente en una sala con características reverberantes, y se reprodujeron mediante auriculares abiertos en dos contextos: una sala acústicamente congruente (misma sala que la de grabación) y una sala incongruente con un tiempo de reverberación significativamente menor. Los participantes escucharon un fragmento musical simulado a distancias de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 metros, y estimaron verbalmente la distancia percibida. Los resultados revelaron que la incongruencia acústica impacta de manera diferenciada a los oyentes. Un subgrupo (27%) no mostró cambios sustanciales en la percepción de distancia entre condiciones, mientras que el resto presentó una compresión significativa de las distancias percibidas en la condición incongruente. Esto sugiere que la percepción de distancia en entornos virtuales no solo depende de las características del estímulo, sino también de la coherencia acústica entre el entorno de grabación y el de reproducción. Estos hallazgos tienen implicancias importantes para el diseño de experiencias auditivas inmersivas, especialmente en aplicaciones donde la fidelidad espacial es crítica, como en simuladores, realidad virtual o entornos clínicos.

Palabras clave: percepción auditiva de distancia, HRTF, realidad virtual, psicoacústicacústica.

Abstract This study investigated how acoustic incongruence between the recording room and the playback room affects auditory distance perception in virtual environments. Previously measured binaural room impulse responses (BRIRs) from a reverberant room were reproduced through open-back headphones under two conditions: an acoustically congruent room (the same room in which the BRIRs were recorded) and an incongruent room with a significantly lower reverberation time. Participants listened to a simulated musical fragment at distances of 1, 2, 3, 4, 5, and 6 meters and verbally estimated the perceived distance. Results revealed that acoustic incongruence affects listeners in a differentiated manner. A subgroup (27%) showed no substantial changes in distance perception between conditions, whereas the remaining participants exhibited a significant compression of perceived distances in the incongruent condition. These findings suggest that distance perception in virtual environments depends not only on the characteristics of the stimulus but also on the acoustic coherence between the recording and playback environments. Such results have important implications for the design of immersive auditory experiences, particularly in applications where spatial fidelity is critical, such as simulators, virtual reality, and clinical environments.

Palabras clave: auditory distance perception, HRTF, virtual reality, psychoacoustics.

1. INTRODUCCIÓN

La percepción de distancia auditiva (ADP, por sus siglas en inglés) se refiere a la capacidad del oyente de estimar cuán lejos se encuentra una fuente sonora. Este proceso es complejo y depende de múltiples claves acústicas. Entre ellas, la más influyente es la intensidad sonora, que disminuye aproximadamente 6 dB cada vez que se duplica la distancia en un campo libre o anecoico [1]. En ambientes reverberantes, la relación entre la energía directa y la reverberante (DRR, direct-to-reverberant ratio) constituye una clave fundamental: a medida que la distancia aumenta, la energía del sonido directo decrece, mientras que la energía de las reflexiones se mantiene relativamente constante [2–4]. Por ello, la DRR se reduce con la distancia y proporciona información adicional que permite estimaciones más precisas que en entornos anecoicos [2, 5, 6]. Asimismo, el espectro de la señal varía con la distancia; por ejemplo, la atenuación de las frecuencias altas a distancias largas (>15 m) genera un efecto de filtrado pasa-bajos que contribuye a la percepción de lejanía [7–10]. Dentro del espacio peripersonal (~1 m) se producen fenómenos opuestos, como el refuerzo relativo de bajas frecuencias por difracción alrededor de la cabeza, que modifica las diferencias interaurales de nivel (ILD) y afecta la precisión de las estimaciones [11–13]. Además de las claves puramente acústicas, la familiaridad del oyente con el estímulo sonoro [14], el movimiento propio o de la fuente (claves dinámicas) [15] y la información visual o somatosensorial [16, 17] también influyen en la ADP.

El estudio de la ADP puede realizarse tanto en entornos reales como virtuales. Los entornos reales plantean desafíos importantes: requieren grandes espacios para explorar el campo lejano, manipulación precisa de las posiciones de las fuentes y control riguroso de variables acústicas y no acústicas. La tecnología acústica virtual ofrece una alternativa poderosa al permitir un mayor control experimental manteniendo un alto grado de realismo. Para generar entornos virtuales realistas es necesario reproducir no solo el sonido directo sino también las reflexiones de la sala, además de considerar las características físicas del oyente. Los sistemas de audio binaural emplean las funciones de transferencia relacionadas con la cabeza (HRTF) para recrear las claves de localización y las respuestas impulsionales de sala binaurales (BRIRs) para incorporar información del espacio. Las BRIRs pueden medirse en los oídos de cada participante (individualizadas) o en una cabeza artificial (no individualizadas) [18, 19]. Cuando se reproducen mediante auriculares, las BRIRs pueden crear la sensación de escuchar una fuente real en un entorno real. Sin embargo, el grado de realismo percibido depende no solo de la información acústica contenida en las BRIRs, sino también de factores como la congruencia entre el entorno de grabación y el de reproducción, la presencia de claves visuales y las expectativas del oyente [20–22].

En un estudio reciente, Lombera et al. (2025) [23] compararon la percepción de distancia auditiva de fuentes reales con la de fuentes virtuales auralizadas mediante BRIRs, encontrando que las respuestas eran prácticamente equivalentes cuando los estímulos se reproducían en la misma sala en la que se habían registrado y a través de auriculares abiertos. Estos resultados validan el uso de BRIRs como herramienta para estudiar la ADP en condiciones controladas y congruentes. Sin embargo, se conoce poco acerca de cómo la incongruencia acústica entre el entorno de grabación y el de reproducción afecta la percepción de distancia. Estudios previos han mostrado que tal incongruencia puede degradar la externalización de las fuentes virtuales [24], y se ha debatido si la externalización y la percepción de distancia son procesos independientes o están estrechamente relacionados. Dado que para percibir una fuente a cierta distancia es necesario externalizarla, es razonable suponer que la incongruencia también afecte la ADP.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la incongruencia acústica en la percepción de distancia auditiva de fuentes virtuales. Para ello, se presentaron a los participantes estímulos generados a partir de BRIRs medidas en una sala reverberante, pero reproducidas en una sala con un tiempo de reverberación significativamente menor. Se hipotetiza que la falta de coherencia entre la información reverberante de los estímulos y la acústica real del entorno de escucha deteriorará la precisión de las estimaciones de distancia y podrá inducir patrones de respuesta diferenciados entre oyentes.

2. METODOLOGÍA

2.1 Participantes

Participaron 25 voluntarios (17 hombres), de entre 21 y 66 años (media ± DE = 30.7 ± 12.1 años). Aproximadamente el 75 % eran estudiantes de grado de la Universidad Nacional de Tres de Febrero. Todos reportaron visión normal o corregida y audición normal o casi normal, verificada mediante audiometrías de tonos puros siguiendo ANSI/ASA S3.21-2004 (R2019) y los lineamientos de la ASHA; el umbral promedio en el mejor oído fue ≤ 25 dB HL en 0.125, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 6 y 8 kHz.

El estudio se condujo conforme a la Declaración de Helsinki y fue aprobado por los Comités de Ética de la Universidad Nacional de Quilmes y de la Universidad Nacional de Tres de Febrero. Todos firmaron consentimiento informado y desconocían las salas y los objetivos del estudio previo a su participación.

2.2 Entorno experimental

El experimento se realizó en una sala semi-reverberante de 2.5 × 2 × 2.2 m (largo × ancho × alto). Las paredes y el techo eran de placas de yeso recubiertas con material fonoabsorbente (~95 % de la superficie), y el piso estaba alfombrado. El tiempo de reverberación promedio fue T20 = 0.15 s y el ruido de fondo 19.9 dBA, ambos medidos en la posición de escucha. Los T20 se estimaron con barrido exponencial (exponential sweep) y el ruido con un sonómetro clase 1 SVAN 959.

Esta sala de reproducción fue elegida intencionalmente incongruente respecto del entorno donde se midieron las BRIRs (ver §2.4), a fin de evaluar el efecto de la incongruencia acústica sobre la percepción de distancia.

2.3 Set-up experimental y estimulo auditivo

El estímulo fue un fragmento anecoico de 8 s (voz y guitarra acústica; Hell of a Guy, Benjamin Bernschutz). Para generar los estímulos virtuales, el audio anecoico se convolucionó con BRIRs no individualizadas (NI-BRIRs) correspondientes a seis posiciones frontales de la fuente: 1, 2, 3, 4, 5 y 6 m.

La reproducción se realizó mediante auriculares abiertos circumaurales Sennheiser HD 800, conectados a una interfaz RME Fireface USB y controlada desde MATLAB R2016b con Psychtoolbox (PTB-3) a 44.1 kHz. Los participantes se sentaron en una silla regulable en altura ubicada en una esquina de la sala; la altura del oído se fijó en ~1.3 m y la cabeza se mantuvo inmóvil (0° de elevación y azimut) mediante reposabarbillas para eliminar claves dinámicas.

Para aportar información acústica del recinto y enmascarar ruidos residuales, entre ensayos se difundió ruido de banda ancha (~70 dB a 1 m) por dos altavoces laterales (Edifier R1000TCN, 25 W) ubicados a ambos lados del oyente, configuración validada en pruebas piloto. El uso de auriculares abiertos permitió que los oyentes percibieran las características acústicas de la sala de reproducción durante la tarea (condición clave para inducir la incongruencia acústica respecto de las BRIRs).

Calibración de nivel. La referencia de nivel se estableció a 70 dBA a 1 m virtual utilizando un GRAS 90AA para acoplar los auriculares. Se ajustó la ganancia de manera que la auralización a 1 m alcanzara 70 dBA; el mismo ajuste se aplicó a las demás distancias para asegurar consistencia de nivel entre posiciones virtuales.

2.4 Mediciones binaurales

Las BRIRs utilizadas fueron no individualizadas y se midieron previamente en una sala reverberante de 8 × 4.2 × 4 m con techo de hormigón, piso de madera, paredes laterales y frontal pintadas con material absorbente cubriendo ~20 % de superficie (no mostrado en la figura), y cortinado pesado en la pared posterior (~95 % de cobertura). El tiempo de reverberación promedio del recinto de medida

fue T20 = 0.68 s y el ruido de fondo 43.9 dBA; la relación señal-ruido superó 15 dBA en gran parte del espectro aun en la mayor distancia.

Las grabaciones se realizaron mediante la técnica de barrido sinusoidal logarítmico (log sine sweep). Se usaron micrófonos binaurales DPA 4560, ubicados en la entrada del canal auditivo de un oyente de referencia (uno de los autores), fijados con earhooks (tipo 4266 Flex). Se emplearon tapones de espuma acortados para obturar el canal auditivo, situando las cápsulas a ras de la entrada sin modificar la cavidad de la forma de la oreja. La fuente fue un Genelec 8010a alineado con el eje de los oídos del oyente y posicionado a 1, 2, 3, 4, 5 y 6 m sobre el eje frontal.

Este conjunto de NI-BRIRs fue común a todos los participantes del presente estudio; por lo tanto, cualquier diferencia perceptual proviene de la acústica de reproducción (sala incongruente) y no de variaciones en la medida de BRIRs.

2.4 Procedimiento Experimental

El estudio constó de una única sesión por participante. En una sala adyacente, los sujetos recibieron instrucciones escritas, firmaron el consentimiento informado y, a continuación, fueron vendados y guiados a la sala experimental. Se los ubicó en la silla (altura ajustada para 1.3 m al pabellón auricular) y se fijó la cabeza con reposabarbillas (0° de elevación y azimut).

La sesión incluyó un solo bloque de estimación de distancia con 24 ensayos (4 repeticiones por cada una de las 6 distancias virtuales), presentados en orden aleatorio. En cada ensayo, los participantes informaron verbalmente la distancia percibida en metros (o centímetros). Antes del bloque principal, se realizaron 6 ensayos de práctica con la secuencia 1, 6, 2, 5, 3, 4 para asegurar la comprensión de la tarea. La duración total por participante fue de ~45 minutos.

2.5 Análisis de Datos

Las estimaciones de distancia se analizaron en escala logarítmica (transformación log–log respecto de la distancia física) para evaluar la compresión de la curva. Se ajustaron funciones potenciales de la forma $r' = kr^a$, donde r' es la distancia percibida, r la distancia física, k y a parámetros libres (con $a < 1$ indicando compresión).

Definimos el sesgo absoluto con signo como la diferencia entre la distancia física y la percibida en cada ensayo, y el sesgo relativo con signo como el sesgo absoluto dividido por la distancia física. Valores positivos indican sobrestimación y negativos subestimación. Para cada sujeto se calculó el sesgo relativo con signo por distancia y luego se promedió a través de las posiciones para obtener un sesgo individual colapsado (métrica global de precisión).

Se emplearon modelos lineales (LM) y modelos lineales mixtos (LMEM) con interceptos y pendientes aleatorios por sujeto para modelar la asociación entre las magnitudes dependientes (distancia percibida en log-escala y sesgos) y la distancia objetivo (1–6 m). La significancia se estableció en $\alpha = 0.05$ y las comparaciones múltiples se ajustaron con Holm-Bonferroni. Los LMEM se ajustaron con lme4 (R); los intervalos de confianza y estimaciones de parámetros se obtuvieron con broom. Los efectos fijos se evaluaron mediante F-test con el método de Satterthwaite (función anova de R). Se verificaron supuestos de normalidad y homocedasticidad por inspección visual de residuos y efectos aleatorios.

Cuando fue necesario contextualizar los parámetros de compresión/precisión respecto de escenarios congruentes, se utilizaron como referencia las curvas publicadas en Lombera et al., 2025 [23]. Esa comparación se reporta únicamente a nivel de parámetros de ajuste y no afecta el protocolo del presente estudio.

La detección de valores atípicos se realizó mediante el método de Desviación Absoluta Mediana (MAD) con umbral de 3 MAD, utilizando el paquete Routliers. Para ello se calcularon los sesgos relativos sin signo colapsados por sujeto; se excluyeron los sujetos S003 y S012.

3. RESULTADOS

En la Figura 1A se presentan las estimaciones de distancia percibida en función de las distancias virtuales de los NI-BRIRs reproducidos en la sala experimental de baja reverberación. Para facilitar la interpretación, también se muestran las curvas obtenidas previamente en condiciones congruentes (misma sala donde se midieron las BRIRs; ver Lombera et al., 2025), utilizando los mismos estímulos y procedimiento. A simple vista, las respuestas en la condición incongruente no siguen de manera precisa las curvas observadas en la condición congruente. Para cuantificar estas diferencias se ajustó un modelo lineal mixto con condición (congruente vs. incongruente) y distancia objetivo como efectos fijos, e interceptos y pendientes aleatorios por sujeto. Para el ajuste de la función potencial, tanto las distancias percibidas como las distancias físicas se transformaron mediante logaritmo en base 10. Los estimadores de los parámetros y sus intervalos de confianza se presentan en la Tabla 1. Los resultados indican que la tasa de compresión no explica por sí sola las diferencias entre condiciones (exponente a = 0.74, IC95% = [0.64, 0.83] para la condición congruente y a = 0.68, IC95% = [0.48, 0.87] para la incongruente), ver Figura 1B. Sin embargo, el intercepto, es decir el desplazamiento de toda la curva de respuesta, difirió significativamente entre condiciones, con una reducción de 25.3 cm (IC95% = [5.04, 45.5]; F(1,22.4) = 6.05, p = 0.022). Esta diferencia se aprecia en las curvas individuales de la Figura 1C. De forma complementaria, en la Figura 1D se presentan los valores de sesgo relativo con signo por sujeto y condición. Se observó que, en promedio, los participantes subestimaron la distancia en la condición incongruente (M = –23.9 %, IC95% = [–79.1, 30.6] %), mientras que en la condición congruente no se observaron sesgos significativos (M = 9.81 %, IC95% = [–13, 32.6] %). Un modelo lineal confirmó que las respuestas fueron significativamente más precisas en la condición congruente que en la incongruente (β = 33.8 %, IC95% = [1.4, 66.1] %, F(1,42) = 4.45, p = 0.0407).

Tabla 1: Estimaciones del modelo para la condición y la estimación de distancia, así como para el sesgo relativo. En lo que respecta a la estimación de distancia, se informa la tasa de compresión en relación con la distancia, y para el sesgo relativo se reporta la media estimada por el modelo.

			NI-BRIR congruent room [95% CI]	**NI-BRIR incongruous room [95% CI]**
Log-Log Distance estimation	**Compression rate**	**m/m**	**0.75 [0.6, 0.92]**	**0.68 [0.48, 0.87]**
Log-Log Distance estimation	**Intercept**	**m**	**0.1 [0.01, 0.2]**	**-0.14 [-0.44, 0.14]**
Signed relative bias	**Intercept**	**%**	**9.81 [-13.0, 32.6]**	**-23.9 [-79.1, 30.6]**

El análisis individual de las curvas reveló que la subestimación promedio estuvo fuertemente influida por seis participantes (S6, S9, S13, S18, S19 y S24), quienes mostraron respuestas planas a través de todas las distancias, percibiendo la fuente consistentemente muy cerca de su cabeza. Este patrón sugiere que, para este subgrupo, la incongruencia acústica llevó a una pérdida casi completa de las claves de distancia (intensidad y DRR). Cabe destacar que ningún participante exhibió este comportamiento en la condición congruente, lo que refuerza la hipótesis de que este efecto fue inducido por el desajuste acústico entre las BRIRs y la sala de reproducción. Para examinar si la incongruencia tuvo impacto en el resto de la muestra, se reanalizaron los datos excluyendo a estos seis participantes. Como se muestra en las líneas punteadas de la Figura 2A, las respuestas restantes exhibieron un patrón de compresión más pronunciado. En este nuevo análisis, la tasa de compresión fue significativamente menor en la condición incongruente (a = 0.61, IC95% = [0.4, 0.8]) que en la congruente (a = 0.74, IC95% = [0.64, 0.83]; F(1,184.2) = 6.1, p = 0.014), mientras que el intercepto no difirió de manera significativa (10 cm, IC95% = [0.1, 20]). Asimismo, el sesgo relativo con signo fue similar en ambas condiciones (p = 0.536), lo que sugiere que, en este subgrupo, el efecto principal de la incongruencia fue aumentar la compresión de la función distancia-percibida, más que producir un corrimiento sistemático.

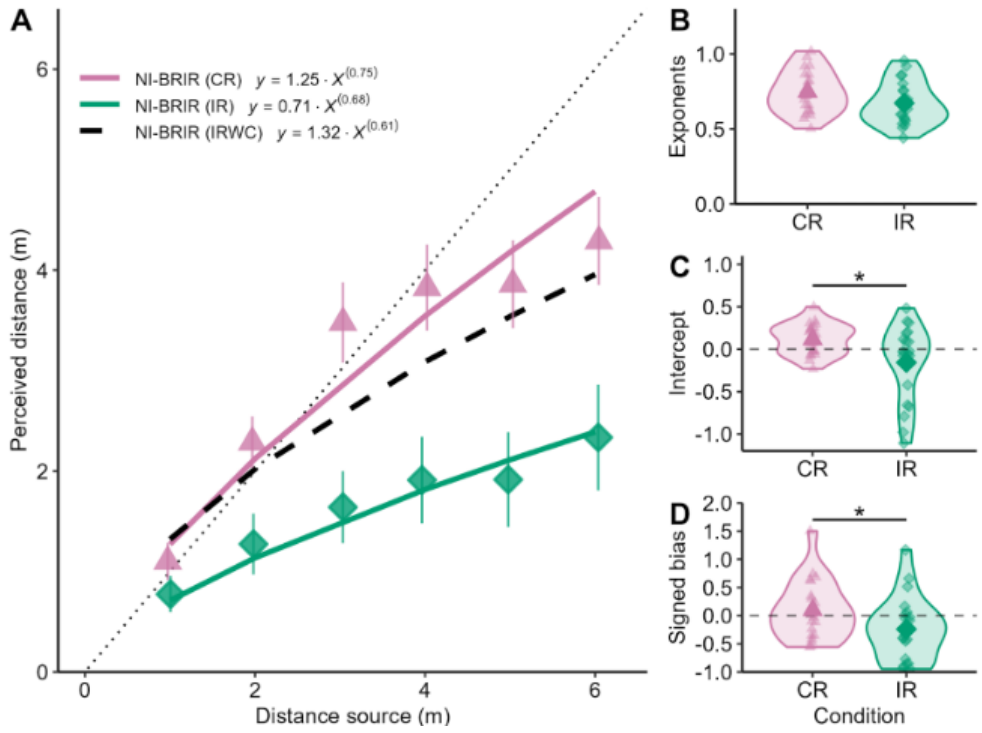


Figura 1: (A) Distancias percibidas en función de la distancia objetivo, junto con los ajustes de los Modelos Lineales de Efectos Mixtos (LMEM). Se muestran las respuestas promedio (± EEM: error estándar de la media) para las condiciones NI-BRIR (CR) (estímulos virtuales no individualizados en sala congruente, rosa) y NI-BRIR (IR) (estímulos virtuales no individualizados en sala incongruente, verde). La línea discontinua presenta el ajuste lineal del modelo de efectos mixtos para la condición NI-BRIR (IR) sin considerar a los sujetos S006, S009, S013, S018, S019 y S024: NI-BRIR (IRWC). Los símbolos representan las diferentes condiciones: triángulos para NI-BRIR (CR) y rombos para NI-BRIR (IR), con barras de error que indican el EEM. Los datos se promediaron en una muestra de veinticinco participantes. **(B)** Exponentes, **(C)** Interceptos y **(D)** Sesgo con signo colapsado para cada bloque, graficados como media ± EEM. Los puntos representan los datos individuales de cada participante. Los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas entre bloques ($p < 0.005$) determinadas mediante t-test entre bloques. La línea punteada denota la respuesta ideal.

4. DISCUSIÓN

Estos hallazgos muestran que la incongruencia acústica puede afectar de dos maneras distintas la percepción de distancia auditiva. Por un lado, un subgrupo de aproximadamente un 27 % de los participantes presentó una subestimación marcada de la distancia de las fuentes virtuales, con respuestas prácticamente planas que indicaban distancias muy cortas incluso cuando los estímulos correspondían a fuentes virtuales ubicadas a 6 metros. Este patrón sugiere que, en presencia de incongruencia entre la reverberación del estímulo y la del entorno de reproducción, la fuente puede ser percibida como internalizada o muy cercana a la cabeza, lo que lleva a una pérdida casi completa de la sensibilidad a la variación de la distancia. Resultados similares fueron reportados por Gil-Carvajal et al. (2016) [24], quienes observaron que la incongruencia entre estímulo y sala provocaba una reducción significativa en las calificaciones de distancia percibida.

El resto de los participantes mostró respuestas más variadas, pero con una compresión significativa de la función distancia-percibida en comparación con condiciones congruentes. Este efecto coincide con lo reportado por Cubick et al. (2015) [25], quienes observaron que la incongruencia entre el campo sonoro virtual y la sala de reproducción disminuye la pendiente de la función distancia-percibida, produciendo curvas más comprimidas. El hecho de que algunos oyentes mantuvieran la capacidad de diferenciar las distancias, aun cuando el estímulo pudiera percibirse como menos externo, sugiere que basaron sus juicios en claves monaurales como la intensidad y la relación directo–reverberante presentes en la señal, más que en el grado de externalización de la fuente. Este comportamiento podría

interpretarse como un proceso de inferencia cognitiva, en el cual el oyente deduce cambios relativos de distancia a partir de variaciones en las claves acústicas, incluso si la fuente se percibe en un plano cercano o interno, de modo similar a cómo las claves de profundidad en una imagen bidimensional permiten estimar distancias relativas entre objetos que se encuentran en el mismo plano.

En conjunto, los resultados refuerzan la idea de que la coherencia acústica entre el entorno de grabación y el de reproducción es un factor crítico para mantener la veridicidad de la percepción de distancia en entornos virtuales. Asimismo, ponen en evidencia una marcada variabilidad interindividual: mientras algunos oyentes son especialmente sensibles a la incongruencia y presentan un colapso perceptual, otros son capaces de preservar parcialmente la información de distancia aunque con respuestas más comprimidas. Esta heterogeneidad debe tenerse en cuenta al diseñar experiencias auditivas inmersivas, simuladores o aplicaciones clínicas que requieran una representación espacial precisa.

REFERENCIAS

[1] Coleman, P. D. (1962). Failure to localize the source distance of an unfamiliar sound. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34, 345–346. https://doi.org/10.1121/1.1928121

[2] Mershon, D. H., & King, L. E. (1975). Intensity and reverberation as factors in the auditory perception of egocentric distance. *Perception & Psychophysics*, 18(6), 409–415. https://doi.org/10.3758/BF03204113

[3] Mershon, D. H., & Bowers, J. N. (1979). Absolute and relative cues for the auditory perception of egocentric distance. *Perception, 8(3)*, 311–322. https://doi.org/10.1068/p080311

[4] Bronkhorst, A. W., & Houtgast, T. (1999). Auditory distance perception in rooms. *Nature*, 397(6719), 517–520. *https://doi.org/10.1038/17374*

[5] Nielsen, S. H. (1993). Auditory Distance Perception in Different Rooms. *Journal of the Audio Engineering Society*, 41(10), 755-770.

[6] Shinn-Cunningham, B. (2000). Adapting to remapped auditory localization cues: A decision-theory model. *Perception & Psychophysics*, 62(1), 33–47. https://doi.org/10.3758/BF03212059

[7] Coleman, P. D. (1968). Dual role of frequency spectrum in determination of auditory distance. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 44(2), 631-632. https://doi.org/10.1121/1.1911132

[8] Lounsbury, B. F., & Butler, R. A. (1979). Estimation of distances of recorded sounds presented through headphones. *Scandinavian audiology*, 8(3), 145–149. https://doi.org/10.3109/01050397909076315

[9] Butler, R. A., Levy, E. T., & Neff, W. D. (1980). Apparent distance of sounds recorded in echoic and anechoic chambers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 6(4), 745–750*. https://doi.org/10.1037/0096-1523.6.4.745

[10] Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). *The attention system of the human brain. Annual Review of Neuroscience,* 13, 25–42. https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325

[11] Brungart, D. S., & Rabinowitz, W. M. (1999). Auditory localization of nearby sources. Head-related transfer functions. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 106(3 Pt 1), 1465–1479. https://doi.org/10.1121/1.427180

[12] Brungart, D. S., Durlach, N. I., & Rabinowitz, W. M. (1999). Auditory localization of nearby sources. II. Localization of a broadband source. T*he Journal of the Acoustical Society of America*, 106(4 Pt 1), 1956–1968. https://doi.org/10.1121/1.427943

[13] Kopčo, N., & Shinn-Cunningham, B. G. (2011). Effect of stimulus spectrum on distance perception for nearby sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(3), *1530–1541*. https://doi.org/10.1121/1.3613705

[14] Zahorik, P., Brungart, D. S., & Bronkhorst, A. W. (2005). Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research. *ACTA Acustica united with Acustica*, 91(3), 409-420.

[15] Kolarik, A. J., Moore, B. C., Zahorik, P., Cirstea, S., & Pardhan, S. (2016). Auditory distance perception in humans: a review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss. *Attention, perception & psychophysics*, 78(2), 373–395. https://doi.org/10.3758/s13414-015-1015-1

[16] Calcagno, E. R., Abregú, E. L., Eguía, M. C., & Vergara, R. (2012). The role of vision in auditory distance perception. *Perception, 41*(2), 175-192.

[17] Hüg, M. X., Vergara, R. O., Tommasini, F. C., Etchemendy, P. E., Bermejo, F., & Fernandez, L. G.

(2019). Reaching measures and feedback effects in auditory peripersonal space. *Scientific reports*, *9*(1), 9476.

[18] Begault, D. R., Wenzel, E. M., & Anderson, M. R. (2001). Direct comparison of the impact of head tracking, reverberation, and individualized head-related transfer functions on the spatial perception of a virtual speech source. *Journal of the audio Engineering Society*, 49(10), 904-916.

[19] Wenzel, E. M., Arruda, M., Kistler, D. J., & Wightman, F. L. (1993). Localization using nonindividualized head-related transfer functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *94*(1), 111-123. https://doi.org/10.1121/1.407089

[20] Best, V., Baumgartner, R., Lavandier, M., Majdak, P., & Kopčo, N. (2020). Sound Externalization: A Review of Recent Research. *Trends in Hearing*, 24, 2331216520948390. https://doi.org/10.1177/2331216520948390

[21] Werner, S., Klein, F., Mayenfels, T., & Brandenburg, K. (2016). A summary on acoustic room divergence and its effect on externalization of auditory events. 2016 *Eighth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, 1-6. https://doi.org/10.1109/QoMEX.2016.7498973

[22] Udesen, J., Piechowiak, T., & Gran, F. (2015). The effect of vision on psychoacoustic testing with headphone-based virtual sound. *Journal of the Audio Engineering Society*, *63*(7/8), 552-561.

[23] Lombera, E. N., Cerviño, J., Piceda, L. B., Viskovic, M., & Vergara, R. O. (2025). Comparison of perceived auditory distance between real and virtual sound sources. Applied Acoustics, 231, 110519.

[24] Gil-Carvajal, J. C., Cubick, J., Santurette, S., & Dau, T. (2016). Spatial Hearing with Incongruent Visual or Auditory Room Cues. *Scientific reports*, 6, 37342. https://doi.org/10.1038/srep37342

[25] Cubick, J., Santurette, S., Laugesen, S., & Dau, T. (2015). The influence of visual cues on auditory distance perception. In *DAGA 2015: 41. Jahrestagung für Akustik* (pp. 1220-1223).

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Elevación sonora y percepción de distancia: umbrales, postura y evidencia psicoacústica (AdAA2025)

Piceda, Laura Berenice [†1]; Lombera, Esteban ‡[2]; Cerviño, Joaquín [†3]; Eguia, Manuel [†4]; Vergara, Ramiro [†5]

[†] Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo), Universidad Nacional de Quilmes, CONICET, Bernal, Buenos Aires, B1876, Argentina

‡ Grupo de Investigación en Acústica y Psicoacústica, Departamento de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), Sáenz Peña, B1678, Argentina

[1] laura.piceda@unq.edu.ar, [2] elombera@untref.edu.ar, [3] joaquin.cervino@unq.edu.ar, [4] meguia@unq.edu.ar, [5] ramiro.vergara@unq.edu.ar

Resumen: Estudios previos han sugerido que la elevación angular de una fuente sonora podría actuar como clave para la percepción auditiva de distancia, de forma análoga a hallazgos en la modalidad visual. Este trabajo presenta experimentos diseñados para aislar el efecto de la elevación en condiciones controladas. En un experimento previo, participantes de pie juzgaron distancias de fuentes ubicadas a nivel del suelo y a la altura de los oídos, bajo condiciones de intensidad fija y roved. En el presente experimento, se replicaron las mismas condiciones acústicas con participantes sentados, lo que redujo los ángulos de elevación disponibles. Los resultados muestran que la percepción de distancia mejora significativamente para fuentes ubicadas a nivel del suelo solo cuando el ángulo de elevación supera cierto umbral, como ocurre en la postura de pie. Este patrón se mantiene incluso cuando las claves de intensidad son degradadas, lo que sugiere que la elevación puede constituir una clave geométrica robusta para la percepción auditiva de distancia. Además, análisis acústicos mediante BRIRs y HRTFs revelan diferencias espectrales consistentes entre condiciones, compatibles con claves perceptuales de elevación. Estos hallazgos aportan nueva evidencia sobre la interacción entre postura, geometría y claves acústicas en la percepción espacial del sonido.

Palabras clave: percepción auditiva, distancia, elevación, psicoacústica

Abstract: Previous studies have suggested that the angular elevation of a sound source may serve as a cue for auditory distance perception, in a manner analogous to findings in the visual modality. This work presents experiments designed to isolate the effect of elevation under controlled conditions. In a previous experiment, standing participants judged distances of sources located either at floor level or at ear height, under both fixed- and roved-intensity conditions. In the present experiment, the same acoustic conditions were replicated with seated participants, thereby reducing the available elevation angles. The results show that distance perception improves significantly for floor-level sources only when the elevation angle exceeds a certain threshold, as observed in the standing posture. This pattern persists even when intensity cues are degraded, suggesting that elevation may constitute a robust geometric cue for auditory distance perception. Furthermore, acoustic analyses using BRIRs and HRTFs revealed consistent spectral differences across conditions, compatible with perceptual cues to elevation. These findings provide new evidence for the interaction between posture, geometry, and acoustic cues in spatial sound perception.
.

Palabras clave: sound perception, distance, elevation, psychoacoustics

1. INTRODUCCIÓN

La percepción auditiva de la distancia (PAD) constituye un proceso complejo en el que intervienen múltiples claves acústicas. Entre las más estudiadas se encuentran la intensidad sonora, la relación entre energía directa y reverberante (D/R) y las características espectrales inducidas por la propagación en el espacio [1] [2]. Sin embargo, estas claves pueden resultar ambiguas en situaciones naturales. Por ejemplo, la intensidad depende no solo de la distancia física, sino también del nivel de emisión de la fuente, mientras que la proporción D/R está fuertemente condicionada por la acústica del recinto. Esto plantea la necesidad de explorar pistas geométricas adicionales que podrían contribuir a la estimación de distancia.

En el dominio visual, se ha demostrado que la elevación angular de un objeto constituye un indicio robusto para juzgar su distancia absoluta. Gibson [3] describió que la posición relativa en el campo visual se interpreta como una clave de profundidad: los objetos más altos en la proyección visual suelen percibirse como más lejanos. Posteriormente, Philbeck y Loomis [4] mostraron que, en condiciones de oscuridad, la percepción de distancia de objetos ubicados en el suelo era más precisa que la de objetos a la altura de los ojos, dado que en los primeros existe un vínculo geométrico único entre ángulo de declinación y distancia. De manera similar, Ooi et al. [5] establecieron que el sistema visual emplea el nivel de los ojos como referencia para calcular la declinación angular bajo el horizonte, lo que refuerza la idea de que la elevación provee información absoluta de distancia.

Por analogía, se ha planteado la hipótesis de que el sistema auditivo también podría utilizar la elevación como una clave para la percepción de distancia [6]. Numerosos estudios han demostrado que los oyentes poseen sensibilidad para discriminar la elevación de fuentes sonoras: el mínimo ángulo audible en el plano vertical suele situarse entre 3° y 9° [7] [8] [9]. Asimismo, se han observado cambios espectrales sistemáticos asociados a la elevación en las funciones de transferencia relacionadas con la cabeza (HRTFs), en particular la aparición y desplazamiento de muescas en la banda de 6–9 kHz, que constituyen claves perceptuales para la localización vertical [10] [11]

Estudios recientes sugieren que estos indicios de elevación podrían tener un rol en la estimación de distancia. Lombera et al. [6] exploraron esta posibilidad con participantes sentados y no hallaron diferencias significativas entre fuentes a nivel de los oídos y en el piso. No obstante, investigaciones posteriores mostraron que cuando los oyentes se encontraban de pie —lo que incrementa los ángulos de elevación—, la discriminación de distancia para fuentes en el suelo mejoraba notablemente [12]. Este hallazgo apunta a que la magnitud del ángulo es crítica: solo cuando las diferencias de elevación superan ciertos umbrales, los oyentes parecen utilizar esta información como pista de distancia.

Un aspecto pendiente era determinar si la elevación mantiene su influencia cuando se eliminan pistas de intensidad, considerada la clave más fuerte de la PAD en condiciones anecoicas o de baja reverberación [1]. En contextos naturales, sin embargo, la intensidad absoluta no siempre resulta confiable: diferentes fuentes pueden emitir con niveles variables y el oyente no necesariamente conoce la potencia de emisión. Por ello, evaluar el rol de la elevación en ausencia de una intensidad estable resulta crucial para comprender la robustez de esta pista.

El presente trabajo aborda específicamente esta cuestión mediante un experimento en el cual la intensidad se degradó mediante una variación aleatoria de ±10 dB (“roved intensity”), con una postura sentada, reduciendo los ángulos. Se buscó determinar si, aun en ausencia de la pista clásica de intensidad, los oyentes podían apoyarse en la elevación angular de fuentes en el piso para estimar distancias. La hipótesis central es que, bajo esta condición, las respuestas mostrarán una discriminación mayor para fuentes ubicadas en el suelo que para aquellas a la altura de los oídos (aunque no tan marcada, al contar con una diferencia angular reducida), evidenciando que la elevación puede funcionar como un indicio geométrico relativamente independiente de la intensidad.

2. MÉTODO

2.1 Participantes

Un total de 21 estudiantes (18 hombres y 3 mujeres) de la Universidad Nacional Arturo Jauretche participaron en el estudio. La edad de los sujetos osciló entre 19 y 45 años, con una mediana de 27.2 años. Todos declararon poseer visión normal o corregida y audición dentro de parámetros normales o casi normales. Esto último se verificó mediante audiometrías tonales, conforme a los estándares ANSI/ASA S3.21-2004 (R2019).

Antes de su participación, cada voluntario firmó un consentimiento informado escrito. El protocolo fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad Nacional de Quilmes y cumplió con los lineamientos de la Declaración de Helsinki (WMA, 2013). Los participantes desconocían tanto los objetivos específicos del estudio como las características de la sala experimental.

2.2 Sala experimental

Las pruebas se realizaron en una sala semirreverberante (12 × 7 × 3 m) acondicionada con tratamiento acústico parcial (paredes con espuma absorbente, piso alfombrado, techo con paneles de fibra de vidrio). El tiempo de reverberación (T30) medido a 1 kHz fue de 0.37 s, utilizando la técnica de barrido sinusoidal (exponential sine sweep). El nivel de ruido de fondo fue de 19 dBA, garantizando condiciones estables y comparables con estudios previos sobre percepción auditiva de distancia [1] [2].

2.3 Aparatos y estímulos

Se dispusieron cuatro altavoces Genelec 8030b en dos configuraciones:

-Nivel de los oídos (0° de elevación): altavoces montados en soportes metálicos, con el eje central alineado a 1.2 m de altura, correspondiente al nivel medio de oído de los participantes sentados en sillas regulables.

-Nivel del piso: altavoces ubicados directamente sobre el suelo, con su eje dirigido al punto medio entre los oídos del oyente en el plano sagital.

Debido a la menor altura de oído de los participantes en posición sentada (1.2m), los ángulos de elevación de las fuentes ubicadas en el piso fueron; 36.9°, 24.4°, 16.6° y 11.5° para las distancias de 2, 2.9, 4.2 y 6 m, respectivamente.

Los estímulos fueron ruidos blancos de banda ancha (50 Hz–20 kHz, duración 500 ms, fade-in/out de 50 ms), generados digitalmente y calibrados para mantener un espectro plano en cada altavoz. Para impedir el uso del nivel absoluto como pista de distancia, la intensidad de cada estímulo se manipuló mediante un procedimiento de variación aleatoria de ±10 dB en torno a 70 dB SPL a 1 m (level roving), estrategia común en estudios de psicoacústica [13].

Durante la preparación de los ensayos se utilizó un ruido enmascarador de 6 s de duración y 60 dBA, compuesto por la superposición de sonidos metálicos y ambientales, para eliminar posibles claves acústicas derivadas de la manipulación de los altavoces [14].

2.4 Procedimiento

Cada ensayo consistió en la presentación de un estímulo, tras el cual el oyente debía informar verbalmente la distancia percibida en metros (ejemplo: “3.0 m”).

Cada una de las cuatro distancias posibles (2, 2.9, 4.2 y 6 m) se presentó cinco veces en cada condición de elevación (oído y suelo), resultando en un total de 20 ensayos por condición y 40

ensayos en total por participante. El orden de presentación se estableció de forma pseudoaleatoria, y el orden de las dos condiciones de elevación se contrabalanceó entre sujetos para minimizar efectos de aprendizaje o fatiga.

Antes del inicio de la tarea, el experimentador explicó a los participantes que la intensidad de los estímulos no reflejaba la distancia real y que debían realizar los juicios de distancia ignorando el nivel sonoro. Los sujetos recibieron un bloque breve de práctica para familiarizarse con la tarea, cuyos datos no fueron incluidos en los análisis.

Las respuestas obtenidas en el experimento revelaron que los participantes fueron capaces de discriminar cambios de distancia bajo condiciones de variación de intensidad, aunque con diferencias claras entre las configuraciones de fuentes al nivel de los oídos y fuentes al nivel del suelo.

3. RESULTADOS

Las respuestas obtenidas en el experimento revelaron que los participantes fueron capaces de discriminar cambios de distancia bajo condiciones de variación de intensidad, aunque con diferencias claras entre las configuraciones de fuentes al nivel de los oídos y fuentes al nivel del suelo.

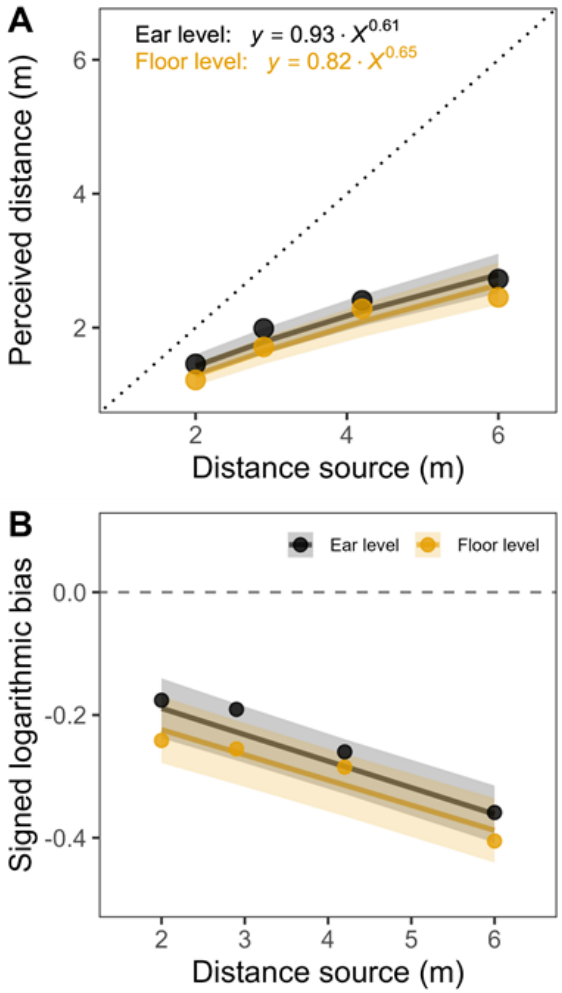


Figura 1: (A) Distancia auditiva verbalizada en función de la distancia real de los altavoces en el Experimento 2 (intensidad aleatorizada). Se muestran las respuestas promedio (±EEM: error estándar de la media) para la condición a nivel del suelo (amarillo) y a nivel de los oídos (negro) como puntos de datos. Las líneas representan el ajuste obtenido mediante el modelo lineal mixto (LMEM). La línea gris discontinua indica desempeño perfecto (respuesta = distancia real). **(B)** Sesgo logarítmico firmado promedio (±EEM) para las

condiciones de suelo (amarillo) y oído (negro), representado como puntos de datos. Las líneas corresponden al ajuste del LMEM. La línea gris discontinua indica desempeño perfecto (respuesta = distancia real).

3.1 Funciones de estimación de distancia

En ambas condiciones se observó un incremento sistemático de las estimaciones a medida que la distancia física aumentaba, lo que indica que, aun en ausencia de un nivel sonoro confiable, los oyentes pudieron acceder a otras claves para realizar juicios relativos de profundidad. Sin embargo, la pendiente de las funciones respuesta–distancia fue más marcada para las fuentes ubicadas a la altura de los oídos que para las situadas en el suelo, lo que sugiere una mayor sensibilidad en la primera condición.

3.2 Rango y sesgo

El rango de estimación (diferencia entre las distancias percibidas promedio para la fuente más lejana y la más cercana) resultó mayor en la condición de oído que en la de suelo, indicando que la posición elevada favoreció un uso más consistente de las pistas disponibles.

En cuanto al sesgo relativo firmado, los participantes mostraron una tendencia general a la subestimación en ambas condiciones, de modo que las fuentes fueron percibidas como más cercanas de lo que realmente eran. Esta tendencia es coherente con hallazgos previos en entornos cerrados y reverberantes. Por su parte, el sesgo relativo absoluto fue menor en la condición de oído, evidenciando no solo mayor precisión, sino también mayor consistencia de los juicios en comparación con la condición de suelo.

3.3 Análisis estadístico

El análisis mediante modelos lineales mixtos confirmó un efecto principal de la condición vertical (oído vs. suelo), $p < .05$, y un efecto robusto de la distancia física, $p < .001$. La interacción entre ambos factores no alcanzó significación estadística, lo que indica que el patrón de crecimiento de las funciones de respuesta fue similar en ambas condiciones, pero con diferencias en magnitud.

En conjunto, los resultados del experimento muestran que, bajo manipulación de la intensidad, la posición de la fuente en el plano vertical modula la precisión y el rango de la percepción de distancia: los oyentes discriminaron mejor las fuentes alineadas con sus oídos que aquellas en el suelo, aunque en ambos casos se observó la tendencia general a la subestimación.

4. DISCUSIÓN

El presente experimento examinó la percepción de distancia auditiva en un escenario en el que la intensidad de los estímulos fue manipulada aleatoriamente, de modo de reducir la confiabilidad de este indicio energético. Los resultados mostraron que, incluso bajo estas condiciones, los oyentes conservaron la capacidad de discriminar diferencias relativas de distancia, aunque con una precisión variable según la posición vertical de la fuente.

En particular, se observó que las estimaciones fueron más precisas y consistentes cuando las fuentes estaban alineadas con los oídos que cuando se encontraban en el suelo. Este hallazgo sugiere que la elevación angular puede constituir un indicio adicional en la percepción de distancia, complementando la información proveniente de otras claves acústicas [1] [2]. El efecto se mantuvo incluso cuando se redujo la validez del nivel sonoro, lo que refuerza la idea de que los oyentes integran múltiples fuentes de información espacial más allá de la intensidad.

La subestimación sistemática observada en ambas condiciones coincide con lo reportado en estudios previos sobre percepción auditiva de distancia en salas cerradas [15] [16]. Este sesgo parece ser un rasgo robusto del sistema auditivo humano, posiblemente relacionado con la representación interna de la energía acústica en entornos reverberantes, donde la relación entre distancia física y nivel percibido no es lineal.

Un aspecto novedoso de este experimento fue la postura de los oyentes: al estar sentados (altura promedio de oído de 1.2 m), los ángulos de elevación en la condición de suelo fueron menores que en experimentos anteriores [12] (donde los participantes estaban de pie, con oídos a ~1.6 m). Aun así, se reprodujo el mismo patrón: mayor sensibilidad en la condición de oído y mayor sesgo en la condición de suelo. Esto indica que el efecto de elevación es robusto frente a variaciones posturales, lo cual refuerza su relevancia perceptiva y su posible base en mecanismos neuro auditivos estables [10] [11].

No obstante, el análisis detallado de la compresión de respuestas y del sesgo reveló valores semejantes entre ambas condiciones, lo cual atenúa la magnitud del efecto de elevación en este experimento. Este resultado coincide con lo informado por Lombera et al. [6] en un estudio realizado con participantes sentados, donde no se halló un efecto significativo de la elevación bajo condiciones de variación de intensidad. En ese caso, los autores interpretaron que la ausencia del efecto se debía a la reducción del ángulo relativo de elevación. En nuestro caso, aunque se observó una ventaja en la condición de oído, los patrones de compresión y sesgo sugieren que esta ventaja puede ser más limitada de lo que indican los análisis de rango y pendiente.

En términos funcionales, puede especularse que la familiaridad ecológica de los oyentes con fuentes sonoras que se ubican frente a ellos, en el plano horizontal, facilita un procesamiento más eficiente de claves espaciales. En contraste, las fuentes en el suelo —menos frecuentes en la vida cotidiana— podrían carecer de representaciones internas igualmente refinadas, lo que derivaría en mayor error perceptual [17]

Además de aportar evidencia psicoacústica novedosa, estos resultados tienen implicaciones aplicadas. En el ámbito de la realidad virtual y los sistemas de audio inmersivo, la manipulación de la elevación de las fuentes podría emplearse estratégicamente para reforzar la percepción de distancia, mejorando la naturalidad y la inmersión de la experiencia [17] [18]. Asimismo, en entornos de accesibilidad para personas con discapacidad visual, aprovechar la dimensión vertical podría contribuir a enriquecer la representación espacial auditiva.

En conjunto, el presente experimento muestra que la elevación angular es un factor determinante en la precisión de la percepción de distancia auditiva, incluso bajo condiciones en las que la intensidad deja de ser un indicio válido. Estos hallazgos complementan lo observado previamente y respaldan la hipótesis de que la percepción de distancia no depende exclusivamente de pistas energéticas, sino que resulta de la integración compleja de múltiples dimensiones espaciales.

REFERENCIAS

[1] Zahorik, P., Brungart, D. S., y Bronkhorst, A. W. (2005). “Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research”. *Acta Acustica united with Acustica, 91*(3), 409–420.

[2] Kolarik, A. J., Moore, B. C., Zahorik, P., Cirstea, S., & Pardhan, S. (2016). “Auditory distance perception in humans: A review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss”. *Attention, Perception, & Psychophysics, 78,* 373–395. https://doi.org/10.3758/s13414-015-1015-1

[3] Gibson, J. J. (1986). “The Perception of the Visual World”. Boston: Houghton Mifflin.

[4] Philbeck J. W., Loomis J. M. (1997). “Comparison of two indicators of perceived egocentric distance under full-cue and reduced-cue conditions”. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 23,* 72–85. https://doi.org/10.1037/0096-1523.23.1.72

[5] Ooi T. L., Wu B., He Z. J. (2001). “Distance determined by the angular declination below the horizon”. *Nature, 414,* 197–200. https://doi.org/10.1038/35102562

[6] Lombera, E. N., Guevara, M. A., y Vergara, R. O. (2022). “Is source elevation an auditory distance cue?

A preliminary study". *Perception, 51*(10), 750-759. https://doi.org/10.1177/03010066221114589

[7] Perrott D. R. y Saberi K. (1990). "Minimum audible angle thresholds for sources varying in both elevation and azimuth". *The Journal of the Acoustical Society of America, 87*, 1728–1731. https://doi.org/10.1121/1.399421

[8] Blauert J. (1997). "Spatial Hearing: The psychophysics of human sound localization" (pp. 50–90). MIT Press.

[9] Grantham D. W., Hornsby B. W., Erpenbeck E. A. (2003). "Auditory spatial resolution in horizontal, vertical, and diagonal planes". *The Journal of the Acoustical Society of America, 114*, 1009–1022. https://doi.org/10.1121/1.1590970

[10] Middlebrooks J. C. (2015). "Sound localization". Handbook of Clinical Neurology, 129, 99–116. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00006-8

[11] Zonooz, B., Arani, E., Körding, K.P. et al. "Spectral Weighting Underlies Perceived Sound Elevation". *Sci Rep 9*, 1642 (2019). https://doi.org/10.1038/s41598-018-37537-z

[12] Piceda, L. B., Lombera, E. N., Cerviño, J., Eguia, M. C., y Vergara, R. O. (2023). "El rol del ángulo de elevación en la percepción auditiva de distancia". XVIII Congreso Argentino de Acústica (AdAA 2023), Buenos Aires, Argentina

[13] Hartmann, W. M., y Rakerd, B. (1989). "On the minimum audible angle—A decision theory approach." *The Journal of the Acoustical Society of America, 85*(5), 2031-2041.

[14] Calcagno, E. R., Abregú, E. L., Eguía, M. C., y Vergara, R. (2012). "The role of vision in auditory distance perception". *Perception, 41*(2), 175-192..

[15] Zahorik, P., y Wightman, F. L. (2001)." Loudness constancy with varying sound source distance". *Nature neuroscience, 4*(1), 78-83.

[16] Kopčo, N., y Shinn-Cunningham, B. G. (2011). "Effect of stimulus spectrum on distance perception for nearby sources". *JASA, 130*(3), 1530–1541.

[17] Larsson, P., Västfjäll, D., Olsson, P., y Kleiner, M. (2007, Octubre). "When what you hear is what you see: Presence and auditory-visual integration in virtual environments". In *Proceedings of the 10th annual international workshop on presence* (pp. 11-18).

[18] Begault, D. R., y Erbe, T. (1994). "Multichannel spatial auditory display for speech communications". *Journal of the Audio Engineering Society. Audio Engineering Society, 42*(10), 819-826.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Emulación de Directividad de Instrumentos mediante Decodificación Ambisónica

Oieni Orozco, M. V.[1]; Accolti, E.[2]; Mut, V.[3]

Instituto de Automática, UNSJ (Universidad Nacional de San Juan) - CONICET, San Juan

[1] valentinao3010@gmail.com, [2] eaccolti@inaut.unsj.edu.ar, [3] vmut@inaut.unsj.edu.ar

Resumen Los estándares actuales para la medición de parámetros de acústica de salas se basan en fuentes omnidireccionales. Sin embargo, la propuesta de utilizar fuentes direccionales para desarrollar descriptores está ganando vigencia en la literatura. En esta línea, en el presente trabajo se emulan directividades de instrumentos musicales, codificadas en armónicos esféricos, mediante su decodificación a un arreglo de doce parlantes, dispuestos en un bafle rígido en forma de dodecaedro. Esto se logra a través del modelado de la relación entre presión sonora y velocidad de los parlantes, representados como componentes de un arreglo de casquetes en un bafle esférico.

Palabras claves: Ambisonics, emulación de directividad, arreglo compacto de parlantes.

Abstract Current standards for measuring room acoustic parameters are based on omnidirectional sources. However, the proposal to use directional sources to develop descriptors is gaining ground in the literature. Along these lines, this paper emulates the directivity of musical instruments, encoded in spherical harmonics, by decoding them to an array of twelve loudspeakers arranged in a rigid dodecahedral baffle. This is achieved by modeling the relationship between sound pressure and speaker velocity, represented as components of an array of caps on a spherical baffle.

Keywords: Ambisonics, directivity emulation, compact loudspeaker array.

1. INTRODUCCIÓN

La motivación para desarrollar descriptores y efectuar mediciones contemplando la directividad propia de los instrumentos musicales, viene dada por buscar una representatividad más ajustada a casos particulares como ciertos ensambles, ciertos tipos de obras, o incluso ciertos pasajes [1], [2], [3]. En este marco, se han caracterizado salas de conciertos por Europa y Norteamérica contemplando la directividad [4], [5] y se han realizado registros sensoriales para reproducir posteriormente en realidad virtual [1]. También se han propuesto descriptores acústicos teniendo en cuenta la directividad, para representar el efecto de la sonoridad y otros atributos acústicos, percibidos por cada músico en un ensamble, que provienen del resto del grupo [3]. Y se ha encontrado para este caso, que esta percepción depende de la posición de cada músico en el ensamble y de las características constructivas de la sala.

Es frecuente también en la literatura la reproducción de patrones de radiación codificados en ambisonics. En [4], [6] se utiliza un arreglo compacto de 20 parlantes, en un poliedro irregular, mientras que en [1] se montan los parlantes en un icosaedro (regular). A su vez, en [7] se utiliza un arreglo distribuido de 40 parlantes. En este marco, el objetivo del presente trabajo es emular la directividad de los parciales de instrumentos musicales, decodificando en un arreglo compacto de 12 parlantes tipo dodecaedro, una base de datos obtenida con un arreglo distribuido de 32 micrófonos. Para ello, se hace uso del modelado en armónicos esféricos, como base de un espacio de funciones que describen patrones de radiación espaciales [8], [9].

La base de datos utilizada para la obtención de los coeficientes, que consta de mediciones anecoicas, está disponible en el repositorio web [10] y detallada en [11]. El número de micrófonos utilizado supone una restricción en el orden máximo de la codificación. La base de datos está codificada en orden $N = 4$. Existe

así también para la decodificación, una limitación física del grado al que se puede llegar de armónicos esféricos para emular directividades, con 12 parlantes en un arreglo compacto en forma de dodecaedro. Este orden máximo es $N = 2$.

2. MODELO MATEMÁTICO

La directividad se modela matemáticamente haciendo uso de los armónicos esféricos. Estos constituyen una base ortonormal que permite describir, por una combinación lineal de los mismos, cualquier distribución angular, como lo es un patrón de radiación sonora. Se dice que, así como la Serie de Fourier temporal, puede describir toda señal periódica, como una combinación lineal de los elementos de la base -que son: una constante y senos y cosenos cuya frecuencia es un múltiplo entero de la fundamental de la señal-, la serie de Fourier espacial, puede describir cualquier distribución angular mediante una combinación lineal -o suma ponderada- de armónicos esféricos [2], [8], [9].

2.1 ARMÓNICOS ESFÉRICOS

La obtención de la expresión de los armónicos esféricos, surge de la solución de la ecuación de onda en coordenadas esféricas. El desarrollo matemático de estas expresiones, puede verse en [2] y está basado en el trabajo de [8] y [9].

La ecuación de onda (1) modela el comportamiento espacio-temporal de la presión sonora, relaciona las variaciones de presión espaciales (representadas por el laplaciano en el término a la izquierda) con las variaciones de presión temporales (representada por la derivada segunda parcial en función del tiempo en el término de la derecha):

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \tag{1}$$

donde c es la velocidad del sonido.

Usando coordenadas esféricas, con distancia radial r, ángulo de acimut ϕ y ángulo de elevación θ:

$$\begin{cases} x = & r\sin\theta\cos\phi \\ y = & r\sin\theta\sin\phi \\ z = & r\cos\theta \end{cases}, \tag{2}$$

la ecuación de onda en (1) se expresa como:

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial p}{\partial r}\right) + \frac{1}{(r^2\sin\theta)}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial p}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{r^2\sin^2\theta}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial\phi^2}\right) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \tag{3}$$

Para hallar una solución a esta ecuación en un sistema de coordenadas esféricas, se debe encontrar y articular una expresión que contemple las cuatro variables independientes. Se propone una solución que se compone de factores de funciones, cada una de ellas, dependientes de tan solo una de las variables en juego.

$$p(r,\theta,\phi,t) = R(r)\Theta(\theta).\Phi(\phi)T(t). \tag{4}$$

Puede demostrarse que la solución de la ecuación de onda es de esta forma, o de una combinación lineal de estos términos. Se debe resolver la expresión obtenida (3) usando separación de variables, se tienen entonces las siguientes cuatro ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$T''(t) + \omega^2 T(t) = 0, \tag{5}$$

$$\Phi''(\phi) + m^2\Phi(\phi) = 0, \tag{6}$$

$$\frac{(\Theta'(\theta)\sin\theta)'}{\sin\theta} + \left[n(n+1) - \frac{m^2}{\sin^2\theta}\right]\Theta(\theta) = 0, \tag{7}$$

$$\frac{\left(R'(r)r^2\right)'}{r^2} + \left[k^2 - \frac{n(n+1)}{r^2}\right] R(r) = 0, \tag{8}$$

donde las derivadas se realizan respecto a la única variable de cada expresión.

Las soluciones a (5) son de la forma:

$$T(t) = A_1 e^{i\omega t} + A_2 e^{-i\omega t}, \tag{9}$$

para cada frecuencia angular $\omega = ck$, donde la constante k se denomina número de onda.

Las soluciones a (6) son de la forma:

$$\Phi(\phi) = B_1 e^{im\phi} + B_2 e^{-im\phi}, \tag{10}$$

donde m debe ser un número entero para que asegurar continuidad y periodicidad de la solución.

Reemplazando $x = \cos\theta$ en (7) se obtiene la ecuación diferencial de Legendre, cuyas soluciones acotadas son de la forma:

$$\Theta(\theta) \propto P_n^m(\cos\theta), \tag{11}$$

donde las P_n^m son las funciones de Legendre asociadas para las cuales P_n^m es nulo cuando $|m| > n$.

Finalmente, las soluciones a (8) se pueden escribir como:

$$\begin{aligned} R_n(r) &= D_1 j_n(kr) + iD_2 y_n(kr) \\ &= D_3 h_n^{(1)}(kr) + iD_4 h_n^{(2)}(kr) \\ &= D_5 j_n(kr) + iD_6 h_n^{(2)}(kr), \end{aligned} \tag{12}$$

donde j_n e y_n son las funciones esféricas de Bessel, y las $h_n^{(1)}$ y $h_n^{(2)}$ son las funciones esféricas de Hankel, siendo estas una combinación lineal de las de Bessel, siguiendo la forma:

$$\begin{aligned} h_n^{(1)}(kr) &= E_1 j_n(kr) + iE_2 y_n(kr) \\ h_n^{(2)}(kr) &= E_3 j_n(kr) - iE_4 y_n(kr), \end{aligned} \tag{13}$$

En cualquiera de las representaciones en (12) el primer término modela las ondas entrantes y el segundo término modela las ondas salientes.

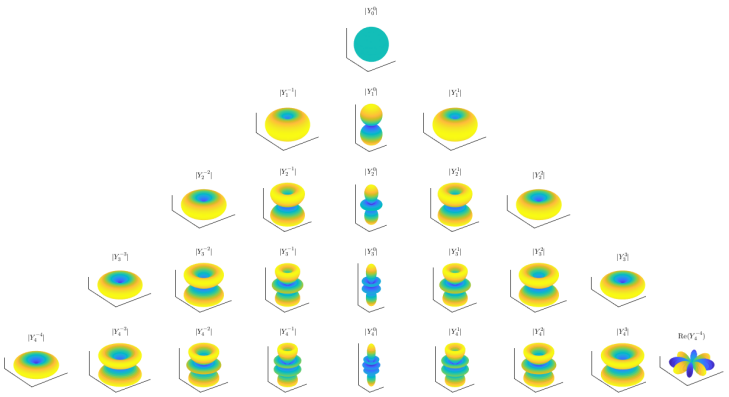
Como en el presente trabajo se deben emular directividades mediante un arreglo compacto de parlantes, localizado donde debiera estar situado el instrumento emulado, las ondas que llegan a micrófonos de medición, o expectadores, se consideran ondas salientes y por lo tanto, se utiliza:

$$R_n(r) \propto h_n^{(2)}(kr). \tag{14}$$

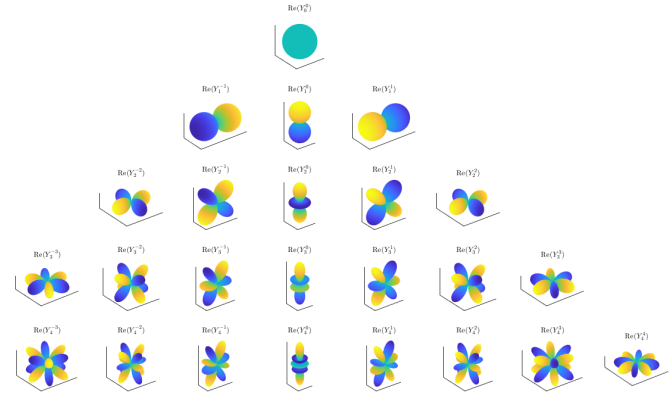
Combinando las soluciones acimutales y de elevación, se obtienen los armónicos esféricos:

$$Y_n^m(\theta,\phi) = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} . P_n^m(\cos\theta)\, e^{im\phi} \tag{15}$$

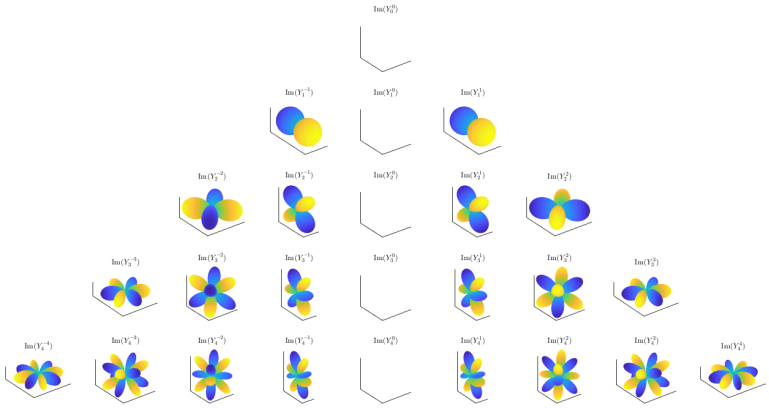
Es importante destacar que los índices de los armónicos esféricos están dados por los índices $n = 0, 1, ..., N$ de los polinomios de Legendre y $m = -n, -(n-1), ..., 0, 1, ..., n$, para cada n. Así como en la respresentación temporal por series de Fourier, la aproximación mejora con mayor cantidad de términos, por la incorporación de términos de mayor frecuencia; la representación espacial por armónicos esféricos mejora su aproximación a mayor orden N considerado. La cantidad total de armónicos esféricos utilizados es $(N+1)^2$, para cierto N. Los armónicos se muestran, llegando a un orden $N = 4$, en la Figura 1.



(a) Módulo de funciones de armónicos esféricos hasta orden $N = 4$



(b) Parte real de funciones de armónicos esféricos hasta orden $N = 4$



(c) Parte imaginaria de funciones de armónicos esféricos hasta orden $N = 4$

Figura 1: Funciones de armónicos esféricos hasta orden $N = 4$

Finalmente, para poder hallar una expresión completa a la presión expresada como combinación lineal de armónicos esféricos, incorporando la solución de $T(t)$ implícitamente, de (4) y (9)-(14), se tiene la solución general de (3) para cada frecuencia angular:

$$\begin{aligned} p(r,\theta,\phi,k) &= \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} C_{n,m}(kr)h_n^{(2)}(kr)Y_n^m(\theta,\phi) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} c_{n,m}(kr)Y_n^m(\theta,\phi), \end{aligned} \tag{16}$$

quedando así, la presión expresada como una combinación lineal de los armónicos esféricos. La distancia radial r es constante, constituye una superficie esférica y representa la distancia respecto de la fuente a la que se mide la directividad.

2.2 CODIFICACIÓN

Expresar a la presión en los coeficientes $c_{n,m}(kr)$ suele denominarse *codificación* en Ambisonics. Para ello, se toman mediciones de la presión sonora en direcciones uniformemente espaciadas, a cierto radio r constante, $\mathscr{D}_e = \{(\theta_q^e, \phi_q^e),\ q = 1,2,\ldots,Q\}$. El número de micrófonos Q debe ser por lo menos igual al número de coeficientes $Q \geq (N+1)^2$. Por lo tanto, el grado de armónicos que se utilizará dependerá de la cantidad de micrófonos disponibles. La base de datos utilizada [10] tiene 25 coeficientes. Por medir con 32 micrófonos, se obtuvo una codificación de orden $N = 4$. Aproximando la presión ((16)) a N coeficientes, de forma matricial:

$$p(r,k) \approx Y_e\, c(kr), \tag{17}$$

$$p(r,k) = \begin{bmatrix} p(r,\theta_1^{\mathrm{e}},\phi_1^{\mathrm{e}},k) \\ p(r,\theta_2^{\mathrm{e}},\phi_2^{\mathrm{e}},k) \\ \cdots \\ p(r,\theta_Q^{\mathrm{e}},\phi_Q^{\mathrm{e}},k) \end{bmatrix}_{Q\times 1}, \tag{18}$$

$$c(kr) = \begin{bmatrix} c_{0,0}(kr) \\ c_{1,-1}(kr) \\ c_{1,0}(kr) \\ \cdots \\ \\ c_{N,N}(kr) \end{bmatrix}_{(N+1)^2\times 1}, \tag{19}$$

$$Y_{\mathrm{e}} = \begin{bmatrix} Y_0^0(\theta_1^{\mathrm{e}},\phi_1^{\mathrm{e}}) & \cdots & Y_N^N(\theta_1^{\mathrm{e}},\phi_1^{\mathrm{e}}) \\ Y_0^0(\theta_2^{\mathrm{e}},\phi_2^{\mathrm{e}}) & \cdots & Y_N^N(\theta_2^{\mathrm{e}},\phi_2^{\mathrm{e}}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_0^0(\theta_Q^{\mathrm{e}},\phi_Q^{\mathrm{e}}) & \cdots & Y_N^N(\theta_Q^{\mathrm{e}},\phi_Q^{\mathrm{e}}) \end{bmatrix}_{Q\times(N+1)^2}. \tag{20}$$

Por tanto, los coeficientes en armónicos esféricos de Fourier se estiman mediante:

$$c(kr) \approx Y_{\mathrm{e}}^{\dagger} p(r,k), \tag{21}$$

donde $Y_{\mathrm{e}}^{\dagger}$ es la pseudoinversa de la matriz de codificación Y_{e}. Como los armónicos esféricos constituyen una base ortonormal y compleja, matricialmente conforman una matriz ortonormal y compleja, por lo que su inversa puede perfectamente calcularse por su matriz adjunta (matriz transpuesta y conjugada).

2.3 DECODIFICACIÓN

El proceso de decodificación consiste en reconstruir la presión medida por los micrófonos, haciendo uso de los coeficientes obtenidos en la codificación de la misma. Para ello, se necesita del modelo matemático del arreglo compacto de parlantes.

Los parlantes se disponen en un bafle con forma de poliedro regular -en nuestro caso dodecaedro- de $L = 12$ caras, de radio r_a menor al que se realizaron las mediciones $r_a < r$ en las direcciones: $\mathscr{D}_{\mathrm{d}} = \{(\theta_\ell^{\mathrm{d}},\phi_\ell^{\mathrm{d}}), \ell = 1,2,\ldots,L\}$. Cabe aclarar que el grado a conseguir en la decodificación se limita al número de parlantes disponibles:

$$L \geq (N+1)^2, \tag{22}$$

por lo que:

$$N \leq \sqrt{L} - 1. \tag{23}$$

Luego, para la decodificación, $N = 2$ y se llega hasta la tercera fila de los armónicos esféricos en Figura 1.

Cada uno de los parlantes del arreglo se puede modelar como un "casquete en un bafle esférico", de acuerdo a lo propuesto por [8], definido sobre una esfera rígida de radio r_a. Luego, el arreglo de parlantes se puede modelar como múltiples casquetes, cada uno ubicado en la dirección correspondiente a cada parlante (haciendo una rotación del modelo individual). Para un único parlante, se plantea la siguiente velocidad de partícula en la dirección radial, $\dot{w}$, que es independiente de ϕ, por lo que no varía azimutalmente, sino solo en elevación:

$$\dot{w}(r_a,\theta) = \begin{cases} \dot{W}, & 0 < \theta < \alpha \\ 0, & \alpha < \theta < \pi \end{cases}, \tag{24}$$

donde α es el ángulo de apertura del parlante, medido desde su centro, que se posiciona en el eje z positivo, desde donde se mide θ, que varía de 0 a π, y donde $\dot{W}$ es la velocidad de partícula en la dirección

radial, constante, que representa la velocidad del cono del parlante. Esto quiere decir que la velocidad $\dot{w}$ es nula fuera del radio de acción de cada casquete.

A partir de esta condición y teniendo en cuenta aspectos de modelado como:

- la posibilidad de expresar la velocidad de partícula también como combinación lineal de los armónicos esféricos (codificar en ambisonics),
- la relación existente entre la expresión de la velocidad y de la presión como combinación lineal de armónicos esféricos,
- la invarianza respecto de azimuth, que hace que $m = 0$ siempre, y que haya solo un término para cada n, simplificando la expresión de los armónicos esféricos, en polinomios de Legendre, véase (15),

se obtiene la expresión de la presión para el ℓ-ésimo casquete esférico individual, centrado en el eje z positivo como:

$$p(r,\theta) = \frac{i\rho_0 c\dot{W}_\ell}{2}\sum_{n=0}^{\infty}\left[P_{n-1}(\cos\alpha) - P_{n+1}(\cos\alpha)\right]\frac{h_n(kr)}{h_n'(kr_a)}P_n(\cos\theta)\,. \tag{25}$$

Particularmente para $n = 0$:

$$P_{n-1}(\cos\alpha) - P_{n+1}(\cos\alpha) = 1 - \cos\alpha. \tag{26}$$

A partir de la expresión en (25) para un único casquete o parlante, se necesita entonces determinar la velocidad $\dot{W}_\ell$ constante que tendrá cada uno. Estos valores constituyen condiciones de contorno para cada parlante. Una vez halladas, la presión resultante es la superposición, que se asume lineal, de los doce parlantes en el dodecaedro [1].

Para poder hallar la velocidad $\dot{W}_\ell$ del ℓ-ésimo parlante, basta con hallar la velocidad de partícula en algún punto perteneciente a la región de acción del parlante $\dot{w}(r_a,\theta_\ell,\phi_\ell)$. La velocidad en cada casquete $\dot{W}_\ell$, es constante en todo el ángulo de acción de cada parlante véase (24) y (25). Para ello, se recurre a la expresión de la velocidad de partícula $\dot{w}$, al radio del dodecaedro r_a, como combinación lineal de armónicos esféricos:

$$\dot{w}(r_a,\theta,\phi) = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n}\dot{w}_{n,m}(kr_a)Y_n^m(\theta,\phi)\,, \tag{27}$$

donde $\dot{w}_{n,m}(kr_a)$ son los coeficientes de Fourier armónicos esféricos de $\dot{w}(r_a,\theta,\phi)$, que pueden ser expresados en función de los coeficientes de presión $c_{n,m}(kr)$, estimados en (21):

$$\dot{w}_{n,m}(kr_a) = \frac{1}{i\rho_0 c}\frac{h_n'(kr_a)}{h_n(kr)}c_{n,m}(kr). \tag{28}$$

La velocidad para el ℓ-ésimo parlante corresponde a (27):

$$\dot{W}_\ell = \dot{w}(r_a,\theta_\ell,\phi_\ell) = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n}\dot{w}_{n,m}(kr_a)Y_n^m(\theta_\ell,\phi_\ell)\,, \tag{29}$$

por lo tanto, la presión sonora obtenida con el arreglo compacto de doce parlantes en un dodecaedro, se puede estimar con el modelo múltiple polar cap como sigue, siendo:

$$p(r,\theta) = \sum_{\ell=1}^{12} p(r,\theta_\ell,\phi_\ell)\Big|_{\dot{W}=\dot{W}_\ell}\,, \tag{30}$$

donde los valores de $p(r, \theta_\ell, \phi_\ell)$ se estiman rotando los resultados de (25), mediante (29) desde la dirección $(\theta = 0, \phi = 0)$ a (θ_ℓ, ϕ_ℓ).

3. SIMULACIONES OBTENIDAS

Se realizó un análisis comparativo de la directividad obtenida en la codificación, con $N = 4$, respecto de la obtenida en la decodificación, con $N = 2$, en simulación. Los armónicos esféricos codifican un mayor detalle espacial cuanto mayor sea su orden, véase la Figura 1. En espectros de alta frecuencia, se necesita de armónicos de mayor orden para poder representar mejor su forma. Justamente es natural que a mayor frecuencia, el patrón de radiación se haga más dirigido y acotado espacialmente.

Las Figuras 2 y 3 muestran los patrones de radiación de un armónico de baja frecuencia y uno de alta frecuencia, respectivamente, usando la base de datos codificada y una simulación de como serían decodificados en el dodecaedro propuesto.

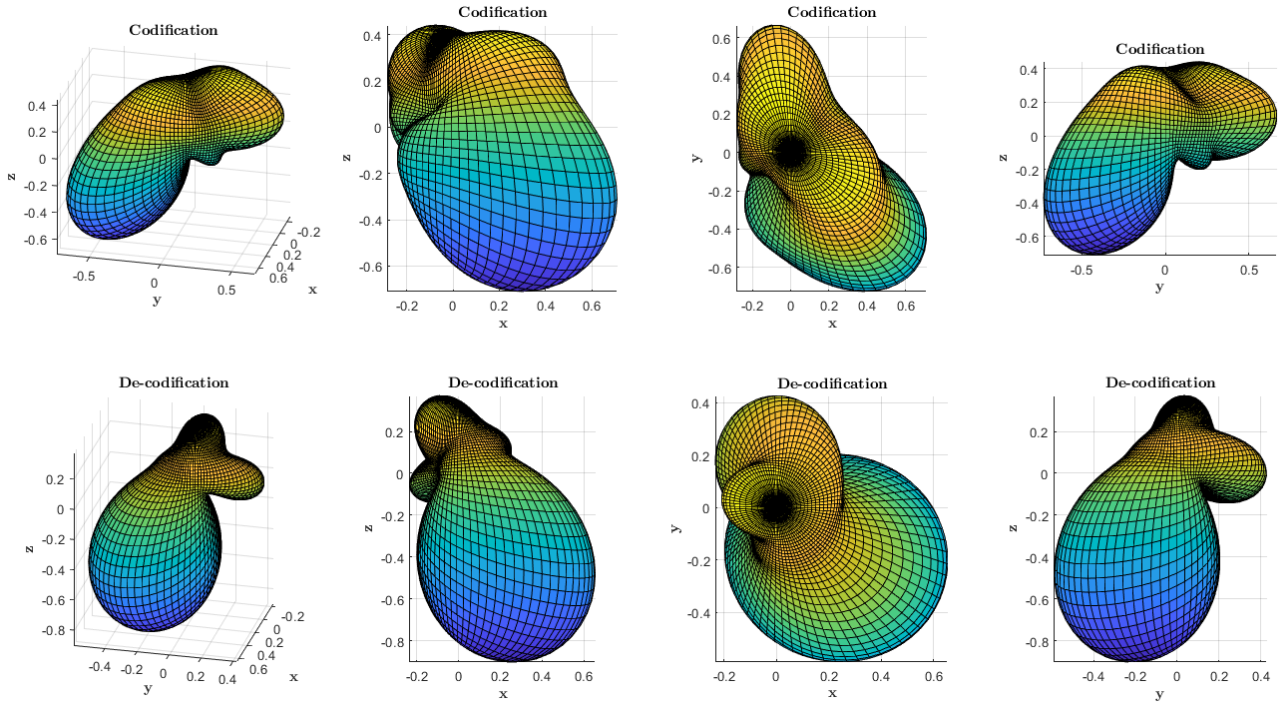


Figura 2: Comparación entre codificación y decodificación en simulación de la grabación de un cello. Frecuencia: 197 Hz - Nota: C2 - Armónico: 3

En Figura 2, se observa que la decodificación para baja frecuencia respeta las directividades previamente codificadas, en la reproducción de sus formas. Pero se observa en Figura 3 que no es capaz de reproducir lóbulos de formas muy recortadas, debido al orden utilizado en simulación. Esto produce que las formas de lóbulos de menor ancho, se suavicen. La forma en Figura 2 también se ve suavizada en la decodificación, esto se puede observar mejor en las vistas de la primera y tercera columna.

4. CONCLUSIONES

Se concluye que, a partir de los modelos vigentes reportados en la literatura y su implementación en simulaciones, fue posible evaluar la directividad obtenida con una codificación de cuarto orden y una decodificación de segundo orden. Los resultados muestran que, si bien la decodificación de menor grado introduce limitaciones en la precisión espacial del campo sonoro, el análisis comparativo permite identificar los alcances y restricciones prácticas de esta configuración. Como trabajo futuro, se propone la validación experimental mediante mediciones directas del espectro reproducido en el arreglo de doce parlantes. También se propone el diseño de filtros por bandas de tercios de octava para lograr imitar los patrones de radiación completos de los instrumentos, como en [4], [6].

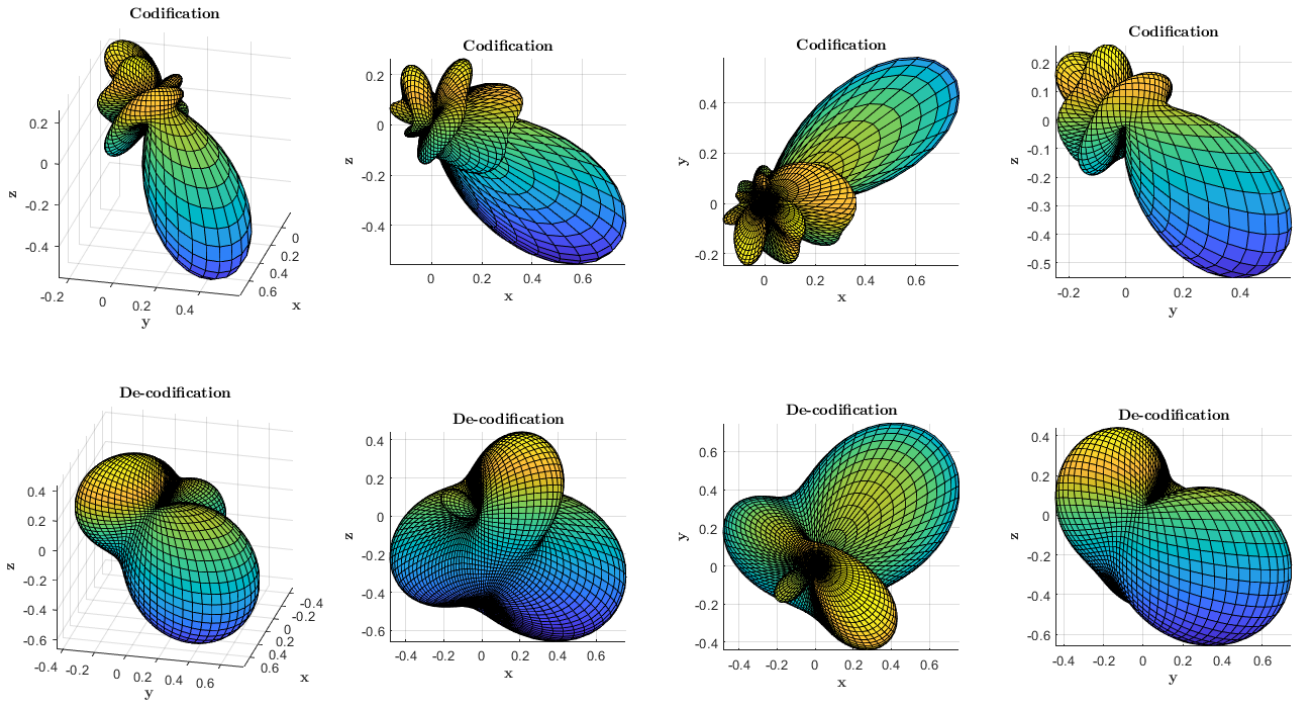


Figura 3: Comparación entre codificación y decodificación en simulación de la grabación de un cello. Frecuencia: 9959 Hz - Nota: B5 - Armónico: 10

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el soporte de la Universidad Nacional de San Juan y del CONICET ya que este trabajo se desarrolló en el marco de las becas CICITCA, internas de la Universidad, que consisten en un estipendio mensual a alumnos adscriptos a proyectos de investigación, con el objetivo de fomentar vocaciones científicas.

Referencias

[1] F. Zotter y M. Frank, *Ambisonics: A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*, 1.ª ed. Springer International Publishing, 2019.

[2] E. Accolti et al., « A Compact Spherical Loudspeaker Array for Efficiently Recreating Instrument Directivities,» *RPIC XIX: Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*, 2021.

[3] E. Accolti y V. Oieni, « Descriptores de acústica de escenarios basados en fuentes direccionales,» *XIII Congreso Iberoamericano de Acústica*, 2024.

[4] M. T. Neal, «A Spherical Microphone and Compact Loudspeaker Array Measurement Database for the Study of Concert Hall Preference,» Tesis doct., The Pennsylvania State University, 2019.

[5] S. Tervo, J. Pätynen y T. Lokki, «Spatio-temporal energy measurements in renowned concert halls with a loudspeaker orchestra,» en *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Acoustical Society of America, vol. 19, 2013, pág. 015 019.

[6] M. T. Neal y M. C. Vigeant, «A Compact Spherical Loudspeaker Array for efficiently recreating Instrument Directivities,» *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 11, n.º 68, págs. 796-809, 2020.

[7] M. T. Neal, «Investigating the Sense of Listener Envelopment in Concert Halls using Third-order Ambisonic Reproduction over a Loudspeaker Array and a Hybrid Room Acoustics Simulation Method,» Tesis de mtría., The Pennsylvania State University, 2019.

[8] E. G. Williams, *Fourier Acoustics. Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*, 1.ª ed. Academic Press, 1999.

[9] B. Rafaely, *Fundamentals of Spherical Array Processing*, 2.ª ed. Springer Nature, Switzerland, 2019.

[10] S. Weinzierl et al., *A Database of Anechoic Microphone Array Measurements of Musical Instruments*. 2017. dirección: http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-5861.2

[11] N. R. Shabtai, G. Behler, M. Vorländer y S. Weinzierl, «Generation and analysis of an acoustic radiation pattern database for forty-one musical instruments,» *The Journal of the Acoustic Society of America*, vol. 141, págs. 1246-1256, 2017.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Desarrollo de un plugin VST para cancelación de crosstalk aéreo en reproducción de señales binaurales mediante parlantes

Charles Mengeon, M. E.[†,1]; Lizaso, G. [†,2]; Petrosino, J. [†,‡,3]

[†] Universidad Nacional de Lanús, Remedios de Escalada

‡ Universidad Nacional de Tres de Febrero, Caseros

[1] marti.charles@hotmail.com.ar, [2] glizaso@unla.edu.ar, [3] jpetrosino@untref.edu.ar

Resumen Para que las señales binaurales reproducidas por sistemas de altavoces sean percibidas por un oyente en su posición sin perder el efecto de binauralidad, es fundamental evitar que la señal destinada a un oído llegue al otro sin control. Esto se logra mediante la cancelación del crosstalk aéreo, es decir, enviando al oído contralateral una señal que anule la interferencia. Este trabajo presenta el desarrollo de un plugin de audio VST que implementa filtros de cancelación de crosstalk, permitiendo la reproducción de contenido binaural a través de altavoces sin pérdida de indicios de espacialidad. El sistema se basa en técnicas de inversión matricial con regularización, que compensan la baja condición de número del sistema a determinadas frecuencias, asegurando una reproducción estable y perceptualmente válida. Como caso de prueba se toma una configuración de dos parlantes, previamente estudiada y se compara el comportamiento del algoritmo en su versión offline con su ejecución en tiempo real dentro de un entorno de producción (DAW). Esta herramienta busca facilitar la aplicación de técnicas transaurales en contextos diversos, sin requerir hardware especializado.

Palabras clave: audio transaural, cancelación de crosstalk aéreo, plugin de audio VST.

Abstract For binaural signals reproduced through loudspeaker systems to be perceived without loss of spatiality, it is essential to prevent the signal intended for one ear from reaching the other ear uncontrolled. This is achieved through airborne crosstalk cancellation: a signal that cancels out the interference is emitted to the contralateral ear. This work presents the development of a VST audio plugin that implements crosstalk cancellation filters, allowing the reproduction of binaural content through loudspeakers without losing any indication of spatiality. The system is based on matrix inversion techniques with regularization, which compensate for poor system performance at certain frequencies and ensure stable and perceptually valid reproduction. A two-speaker configuration is used as a test case; the behavior of the algorithm in its offline version is compared with its real-time execution within a production environment (DAW). The tool aims to facilitate the application of transaural techniques in diverse contexts, without requiring specialized hardware..

Palabras clave: transaural audio, aerial crosstalk cancelation, VST audio plugin.

1. INTRODUCCIÓN

Cada sonido que se emite, independientemente de su fuente y su ubicación, interactúa con los diversos objetos presentes en el ambiente. Estos alteran las ondas sonoras y generan diversas variaciones en ellas. La suma de todas las variables posibles para los sonidos que existan en un determinado ambiente es lo que denominamos campo sonoro. Este último es captado por nuestros oídos los cuales de acuerdo con las diversas variaciones que perciban detectan diversos indicios que le permiten ubicar el sonido en espacio dentro del recinto. En particular, las interacciones más importantes son las que se producen por efecto de la cabeza, hombros y pabellones auriculares de los oyentes, produciendo en conjunto el efecto conocido como función de transferencia de la cabeza (conocido por sus siglas en inglés HRTF, de *Head Related Transfer Function*). Esto es muy importante a la hora de emular campos sonoros tridimensionales. El término ‘señal binaural’ se refiere a dos canales de audio con información que contiene indicios de espacialidad relacionados con el HRTF. Para que dicha señal binaural sea corrrectamente interpretada es necesario utilizar auriculares para su reproducción.

Cuando se pretende reproducir audio binaural mediante altavoces, sin perder la percepción de espacialidad, es necesario procesar previamente las señales para evitar la contaminación cruzada de señales entre altavoces y oídos. Existen varios métodos: en este trabajo nos vamos a centrar en el método transaural que consiste en lograr dicha sensación de espacialidad con audio binaural reproducido a través de dos altoparlantes, tales como los de un sistema estéreo convencional. El objetivo es lograr una suerte de auriculares virtuales en donde cada altavoz emite una señal compuesta de modo tal que las contribuciones cruzadas (al oído contralateral) se cancelen: idealmente, a cada oído debe llegar únicamente su señal ipsilateral [1]. Este procedimiento se conoce también como método de cancelación de crosstalk aéreo (XTC).

Pensemos en el caso típico de una emisión del tipo estéreo: el parlante izquierdo (X_L) emite una señal que llegará tanto al oído izquierdo (Y_L) como al oído derecho (Y_R). El mismo proceso a la inversa se dará para con el parlante derecho (X_R) y el oído Y_R. Entonces cada oído recibe una mezcla de la señal correspondiente a la contribución directa de X_L y a la contribución cruzada de X_R. El objetivo del método de crosstalk es elaborar un filtro que logre anular las contribuciones cruzadas, manteniendo las señales ipsilaterales sin alteración.

El procedimiento utilizado en este trabajo logra sus objetivos sólo para un oyente en una posición determinada. Un cálculo bien diseñado puede tolerar pequeñas variaciones pero en términos generales es muy sensible. Para que sea perfecto la cabeza del oyente no debe moverse y debe ubicarse en un recinto completamente anecoico y toda la cadena electroacustica debe estar apareada. Incluso en estas condiciones debe lograrse que la diferencia entre la señal que llega al oído ipsilateral respecto a la contralateral sea adecuada para que el cerebro la ignore. Dada la dificultad para lograr estas condiciones técnicas en circunstancias comerciales y/o hogareñas se pensaron múltiples soluciones para relativizar estas condiciones.

En particular, el enfoque propuesto por E. Choueiri [2] plantea una inversión matricial regularizada que no requiere modelar explícitamente la cabeza mediante HRTF, sino dos puntos de escucha ideales (oídos) y cuatro caminos de propagación libre entre altavoces y oídos. Trabajos posteriores han observado que, aunque la cancelación teórica no sea perfecta, el resultado perceptivo puede ser convincente [3].

En esta línea, el presente trabajo presenta el desarrollo de un **plugin VST** que, sobre la base de la inversión regularizada, permite **generar y ajustar** filtros XTC en tiempo real con parámetros geométricos (distancia altavoces–oyente, separación entre altavoces y entre oídos) y el parámetro de regularización β.

2. CANCELACIÓN DE CROSSTALK

En la figura 1 se muestra el diagrama en bloques de un sistema de cancelación de crosstalk, donde se busca que al oído Y_L llegue solamente la señal S_L y al Y_R llegue S_R. Lo que se emite por el altavoz X_L va a llegar tanto al oído Y_L como al Y_R, por lo que el altavoz X_R deberá emitir una señal convolucionada por un conjunto de filtros C que logre predecir y cancelar esta contribución al oído contralateral. Pero, a su vez, al oído ipsilateral llegará esta nueva señal afectada por el filtro C. La solución es diseñar un conjunto de filtros C que cancele ambas contribuciones indeseadas.

Esto implica resolver un sistema de ecuaciones que puede representarse en forma matricial. Este sistema de ecuaciones tiene la desventaja que frente a pequeñas variaciones en las condiciones ideales del sistema se producen grandes variaciones en el resultado sonoro. Por ejemplo, pequeños movimientos de la cabeza generan una caída perceptible del nivel de cancelación y coloraciones notorias. Además de esto, las condiciones reales de escucha (los altavoces utilizados de calidad hogareña, ambientes no anecoicos, etc) generan dificultades a la hora de predecir el comportamiento de los filtros, con muy baja tolerancia. Es por esto que Choueiri utiliza la técnica conocida como regularización de matrices mediante la cual los resultados teóricos de cancelación de crosstalk se alejan de los ideales pero resultan más estables frente a variaciones del sistema.

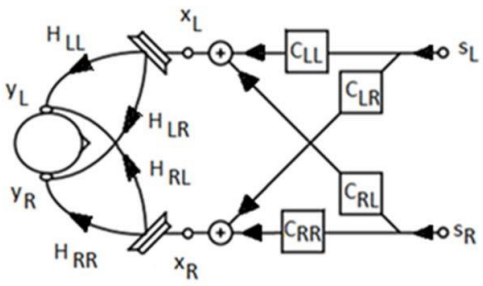


Figura 1: Diagrama en bloques de un sistema de cancelación de crosstalk [1]

En la ecuación (1) C es la matriz que contiene los cuatro filtros de la figura 2. H representa los cuatro caminos de propagación de sonido al aire, β es el parámetro de regularización de la matriz, I es la matriz identidad y el superíndice TC significa transpuesto conjugado.

$$C_\beta = [H^{TC} \times H + \beta \times I\} \times H^{TC} \times K \times e^{-j\omega\Delta t} \quad (1)$$

C es la matriz que contiene los cuatro filtros de la figura 2. H representa los cuatro caminos de propagación de sonido al aire, β es el parámetro de regularización de la matriz, I es la matriz identidad y el superíndice TC significa transpuesto conjugado.

El parámetro de regularización β es un valor constante elegido por el usuario. Si le damos valor 0 el resultado será el filtro ideal pero sensible. A medida que aumentamos el valor de β la respuesta se alejará del resultado exacto (incluso en el punto exacto donde funciona a la perfección, lo que entendemos como *sweet spot*) pero será menos sensible frente a variaciones en los parámetros.

3. DESARROLLO DE UN PLUGIN VST

Entendiendo el funcionamiento de la ecuación, desglosamos el desarrollo del plugin VST. Se utilizó el *Audio Toolbox* de MATLAB en su versión 3.1 (correspondiente a la versión R2021b de MATLAB). El primer paso fue desarrollar una función que realice la tarea matemática de la ecuación independiente del proceso mismo del plugin. Esta función es el archivo transaural_ir.m. Tras esto, se procedió al desarrollo del código del plugin VST, el archivo XTC09.m. Este funciona tomando la matriz C como una respuesta al impulso, que hará convolucionar con el audio que procesará en el futuro entorno de trabajo. Aquí damos la posibilidad de modificar las variables que acepta transaural_ir de entrada, de modo tal que se permite cierta flexibilidad al usuario sobre el punto de escucha. A continuación se detallara el código de cada una de las partes.

3.1 La función transaural_ir

La función transaural_ir.m permite el ingreso de parámetros variables (la distancia entre el plano de altavoces y el plano de oídos, entre altavoces y entre oídos, el factor de regularización beta y el número de muestras de sampleo) y devuelve las respuestas al impulso (IR, por su sigla en inglés) de cancelación de crosstalk, es decir, las matrices C. A continuación, se transcribe el código de la función.

Código 1. Función transaural_ir.m

```
function [cLL, cLR] = transaural_ir(D, dp, do, beta, nSamplesIR, fs)


% --- Pre-asignación de memoria ---
% Es lo mas eficiente y resulta necesario para pasar el codigo a C++ en el futuro
```

```
C = complex(zeros(2, 2, nSamplesIR/2));
c = 345;
if mod(nSamplesIR, 2) == 1
    nSamplesIR = nSamplesIR + 1;
end
f = (0:nSamplesIR/2-1) / nSamplesIR * fs;

dLL = sqrt(D^2 + (dp/2 - do/2)^2);
dLR = sqrt(D^2 + (dp/2 + do/2)^2);
tLL = dLL/c;
tLR = dLR/c;

% Cálculo de la matriz de transferencia en frecuencia
for naux = 1:nSamplesIR/2
    w = 2 * pi * f(naux);
    Haux0 = [exp(-1i*w*tLL)/dLL, exp(-1i*w*tLR)/dLR; ...
            exp(-1i*w*tLR)/dLR, exp(-1i*w*tLL)/dLL];
    C(:,:,naux) = inv((Haux0' * Haux0 + beta * eye(2))) * Haux0';
end

% Reconstrucción del espectro completo
CLL_spec = [squeeze(C(1,1,:)); 0; conj(squeeze(C(1,1,end:-1:2)))];
CLR_spec = [squeeze(C(2,1,:)); 0; conj(squeeze(C(2,1,end:-1:2)))];

% Obtener la respuesta al impulso (real)
cLL = real(ifft(CLL_spec));
cLR = real(ifft(CLR_spec));

% Aplicar un pequeño retardo para hacer la respuesta causal
tdelay = 0.01; % 10 ms delay
ntdelay = round(tdelay * fs);
cLL = circshift(cLL, ntdelay);
cLR = circshift(cLR, ntdelay);
end
```

Como estamos considerando un caso simétrico, las matrices C_{LL} y C_{RR} son iguales, del mismo modo que C_{LR} y C_{RL}. Es por esto que la función devuelve solamente dos valores: una matriz para el caso ipsilateral y otra para el caso contralateral. En el plugin se construirán los dos filtros restantes.

En primer lugar la función preasigna en la memoria los valores que precisará para funcionar, aunque estén vacíos (como el caso de C). Esto es necesario para habilitar en un futuro pasar la función a lenguaje C++, dado que este lenguaje no permite el desarrollo dinámico de una variable.

El primer bucle if busca asegurarse que el número de muestras sea par. No es necesario en nuestro caso, pero sí lo será en caso de que se desarrolle una aplicación independiente del plugin que desarrolle respuestas al impulso que se puedan prealojar.

El vector de frecuencias f se calcula para contener únicamente los componentes que serán utilizados en el bucle: desde 0 Hz hasta la frecuencia inmediatamente anterior a la de Nyquist (fs/2). Este método se fundamenta en la simetría hermitiana de las señales reales que establece que los componentes de frecuencia negativos son el conjugado complejo de sus contrapartes positivas. Por lo tanto, calcular explícitamente la mitad del espectro es suficiente para reconstruirlo en su totalidad, reduciendo a la mitad el número de iteraciones necesarias y optimizando significativamente el proceso.

La función luego calcula la distancia del altavoz izquierdo al oído izquierdo primero y al oído derecho después, aplicando el teorema de Pitágoras. Una vez obtenidas esas distancias las divide por la velocidad del sonido (la constante c minúscula, que en la función es 345 m/s) para obtener el retardo.

A continuación, una vez obtenidos los datos necesarios, la función calcula la matriz inversa regularizada. En un bucle for que itera sobre la primera mitad de las frecuencias, se construye la matriz de transferencia acústica H para cada componente frecuencial. Esta matriz modela la atenuación y el desfase que sufre el sonido en su propagación desde cada altavoz a cada oído. Una vez obtenida la matriz H, se aplica la ecuación de regularización de matrices propuesta por Choueiri para obtener la matriz de filtros de cancelación C.

Utilizando la propiedad de simetría hermitiana se reconstruye el espectro de frecuencia completo para cada uno de los cuatro filtros (C_{LL}, C_{LR}, C_{RL}, C_{RR}) a partir de la mitad calculada (la función squeeze). Esta simetría debería asegurar que la respuesta al impulso resultante en el dominio del tiempo sea una señal puramente real. El problema es que una computadora de uso hogareño puede tener pequeños errores de precisión (como, por ejemplo, $2{,}5 + 3{,}1 \times 10 - 17\mathrm{i}$) que terminarían alojados en C, dado que es invariable como número complejo. Por ende, a la hora de calcular la Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT) de C_{LL} y C_{LR} se utiliza la función real(), que obliga a devolver la parte real del resultado.

Por último, se introduce un retardo fijo de 10 ms mediante un desplazamiento circular (la función circshift) para asegurar que los filtros sean causales, es decir, que su respuesta ocurra después del estímulo inicial.

3.2 La clase XTC09

La versión final del plugin fue el resultado de un largo proceso de desarrollo y depuración (Apéndice A). A diferencia de la función, en este caso el paradigma es el de programación orientada a objetos (OOP, por sus siglas en inglés). Se priorizó que el desarrollo sea compatible con el compilador de MATLAB Coder, teniendo en cuenta que, a diferencia del lenguaje M (el lenguaje de MATLAB), que es un lenguaje interpretado, el lenguaje que genera el Coder (C++) es del tipo compilado. Por lo tanto, la flexibilidad que nos otorga MATLAB debe ser modificada a veces por procesos más elementales, pero fácilmente traducibles a un valor invariable.

En lugar de delegar el proceso de filtrado a objetos de sistema complejos se tomó la decisión de que el plugin gestionara directamente sus elementos constitutivos. Esta elección de diseño presenta dos ventajas clave: primero, permite tener sobre el proceso de filtrado; segundo, presenta al compilador de

MATLAB Coder una estructura de memoria simple y de tamaño fijo, un factor que resulta importante para la generación de código estable.

Para la tarea de convolución en tiempo real, MATLAB ofrece diversas herramientas. Si bien objetos como dsp.FrequencyDomainFIRFilter son altamente eficientes para aplicar filtros estáticos (ya que realiza convolución en frecuencia), se optó por utilizar la función filter(). La principal razón radica en que es una función base del lenguaje M, por lo que su nivel de optimización y su simplicidad son mayores. En primer lugar, esto hace que el Coder tenga mayores probabilidades de comprender sus acciones y aumente la posibilidad de éxito en la generación del sistema VST. Esto es importante en este plugin, cuyo propósito principal es que sus filtros cambien dinámicamente cada vez que el usuario ajuste un parámetro. La función filter() acepta un vector de coeficientes como un argumento directo en cada llamada, sin la sobrecarga de gestionar la estructura interna de un objeto complejo.

En segundo lugar, que sea una función básica de M permite entender y controlar todo el procesamiento que realiza la función, a diferencia de dsp.FrequencyDomainFIRFilter que, al ser un objeto de matlab.System, su algoritmo interno no es accesible. Esto facilitará las investigaciones futuras que eventualmente se realicen con respecto al sistema crosstalk.

En contrapartida, dado que su funcionamiento es por convolución directa, en el dominio del tiempo, "muestra por muestra", es menos eficiente que la convolución en frecuencia. Sin embargo, para la longitud de filtro utilizada en este proyecto (8192 muestras), el rendimiento de las computadoras hogareña actuales es suficiente para garantizar el procesamiento en tiempo real de los casos analizados en el presente trabajo.

Pasemos a desarrollar el funcionamiento del plugin. En la primera etapa de funcionamiento del plugin el constructor llama inmediatamente al método reset(). Este método tiene dos responsabilidades: primero, inicializa los cuatro vectores de estado (zLL, etc.) con ceros, asegurando que el filtro no contenga muestras residuales de ejecuciones previas. Segundo, realiza la primera llamada al método privado updateCoefficients() para calcular el conjunto inicial de filtros a partir de los valores por defecto de los parámetros.

Luego viene la etapa de los métodos set y updateCoefficients. La capacidad dinámica del plugin se gestiona a través de los métodos set de cada parámetro público. Cuando el usuario modifica un parámetro en la interfaz (por ejemplo, D), se ejecuta su método correspondiente (set.D). Este, a su vez, actualiza el valor de la propiedad y llama al método privado updateCoefficients().

Este método centraliza la lógica de recálculo: obtiene la frecuencia de muestreo actual, invoca a la función externa transaural_ir con los parámetros actualizados y almacena los nuevos vectores de coeficientes cLL y cLR en las propiedades correspondientes, asegurando que tengan la orientación correcta (vectores fila).

El núcleo del procesamiento en tiempo real reside en el método process. En lugar de utilizar un objeto de sistema, se emplea la función fundamental de MATLAB: filter(). La señal de entrada estéreo se divide en sus canales izquierdo y derecho. Luego, se realizan cuatro operaciones de filtrado separadas, una para cada ruta acústica (LL, LR, RL, RR). En cada llamada a filter(b, a, x, zi), se le proporciona el vector de coeficientes correspondiente (plugin.cLL o plugin.cLR), la señal de entrada mono (left_in o right_in) y el vector de estado actual para esa ruta específica (plugin.zLL, etc.). Entonces, devuelve tanto la señal de audio filtrada como el vector de estado actualizado, que se guarda de nuevo en su propiedad correspondiente. Este manejo manual del estado es crucial para garantizar la continuidad del filtrado entre bloques de audio consecutivos. Finalmente, las señales filtradas se suman de acuerdo con el modelo de cancelación de crosstalk para producir la salida estéreo final.

4. COMPARACIÓN DE FUNCIONAMIENTO

Con el objetivo de validar el correcto funcionamiento del plugin XTC09 y obtener una primera impresión sobre su efectividad, se llevaron a cabo una serie de pruebas preliminares de carácter perceptivo. Para evaluar este plugin se deben realizar disintos estudios, pruebas y mediciones del nivel

de cancelación de crosstalk conseguido con este y, a su vez, poder compararlas con estudios previos sobre el funcionamiento del algoritmo en su estado offline.

4.1 Consideraciones Metodológicas

La evaluación inicial fue subjetiva. Para obtener resultados concluyentes se requieren mediciones acústicas controladas del nivel de cancelación (p. ej., relación ipsilateral/contralateral en dB en banda de 1/3 de octava), utilizando micrófonos de medición en recintos de acústica controlada, como cámaras semianecoicas o anecoicas.

No obstante, las primeras pruebas preliminares arrojan resultados aceptables y animan a realizar estas pruebas más precisas en trabajos futuros.

4.2 Entorno y Equipamiento de Prueba

Para evaluar este plugin se deben realizar distintos estudios, pruebas y mediciones del nivel de cancelación de crosstalk conseguido con este y, a su vez, poder compararlos con estudios previos sobre el funcionamiento del algoritmo en su estado.

Las pruebas se realizaron en un entorno configurado para aproximarse a condiciones de escucha ideales dentro de las limitaciones de un entorno no profesional.

Se seleccionó un ambiente abierto para evitar en la medida de lo posible las reflexiones tempranas y tardías que pudieran interferir con la percepción de la señal directa. Se aseguró, además, que el nivel de ruido de fondo fuera bajo.

El sistema consistió en una computadora personal estándar y un par de altavoces Genius SP-U115. Este modelo de altavoces fue elegido por su relativo fácil acceso en el mercado argentino representando un caso de uso común y realista.

Se utilizó el DAW (Digital Audio Workstation) Reaper en su versión 7.01 como anfitrión para el plugin VST.

4.3 Material de Audio y Configuración del Plugin

Para la evaluación se emplearon las muestras de audio ofrecidas por el 3D Audio and Applied Acoustics (3D3A) Lab de la Universidad de Princeton, en el marco de la investigación de Edgar Choueiri sobre el método de regularización de matrices. Estas muestras, disponibles públicamente en su sitio web [4] son un recurso estándar para la evaluación de sistemas de audio transaural.

La metodología de prueba consistió en comparar dos señales: La versión de audio ya procesada con los filtros XTC (denominada "BACCH" en el sitio) y la versión binaural limpia, a la cual se le aplicó en tiempo real el plugin XTC09.

Para esta última, la configuración del plugin se estableció siguiendo los parámetros propuestos por Jofre, Lizaso y Petrosino [3], buscando emular una escucha de campo cercano:

1. Distancia Altavoces-Oídos (D): 35 cm (aproximadamente un brazo semiextendido de distancia)
2. Distancia entre Altavoces (dp): 18 cm
3. Distancia entre Oídos (do): 12 cm
4. Parámetro de Regularización (β): 0.05

4.4 Resultados y Observaciones

Los resultados de la escucha subjetiva fueron positivos. Al procesar la señal binaural con el plugin XTC09 se logró obtener una sensación de binauralidad y espacialidad aceptable, distinguiendo claramente la direccionalidad del sonido emulada en la grabación original.

Por sobre todas las cosas el hallazgo más relevante fue que el resultado sonoro del audio procesado por XTC09 resultó ser muy similar al audio de referencia ya procesado ofrecido por Choueiri. Esta similitud valida que el algoritmo implementado en la función transaural_ir y su aplicación en el plugin son correctos y logran el efecto de cancelación de crosstalk deseado.

Como observación adicional surgió un problema práctico durante el procesamiento: en ciertas muestras de audio con alto nivel de RMS la salida del plugin superaba los 0 dBFS introduciendo saturación digital (*clipping*). Esto se debe a que la convolución, dependiendo de la fase de la señal y los coeficientes del filtro, puede incrementar la amplitud de la señal. Para corregirlo, se volvió necesario controlar los volúmenes, reduciendo el nivel de la pista directamente desde el control del fader en REAPER antes de que la señal llegara al bus maestro.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo dio cuenta del desarrollo de un primer plugin de audio VST funcional, capaz de implementar filtros de cancelación de crosstalk aéreo en tiempo real basados en el método de inversión matricial con regularización. Se ha validado en pruebas preliminares que el algoritmo implementado produce resultados perceptualmente muy similares a los obtenidos en la investigación de referencia, logrando una sensación de binauralidad aceptable a través de altavoces convencionales. Este desarrollo constituye un primer paso significativo para seguir investigando el método de cancelación de crosstalk y sus aplicaciones prácticas.

En su estado actual, el plugin demuestra ser una herramienta eficaz para la personalización del campo sonoro. Permite al oyente realizar ajustes finos que adapten los filtros de la matriz C a sus características antropométricas particulares (como la distancia interaural) o a pequeñas variaciones en el punto de escucha ideal. Sin embargo, es importante señalar que el sistema no está diseñado para compensar grandes variaciones en la configuración física del sistema de reproducción, como cambios sustanciales en la distancia entre los altavoces o entre el oyente y el plano de estos.

A partir de este desarrollo, se pueden abrir varias líneas de investigación y mejoras futuras para el plugin. Sería de gran interés investigar la viabilidad y las posibles estrategias algorítmicas que permitan al sistema adaptarse a cambios geométricos de mayor envergadura, aumentando así su flexibilidad y fiabilidad en entornos de escucha menos controlados.

Por otro lado, una mejora de gran valor práctico y académico sería la implementación de una funcionalidad que permita al plugin cargar respuestas al impulso (IR) personalizadas. Al dotar al VST de esta capacidad, se transformaría de una herramienta de aplicación de un método específico a una plataforma de investigación flexible. Esto permitiría a futuros investigadores estudiar y comparar de forma directa el comportamiento de otras formas de calcular la cancelación de crosstalk, aparte de la propuesta por Choueiri, utilizando el mismo entorno de procesamiento y escucha.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada en el marco de una beca Estímulo para las Vocaciones Científicas del Consejo Interuniversitario Nacional.

REFERENCIAS

[1] G. A. Lizaso y J. R. Petrosino, “Audio transaural y sistemas de cancelación de crosstalk”, en *Investigaciones sobre audio espacial y estética del arte sonoro*, Wolkowicz Editores, 2023, pp. 116–142.

[2] E. Choueiri, “Binaural audio through loudspeakers”, en *Immersive Sound*, Routledge, 2017, pp. 124–179.

[3] F. Jofré, G. A. Lizaso. y. J. R. Petrosino, “Simulación y medición de un sistema de cancelación de crosstalk por regularización de parámetros”, en *Investigaciones sobre audio espacial y estética del arte sonoro* 2022.

[4] E. Choueiri, “Jambox BACCH Demos --- 3d3a.princeton.edu”. [En línea]. Disponible en: https://3d3a.princeton.edu/jambox-bacch-demos#:-:text=bacch.

Apéndice A. CODIGO DE XTC09

A continuación, presentamos el código en lenguaje M de la clase XTC09, que fue escrito aquí dada su extensión.

Código 2. Clase XTC09.m

```
classdef XTC09 < audioPlugin


    properties
        D = 1.0;
        dp = 0.2;
        do = 0.18;
        beta = 0.01;
    end
    properties(Access = private)
        % Coeficientes como vectores fila
        cLL = zeros(1, 8192);
        cLR = zeros(1, 8192);


        zLL = zeros(8191, 1);
        zLR = zeros(8191, 1);
        zRL = zeros(8191, 1);
        zRR = zeros(8191, 1);
    end
    properties (Constant, Access = private)
        nSamplesIR = 8192;
    end
    properties (Constant)
        PluginInterface = audioPluginInterface(...
            audioPluginParameter('D', 'DisplayName', 'Distancia Altavoces-Oídos (m)', 'Mapping', {'lin', 0.1, 2}), ...
            audioPluginParameter('dp', 'DisplayName', 'Distancia entre Altavoces (m)', 'Mapping', {'lin', 0.1, 1}), ...
            audioPluginParameter('do', 'DisplayName', 'Distancia entre Oídos (m)', 'Mapping', {'lin', 0.1, 0.3}), ...
            audioPluginParameter('beta', 'DisplayName', 'Regularización β', 'Mapping', {'log', 1e-4, 1e-1}),...
            'InputChannels', 2, ...
            'OutputChannels', 2, ...
            'PluginName', 'CrosstalkConvolver' ...
            );
```

```
    end
    methods
        function plugin = XTC09()
            plugin.reset();
        end
        function out = process(plugin, in)
            left_in = in(:,1);
            right_in = in(:,2);
            [y_LL, plugin.zLL] = filter(plugin.cLL, 1, left_in, plugin.zLL);
            [y_RL, plugin.zRL] = filter(plugin.cLR, 1, right_in, plugin.zRL);
            [y_LR, plugin.zLR] = filter(plugin.cLR, 1, left_in, plugin.zLR);
            [y_RR, plugin.zRR] = filter(plugin.cLL, 1, right_in, plugin.zRR);
            outL = y_LL + y_RL;
            outR = y_LR + y_RR;
            out = [outL, outR];
        end
        function reset(plugin)
            plugin.zLL = zeros(plugin.nSamplesIR - 1, 1);
            plugin.zLR = zeros(plugin.nSamplesIR - 1, 1);
            plugin.zRL = zeros(plugin.nSamplesIR - 1, 1);
            plugin.zRR = zeros(plugin.nSamplesIR - 1, 1);
            plugin.updateCoefficients();
        end
        % Métodos set
        function set.D(plugin, val)
            plugin.D = val;
            plugin.updateCoefficients();
        end
        function set.dp(plugin, val)
            plugin.dp = val;
            plugin.updateCoefficients();
        end
        function set.do(plugin, val)
            plugin.do = val;
            plugin.updateCoefficients();
        end
        function set.beta(plugin, val)
            plugin.beta = val;
            plugin.updateCoefficients();
```

```
        end
    end
    methods (Access = private)
        function updateCoefficients(plugin)
            fs = getSampleRate(plugin);
            if fs == 0, return; end

            [cLL_temp, cLR_temp] = transaural_ir(plugin.D, plugin.dp, plugin.do,...
                plugin.beta, plugin.nSamplesIR, fs);

            plugin.cLL = cLL_temp.';
            plugin.cLR = cLR_temp.';
        end
    end
end
```

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Utilización de Librerías de Python en la Interfaz Gráfica de un Software de Medición de Niveles Sonoros

Ferreyra, S. P.[†,1]; López, J. F. [†,2]; Sepúlveda Amaro, M. E[†,3].; Yarbouh, Y.[†,4]; Mira, M. [†,5]; Cavero G.A.[†,6]; Moreno A.M.[†,7]

[†] Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Ejecutora UTN-CONICET, Córdoba, Argentina.

[1] sferreyra@frc.utn.edu.ar, [2] facundolo01@gmail.com, [3] sepulvedamartinmt@gmail.com, [4] yamiliyarbouh@gmail.com, [5] manuelsalortmira@gmail.com, [6] gacravero@gmail.com, [7] anamariamoreno88@gmail.com

Resumen El desarrollo de software dedicado a mediciones acústicas ha evolucionado significativamente en los últimos años debido al vertiginoso avance de la ciencia y la tecnología. La necesidad de nuevas aplicaciones que permitan realizar mediciones acústicas confiables de manera simple y automática es transversal a diversas actividades del medio socio productivo como también del científico y educativo. En este trabajo se presentan algoritmos implementados con Python utilizado nuevas librerías para el desarrollo de la interfaz gráfica de un Sistema Automático de Medición de Niveles Sonoros (SAMNS) el cual fue inicialmente desarrollado con Matlab. Se analizan ventajas y desventajas de diferentes librerías y se presentan algoritmos específicos de la interfaz gráfica con el usuario del SAMNS.

Palabras clave: mediciones acústicas, interfaz gráfica, librerías, Python.

Abstract The development of software dedicated to acoustic measurements has evolved significantly in recent years due to the rapid advances in science and technology. The need for new applications that enable reliable acoustic measurements in a simple and automatic manner is transversal to various activities in the socio-productive, scientific, and educational fields. This paper presents algorithms implemented in Python using new libraries for the development of the graphical interface of an Automatic Sound Level Measurement System (SAMNS), initially developed with Matlab. The advantages and disadvantages of different libraries are analyzed, and specific algorithms for the SAMNS graphical user interface are presented.

Key words: acoustic measurements, graphical interface, libraries, Python.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de software dedicado a mediciones acústicas ha evolucionado significativamente en los últimos años debido al vertiginoso avance de la ciencia y la tecnología. La necesidad de nuevas aplicaciones que permitan realizar mediciones acústicas confiables de manera simple y automática es transversal a diversas actividades del medio socio productivo como también del científico y educativo. Actualmente, existen desarrollos tecnológicos de empresas especializadas en acústica como de instituciones del ámbito académico para realizar mediciones acústicas básicas y avanzadas utilizando *hardware* y *software* específico con diferentes funciones para el análisis de señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia. En este trabajo se presentan algoritmos implementados con Python utilizado nuevas librerías para el desarrollo de la interfaz gráfica de un Sistema Automático de Medición de Niveles Sonoros (SAMNS) el cual fue inicialmente desarrollado con Matlab en el marco de las actividades de investigación, desarrollo e innovación tecnológica que los autores realizan en el Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Ejecutora de doble dependencia UTN-CONICET [1]-[4]. Además se analizan ventajas y desventajas de diferentes librerías y se presentan algoritmos específicos desarrollados para el procesamiento digital de señales para la medición de niveles sonoros. El *software* se encuentra en constante desarrollo y modificación, el cual debido a su estructura modular permite escalabilidad y rápida actualización. Actualmente se ejecuta en una PC (*Personal Computer*), con sistema operativo de 64 bits y requiere una tarjeta de adquisición/reproducción de sonido estándar a la que se conecta a un micrófono de medición.

2. SAMNS

2.1 Arquitectura de software

El Modelo Vista Controlador (MVC) es un patrón de arquitectura de *software* que separa en tres capas la funcionalidad de una aplicación. En la Figura 1 se muestra un esquema que especifica la interacción entre las capas. El *modelo* se encarga del almacenamiento y procesamiento de los datos, el *controlador* gestiona las órdenes del usuario y se encarga de solicitar los datos al modelo y proporcionarlos a la vista. La *vista* gestiona la representación visual de la información (interfaz gráfica) y es el medio por a través del cual se relaciona el usuario [5].

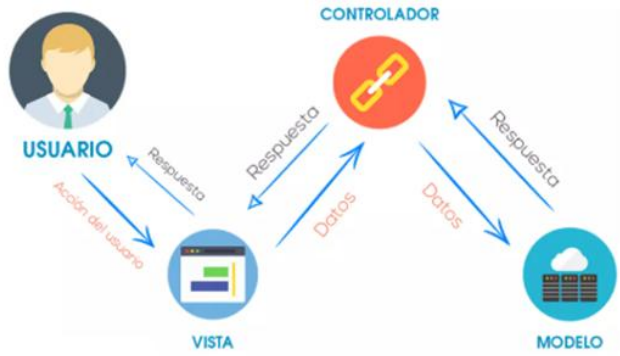


Figura 1: Esquema del patrón de arquitectura de software MVC.

Este esquema permite realizar actualizaciones y modificaciones sin afectar otra parte del código y fundamentalmente el modelo se encuentra completamente separado de la interfaz de usuario y no tiene conocimiento de la vista, ni del controlador por lo tanto no posee ninguna referencia a estos. Es importante la independencia en los códigos ya que se puede reemplazar el modelo, la vista o el controlador, lo cual permite que cada elemento del programa pueda ser diseñado por separado [6]. El programa agrupa *funciones* y *clases* que permiten realizar cálculos, procesamiento de señales y manejo del hardware las cuales se agrupan en *módulos básicos*. Las funciones y clases que dan lugar a diferentes aplicaciones avanzadas se agrupan en *módulos específicos*.

2.2 Principales algoritmos utilizados en la lógica y el procesamiento digital de datos

En el SAMNS se implementan un conjunto de algoritmos de procesamiento de datos diseñados para la adquisición y análisis de señales acústicas en tiempo real, como también la calibración del sistema. La adquisición digital se realiza a través de una interfaz de audio estándar gestionada por controladores y las librerías PyAudio y Sounddevice. Los datos posteriormente son procesados en ventanas sucesivas con el fin de obtener valores instantáneos y estadísticos del nivel sonoro.

El cálculo del nivel sonoro se lleva a cabo mediante la determinación del valor eficaz ó RMS (*Root Mean Square*) y la posterior conversión a niveles de presión sonora (L_p) expresados en decibeles (dB) ó niveles normalizados a fondo de escala expresados en dBFS, según selección del usuario. Los filtros de ponderación frecuencial A, C y Z, son implementados mediante la aplicación directa de las funciones de transferencia normalizadas según IEC 61672-1:2002 [5] en el dominio frecuencial, utilizando FFT (*Fast Fourier Transform*) mediante el algoritmo de Cooley-Tukey [7].

Para el análisis espectral el sistema utiliza la FFT permitiendo ajustar la resolución de los coeficientes espectrales modificando la frecuencia de muestreo y el número de muestras. Asimismo, se implementan filtros normalizados por banda de octava y tercio de octava según IEC 61260-1:2014 [8] para la evaluación de la distribución espectral de la energía sonora en bandas angostas de frecuencia.

El procedimiento de calibración relativa a fondo de escala se basa en la generación de una señal sinusoidal de 1 kHz, aplicado por etapas de amplitud creciente de manera automática. Para cada nivel se calcula la THD (*Total Harmonic Distortion*) de la señal capturada; la referencia 0 dBFS se fija en el último nivel cuya distorsión armónica permanece por debajo un umbral prefijado. Además, se implementan otros dos algoritmos complementarios de calibración llamados calibración con fuente de referencia interna y externa.

El procedimiento para la calibración con fuente de referencia interna se basa en utilizar un archivo de referencia calibrado ingresado por el usuario y determinar el nivel medido a partir del valor eficaz ó RMS de la señal y su correspondiente nivel de presión sonora $L_{p\ med} = 20\ \log_{10}(x_{RMS}/20\ \mu Pa)$. Dado el valor de referencia ingresado por el usuario L_{ref} , se determina el offset del nivel calibración a partir de la diferencia de los niveles ($OffsetL_{Cal} = L_{ref} - L_{p,\ med}$).

La calibración con fuente de referencia externa se realiza empleando una señal sinusoidal de 1 kHz, ruido blanco o ruido rosa generado por el sistema y capturada por el micrófono de medición del mismo. El nivel sonoro medido por el sistema se compara con el valor medido, en idéntica posición del campo sonoro, por un medidor de nivel de presión sonora calibrado, para que el usuario ingrese el valor de desvío correspondiente con el cual el sistema ajusta el *offset* de calibración correspondiente. También es posible realizar de manera análoga esta calibración conectando un calibrador acústico normalizado el cual produce un nivel de presión sonora de referencia habitualmente de 94 dB para una señal sinusoidal de 1 kHz, en el micrófono de medición del sistema.

2.2.1 Filtros de ponderación temporal

El sistema implementa filtros de ponderación temporal que se aplican a la señal para simular la forma en que el sistema auditivo humano responde a variaciones rápidas o lentas del sonido. Dichos filtros normalizados por IEC 61672-1 [6] se denominan pico (pk: *Peak*), impulsivo (I: *Impulsive*), rápido (F: *Fast*) y lento (S: *Slow*). La ponderación temporal se realiza aplicando algoritmos de funciones de promediado exponencial con diferente tiempo de ataque y decaimiento a la señal medida. Para este procesamiento se utilizan librerías científicas de Python *Numpy* para operaciones vectorizadas y cálculo eficiente de la envolvente y funciones personalizadas para la aplicación de las ponderaciones temporales.

Para cada bloque de datos de la señal se calculan niveles instantáneos aplicando las ponderaciones temporales pk, I, F y S. Los resultados se almacenan en vectores históricos para su representación en el dominio del tiempo y posterior cálculo de niveles estadísticos. En el fragmento de Código 1 se muestra la función que implementa el filtro de ponderación temporal lento (S) mediante la integración exponencial, parametrizada por la señal de audio en el dominio temporal (x), la frecuencia de muestreo (fs), el estado inicial de la envolvente desde el bloque anterior (*gainSlow*) y la envolvente de referencia (env). De manera equivalente operan las funciones para los demás filtros temporales.

Código 1. Filtro de ponderación temporal lento S.

```
def filEnvSlow(x, fs, gainSlow, env):
    ATT = 1.0 # Constante de tiempo de ataque. Si es S = 1.0; Si es F = 0.125; Si es I = 0.035.
    RLS = 1.0 # Constante de tiempo de decaimiento. Si es S = 1.0; Si es F = 0.125; Si es I = 1.5.
    T = 1/fs;    # Periodo de muestreo T.
    consAT = 1-2.7182**(-1*T/ATT)
    consRL = 1-2.7182**(-1*T/RLS)
    gain = np.zeros(len(x)) # Vector de ganancias inicia en un vector de ceros
    gain[0] = gainSlow                    # Última ganancia del último bloque procesado.
                                                                                    #    Si
es el primer bloque de la captura entonces es 0.
    for i in range(1, len(x)):
        if np.absolute(x[i-1]) == env[i-1]:
            gain[i] = gain[i-1]*(1-consRL)
        else:
            if np.absolute(x[i-1]) > env[i-1]:
                gain[i] = gain[i-1]*(1-consAT) + np.absolute(x[i])
            else:
                gain[i] = gain[i-1]*(1-consRL)
    x = gain*consAT
    gainUlt = gain[-1]
    return (x, gainUlt)
```

2.2.2 Filtros de ponderación frecuencial

Se implementaron filtros normalizados de ponderación frecuencial A, C y Z [6]. Estos filtros permiten aproximar la sensibilidad del oído humano a diferentes frecuencias y se aplican directamente sobre la señal en el dominio de la frecuencia y su posterior transformación al dominio temporal. La implementación se realizó utilizando las librerías estándar Numpy para operaciones numéricas y scipy.fftpack para la transformada rápida de Fourier directa e inversa (FFT/IFFT). El procedimiento seguido fue el siguiente: transformar la señal original al dominio de la frecuencia mediante la FFT, realizar el filtrado en el dominio de la frecuencia mediante el producto de la función de transferencia correspondiente y el vector datos de la señal y reconstruir la señal filtrada en el dominio del tiempo mediante la IFFT.

El fragmento de Código 2 muestra la implementación del filtro de ponderación frecuencial A en el dominio de la frecuencia. Se calculan los coeficientes normalizados a partir de los polos definidos por la norma IEC, y se aplica el filtrado mediante la multiplicación en dicho dominio. De manera equivalente, se dispone de una función para el filtro de ponderación C, mientras que el filtro Z no presenta variaciones espectrales en su función de transferencia.

Código 2. Filtro de ponderación frecuencial A.

```
def filtA(x, fs):
    xlen = len(x)
    NumUniquePts = ceil((xlen+1)/2)
    X = np.array(fft(x)[1:NumUniquePts])        # FFT y mitad positiva
    f = np.array(range(0, NumUniquePts-1)) * fs / xlen

    # Coeficientes IEC 61672-1:2002
    c1, c2 = 12194.217**2, 20.598997**2
    c3, c4 = 107.65265**2, 737.86223**2

    f2 = f**2
    num = c1 * (f2**2)
    den = (f2 + c2) * np.sqrt((f2 + c3)*(f2 + c4)) * (f2 + c1)
    A = 1.2589 * num / den

    XA = X * A                                                    # Filtrado espectral
    XA = np.append(XA, np.conj(XA[::-1]))      # Espectro completo
    return np.real(ifft(XA))
```

2.2.3 Niveles sonoros

El sistema implementa algoritmos de cálculo de niveles sonoros en tiempo real, tanto instantáneos como estadísticos. Para el procesamiento se emplean las siguientes librerías científicas de Python y funciones desarrolladas para tareas específicas:

- NumPy: para operaciones vectorizadas y estadísticas.
- SciPy: para el análisis espectral mediante transformada rápida de Fourier.
- PyAudio: para la adquisición continua de audio desde el micrófono.
- Funciones de filtrado de ponderación temporal y frecuencial
- Funciones de niveles instantáneos y estadísticos

Para cada bloque de datos adquirido de la señal, el sistema calcula niveles instantáneos aplicando filtros de ponderación frecuencial A, C, Z y de ponderación temporal pico (pk), impulsivo (I), rápido (F) y lento (S). Los niveles sonoros calculados se almacenan en vectores históricos para generar su representación temporal y el cálculo posterior de niveles estadísticos L_{eq}, L_{01}, L_{10}, L_{50}, L_{90} y L_{99}. En el fragmento de Código 3 se observa cómo se actualizan los valores instantáneo, mínimo y máximo para el filtro de ponderación frecuencial A, existiendo funciones equivalentes para los filtros de ponderación frecuencial C y Z.

Código 3. Actualización de valores instantáneo, mínimo y máximo del Lp con filtro A.

```
def setNivelesA(self, recorderPicoA=0, recorderInstA=0,
            recorderFastA=0, recorderSlowA=0, mode='a'):
    if mode == 'a':
        self.recorderPicoA = np.append(self.recorderPicoA,
            self.aplicar_calibracion_spl(recorderPicoA))
        new_inst_val = self.aplicar_calibracion_spl(recorderInstA)
        self.recorderInstA = np.append(self.recorderInstA, new_inst_val)
        self.recorderInstA_min = np.append(self.recorderInstA_min,
                                    np.min(self.recorderInstA))
        self.recorderInstA_max = np.append(self.recorderInstA_max,
                                    np.max(self.recorderInstA))
```

2.3 Principales algoritmos utilizados en la interfaz gráfica con el usuario

La interfaz gráfica de usuario del SAMNS se construyó principalmente mediante las librerías PyQt5 y PyQtGraph, donde la visualización se gestiona mediante un GraphicsLayoutWidget que contiene los diferentes gráficos de cada dominio. La interfaz gestiona tres modos de visualización: dominio temporal, dominio de frecuencia y niveles sonoros, permitiendo la selección mediante botones al usuario. Cada modo implementa algoritmos específicos optimizados para representar las características particulares de los datos acústicos.

La actualización de los datos que se representan gráficamente se gestiona mediante un objeto QtCore.QTimer en el controlador, que periódicamente llama al método *update_plot*, que refresca continuamente las curvas a partir de la información procesada en el modelo y el modo de visualización seleccionado. Una ventaja de PyQtGraph es la posibilidad de editar el gráfico, modificando escalas, límites, colores y títulos de ejes. Estas opciones son además parametrizables desde una pantalla de configuración dedicada, lo que permite al usuario ajustar la visualización según las necesidades del análisis.

2.3.1 Representación en el dominio del tiempo

La representación en el dominio del tiempo permite observar la forma de onda en tiempo real con una ventana deslizante optimizada como se observa en la Figura 2. Para mejorar la legibilidad, se implementó un eje X personalizado (*TimeAxisItem*) que muestra el tiempo con una resolución de centésimas de segundo. El rango vertical se fija entre 1 y -1 para señales normalizadas, mientras que el rango horizontal se ajusta automáticamente basándose en los tiempos de captura proporcionando una representación temporal adecuada según la evolución temporal de la señal.

El gráfico en el dominio del tiempo se actualiza mediante la constante actualización del objeto de ploteo *plot_line*, a la cual no solo se le definió los valores a plotear sino también las características visuales del gráfico, como color y tipo de línea.

Código 4. Configuración del eje temporal.

```
class TimeAxisItem(pg.AxisItem):
    def tickStrings(self, values, scale, spacing):
        # Formatea los valores del eje X para mostrar segundos
        strings = []
        for val in values:
            # Formatea el valor como segundos con 2 decimales
            strings.append(f"{val:.2f}")
        return strings
```

Código 5. Actualización de gráfico en tiempo real.

```
self.plot_line = self.waveform1.plot([], [], pen=pen)
self.plot_line.setData(xdata, ydata)
self.waveform1.setXRange(xdata[0], xdata[-1])
self.waveform1.setYRange(-1, 1)
```

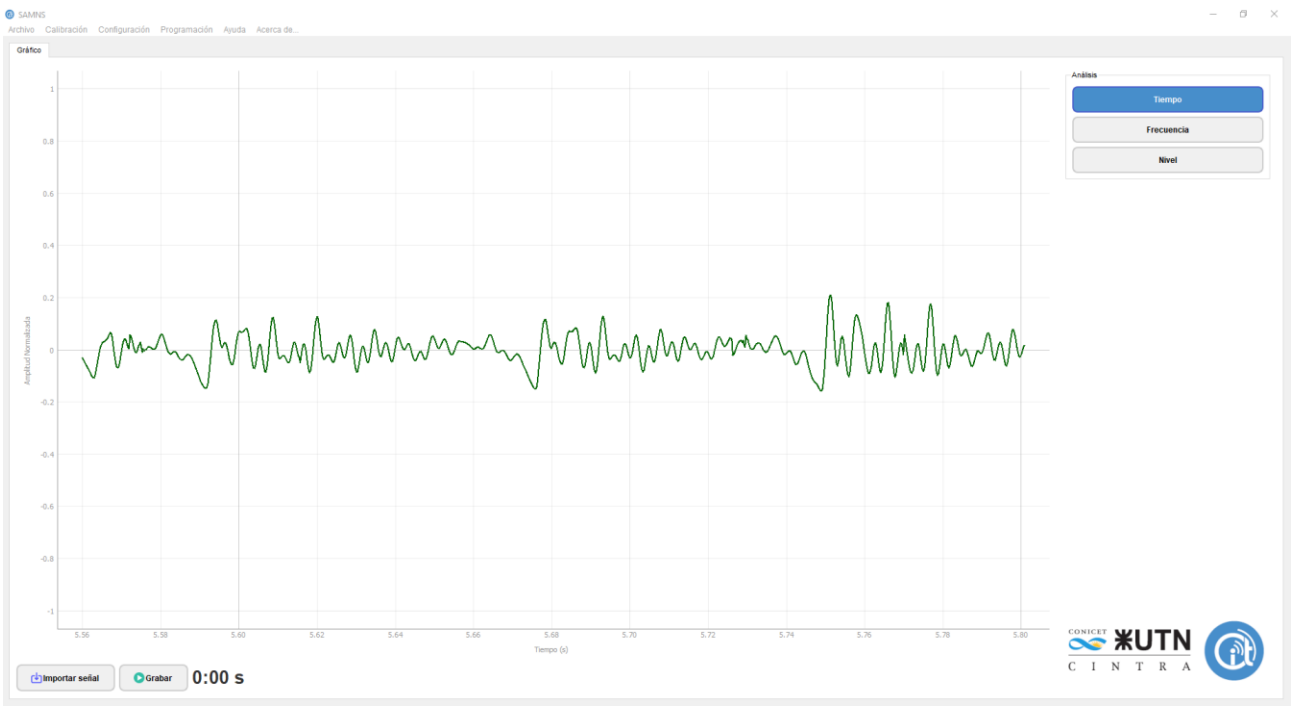


Figura 2: Representación de la señal en el dominio del tiempo.

2.3.2 Representación en el dominio de la frecuencia

La representación gráfica de las señales acústicas en el dominio de la frecuencia se realiza a través de dos métodos de análisis complementarios:

- Análisis de Fourier (mediante FFT con representación mediante gráfico de línea).
- Análisis de frecuencia por bandas de octavas o tercios de octavas normalizadas (mediante FFT con representación mediante gráfico de barra).

Para ambos tipos de análisis es posible seleccionar filtros de ponderación frecuencial A, C y Z que se utilizan para el procesamiento de los datos mediante *QRadioButtons* la derecha del gráfico.

El análisis de Fourier se limita por defecto para el espectro de frecuencia audibles de 20 Hz a 20 000 Hz, configurable por el usuario y se grafica en escala logarítmica.

Para el análisis por bandas angostas, el algoritmo solicita al modelo el cálculo de filtros normalizados de octava o tercios de octavas (*calcular_octavas(), calcular_tercios_octava()*) que agruparán los componentes espectrales obtenidas por FFT según corresponda. En la vista se generan barras individuales usando *PlotDataItem*, construyendo polígonos cerrados desde un piso de ruido fijo de -120 dB hasta el nivel medio en cada banda. Opcionalmente, se superponen etiquetas de texto indicando el valor numérico exacto de cada banda, mejorando así la cuantificación visual. El eje x se gestiona con la clase personalizada *FrequencyAxisItem*, que permite etiquetar las frecuencias centrales, expresadas en Hz y kHz, de cada una de las bandas de frecuencia para facilitar la interpretación.

Código 6. Eje de frecuencia para bandas de octava

```
class FrequencyAxisItem(pg.AxisItem):
    def tickStrings(self, values, scale, spacing):
        strings = []
        for v in values:
            idx = int(round(v))
            if 0 <= idx < len(self.bandas):
                freq = self.bandas[idx]
                if freq >= 1000:
                    strings.append(f'{int(freq/1000)}k')
                else:
                    strings.append(f'{int(freq)}')
            else:
                strings.append('')
        return strings
```

El nivel sonoro espectral correspondiente a cada banda angosta se presenta numéricamente en la parte superior de la misma permitiendo una comparación directa al usuario.

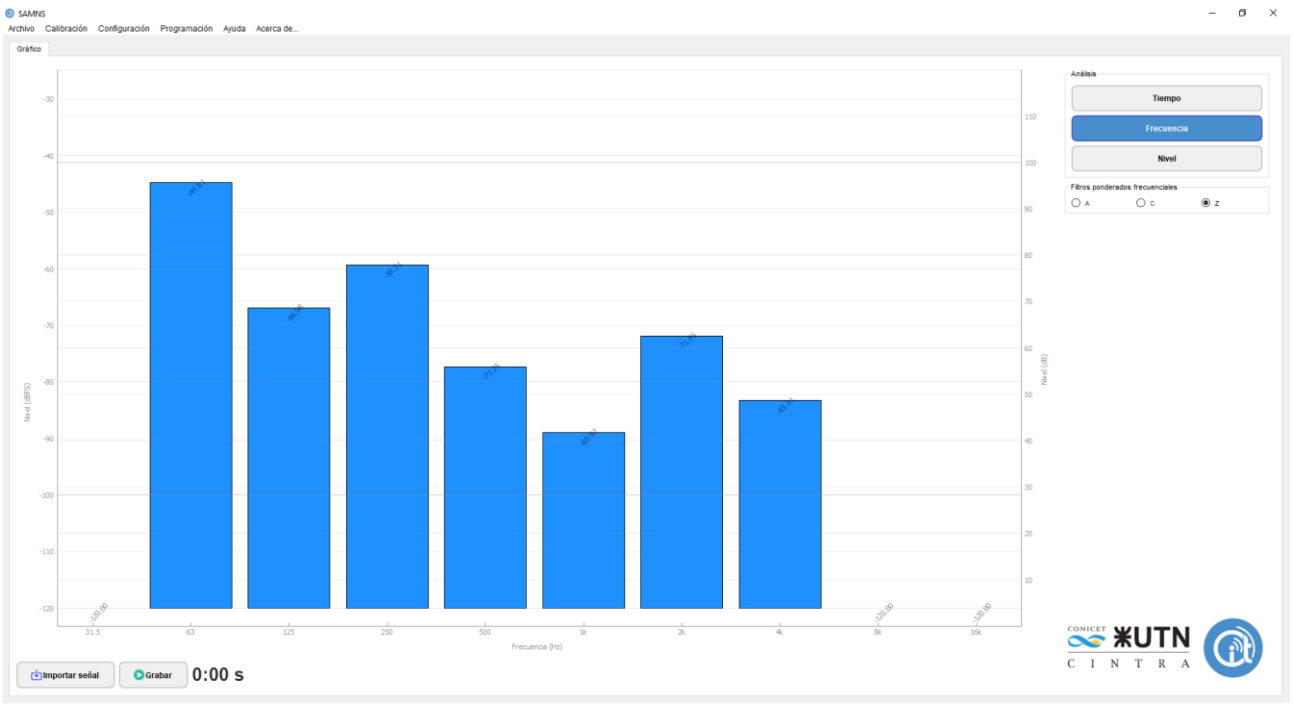


Figura 3: Representación en el dominio de la frecuencia con análisis de bandas de octavas.

2.3.3 Representación de niveles instantáneos y estadísticos

El algoritmo de visualización de niveles implementa renderizado simultáneo de múltiples descriptores acústicos organizados jerárquicamente por ponderación frecuencial (Z, C, A) y ponderación temporal (Pico, Impulsivo, Rápido, Lento) como se puede ver en la Figura 4.

Cada una de estas ponderaciones es controlada mediante QCheckBox que se encuentran en el costado derecho de la pantalla, así el usuario tiene completo control de selección, permitiendo comparación flexible entre diferentes descriptores del nivel.

La codificación visual utiliza color para diferenciar ponderaciones (rojo=Z, verde=C, azul=A) y estilo/grosor de línea para distinguir constantes temporales (3px sólida para Slow, 2px con variaciones de estilo para Fast/Inst/Pico).

El eje x utiliza la misma clase personalizada que se utiliza en el dominio del tiempo *TimeAxisItem.* El sistema mantiene una ventana deslizante de 100 segundos (*max(0, xdata[-1]-100) a xdata[-1]*) que se actualiza automáticamente, permitiendo seguimiento continuo de la evolución de todos los descriptores simultáneamente sin sobrecarga visual.

Código 6. Niveles sonoros con filtro Z

```
self.ptNivZSlow = self.waveform1.plot(pen='k', width=3)
self.ptNivZFast = self.waveform1.plot(pen='g', width=3)
self.ptNivZImp = self.waveform1.plot(pen='b', width=3)
self.ptNivZPico = self.waveform1.plot(pen='r', width=3)
```

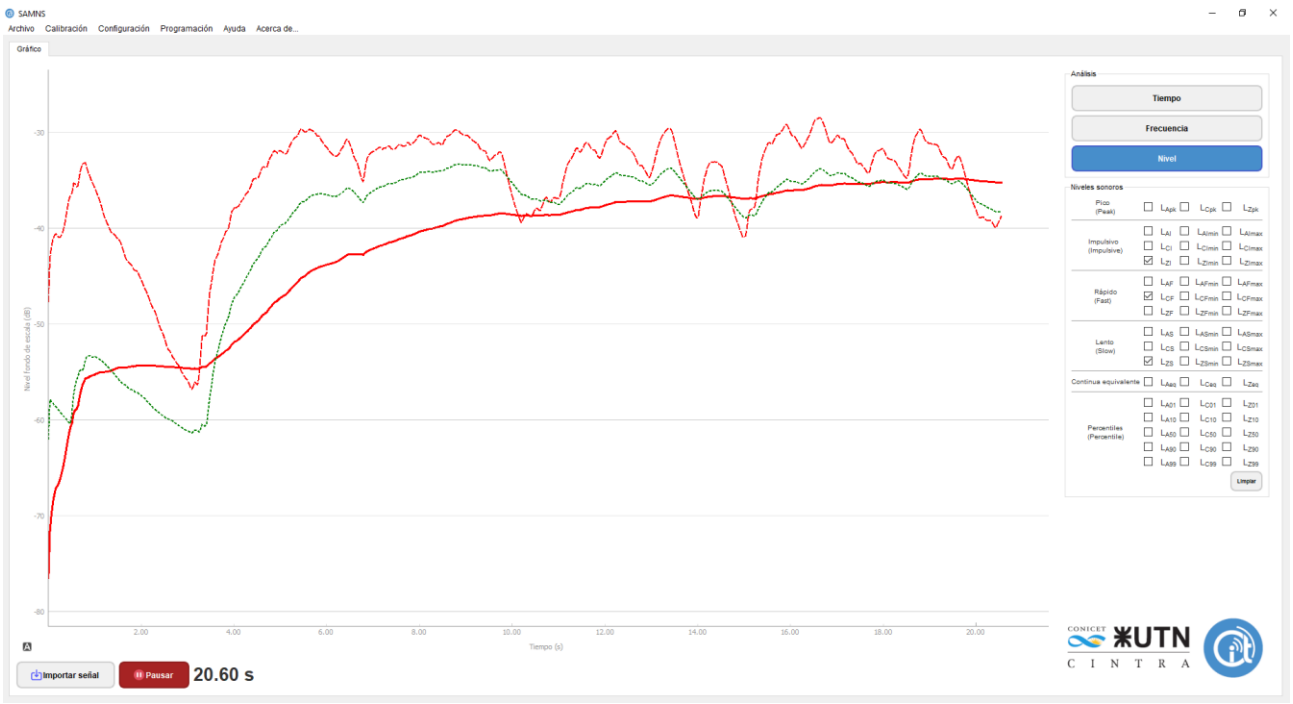


Figura 4: Representación de niveles sonoros instantáneos y estadísticos en el dominio del tiempo.

3. CONCLUSIONES

Se desarrolló una aplicación modular, automática y escalable, utilizando librerías “open source” que se puede ejecutar en hardware de propósito general, aplicable en actividades de investigación, desarrollo, ingeniería, industriales, educativas y de salud.

La utilización de librerías de Python para la adquisición y procesamiento de señales como SciPy, PyAudio, NumPy y Sounddevice permitió desarrollar una lógica de altas prestaciones, multiplataforma, con disponibilidad de licencias y pocas restricciones de uso, permitiendo que la solución sea accesible.

El desarrollo de la interfaz gráfica realizada evidencia que la combinación de librerías como PyQt5, PyQtChart y PyQtGraph constituye una solución altamente eficiente, flexible y escalable frente a otras librerías gráficas alternativas como la clásica librería Tkinter o frameworks como Kivy o BeeWare. PyQt5 ofrece un entorno robusto y multiplataforma que facilita la integración de interfaces gráficas complejas con un elevado grado de personalización. PyQtChart, por su parte, aporta una representación clara e intuitiva de datos. Finalmente, PyQtGraph se destaca por su capacidad de visualización de información en tiempo real con un rendimiento eficiente para grandes volúmenes de datos, superando las limitaciones de librerías más genéricas como matplotlib.

La utilización de las librerías PyQt5, PyQtChart y PyQtGraph resulta significativa no solo por su ventajas en entornos de escritorio, sino también por su capacidad de adaptación para dispositivos móviles. La portabilidad inherente de Python, junto con la flexibilidad del framework Qt, permite generar aplicaciones multiplataforma que mantienen coherencia visual, estabilidad y alto rendimiento en distintos sistemas operativos móviles. El trabajo realizado evidencia que la elección del mencionado ecosistema gráfico no solo optimizó el desarrollo y mantenimiento del software, sino que también garantiza la escalabilidad del mismo.

4. AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional por el soporte brindado durante la gestión y ejecución de los Proyectos de Investigación y Desarrollo PIDs UTN N°: 4081, 7838, 516. A los miembros del Centro de Investigación y Transferencia en Acústica, Unidad Ejecutora de doble dependencia UTN-CONICET.

REFERENCIAS

[1] Ferreyra S.P, Moreno A.M., Morales J. I., Tommasini F.C., Budde L., Novillo D., Cravero G.A, Longoni H.C., López F. *SAMSoft: acoustical devices automatic measurement system software.* Journal of Proceedings of Meeting on Acoustics. Vol 28, Issue 1, 0015024, pp1-5, Acoustical Society of America. ISSN 1939-800X. DOI: 10.1121/2.0000776. View on line: http://dx.doi.org/10.1121/2.0000776, 2018

[2] Ferreyra S.P., López J.F., Cravero G.A. y Moreno A.M. Diseño e implementación de Sistema Automático de Medición de Respuesta Impulsiva, SAMRI en Conferencia Latinoamericana de Audio, AES LAC 2022. Buenos Aires, Argentina. 21 al 24 de Septiembre de 2022.

[3] Simes J.Y., Ferreyra S.P., Moreno A.M., López J.F., Morales J.I., Rametta J., Cravero G.A., Longoni H.C., Análisis de latencia de controladores de audio para aplicaciones de metrología acústica. *Mecánica Computacional, Vol 35, 2, 79-90.* Editorial: Asociación Argentina de Mecánica Computacional. ISSN: 1666-6070. ISSN electrónico: 2591-3522, 2017.
Publicación on line: https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/5239

[4] Moreno A.M., Ferreyra S.P., Morales J,I., Lopez J.F., Simes J,Y., Gelerstein Moreyra S.I., Cravero G.A., Tommasini F. C., Longoni H.C., Gilberto L.G., *Proceso computacional para la obtención de descriptores de la directividad de transductores electroacústicos. Mecánica Computacional,* Vol 34, 7, 393-409. Editorial: Asociación Argentina de Mecánica Computacional. ISSN: 1666-6070. ISSN electrónico: 2591-3522, 2016

[5] Buschmann, F., Henney, K., & Schimdt, D. *Pattern-oriented Software Architecture: On Patterns and Pattern Language*. Volumen 5. John Wiley& Sons, West Sussex, England, 2007.

[6] IEC 61672-1:2002. Electroacoustics. Sound level meters - Part 1: Specifications.

[7] Li, F. and Cox, T. *Digital signal processing in audio and acoustical engineering.* CRC Press. Taylor & Francis Group, 2019.

[8] IEC 61260-1:2014. *Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specification.*

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

La mirada fotográfica en los ojos de Pablo. La escucha en los oídos de todos y todas.

Lutowicz, Analía. [‡,1]**; Cardoso, Ana.** [†,2]

‡ CEPSA, Departamento de Humanidades y Artes, Universidad Nacional de Lanús, Buenos Aires

† IJDH "Luis Eduardo Duhalde", Universidad Nacional de Lanús, Buenos Aires

[1] analutowicz@gmail.com, [2] animaginaria@email.com

Resumen. El presente trabajo se inscribe en el análisis de las violencias institucionales en el marco del sistema democrático, y en su articulación con las prácticas artísticas concebidas como expresiones de acción política con anclaje territorial. Dichas prácticas intervienen en la disputa por el espacio público, con el objetivo de visibilizar los conflictos que atraviesan los procesos de construcción de memorias sociales, cuyas narrativas no siempre responden a matrices hegemónicas. Desde todas las corrientes conceptuales en torno al artivismo se reconoce la revitalización que el arte aporta a la práctica política, en función de su capacidad transformadora y de comunicar con impacto en un contexto donde prima el desinterés y la desconfianza hacia las instituciones políticas.

Esta propuesta surge a partir de los hechos ocurridos el 12 de marzo de 2025, cuando el fotoperiodista Pablo Grillo resultó herido por el impacto de un cartucho de gas lacrimógeno disparado por la Gendarmería. El hecho tuvo lugar durante una jornada de protesta contra el ajuste en las jubilaciones, mientras Grillo documentaba la represión en las inmediaciones del Congreso de la Nación. Estos acontecimientos, lejos de ser aislados, son cada vez más frecuentes en el marco de la protesta social, y constituyen el punto de partida de esta intervención en la Universidad, orientada a generar un espacio de diálogo y problematización en torno al uso de discursos de odio y a las prácticas que avasallan tanto el derecho a la protesta como el ejercicio del registro y la difusión del accionar de las fuerzas de seguridad.

Palabras clave: violencias institucionales, artivismo, fotografía, paisaje sonoro, derechos humanos

Abstract This work is part of the analysis of institutional violence within the framework of the democratic system, and its connection with artistic practices conceived as expressions of territorially anchored political action. These practices intervene in the dispute over public space, with the aim of making visible the conflicts that permeate the processes of constructing social memories, whose narratives do not always respond to hegemonic matrices. All conceptual currents surrounding artivism recognize the revitalization that art brings to political practice, based on its transformative capacity and ability to communicate impactfully in a context where disinterest and distrust of political institutions prevail.

This proposal arises from the events that occurred on March 12, 2025, when photojournalist Pablo Grillo was injured by the impact of a tear gas canister fired by the Gendarmerie. The incident occurred during a day of protests against pension cuts, while Grillo was documenting the repression near the National Congress. These events, far from being isolated, are becoming more frequent within the context of social protests and constitute the starting point for this intervention at the University, aimed at generating a space for dialogue and problematizing the use of hate speech and practices that violate both the right to protest and the right to record and disseminate the actions of security forces.

Palabras clave: institutional violence, artivism, photography, soundscape, human rights.

1. Introducción

En este trabajo nos proponemos presentar el relato y las reflexiones surgidas a partir de la propuesta de una acción artística llevada adelante por el equipo de investigación conformado por las autoras, en el marco de un proyecto que indaga acerca de las diferentes manifestaciones del artivismo que acompañan y plasman las memorias sociales contra las violencias institucionales en el Conurbano Sur. Entendiendo que nuestro objeto de estudio son las prácticas político-artísticas que construyen diferentes narrativas sobre las violencias institucionales en democracia, y en un contexto social de avance de los discursos de odio y negacionismos, uno de los objetivos de esta investigación es contraponer una narrativa con enfoque en Derechos Humanos produciendo intervenciones en espacios públicos físicos y digitales desde nuestra Universidad.

Así, en este artículo nos proponemos relatar las implicancias y observaciones que resultan de la experiencia sensorial inmersiva de la instalación denominada “Cabina de Enfoque”, poniendo de manifiesto el vínculo entre las narrativas de las memorias sociales con la acción artística que sitúa en contacto directo al visitante con fotografías y paisajes sonoros del día en que el fotógrafo e integrante de nuestra comunidad universitaria, Pablo Grillo fue agredido por personal policial de la gendarmería nacional durante la represión en la manifestación de jubilados y jubiladas el pasado 12 de marzo.

Al momento de redactar este trabajo, la instalación se encuentra en proceso de producción, a los fines de presentarla en el mes de octubre, en el marco de La Semana de las Humanidades y las Artes. De modo que daremos cuenta de estas instancias de desarrollo de producción y su correspondiente marco teórico con el objetivo de aportar una mirada sobre las prácticas artístico-políticas. Para ello, iniciaremos el recorrido planteando algunos conceptos en torno a la noción de artivismo, desde una perspectiva histórica focalizando en los antecedentes nacionales en torno a estas prácticas; para luego profundizar en los conceptos centrales que guían el desarrollo de esta intervención.

2. Del arte callejero al artivismo

El arte callejero puede entenderse como una noción estética en torno a la disputa del espacio urbano social, con antecedentes históricos como los muralistas mexicanos, los esténciles de Siqueiros o el siluetazo de 1983, en tanto acciones estético-políticas que articulan formas artísticas plásticas con las demandas sociales contemporáneas. También podemos recordar los cruces entre vanguardia y radicalización militante como la cronología de 1968 que se inicia con las Experiencias ´68 del Instituto Di Tella y que culmina con la realización colectiva de Tucumán Arde [1].

Si bien el activismo artístico se mantiene siempre vigente a lo largo de nuestra historia, toma especial relevancia con características propias en coyunturas recientes dadas por dos hechos que marcan las particularidades que adopta el movimiento activista en la región: por un lado, las leyes de impunidad e indultos a finales de la década del ´80 y durante el período neoliberal de los ´90, que marcan el surgimiento de agrupaciones como HIJOS adoptando métodos de intervención urbana como el escrache acompañado de colectivos artísticos como el GAC y Etcétera. Y por el otro, el estallido social seguido de la crisis institucional de diciembre de 2001, signada por el cambio de milenio y la emergencia de nuevos actores sociales como el movimiento piquetero, los trabajadores de fábricas recuperadas y las asambleas populares [2]. Más allá de estos hitos, también podríamos nombrar recientemente los colectivos de arte callejero que impulsaron todo tipo de intervenciones a lo largo del país luego de la segunda desaparición de Julio López en 2016. Podemos recordar desde los espejos que inundaban la Ciudad de Buenos Aires con la figura de López y la leyenda de “mirá quién falta”, hasta los sellos en los vinos de la bodega López que recorrían las góndolas y casas [2].

Las prácticas de activismo artístico adoptan una gran diversidad de formatos; algunos presentan características más convencionales como la señalización de proximidad de los ex Centros Clandestinos de Detención, Tortura y Exterminio que realizaba el GAC o la intervención de carteles de tránsito con la silueta de Jorge Julio López, como se mencionó anteriormente. Otros, experimentan con las artes performáticas y sonoras como es el caso de las acciones del colectivo MAT (Mujeres de Arte Tomar)

interviniendo el Paro Internacional de Mujeres o la puesta sonora “Presentes” durante la manifestación a 40 años del último golpe cívico-eclesiástico-militar. En todos los casos, su artisticidad se extiende más allá de la convención normalizante, amalgamando una búsqueda expresiva e ideológica.

De forma simultánea y con la explosión transcultural que trae aparejada la globalización, se configura un concepto que adquiere la particularidad de sintetizar el accionar político a través del arte: el artivismo. Este lenguaje definido por autores tales como Abarca [3] o Expósito [4] como múltiple y generativo, efímero y práctico, fue adoptado por los movimientos políticos emergentes en los contextos mencionados, y es usado para ocupar el espacio público como territorio a conquistar y poner de manifiesto la arbitrariedad y materialidad que el sistema otorga a estas demarcaciones físicas devolviéndoles su estado natural; a la vez que se presenta como un arte hacia el afuera, lejos de la institucionalidad que el modelo museístico reserva a estas expresiones, para generar un proceso informativo en la vida social [5].

Así, la noción de artivismo se produce asociado las prácticas artísticas callejeras de diversa índole al activismo social como forma de empujar una agenda política desde el arte. Transitando los barrios y la ciudad podemos ver las marcas territoriales que las expresiones artísticas de diferentes individualidades y colectivos utilizan para denunciar las injusticias y desigualdades sociales. Pero acá cabe preguntarnos cuál es ese espacio público, ya que no podemos dejar de remarcar que el concepto de público actualmente enmarca, necesariamente, al espacio cibernético. Desde la popularización de internet en la era del acceso durante los últimos años de la década del ´90, pasando por la etapa de la Web 2.0 y el actual integralitarismo digital, la red de redes sirvió para amplificar voces, pero también para desplazar el espacio público hacia un mundo virtualizado. No es la misma experiencia la de descubrir una intervención en la calle que observar su fotografía en una red social. Las marcas territoriales se trasladan a un espacio digital incorpóreo que invita a explorar otras formas de activismo político.

Tanto internet como las redes sociales constituyen campos de disputa entre la diversidad de actores sociales que también involucran nuevos agentes políticos como las corporaciones transnacionales. Este espacio público ampliado se presenta como un lugar central para la producción y distribución de acciones artísticas, abriendo la posibilidad de potenciar el trabajo de los colectivos artivistas en sus luchas sociales, no sólo a través de la obra artística en sí, sino también como documentación del evento que deviene también en obra [6]. Rolnik y Guattari [7] señalan estas acciones como potentes micropolíticas capaces de intervenir y poner en tensión el orden y la administración de lo social en la cartografía dominante, tanto del territorio público físico como digital. Las experiencias artivistas de la actualidad contemplan la intervención de estos dos ámbitos, subvirtiendo el uso hegemónico del espacio y corporizando así las desigualdades y violencias institucionales que las democracias patriarcales y neoliberales ejercen sobre los movimientos sociales, pero sobre todo marcan una novedosa perspectiva de la virtualidad constituida por redes que individualizan en lugar de colectivizar, recuperando el carácter político de la experiencia artística digital. De esta forma, el artivismo forma parte de la cibercultura como expresión política y como estrategia comunicativa. La trasgresión del arte político se distribuye y viraliza a través de las redes sociales visibilizando una red de significados simbólicos y culturales [8].

El eje en común de todas estas prácticas se centra en una apropiación del espacio público, reconociendo su condición de efímero y polisémico. Pero es justamente en esa esfera pública donde la acción artística se torna explícitamente política, constituyendo nuevas maneras de decir que reformulan el estatuto de lo artístico en el marco de nuevos modelos de participación y militancia. Y se presentan como salidas frente a la crisis de legitimidad que sufre la política partidaria y sus formas de representación institucional, en un contexto de ruptura de los entramados sociales que impulsa el avance de las derechas en el mundo en general, y en nuestro país en particular.

Las memorias de las luchas sociales siempre son producto de las disputas de poder, marcadas por las relaciones de preponderancia actuantes en un contexto histórico específico. Las narrativas hegemónicas definen la forma en que el Estado y las generaciones futuras se estructuran en torno a las violencias tolerables, tanto institucionales como no institucionales [9]. El estudio de las manifestaciones de artivismo, tanto en el espacio público físico como en el digital, permite encontrar las líneas de fuga para

nuevas prácticas militantes y pensar una reapropiación de lo público, en tiempos en los que los movimientos sociales chocan con nuevos paradigmas comunicativos y culturales.

3. Nuevas acciones para viejas fórmulas

A lo largo de la última década, asistimos a una radicalización de los posicionamientos políticos e ideológicos, englobados en la simplificación extrema que encierra el concepto de "la grieta". La Argentina se encuentra en un profundo debate que va más allá de cómo saldamos estas diferencias cuasi binarias que se esconden en dicha grieta, que en el mientras tanto se traga en ese *gap* a los sectores más desfavorecidos e invisibilizados de la sociedad. Jubilados, personas con discapacidad, niños, mujeres y diversidades son los primeros hundidos de este modelo liberal que favorece los intereses del poder económico financiero a costa de una caída abrupta de salarios, el empobrecimiento de la clase trabajadora y el desfinanciamiento de toda política pública que pueda aliviar, aunque sea mínimamente, las consecuencias de un plan económico para unos pocos.

Si bien no es la primera vez en nuestra historia que se dan estas "batallas ideológicas", la caracterización que adquieren actualmente da cuenta de un fenómeno con muchas aristas para analizar. El triunfo electoral en 2023 de una fuerza *outsider* que rompe con la polarización partidaria e introduce nuevas prácticas políticas principalmente en la comunicación, trae aparejada la necesidad de revaluar y revalorizar nuestras propias prácticas.

Estamos frente a un momento histórico donde los pactos democráticos e incuestionables que sostuvieron la cohesión social y condenaron el accionar de la última dictadura cívico-eclesiástica- militar en materia social, económica, política y cultural, se resquebrajan de la mano de un conservadurismo radicalizado cuyo objetivo es magnificar las diferencias existentes para sus propios fines. Berdonini y Vinuesa [10] dan cuenta de una diferencia sustancial entre la extrema derecha y la derecha radicalizada en tanto que esta última acepta el juego democrático, pero se opone a elementos centrales de una democracia liberal, especialmente en lo que respecta a los derechos de las minorías, el Estado de Derecho y la separación de poderes. En una tónica más optimista, las autoras también refieren a la comprensión de la democracia como un proceso y no sólo como un régimen, considerando que así las tendencias de democratización y desdemocratización conviven entre avances y retrocesos en direcciones disímiles [10]

En un contexto de crisis democrática como la que atravesamos actualmente, la derecha radicalizada plantea viejas recetas económicas que se apoyan sobre la base de un fuerte control social que se da a través de diversos mecanismos, pero fundamentalmente a partir de fuertes medidas represivas, un bombardeo desinformativo y el cuestionamiento a consensos sociales sobre lo que se define como verdadero y los procedimientos aceptados para validarlo. Estas posiciones son las que ponen en tela de juicio afirmaciones históricas y científicas, sin constatación empírica, dando lugar a discursos antivacuna, terraplanistas o negacionistas de los genocidios en América Latina bajo las dictaduras militares. Ejércitos de *trolls* y *haters* forman parte de los mecanismos comunicacionales de un estilo político que apuesta a gritar hasta aturdir las redes y streamings con las maldades que trae la justicia social, en contraposición con la mordaza silenciadora que adquieren frente a hechos que puedan comprometer su programa socioeconómico.

En este sentido, la desinformación y la represión de la movilización social son ejes vitales que permiten mantener los velos de una política neoliberal que parece inconducente. Y allí entra en juego la conjunción de hechos que derivan en la agresión a Pablo Grillo durante la represión en la marcha de jubilados el 12 de Marzo de 2025.

4. Cronología de los hechos

Desde mediados de 2024, jubilados y jubiladas concentran los días miércoles frente al Congreso de la Nación como forma de protesta por el ajuste del que son objeto desde la modificación por decreto de la fórmula que calcula sus haberes en abril de 2024. En todos los casos, los manifestantes tuvieron que enfrentar operativos violentos de seguridad, bajo la excusa de aplicar el protocolo antipiquetes

publicado en el Boletín Oficial el 14 de diciembre de 2023, a tan sólo cuatro días de la asunción del actual mandatario.

De acuerdo al tercer informe del Monitor de Respuestas Represivas del Instituto de Estudios y Formación (IEF) de la CTA Autónoma, entre el 10 de diciembre de 2023 y el 31 de mayo de 2025 se registraron 73 protestas que fueron reprimidas, dejando un saldo de 2395 manifestantes heridos y 277 detenidos. De acuerdo a dicho informe, las protestas de los jubilados presentan los datos más preocupantes: fueron reprimidos en 19 ocasiones, con 1297 heridos y 133 detenciones, la mayor parte de ellos durante los primeros cinco meses de 2025, con una sistematización de la represión ejercida por las cuatro fuerzas de seguridad (PFA, PSA, Gendarmería y Prefectura) [11]

Frente a la represión sufrida durante los primeros meses del año, hinchas de clubes de fútbol de la Argentina decidieron participar de la protesta del miércoles 12 de Marzo, cómo símbolo de acompañamiento a los jubilados y jubiladas en su lucha por recuperar el poder adquisitivo perdido en sus haberes, contra la quita de medicamentos y la eliminación de la moratoria. La iniciativa fue impulsada por la hinchada de Chacarita, al ver semanas antes que uno de sus hinchas, también jubilado, había sido reprimido brutalmente con gas pimienta, terminando con una muñeca fracturada a raíz de la violencia policial. Desde el gobierno se inició una campaña mediática para convencer a la población de que las barras bravas estaban involucradas.

Promediando la jornada de protesta, las fuerzas represivas desplegaron un intenso operativo que contó también con la actuación de la Policía de la Ciudad, y que incluyó el uso de balas de goma, gas pimienta, camiones hidrantes y gas lacrimógeno. Según el informe del Centro de Estudios Legales y Sociales (CELS) elevado a diversas relatorías de la Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos, en la jornada fueron detenidas más de un centenar de personas de manera indiscriminada, incluyendo niños de 12 y 14 años. En dicho informe se da cuenta que “Según surge de fotografías y videos que circularon en redes sociales, no hay registro de que las personas detenidas hubieran causado focos de conflicto durante la manifestación. Por el contrario, la prueba audiovisual pone en evidencia que las detenciones se realizaron contra personas que no se encontraban cometiendo delito o contravención alguna” [12 p.6]. A su vez, la Posta de Salud y Cuidados informó que se atendieron más de 300 casos con traumatismos de cráneo, con y sin pérdida de conocimiento, traumatismos de torax, síncopes, lipotimias, heridas abiertas en rostro, hemorragias, dificultad respiratoria aguda, entre otras afecciones causadas por la violencia ejercida por las fuerzas represivas. [12]

En ese contexto de violencia policial, Pablo Grillo (35), fotoperiodista y ex estudiante de nuestra Universidad, recibió el impacto de una cápsula de gas lacrimógeno en la cabeza quedando inconsciente y siendo trasladado de inmediato por otros manifestantes al hospital Ramos Mejía. La agresión le provocó fractura de cráneo y pérdida de masa encefálica, quedando en estado crítico por varias semanas y afrontando una larga recuperación sin pronóstico claro hasta el momento en que fue escrito este artículo. La agresión quedó registrada por un video que muestra el momento exacto en que recibe el impacto, cuando estaba de cuclillas tomando fotografías de la represión.

A este cuadro se le suman los datos recolectados por la Comisión Provincial por la Memoria en el informe sobre el Monitoreo de la represión de las fuerzas de seguridad a las manifestaciones públicas durante el primer semestre, presentado en Julio de 2025. En dicho informe se advierte un crecimiento exponencial de la violencia institucional en contexto de represión a las protestas, pasando de 1216 personas heridas en 2024 a 1251 en sólo 6 meses de 2025. También se puede observar un incremento en las detenciones arbitrarias que en 2024 fueron de 93, mientras que en el primer semestre de 2025 alcanzaron las 130 personas. El informe también sugiere una sistematización de la política represiva con el objeto de generar temor en la población, limitando su participación en el ejercicio del derecho a la protesta y a la libertad de expresión, lo cual despoja al sistema democrático de sus elementos esenciales e instala la violencia política como “forma de tramitar los conflictos de la desigualdad y el despojo de derechos” [13 p44]

5. Cabina de Enfoque. Hoy: la protesta

Pablo Grillo fue herido por una granada de gas lacrimógeno disparada por el Cabo Primero de la Gendarmería Nacional Héctor Guerrero, quien pudo ser identificado a partir del material audiovisual recolectado por el colectivo Mapa de la Policía. Con imágenes de fotoperiodistas, cámaras de gente que participó de la manifestación y aportes de la sociedad civil y medios de comunicación que compartieron todo tipo de registros de la jornada represiva, pudieron determinar la posición exacta desde dónde salió el disparo. Luego, con la colaboración de los físicos forenses Pregliasco y Onetto quienes analizaron la trayectoria del disparo, se pudo corroborar que el gendarme realizó el impacto de forma horizontal, lo cual transgrede todos los manuales de uso de estas armas de baja letalidad, que se tornan en mortales cuando se violan los protocolos de uso. Cabe destacar que el discurso oficial procuró instalar primero la versión de que fue el mismo Grillo quien se interpuso en el disparo para luego justificar el accionar del gendarme como un accidente producto del rebote del cartucho contra una barricada detrás de la que se encontraba el fotógrafo de cuclillas registrando los hechos. El mismo sumario interno abierto por el Ministerio de Seguridad y cerrado en 24 horas asegura que se trató de un hecho fortuito producto de la mala visibilidad ocasionada por el incendio de contenedores causado por los manifestantes y que la responsabilidad es de la víctima quien se ubicó en la línea de tiro. Posteriormente, la reconstrucción de los hechos realizada por orden judicial confirmó que el disparo se realizó de manera horizontal, violando los protocolos internacionales de uso de armas de baja letalidad y desmintiendo así las versiones oficiales.

Como dijimos anteriormente, la narrativa política de la derecha radicalizada se basa en la desinformación y la represión. Y estos son los primeros factores que se pusieron en juego en el caso de Pablo Grillo, con proliferación de falsas noticias, datos infundados y demonización de la víctima. En este contexto, hay un elemento de suma relevancia para desacreditar las versiones oficiales que buscan encubrir la sistematización represiva que ejerce el gobierno desde su asunción: el material audiovisual y fotográfico. Por un lado, el colectivo de Mapa de la Policía, responsables de la recolección de imágenes para la reconstrucción del hecho con datos y pericias. Por el otro, la fotografía tomada por el fotoperiodista Kaloian Santos que permitió reconocer al efectivo que había realizado el disparo. La puesta conjunta de todas las imágenes, constituyeron una prueba de tanta contundencia que logró correr los velos impuestos por el discurso oficial y sostenidos por su maquinaria comunicacional, impulsando la causa no solamente en los Tribunales sino también en la opinión pública.

La Argentina de 2025 se encuentra transitando un momento histórico donde las nociones de verdad y realidad se desvirtúan y cuestionan frente a un ejercicio de poder que se sostiene sobre la construcción de un mensaje político desde la reinterpretación argumentativa de la verdad, que opta por prescindir de la lógica racional para reposar sobre la exacerbación de la emocionalidad [14]. En este contexto, adquiere una nueva relevancia el registro visual y sonoro de los hechos. Sin esas imágenes y videos, sin la voluntad de parte de la sociedad civil de recuperar las libertades hoy reprimidas, no hubiese sido posible conocer el nombre del perpetrador del disparo que casi termina con la vida Pablo Grillo, y mucho menos llevar el caso ante la Justicia que avanza, aunque sea lentamente, en la investigación con las pruebas aportadas.

Y acá es donde podemos establecer una vinculación con el arte político. Raymundo Gleyzer, cineasta desaparecido durante la última dictadura cívico-eclesiástica-militar dijo que el cine es un arma de contrainformación, que la cámara no es un fusil sino un instrumento de información para las bases. En este sentido, podemos decir que el arte es un acto comunicativo que apela a la percepción sensorial para cruzar las barreras de la razón e impregnar nuestros sentidos de un constructo significante, y en el marco del activismo es también una estrategia comunicativa.

Así es como surge *Cabina de Enfoque. Hoy: la protesta*, una instalación sensorial inmersiva que busca conjugar elementos concretos del día en que Grillo fue agredido, con un espacio que convoque al

recogimiento en contacto directo con las imágenes físicas y con el sonido, invitando a una experiencia sensible, reflexiva y compartida. Esta instalación antecede una charla con referentes en la temática como la investigadora Cora Gamarnik, integrantes del colectivo de Mapa de la Policía[1] y Emiliano Grillo, hermano de Pablo. En este artículo nos referiremos exclusivamente a la realización de la instalación, pero es importante mencionar que la actividad se completa con un Taller de Fanzines posterior a la charla, dictado también por una integrante de este equipo de investigación, donde se espera volcar a ese formato gráfico las reflexiones de los participantes luego de atravesar la cabina y compartir el diálogo con los y las invitadas.

6. Una mirada. Muchas escuchas

La cabina es sí es una construcción en fibrofácil, pintada íntegramente de negro con acceso a través de una cortina o telón también negro, de dimensiones reducidas para el ingreso de dos o tres personas en simultáneo como máximo, generando un ambiente íntimo y de recogimiento. Frente a la entrada, se encuentra una pequeña mesa integrada a la estructura de la cabina. Sobre ella se dispone un álbum en formato A3, con una selección de fotos de la manifestación del día que hirieron a Pablo, tomadas por Kaloian Santos, fotógrafo y periodista, y cedidas para la instalación. En los alrededores de la cabina se exponen dípticos de la muestra del mismo autor llamada “De qué lado de la mecha te encontrás”. Las mismas pueden ser vistas libremente por los y las visitantes. Dentro de la cabina sólo se encuentra exhibida en bastidor y con iluminación puntual, la última foto tomada por Pablo Grillo, instantes previos a que cayera herido por el Gendarme. Desde un parlante oculto bajo la mesa, se escucha en loop un paisaje sonoro que reconstruye el ambiente de la manifestación y la posterior represión policial en la que Pablo Grillo fue herido. El objetivo es aislar a las y los visitantes de todo estímulo visual y sonoro que no sean los propios de la jornada represiva para potenciar el movimiento afectivo que la combinación que estos elementos sensoriales puede generar.

Pablo es fotoperiodista. Ya en 1961 Barthes analizó la fotografía de prensa en su sentido semiótico, dando cuenta de diferentes mecanismos que construyen el sentido connotado del mensaje fotográfico. El autor desliga la fotografía de su esencia que es la literalidad del objeto, pero sostiene que tampoco se trata de una transformación; entre el objeto representado y su imagen no hay un código porque es su analogon perfecto y es, justamente esa perfección analógica lo que define la fotografía [15]. Pero Pablo sabe que sus imágenes son algo más que una representación denotada de la realidad. Pablo sabe que hay en ellas un mensaje connotado que la sociedad aprendió a leer. Pablo sabe que ese mensaje no tiene un código para comprenderlo y allí radica la potencia de la fotografía periodística: es la única estructura informativa que está exclusivamente constituida y ocupada por el mensaje.

Las guerras del siglo XX trajeron como consecuencia un veloz desarrollo de la fotografía periodística. La cobertura y publicación de imágenes emblemáticas que cuentan la historia de ese siglo conllevan a una profundización en el análisis del mensaje fotográfico, y aparecen autores como Susan Sontag que se preguntan hasta qué punto la fotografía de prensa es el acto de no intervención por esencia; frente a la dualidad de fotografía o vida, el fotoperiodista elige la imagen provocando la pasividad del *voyeur* en un proceso de insensibilización frente a la imagen y traduciendo el rol del periodismo fotográfico al del vaciamiento de las imágenes [16]

Con el cambio de siglo, y especialmente después del caso Abu Ghraib[2], Sontag revisa su posición respecto a la fotografía y llega a la conclusión que no nos hemos vuelto más pasivos por el exceso de

[1] La escritura de este artículo es anterior a la realización de la charla y la instalación, por lo que no podemos confirmar con certeza quienes integran la mesa. No obstante, ya contamos con fotografías cedidas por Kaloian Santos y hemos dialogado con los posibles panelistas, quienes se han mostrado con absoluta predisposición a participar de la actividad.

[2] En 2003 la Associated Press publica un informe con imágenes de abusos y torturas a prisioneros en la cárcel de Abu Ghraib por parte de la compañía 372 de la Policía Militar de Estados Unidos, agentes de la CIA y contratistas militares durante la ocupación en Irak, provocando un escándalo político que llevaría a la corte marcial a varios de los responsables. Durante los

imágenes, sino por el contrario. Las imágenes de impacto movilizan las fibras sensibles de la sociedad, impulsan los movimientos humanitarios y ejercen la suficiente presión sobre los gobiernos para obligarlos a asumir su responsabilidad [17]. La imagen, aunque estática y muda, puede ser un resorte para activar un proceso que va de la conmoción a la acción, tal como ocurre con el artivismo. Las imágenes tienen el potencial de decir algo que muchas veces ni el mismo espectador, ni él o la autora, saben que dicen [18].

Hay imágenes que golpean y afectan, fotografías con el poder de permitirnos tocar un fragmento de realidad provocando un sentido muy profundo. Pablo sabe que no puede contar con su lente lo que ocurre a la distancia; que la composición, el ángulo, la luz que dan sentido a esa analogía representada por su cámara pueden decir mucho más que la mera palabra acerca de lo que viven cada miércoles los y las jubiladas cuando son reprimidos por ejercer su derecho a la protesta. Y Pablo va a cumplir con su rol, su mirada va a capturar el instante preciso de brutalidad represiva: el fuego, las astillas volando por el aire, el humo. Un instante después de esa mirada, Pablo Grillo cae herido al suelo.

Cabina de enfoque no es sólo una instalación visual sino también sonora, mas no audiovisual. Sin embargo, algunas conceptualizaciones básicas del lenguaje audiovisual son aprovechadas por la obra para provocar en las y los espectadores un efecto semejante al que generan las películas que, según Michel Chion, se *audioven*. Para el autor, al ver un filme no percibimos las imágenes y los sonidos de manera aislada siguiendo un esquema aditivo donde se suman ambos lenguajes, sino por el contrario, la imagen y el sonido ejercen una influencia mutua dando una nueva dimensionalidad que sólo existe en nuestras mentes [19]. Ese es el objetivo de sumar un paisaje sonoro a la selección de fotografías de Kaloian y a esa última expresión de Pablo antes de ser agredido. La imagen nos trae la conmoción que la percepción emocional de esa perfección analógica contiene. En cambio, el sonido dista de ser un analogon en el sentido que plantea Barthes, pero contiene la imagen acústica del mundo mediante sus signos verbales, musicales, sonoros y el silencio [20]

El concepto de paisaje sonoro lo elabora Murray Schaeffer en la década del ´60 cuando inicia su *World Soundscape Project* registrando los entornos sonoros canadienses y, originalmente, tenía por objeto la preservación de los paisajes sonoros que cambian constantemente a partir de las transformaciones sociales y su correlación en el ambiente, siendo un acercamiento desde la perspectiva de la ecología acústica. No obstante, tiempo antes y en directa vinculación con ello, surgen corrientes compositivas que utilizan los sonidos concretos del paisaje sonoro para reelaborarlos desde una concepción musical: la composición del paisaje sonoro.

En cierta manera, podemos establecer un paralelismo entre la fotografía como representación de la realidad y el paisaje sonoro en su concepción más ecológica; y la noción de composición de la imagen fotográfica con la relativa al paisaje sonoro. En ambos casos, la materia prima proviene del mundo tangible y concreto, en tanto que su tratamiento habilita la percepción de ideas y emociones de gran complejidad. En este sentido, Barry Truax [21] especifica que la composición de paisajes sonoros se caracteriza por la presencia de sonidos ambientales y contextos reconocibles, cuyo propósito es invocar en el oyente asociaciones, recuerdos y la imaginación en relación con el entorno. Esa sucesión de asociaciones y recuerdos, y el sentido que a ello se le otorga será producto de diversos factores, pero fundamentalmente de las dimensiones interpretativas del oyente. José Iges [22] lo deja en claro cuando dice que la construcción de un paisaje sonoro genera un relato subjetivo, no real, como consecuencia de la suma de las interpretaciones. Así, podemos decir que existe una falsedad cuando se trata de establecer una equivalencia entre los sonidos de un entorno real y los mismos una vez que fueron grabados y organizados en el espacio de la obra sonora; el sonido grabado es sólo una huella, un espejismo sonoro de la realidad [22]

años sucesivos, medios de todo el mundo continuaron publicando nuevas imágenes, afectando la credibilidad de Estados Unidos en sus operaciones en territorios extranjeros.

El paisaje sonoro de Cabina de Enfoque es una composición que utiliza los registros sonoros extraídos de los audiovisuales que se registraron en la jornada de represión; los mismos que usó el colectivo Mapa de la Policía para desacreditar los discursos oficiales pintados de impunidad. Pero no es el mismo paisaje que oyó Pablo. Es el que oímos todos y todas mirando la represión desde nuestras pantallas. Es el que oímos todos y todas tratando de protegernos de los gases y balazos de goma en cada una de las manifestaciones que fueron reprimidas. Murray Schaeffer dijo en una de sus conferencias “todos los acontecimientos traumáticos conservan el sonido como su medio expresivo” [23]. El paisaje sonoro de Cabina de Enfoque es la expresión de esa memoria sonora que, a la luz de la mirada fotográfica, nos envuelve en una nube aural que bien supo ser la humareda de los gases en la Plaza, así como la consciencia de una sociedad que recuerda que no podemos volver a tolerar los espasmos de violencia institucional que erosionan los acuerdos democráticos del Nunca Más.

7. Conclusiones preliminares

Cabina de enfoque es una instalación sonora y visual que se llevará adelante durante la Semana de las Humanidades y las Artes, a finales del mes de octubre de este año. Debido a que este artículo fue entregado con anterioridad para cumplir con los plazos de los organizadores del Congreso, no resulta posible anticipar los resultados que la instalación en particular, y la actividad en general puedan arrojar. El marco teórico aquí definido es el punto de partida que requiere de la observación en torno a la recepción de los y las visitantes para poder analizar los alcances de esta intervención artística como expresión de una práctica política que busca interpelar y manifestar el compromiso de nuestra Universidad con los pactos democráticos de la sociedad.

REFERENCIAS

[1] A. Longoni y M. Mestman. *Vanguardia artística y política en el 68 argentino*. Buenos Aires: Eudeba. 2008

[2] P. Russo. *¿Dónde está Julio López? Prácticas estéticas en relación al reclamo de aparición con vida*. Buenos Aires: Tierra del Sur. 2010

[3] J. Abarca (2012, Julio, 01). *Breve introducción al graffiti*. [Online] Disponible en https://urbanario.es/articulo/breve-introduccion-al-graffiti/

[4] M. Expósito. *La potencia de la cooperación. Diez tesis sobre el arte politizado en la nueva onda global de movimientos*. [Online] Disponible en https://www.academia.edu/9082638/La_potencia_de_la_cooperaci%C3%B3n

[5] E. Aladro-Vico, D. Jivkova-Semova y O. Bailey. "Artivismo: un nuevo lenguaje educativo para la acción social transformadora". *Comunicar*, vol XXVI, no 57, pp 9-18, Octubre, 2018. [Online] Disponible en https://www.redalyc.org/journal/158/15856696001/html/

[6] M. De La Puente. "Performance, política y activismo digital: las intervenciones del Colectivo Dominio Público". *Telón de fondo*, vol 26, no 12, pp 80-88. [Online] Disponible en https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/57722

[7] S. Rolnik y F. Guattari. *Micropolítica. Cartografías del deseo*. Madrid: Traficantes de sueños editorial. 2006

[8] S. Escobar y M. Aguilar. "Artivismo en la cultura digital. Dos casos en México: #Ilustradoresconayotzinapay #noestamostodas" *índex. Revista de Arte Contemporáneo*, vol 8, pp 142-150. [Online] Disponible en http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2477-91992019000200142

[9] P. Calveiro. "Apuntes sobre la tensión y ética en la construcción de las memorias políticas". [Online] CELS/ICTH. [Online] Disponible en http://www.cels.org.ar/common/documentos/Calveiro.pdf

[10] M. Berdondini y L. Vinuesa, "Desdemocratización y conservadurismo radical en la Argentina contemporánea", *Ideas*, no 18, pp. 40–51. Noviembre. 2023. [Online] Disponible en https://revistaideas.com.ar/ojs/index.php/ideas/article/view/478

[11] D. Godoy. "500 días de Milei. Asalto a la democracia, punitivismo y represión para la entrega de la Nación" IEF, CTA Autónoma, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Monitor de respuestas represivas. Julio 2025

[12] Centro de Estudios Legales y Sociales. "Represión a personas mayores y trabajadores de prensa en contexto de protesta". CELS, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Marzo 2025

[13] Comisión Provincial por la Memoria. "Monitoreo de la represión de las fuerzas de seguridad a las manifestaciones públicas" CPM, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Informe Especial. Julio 2025

[14] H. Guerrero Sierra, C. Niño y J. Wilches Tinjaca. "Javier Milei, Tik Tok y la construcción del patán político". *Análisis Político*, vol 37, no 108, pp 74-102. Enero-Junio, 2024- [Online] Disponible en http://www.scielo.org.co/pdf/anpol/v37n108/0121-4705-anpol-37-108-74.pdf

[15] R. Barthes. *Lo obvio y lo obtuso*. Barcelona: Paidós. 1995

[16] S. Sontag. *Sobre la fotografía*. Barcelona: De Bolsillo. 2010

[17] S. Sontag. *Ante el dolor de los demás*. Buenos Aires: Alfaguara. 2003

[18] P. Burke. *Visto y no visto. El uso de la imagen como documento histórico.* Barcelona: De Bolsillo. 2005

[19] M. Chion. *La audiovisión*. Barcelona: Paidós. 1993

[20] R. Haye. *El arte radiofónico. Algunas pistas sobre la constitución de la expresividad*. Buenos Aires: La crujía. 2004

[21] B. Truax. “Paisaje sonoro, comunicación acústica y composición con sonidos ambientales”. *Contemporany Music Review*, vol 15, part 1. 1996. [Online] Disponible en https://www.eumus.edu.uy/eme/ps/txt/truax.html

[22] J. Iges. 2000. Soundscapes, una aproximación histórica. [Online] Disponible en https://www.sonoscop.net/sonoscop/soundscape/igess.html

[23] M. Schaeffer. “Nunca vi un sonido” presentado en el Foro Mundial de Ecología Acústica. D.F, México. 2009. Disponible en https://archive.org/details/archivosonoro-murray-schafer

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

El potencial de la sonoterapia a través del cine argentino. Diseño con frecuencias terapéuticas, que benefician la salud, para diversas cosmovisiones y fomentan la escucha activa, de paisajes sonoros

Vásquez, Martínez, Jennifer, Lorena.

[†] Universidad de Buenos Aires - FADU

[§] Asociación Argentina de Sonidistas Audiovisuales - ASA

[1] jennilore@hotmail.com, [2] jennilore8@gmail.com

Resumen Planteo realizar " Bandas sonoras terapéuticas" y resaltar la importancia, de ejercitar la audición, prestando atención al paisaje sonoro o sonidos que nos rodean; los cuales, nos influyen. La ecología de los medios, plantea que los medios influencian "a los sujetos que las utilizan". Siendo importante ser conscientes de su influencia. Metafóricamente los sonidos o vibraciones, son como alimentos que consumimos, existen los sonidos poco saludables y existen los sonidos que son vitaminas, es importante encontrar el sonido vitamina, que nos hace bien a cada uno. En distintos paradigmas, culturas y cosmovisiones, usan las vibraciones para sanar, como los ìcaros amazónicos, las coplas andinas o los mantras. La sonoterapia, se basa en el principio de resonancia y utiliza, determinadas frecuencias, para beneficiar al paciente. El Dr. Royal Rife, logró encontrar la "firma espectral" de cada virus. Con sus estudios, demostró el poder del sonido para curar enfermedades. Otro caso emblemático es el de Enrique Dussell, quien creó el concepto de "transmodernidad", en el que plantea fusionar herramientas y conocimientos ancestrales, con tecnología, para beneficiar a la sociedad. El cine, es medicina, además de expresar ideas, y transmitir emociones. Realizando, bandas sonoras con frecuencias terapéuticas, beneficiamos la salud de la audiencia.

Palabras clave: bandas sonoras terapèuticas, vibraciones y cosmovisiones, cultura de escucha.

Abstract I propose creating "Therapeutic Soundtracks" and highlighting the importance of practicing hearing, paying attention to the soundscape or sounds that surround us; these influence us. Media ecology suggests that the media influences "the subjects who use them." It is important to be aware of their influence. Metaphorically, sounds or vibrations are like the foods we consume; there are unhealthy sounds and there are sounds that are vitamins. It is important to find the vitamin sound that is good for each of us. In different paradigms, cultures, and worldviews, vibrations are used to heal, such as Amazonian ìcaros, Andean verses, or mantras. Sound therapy is based on the principle of resonance and uses certain frequencies to benefit the patient. Dr. Royal Rife managed to find the "spectral signature" of each virus. With his studies, he demonstrated the power of sound to cure diseases. Another emblematic case is that of Enrique Dussell, who created the concept of "transmodernity," in which he proposes merging ancestral tools and knowledge with technology to benefit society. Cinema is medicine, in addition to expressing ideas and conveying emotions. By creating soundtracks with therapeutic frequencies, we benefit the health of our audiences.

Palabras clave: therapeutic soundtracks, vibrations and worldviews, listening culture.

1. INTRODUCCIÒN

"La tierra tiene música para los que escuchan..." George Santayana

El propósito de esta investigación, es valorizar el potencial medicinal del sonido, a través de bandas sonoras, con Frecuencias Terapéuticas. En la sociedad occidental, es necesario despertar el interés, por el mundo sonoro y la escucha activa. Además de fomentar, la toma de conciencia, de la influencia de los sonidos en los humanos. Es preciso incentivar a los ciudadanos, a prestar atención a los “paisajes sonoros” o sonidos que los rodean, a través de diferentes herramientas y conocimientos.

En los años 60 Murray Schafer , el creador del concepto paisaje sonoro (Sonidos en un espacio y tiempo determinado), junto con Barry Truax, crearon el proyecto “World Soundscape Project (WSP)”. Planteando alternativas para combatir la contaminación auditiva que existe en las ciudades, así como también restablecer los niveles naturales del sonido a través de un nuevo arte conocido como el “diseño acústico”, que consiste en recomponer el sonido o paisaje musical del mundo (Truax, 1974). Westerkamp integrante del (WSP), en 1991 planteó “más allá de luchar contra la contaminación acústica la tarea de los ecologistas del sonido es diseñar entornos sonoros atractivos o bien lugares sonoros, además de fomentar la sensibilización continua del oído…”.

En su libro “Nuevo paisaje sonoro”, Schafer comenta cuando John Cage entró en una cámara anecoica, donde existiría el silencio absoluto. Pero Cage escuchó los sonidos de su cuerpo y concluyó que “el silencio no existe”. Parecido a lo que expone la teoría de Pitágoras, armonía de las esferas, también la resonancia Schumann, en la que se plantea, que todo en el universo vibra y que la frecuencia, en la que vibra la tierra es de 7.83 (Hz), frecuencia que los humanos no percibimos ya que está por debajo de los 20Hz, pero igualmente nos influye.

En distintos paradigmas y cosmovisiones, se plantea que “Todo es energía, todo vibra”. La física cuántica, en la teoría de cuerdas, propone que las partículas elementales no son puntos, sino modos de vibración de "cuerdas diminutas". Algunas culturas ancestrales usan las vibraciones para entrar en estados de consciencia que aportan sanación. En la cosmovisión andina, se usan instrumentos como la tinya o caja coplera, que representa el pulso del útero de la tierra. En Norteamérica se usa el tambor Lakota que representa el latido del corazón de la tierra y tú propio corazón. En Nepal se usa el tambor oceánico y es usado, al igual que los cuencos tibetanos, en rituales espirituales y en terapias sonoras. El kundalinin yoga plantea, que en el paladar superior de la boca tenemos 84 puntos meridianos y que al cantar, la lengua los estimula y activa determinadas zonas del hipotálamo, beneficiando la salud. Algo parecido sucede con la, musicoterapia, disciplina de la salud que emplea la música de forma terapéutica.

La sonoterapia es una terapia complementaria, que utiliza ondas en determinadas frecuencias, para generar bienestar en el paciente. Cuando alguien canta y rompe una copa, es porque la frecuencia, resuena con la de la copa. Parecido al planteamiento que hizo el Dr. Royal Rife, quien es considerado uno de las mentes más grandes del siglo 20, pues logró encontrar la "firma espectral" de cada virus (frecuencia en la que resuena) y transmitiéndole la misma frecuencia, pudo destruirlos como pasa con la copa. Con sus estudios, Rife demostró el poder del sonido para curar enfermedades, incluso el cáncer.

Otro caso emblemático es el de Enrique Dussell, quien creó el concepto de "transmodernidad", en el que planteó que es posible retomar algunos saberes, además de herramientas utilizadas por distintas culturas ancestrales y, junto con la tecnología, realizar acciones o trabajos que nos beneficien.

2. DESARROLLO Y METODOLOGÌA

Realizando el análisis de 3 tres films argentinos, que se destacan por su diseño de sonido e incentivan la escucha activa, siendo para mí 3 películas referentes del cine medicina argentino. Indagaré sobre los recursos y herramientas, que fueron utilizadas. Y desde un enfoque cualitativo, realizaré entrevistas a los realizadores, preguntándoles sobre esos recursos y el proceso de elaboración, de esas bandas sonoras terapéuticas.

Uno de los tres films es “El lado oscuro del corazón” de Eliseo Subiela del año 1992, otro es el documental “Mujer Medicina” de Daiana Rosenfeld del año 2019 y el tercero, es el documental “Bajo las banderas el sol” de Juanjo Pereira, de este año 2025.

Aprendí que el cine, y el arte en general, es una poderosa herramienta para transformar y aportar a la sociedad, ya que puede expresar ideas, generar conciencia y transmitir emociones. Con esta metodología, planteo diseñar y realizar bandas sonoras con “Frecuencias Terapéuticas”, proponiendo el cine como un tipo de arte-terapia que beneficia la salud, planteándolo como medicina.

Creo fervientemente, que al componer o diseñar con frecuencias terapéuticas, como las frecuencias de solffegio, los cantos de comunidades ancestrales o los sonidos de la naturaleza, realizamos un aporte a la sociedad, al generar beneficios en la salud, de la audiencia. Además de fomentar, la creación de películas, con frecuencias terapéuticas y de expandir, la importancia de ejercitar la escucha activa; como diseñadora de sonido y ecologista sonora, he venido realizando exploraciones sonoras y dictando clases, sobre el potencial del sonido. A su vez, vengo poniendo en práctica, esta metodología, en mi vida y proyectos.

3. LA POSIMAGEN, COMO DISPOSITIVO HEGEMÓNICO Y EL POSONIDO

La posimagen es un concepto que relaciona las imágenes y el poder, siendo una forma de manipular y ejercer el poder de los medios hegemónicos. Por eso es fundamental analizarla desde una perspectiva crítica, ya que manipula y expande la desinformación. Es planteada como un dispositivo hegemónico y se presenta, como un virus, porque la posimagen se replica. “Al generar goce promueve el consumismo y el ser consumido, crean adicción, llevando al sometimiento y logrando controlar al usuario, a través de la persuasión. Conocer su funcionamiento permitirá, por ello, no sólo disminuir el miedo que generan, sino también propiciar modalidades alternativas de las imágenes, que contribuyan a definir de una manera distinta tanto las formas en las que nos relacionamos con los otros y con nosotros mismos, como el modo en el que habitamos en la Tierra”. (Litvinoff, 2023)

La teoría crítica planteada por la escuela de Frankfurt de Alemania, alerta y cuestiona las relaciones de poder, considerando que el arte establece aspectos culturales y psicológicos en la sociedad, por lo que es necesario que los individuos sean conscientes y tengan pensamiento crítico. La industria cultural, ha generado estereotipos y conductas nocivas en los ciudadanos, producidas por la persuasión de los medios de comunicación hegemónicos. Siendo una industria que propicia la cultura de masas y fomenta, una sociedad consumista, en la que los individuos dejan de ser ciudadanos para ser consumidores.

Marshall Mcluhan de la escuela de Toronto, plantea que, así como nosotros, moldeamos y diseñamos a las máquinas, ellas nos moldean a nosotros. Mcluhan es uno de los promotores de la ecología de los medios, teoría que sostiene, que los medios de comunicación son un ecosistema dónde cada medio interactúa con nosotros y nos influye. También, que éstos "afectan a los sujetos que las utilizan". Su influencia en nuestra memoria sonora es evidenciada, por ejemplo, cuando recibimos una notificación de una red social y reconocemos inmediatamente el sonido característico de esa red determinada, el cual fue diseñado y está registrado en nuestra memoria sonora. Ese sonido es un ejemplo del “posonido”.

4. LA CULTURA DEL OJO Y LA CULTURA DE LA ESCUCHA

En la sociedad occidental, prevalece el sentido de la vista. Murray Schafer plantea "...siguen creyendo que el ojo es el receptor de información más importante... el oído volverá a ser en esa región un sentido primordial, como lo sigue siendo todavía en otras partes del mundo".

En busca de conocimientos y herramientas que nos aporten para evolucionar, es importante en nuestra sociedad cultivar la cultura de la escucha, siendo fundamental reconocer y aprender, a escuchar, nuestro entorno y escucharnos. Al vincularnos con el apasionante mundo de los sonidos abrimos las compuertas de la mente y de la percepción, teniendo la oportunidad, no solo de aprender sino de sentir. Al valorar y pensar al sonido, como una herramienta que produce grandes aportes, podemos ser conscientes de su poder e influencia, en nosotros y beneficiarnos, de su maravilloso potencial.

La composición 4′33″ de John Cage, demuestra que cualquier experiencia auditiva puede ser música, y que el silencio absoluto no existe. La pieza, resalta los sonidos involuntarios del entorno y la propia experiencia del oyente, invitando a una nueva forma de escuchar y a expandir la definición de música.

5. VISUALIZANDO EL SONIDO

La Cimática es el proceso de visualizar el sonido y estudia el efecto que causan las vibraciones sobre la materia, ya sea agua, aire o incluso nuestro propio cuerpo. Hans Jenny, un médico y científico, se encargó de expandir e implementar más aportes al trabajo, de Ernst Chladni (El padre de la Acústica); quien realizó el experimento llamado "Las placas de Chladni". En placas de metal, con sal y con un arco de violín, que genera frecuencias de sonido; se lograron observar, diversas figuras y patrones, que las ondas creaban en la materia. Entre más alta la frecuencia(aguda), más complejos son los patrones. Siendo útil, en el análisis de infrasonidos o ultrasonidos (como las llamadas de los delfines). El espectro audible humano, es de 20 Hz a 20.000 Hz. Por debajo de 20 Hz, están los sonidos graves o infrasonidos y por encima de los 20.000 Hz, están los sonidos agudos o ultrasonidos. Aunque los humanos no podemos percibir, a los infrasonidos y ultrasonidos con la audición, es preciso ser conscientes, de que están presentes y nos influyen.

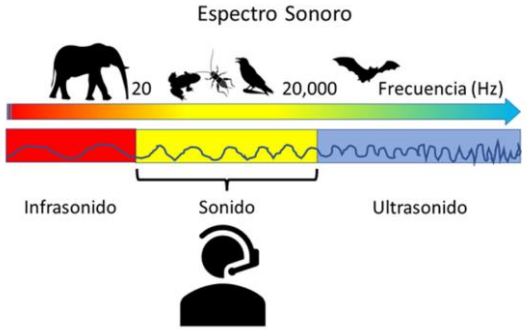


Figura 1: Espectro sonoro audible humano

6. EL PODER DEL SONIDO Y SU INFLUENCIA EN NUESTRA VIDA

Propongo pensar, que los sonidos o vibraciones, son como alimentos que consumimos. Existen los sonidos poco saludables y existen los sonidos que son vitaminas. Creo que es importante, encontrar el sonido vitamina, que nos hace bien a cada uno y a cada una.

En distintas disciplinas y culturas, como la cosmovisión andina, se piensa que todo está en vibración, que todos vibramos y resonamos en determinada frecuencia. En esas culturas ancestrales, existen sonidos que generan sanación, como los icaros, que son cantos del Amazonas. También el tambor ceremonial llamado Kultrùn, utilizado por los mapuches. Asì mismo, los cuencos tibetanos, usados en rituales espirituales y en baños de sonido, para equilibrar los chackras.

En la Sonoterapia, se utilizan vibraciones para tratar la mente y el cuerpo. Aplicando vibraciones generadas por la voz, diapasones, cuencos tibetanos, tambores, didgeridoo, tambores oceánicos, armónicas, campanas, gongs, vientos y aerófonos. Se desbloquea la energía estancada en los campos energéticos del cuerpo y se puede modificar las frecuencias de energía aumentándola. Basándose en el principio de la «Ley de Resonancia», cuando una vibración provoca vibraciones en un objeto. Por ejemplo, cuando una cantante es capaz de romper una copa cuando canta.

En un estudio publicado en Brazilian Journal of Otorhinolaryngology, se evidenció una reducción del tinnitus, en 9 pacientes mediante un protocolo con un enfoque personalizado. La mejor respuesta al tratamiento con terapia sonora, se observó en los pacientes con tinnitus silbante.

Algunos terapeutas en sus secciones, emplean frecuencias de Solfeggio, provenientes de los cantos gregorianos, ya que se tiene el concepto de que benefican la salud (174 Hz, 285 Hz, 396 Hz, 417 Hz, 528 Hz, 639 Hz, 741 Hz, 852 Hz y 963 Hz). Por ejemplo, la 285 Hz ayuda a cicatrizar heridas, ya que estimula la regeneración de tejidos beneficiando la salud. Al igual que la música fractal de Bach, basada en la repetición de patrones de sonidos a diferentes escalas, siendo una composición simétrica.

Actualmente en el campo de la ciencia, se está haciendo uso de frecuencias, para realizar tratamientos.

La profesora de la Universidad de Michigan, Zhen Xu, autora de un nuevo estudio publicado en la revista Cancers, expone que están probando en seres humanos con cáncer de hígado, el tratamiento denominado histotripsia. Enfocando haces de ondas ultrasónicas, con precisión milimétrica, se crean microburbujas en el interior de los tejidos afectados; lo que hace que se expandan, colapsen rápidamente y se rompan. Esta técnica, no tiene los mismos efectos secundarios adversos que otros enfoques para tratar los tumores cancerosos, como la radiación y la quimioterapia.

El científico, investigador y músico Anthony Holland, siguiendo los experimentos del Dr. Royal Rife, reunió los componentes electrónicos necesarios y construyó una máquina de frecuencias. Durante quince meses, realizó frecuencias de prueba en microorganismos inofensivos y fáciles de obtener (paramecio y blefarismo). Luego junto otros científicos, comprobaron que el dispositivo provocó, cambios en el tamaño y la forma de las células del cáncer de páncreas. Evidenciando que es posible tratar el cáncer, con este tratamiento no invasivo, que usa ondas sonoras.

La levitación acústica, aprovecha las propiedades del sonido para hacer que sólidos, líquidos y gases pesados floten. Los científicos han estudiado con buenos resultados el fenómeno de las ondas estacionarias, las cuales tienen el potencial para contrarrestar la gravedad. Debiendo usar sonidos, de la frecuencia correcta para crear la onda estacionaria deseada; la mayoría de los sistemas, utilizan ondas ultrasónicas, que son demasiado agudas para ser escuchadas por las personas.

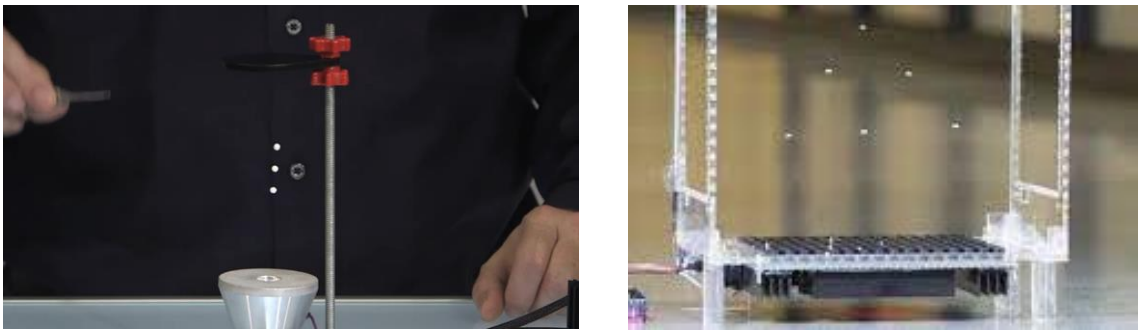


Figura 2: Levitación Acústica

En neurología se está usando, la Sonata para Dos Pianos K448 de Mozart, considerada la sonata antiepiléptica. Ya que ha mostrado, efectos positivos en personas con epilepsia, reduciendo la frecuencia de convulsiones. El equipo del Dr. Rei-Cheng Yang, ha dedicado los últimos años a descubrir el alcance que tiene el efecto Mozart en la epilepsia. En 2010 publicaron los resultados de un experimento en el cual sometían a 58 niños con diferentes tipos de epilepsia a sesiones de escucha de Mozart, comprobando que el número de crisis epilépticas y la duración de las mismas, disminuían durante y después de la pieza musical.

En la Universidad de Medicina de Geisel School en Dartmouth, (EE.UU.), un equipo coordinado por Robert Quon, empleó la técnica de electroencefalograma (EEG) para evaluar la actividad eléctrica en los cerebros de 16 adultos con epilepsia resistente a los medicamentos mientras escuchaban una serie de clips musicales de 15 o 90 segundos, incluido el de la Sonata K448. Los autores comprobaron que escuchar K448 causaba una reducción media del 66,5% en el número de picos de actividad eléctrica asociados con la epilepsia en todo el cerebro. Un análisis más detallado mostró que estas disminuciones eran mayores en las cortezas frontales izquierda y derecha del cerebro, partes del cerebro involucradas en la regulación de las respuestas emocionales, resonando en ondas theta. Investigaciones han sugerido que la actividad theta, puede estar asociada con respuestas emocionales, positivas a la música.

7. EL CEREBRO HUMANO Y LA INFLUENCIA DE LOS SONIDOS

Con la cimàtica podemos percibir el sonido con otro sentido, el de la vista, pero también podemos percibir las vibraciones con el sentido, del tacto. Por ejemplo, cuando se nos eriza la piel, al escuchar determinados sonidos. Las ondas sonoras se propagan más rápido en un medio elástico, por eso tiene más velocidad, en el agua que en el aire. Cuando estamos cerca del agua, escuchamos todo más cerca.

Las ondas sonoras nos atraviesan y nos influyen, el cuerpo humano está formado en su mayoría por agua (conductora de las ondas vibratorias). Cuando estas ondas navegan por el organismo, se activan respuestas, a través de las ondas cerebrales. El cerebro tiene una tendencia natural a sincronizar su actividad eléctrica con los estímulos externos. La actividad eléctrica cerebral se caracteriza por diferentes bandas de frecuencia, asociadas con diversos estados mentales. La sincronización de ondas cerebrales, consiste en transmitir una frecuencia, dependiendo de la necesidad, por ejemplo, se pueden transmitir ondas delta, para tratar el insomnio.

La neuroacústica es el estudio del sistema auditivo y su influencia en las funciones superiores del sistema nervioso, analiza la relación entre la audición y el cerebro; también se refiere a la aplicación de estímulos sonoros para influir en la actividad cerebral con el fin de promover el bienestar, la relajación, un mejor sueño y la mejora de funciones cognitivas. Implica el uso de sonidos, música y frecuencias específicas para sincronizar las ondas cerebrales, restableciendo patrones neuronales saludables y mejorar la calidad de vida.

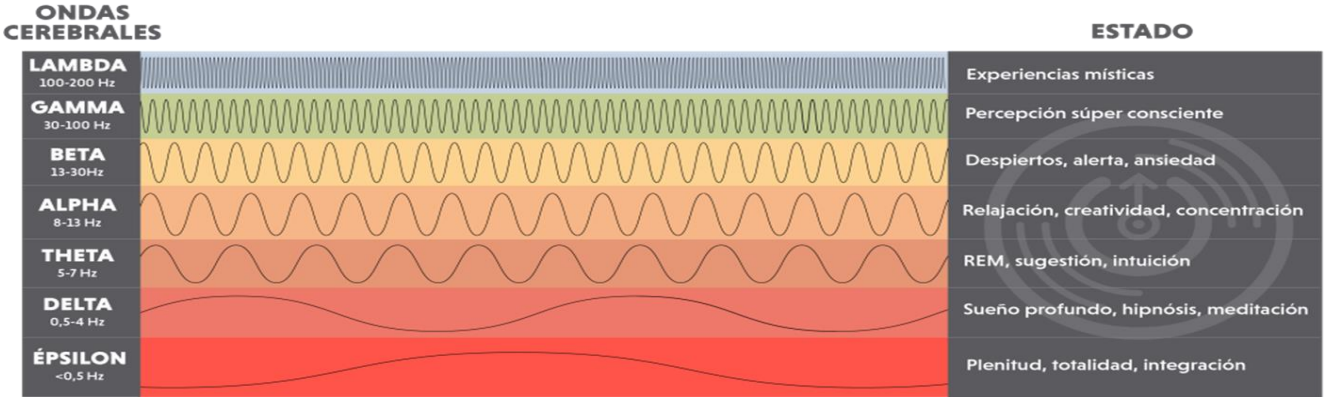


Figura 3: Ondas Cerebrales Humano

El doctor Jeffrey Thompson usando la neuroacústica como terapia, ha logrado demostrar que produce una sincronización espontánea de los hemisferios cerebrales. Estas vibraciones acústicas logran aumentar el nivel de ondas DELTA asociadas al sueño, las ondas THETA las cuales permiten el acceso a informaciones almacenadas en el subconsciente, para su reprogramación, las ondas ALPHA las cuales se asocian a estados de relajación y meditación profunda.

Las vibraciones sonoras se convierten en ondas eléctricas que entran a través del oído y que navegan por el nervio auditivo hasta la corteza auditiva: zona cerebral encargada de procesar el sonido. La sincronización de las ondas cerebrales con estímulos externos, es real y está comprobado en varios casos. Dependiendo del estado de alerta o de relajación de una persona, sus ondas cerebrales pueden vibrar a diferentes frecuencias.

Figura 4: Ondas sonoras, sistema auditivo y cerebro

Al realizar, la sincronización de la actividad cerebral con estímulos auditivos, se alinean la resonancia de las ondas cerebrales con el ritmo y la estructura de los sonidos, facilitando la percepción, la comprensión y la conexión emocional con el estímulo. El neurofeedback es una terapia no invasiva en expansión, se realiza mediante el registro en tiempo real de la actividad del cerebro, mientras se envían estímulos visuales y auditivos. Está siendo utilizada, para mejorar el rendimiento del cerebro o para tratar trastornos. Al permitir la renovación o mejora de la conexión neuronal, ayuda a personas con depresión, TDAH, ansiedad, epilepsia y disfunciones como el estrés crónico, las obsesiones y el insomnio.

Las ondas cerebrales son impulsos eléctricos que actúan como una especie de lenguaje entre nuestras neuronas, pensamientos y sentimientos. Es actividad eléctrica, generada por nuestro cerebro, en diferentes estados de conciencia. Es importante comprender nuestras ondas cerebrales y cómo pueden afectar nuestra mente y nuestro cerebro. Entender cómo funcionan, puede ayudarnos a mejorar nuestra concentración, reducir el estrés y aumentar nuestra creatividad, experimentando una vida diferente. La neurociencia moderna, plantea que podemos reprogramar nuestro cerebro, ya que cambia constantemente gracias a la neuroplasticidad. Distintos experimentos presentan, el fenómeno de la neurogénesis adulta, planteando que el cerebro siempre mantiene su capacidad de adaptación; generando la formación de nuevas conexiones neuronales, durante toda la vida. La neurociencia, ha demostrado que podemos "esculpir" activamente nuestro cerebro a través de nuestras experiencias, hábitos y aprendizajes. Exponiendo que no estamos "programados" definitivamente y que podemos reinventarnos, además de adaptarnos a cualquier edad.

En un documental de la BBC News Mundo, llamado “Mindfulness: cómo reconfiguré mi cerebro en 6 semanas”. La periodista Melissa Hogenboom, investigó si existe alguna manera de que podamos inducir un cambio cerebral significativo, explorando su propio cerebro. Luego de hacer meditación por 6 semanas, se sometió a un escaneo, en el que se evidenció, una disminución en el tamaño de la amígdala. La amígdala, aumenta su tamaño cuando estamos estresados o cuando se padece, depresión o ansiedad. Al reducirse su tamaño, se genera un efecto de reducción del estrés.

8. RUIDOS DE COLOR, CEREBRO HUMANO UN RADIO SINTONIZADOR

Federico Miyara plantea “Una cualidad importante del ruido que recién en los últimos tiempos comienza a reconocerse es su contenido semántico (es decir, relativo a su significado) y contextual. Como principio general, un ruido inteligible o fuera de contexto será más molesto y perturbador que uno neutro, ya que evocará sensaciones desagradables o desviará la atención. Así, la mayor parte de las personas encontrará más molesta una conversación apacible en la sala, a unos metros del dormitorio, cuando quieren conciliar el sueño, que muchas conversaciones todas juntas en un restaurante… El ruido no es necesariamente molesto. Por ejemplo, el ruido de la lluvia, a la mayor cantidad de la gente le causa placer. Lo mismo el ruido del viento, la brisa, el ruido de las hojas de los árboles. Inclusive el ruido de los pájaros son ruidos que son sedantes y son tranquilizadores…”.

Los ruidos, como todo sonido, tienen una longitud de onda, por lo tanto, un color asociado, de ahí que existan los denominados ruidos de color. La densidad espectral (potencia y distribución en el espectro de frecuencia) es una de las propiedades que pueden ser utilizadas para distinguir los diferentes tipos de ruido, ya que establecen, diferencias entre cada ruido. El ruido blanco es un tipo de ruido que tiene la misma potencia en todas las frecuencias, suena como la estática o el silbido de un televisor. El ruido rosa tiene más energía en las frecuencias bajas que el ruido blanco, pero menos que el ruido marrón y suena como las olas del mar, una cascada o la lluvia cayendo de forma constante. En algunos estudios se ha demostrado que el ruido rosa, mejora la calidad del sueño y la consolidación de la memoria. El ruido marrón, también conocido como ruido rojo, tiene más energía en las frecuencias bajas y menos en las altas. Suena como un estruendo bajo o un rugido profundo, similar al sonido del océano o de una tormenta lejana. El ruido azul, tiene más energía en las frecuencias más altas. Puede describirse como un silbido agudo, similar al sonido del vapor que sale de una tubería. El ruido azul se utiliza a veces en ingeniería de audio para crear sensación de espacio o profundidad. El ruido violeta es una versión más extrema del ruido azul, con aún más energía en las frecuencias más altas. Puede describirse como un muy sonido agudo, como el del taladro de un dentista.

Los colores del ruido, son una forma de clasificar, los distintos tipos de ruido que encontramos en nuestro entorno. Comprender las distintas características de cada tipo de ruido, puede ayudarnos a utilizarlos eficazmente en diferentes contextos.

Los sonidos binaurales son un fenómeno auditivo, que ocurre cuando dos tonos de diferentes frecuencias, que se presentan por separado a cada oído, provocan la sensación de un tercer tono que oscila a la frecuencia de diferencia de los dos tonos; se han utilizado durante miles de años en la medicina y las prácticas curativas orientales.

Fueron introducidos por primera vez en la cultura occidental, por el físico alemán Heinrich Wilhelm Dove en 1839. En su libro «Investigaciones experimentales en electricidad», Dove describió cómo usó, esos sonidos para inducir un estado hipnótico. Desde entonces, los ritmos binaurales se han utilizado como una forma de ayudar a las personas a relajarse, así como a mejorar el rendimiento físico y reducir la ansiedad.

El departamento de Psicología, de la Universidad de Duisburg-Essen, en Alemania, junto con la Universidad La Sapienza de Roma. Plantea que los sonidos binaurales, se pueden percibir en el rango de frecuencia de aproximadamente 1 a 30 Hz, un rango que coincide con las principales bandas de frecuencia del EEG humano. Lo que comprueba la hipótesis del arrastre de ondas cerebrales, que supone que la estimulación externa a una frecuencia determinada, provoca que la actividad electrocortical del cerebro oscile a la misma frecuencia. Concordando con la «Ley de Resonancia».

Nuestro cerebro es como una radio, él puede sintonizar distintas emisoras, en función de la actividad que queremos realizar. En base a las frecuencias que escuchamos y sentimos, nuestro cerebro envía señales y nuestro cuerpo reacciona. Por eso es importante, tener presente que los sonidos que nos rodean, nos influyen; algunos nos afectan, ya que son nocivos y nos generan enfermedades, otros nos benefician, mejorando nuestra salud. Siendo conscientes de la influencia de los sonidos, podemos conocer distintas frecuencias terapéuticas y animarnos a explorar en nosotros, con ellas, sintonizándonos y aprendiendo a disfrutar de sus beneficios, siendo una forma de programarnos; pues así, logramos inducirnos a determinados estados, dependiendo de las actividades que deseamos realizar.

9. ARTE TERAPÉUTICO CON SONIDOS, CINE MEDICINA

En la ciudad de Neuchatel, Suiza. Se puso en marcha un proyecto piloto, para ayudar a pacientes que padecen diversas enfermedades crónicas, con arte terapia. Planteando que los museos, pueden ayudar a curar la depresión o problemas de salud mental. En esta ocasión, los doctores en lugar de entregar recetas para obtener farmacéuticos, entregan a sus pacientes, entradas gratuitas a museos. De esa forma, brindando visitas al museo como receta médica, promueven la sanación a través del arte.

La Neurocinemática estudia cómo el cerebro procesa, almacena y recupera la información que percibe mediante las imágenes, recibidas a través de las plataformas audiovisuales. También, analiza el impacto de los soportes audiovisuales en la población. Indagando con estudios, se desea comprender qué le ocurre a nuestro cerebro, cuando vemos películas. Esos estudios neurocientíficos pueden ser aplicados al cine, dando lugar a lo que se ha llamado, neurocinema o neurocinemática. La propuesta, es que exista interés en la investigación, orientada hacia estudios sanitarios, en individuos que padecen algún tipo de enfermedad relacionada con la neurociencia. Actualmente, se realiza para entender qué pasa por nuestra cabeza, cuando estamos visualizando una película; y así, crear una película que genere un impacto, ante el espectador y asegurarse el éxito en su estreno. La neurocinemática, está poniendo a disposición de la ciencia, los conocimientos y recursos audiovisuales, generando nuevas líneas de investigación y un intercambio muy enriquecedor con el sector médico-sanitario. Esa interacción entre el arte y la ciencia, ha promovido la realización de distintos estudios neurocientíficos, que exponen novedosos tratamientos, aplicados a través del cine.

Entiendo que el cine como medio de comunicación, ha sido una herramienta utilizada por los medios hegemónicos, para manipular e instaurar estereotipos y conductas nocivas, en la población.

Pero también lo comprendo como un arte mágico, pues pienso que es una poderosa herramienta, que además de sacarnos de la realidad llevándonos a la fantasía y de ser un valioso aporte, en la construcción social. Es medicina, que nos trae muchos beneficios y que podemos incorporar en nuestra vida.

El cineasta Abbas Kiarostami escribió en 1995 para el centenario del cine, en París. “La butaca de cine es de mayor ayuda que el diván del analista. Al sentarnos en la butaca estamos solos con nosotros mismos y este es quizás el único lugar donde estamos tan unidos y a la vez tan distanciados los unos de los otros: ese es el milagro del cine”.

El cine argentino es reconocido a nivel mundial, es valorado por su calidad y diversidad de producción, ha obtenido reconocimientos internacionales significativos; destacando internacionalmente con premios en festivales importantes como los Oscar, Locarno y el Festival de Berlín. Este año “La ciénaga”, la primera película de Lucrecia Martel, fue elegida como la mejor del siglo en “La Internacional Cinéfila”, un sondeo en el que participan críticos, programadores y cineastas de todo el mundo.

Desde un enfoque crítico, pienso que, como sociedad, podemos usar el arte cinematográfico como una terapia no invasiva. Al implementarlo como tratamiento para enfermedades, se convierte en un tipo de medicina alternativa, pues además de transmitir nuestra cultura, aporta beneficios en la salud, de la audiencia. Creo que, al incorporar frecuencias terapéuticas en las bandas sonoras, creamos cine medicina con bandas sonoras terapéuticas; que además de aportar en la construcción social, genera beneficios en la salud de la audiencia y fomenta la cultura de la escucha.

En nuestra sociedad occidental, considerada la cultura del ojo, el sonido ha sido subestimado por muchos años. Afortunadamente, artistas, filósofos, investigadores, terapeutas y científicos, trabajan con el sonido y expanden su poder. Asu vez, el sonido, ha sido desvalorizado e incluso invisibilizado, en la industria cinematográfica. En su libro, “Como hacer el sonido de una película”, el sonidista Carlos Abbate dice: "Luz, cámara, acción..."; esta frase es tan famosa como inexacta, dado que falta el término "sonido"... es a partir de la aprobación del sonidista que se pone en marcha todos los mecanismos de una filmación. Este disparador se da con la voz de "anda"... emitida la señal, todos tienen la certeza que el entorno está controlado y de que no hay ruidos que puedan perturbar al desarrollo de la toma por filmar”.

Tuve la oportunidad de entrevistar a Carlos Abbate, por su participación en el área de sonido, en la película “El lado oscuro del corazón” de Eliseo Subiela. Este film, con escenas surrealistas y construido desde lo poético, narra la historia de un poeta que sobrevive y recorre Buenos Aires editando poesía comercial. Este personaje, desea encontrar a la mujer de sus sueños, aquella que lo comprenda y que lo haga volar.

En la entrevista comentó, que fue deseo del director realizar la película con poesías y boleros, sin pensar que generaría tanto éxito a nivel latinoamericano. Dijo que, en esa película, el sonido está trabajando por debajo de la música, pues algunos ambientes y efectos sonoros, están integrados a la música. También mencionó que se doblaron todos los diálogos, excepto el diálogo de Mario Benedetti, en el que recitó una poesía en alemán, que se hizo en directo. En esta película, la poesía es fundamental, al estar dentro de su dièGesis o universo creado, pues en muchos momentos se convierte en el sostén del relato; además es valorizada como moneda de intercambio, ya que el protagonista en varias escenas, va a un local de comidas y paga, creando poesía para el que vende la comida. Al incluir poesía, este film aportó, en la difusión de la poesía latinoamericana y fomentó en la audiencia la práctica de recitar poesía, animado a los espectadores, a imitar los diálogos de los personajes. A partir de estudios científicos, se ha llegado a la conclusión de que la poesía beneficia la salud ya que además de expandir el vocabulario, también ayuda en el desarrollo cognitivo.

Una prueba en la Universidad de Maranão, de Brasil, estudió el efecto de escuchar pasivamente música y poesía en 65 pacientes que sufrían dolor y depresión causada por el cáncer y sus tratamientos. Comprobando que las dos terapias generaron mejoras en la intensidad del dolor y el nivel de depresión de los sujetos, sugiriendo que la música, la poesía y otros estímulos no farmacológicos, pueden ayudar a reducir el dolor. Estos estudios, han alentado a clínicas, médicos y organizaciones a usar la poesía y el arte en general, como métodos de curación, lo que ha fomentado lecturas y talleres de poesía en hospitales y centros de salud. La poesía, es una expresión que, por su ritmos y musicalidad, puede experimentarse en todo el cuerpo. Siendo una condensación del poder del lenguaje y la música.

Además de composiciones como, Gloria RV 588 de Antonio Vivaldi, Fantasy D Minor y Saltzburg Symphomy No. 1 de Wolfgang Amadeus Mozart. En esa película, se incluyeron boleros, género musical considerado un crisol cultural, por que combina el lenguaje utilizado en la poesía europea, los ritmos africanos de los esclavos y los sentimientos de los pueblos indígenas de las Américas. Ese género, fue declarado Patrimonio Inmaterial de la Humanidad en el 2023.

Abbate contó que estando en el aeropuerto de Cuba, los trabajadores de la aerolínea le solicitaron sacarse fotos con él, cuando se enteraron que trabajó en esa película; ya que es muy conocida en ese país por su banda sonora, pues el bolero es de origen cubano.

Luego de analizar el documental "Mujer Medicina" de Daiana Rosenfeld, realizadora integral, en el que Fedra, la protagonista, se hace preguntas existenciales buscando herramientas y medicinas para su camino. Estuve hablando con la realizadora sobre su película, ella me comentó que se propuso narrar y hacer entrar al espectador en el mundo de la medicina y de las ceremonias, a través de Fedra, la protagonista. La película se filmó con un tono naturalista, pues transcurre en la selva y en la montaña, y narra un viaje, además de una transformación personal. Daiana comentó, que en la banda sonora se utilizaron distintos sonidos con una sutil distorsión y que los trabajaron en distintas capas, algunas más perceptibles que las otras; logrando generar una superposición de sonidos con distintos planos sonoros que se iban entrecruzando. Su objetivo era generar a través de las imágenes y sonidos esas sensaciones; esa sinergia, que se da dentro de una ceremonia y dentro de esos trabajos espirituales.

Evitando contar la experiencia narrativa personal del personaje, se propuso simular la subjetividad de la protagonista, siendo su objetivo transmitir esa profundidad y experiencia sonora, que se generan en una ceremonia, al realizarse en un espacio a oscuras. La directora utilizó recursos sonoros que trasmitían la amplitud de la percepción auditiva de la protagonista, durante esa experiencia en la que la audición se agudiza. En el diseño sonoro, la naturaleza como símbolo le sirvió para estructurar el relato, como la escena del clímax, en la que cae lluvia, mientras la protagonista está llorando. Dijo que el tambor en la película, tiene que ver con el llamado a las personas, el latido del corazón de la tierra y del pulso de nuestro corazón. Siendo una frecuencia vibratoria, el tambor nos lleva a cierto estado, así como las plantas alteran la conciencia, con el tambor también se llega a ciertas frecuencias y estados.

La película no solo narra y documenta a nivel sonoro lo que ocurría sobre la sanación, sino que también está diseñada como una obra o película que produce sanación, ya que trabaja con frecuencias terapéuticas, como si fuera una propia ceremonia; pues se utilizaron cuencos e instrumentos de sanación como el koshi, que fue sincronizado, en los planos detalles de insectos. Además, se incluyeron icaros o cantos amazónicos, de la comunidad Shipiba de Perú. Recurso sonoro que no solo encadena un plano con otro, sino que también aportan sanación en la audiencia, ya que, según la cosmovisión Shipiba, los icaros son cantos de carácter sagrado que guían y cuyo propósito, es la sanación. Así es que, a través del sonido, se pudo generar que la película pase por el cuerpo, siendo una experiencia para la audiencia, que acompaña a la protagonista desde lo emocional, visceral y sensitivo.

Por último, analicé el documental "Bajo las banderas el sol" de Juanjo Pereira. Documental completamente realizado con material de archivo, que expone de manera cronológica la dictadura de Paraguay y ese proceso de la historia, mostrando y configurando esa serie de eventos de un Paraguay, visto desde la perspectiva de los medios internacionales. Con esas imágenes y sonidos de distintas partes del mundo, el director se propuso evitar el uso de voz en off y con distintos recursos sonoros, transmitir el comentario propio. Es así que, al sincronizar discursos del dictador, con imágenes que contrastan su relato, se crea un relato tragicómico, además se incluyeron diálogos en diferentes idiomas, lo que genero un tipo de lenguaje universal. Esta película además de ser un referente por su banda sonora, es reconocida por su gran aporte en la memoria colectiva, al narrar esa historia, deja como legado ese conocimiento a las futuras generaciones.

10. TRANSMODERNIDAD Y CINE MEDICINA

El posmodernismo plantea que el conocimiento es construido desde distintas perspectivas y verdades, exponiendo que es necesario un abordaje crítico desde distintos enfoques y cosmovisiones. Como se plantea en la metáfora de "La pelota de colores", en la que estaban distintas personas alrededor de una pelota. Una persona decía que la pelota era de color azul, otra de color rojo, otra de color amarillo y así, distintas personas decían diferentes colores. Pero una persona, tomó la decisión de tomar distancia y ver la pelota con más panorama, dándose cuenta que la pelota era de muchos colores y que cada persona decía su verdad, decía un color dependiendo de su ubicación y de su punto de vista. Tomando el concepto de transmodernidad de Enrique Dussel, propongo que revaloricemos esas herramientas y conocimientos ancestrales, incorporándolos y fusionándolos con las tecnologías actuales.

Figura 5: Poster Películas "Relatos de archivo", Retrato de un Amanecer" y Festivales de cine.

Poniendo en práctica esa propuesta y metodología, vengo desarrollando bandas sonoras y exploraciones sonoras con frecuencias terapéuticas en diversas producciones. Como en el documental de derechos humanos, "Relatos de archivo", el cual tiene distintas versiones, una de ellas con accesibilidad para ciegos y sordomudos. En la segunda parte del documental utilicé, la frecuencia 7000 Hz, considerada terapéutica ya que estimula las células ciliadas, las cuales se atrofian en las personas que tienen tinnitus. Así, mientras la audiencia escucha la película, recibe un tratamiento terapéutico en su sistema auditivo.

Otro proyecto en el que puse en práctica esta metodología fue la película "Retrato de un amanecer", en el que hice uso de determinados cantos de pájaros, diseñando y grabando los paisajes sonoros de Maipú, la ciudad donde se realizó el film. Este largometraje, además de ganar distintos premios, evidenció que, si es posible generar bandas sonoras terapéuticas, ya que algunos espectadores de, comentaron que además de sentirse en el lugar de las escenas por sus sonidos, también sintieron la experiencia de ver la película en la sala de cine y sentirla en el cuerpo, pues manifestaron que sintieron muy parecido a cuando han asistido a un spa. También realicé una instalación sonora con frecuencias terapéuticas llamada Visualizando el sonido en el marco del Festival Amazonía del Plata. Y utilicé en un reel, para difundir el festival de Cine Underground en redes, la frecuencia de solfeggio 741hz; que estimula la curación de las células, al limpiar y eliminar las toxinas, de la célula misma.

11. DISEÑO MEDICINA CON BANDAS SONORAS TERAPÉUTICAS Y LA CULTURA DE LA ESCUCHA

Concluyendo, creo que el cine es una valiosa herramienta que puede generar grandes aportes en el campo de la medicina. Creando una sinergia entre las bandas sonoras y la ciencia, podemos generar una novedosa terapia y beneficiar nuestra salud con esa medicina artística. Mi propuesta a los colegas diseñadores de sonido, ecologistas sonoros y músicos, es que realicemos composiciones y bandas sonoras, que beneficien la salud.

Recopilando información sobre el potencial y los beneficios del sonido, desde distintas disciplinas y cosmovisiones ancestrales, aprendí sobre el potencial del sonido, siendo una poderosa medicina que podemos implementar en nuestra vida y proyectos. En la sociedad occidental la gente no se escucha porque escuchar requiere prestar atención, a diferencia de oír, para escuchar debemos prestar atención e interpretar. Por eso, importante cultivar la cultura la escucha, escucharnos y escuchar el paisaje sonoro o esos sonidos que nos rodean, con atención. La escucha es un músculo qué podemos ejercitar a diario, para ello hay distintas herramientas y ejercicios de escucha activa que podemos implementar, como los ejercicios de la metodología "Deep Listening" de Pauline Oliveros.

Como docente vengo aplicando y expandiendo herramientas como el desglose de sonido, herramienta que utilizamos en el cine, para diseñar el paisaje sonoro de cada escena. El desglose divide el paisaje sonoro, en cuatro cadenas o códigos de lenguaje, que son: diálogos, ambientes, foleys o efectos y música. En sonido cinematográfico, denominamos a los sonidos que están más cerca en primer plano sonoro y en segundo plano sonoro, a los sonidos que están más lejos. Al utilizar esta herramienta en las clases que vengo desarrollando, se le propone a los los estudiantes, que estructuren mentalmente los sonidos que los rodean y desglosen ese paisaje sonoro, clasificándolos y focalizando la atención en distintos planos sonoros.

Así, incentivamos y generamos la toma de conciencia, de la influencia de los sonidos en nosotros y en la sociedad.

Conociendo el potencial del sonido, desde distintas perspectivas y cosmovisiones, aprendemos a usar las distintas tecnologías ancestrales, que son herramientas que además de sanarnos, estimulan la escucha. Por ejemplo, implementando el circulo de palabra, ritual que realizan algunas comunidades en el que se sientan en circulo alrededor del fuego y cada uno o cada una, pide permiso para tomar la palabra y no se interrumpen; práctica que realiza, para transmitir de manera oral, sentimientos y conocimientos, ya sean de lo cotidiano o de su legado.

“Conviene remarcar la importancia de contar con información buena y completa sobre las posibles consecuencias del ruido, para lo cual debería incorporarse la higiene sonora como asignatura en las escuelas. Esta asignatura incluiría contenidos relativos a la sensibilización del oído para la escucha activa, por ejemplo, la identificación de los elementos que constituyen el paisaje sonoro, la identificación de los sonidos peligrosos y los saludables, etc., así como las técnicas de prevención, tanto individuales como sociales” (Miyara 2001).

Luego de impartir clases sobre el potencial del sonido y la cultura de la escucha, pienso igual que Federico Miyara. Pues llegué al entendimiento, de que es importante, enseñar estos temas y sembrar la cultura de la escucha en las escuelas, desde primaria. Fomentando el interés, la consciencia y la estimulación de la escucha, desde la infancia. Afortunadamente la cultura de la escucha se ha ido expandiendo, cada vez hay más personas interesadas en el poder terapéutico del sonido. A partir de un curso que vengo impartiendo se generó un grupo, que con el tiempo se transformó en una comunidad sonora, en la que compartimos información sobre sonido. Comunidad que se originó en una red social, por ahora está compuesta por casi 300 miembros y cada vez se va acrecentando.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al doctor Diego Litvinoff, qué ha sido mi mentor, sostén y guía en este camino, igualmente a mis compañeros del grupo de investigación del Instituto de Arte Americano e Investigaciones Estéticas “Mario J. Buschiazzo” (IAA – FADU – UBA). También a los docentes, Marcela negro Ricardo Iapichino, Alejandro Seba y Paraná Sendròs. Así mismo, agradezco a la Universidad de Buenos Aires y a la Asociación Argentina de Sonidistas Audiovisuales.

Agradezco profundamente a mi familia, por su amor incondicional y paciencia. También a Nicolás Gadda Thompson, a Jennifer Dávila, al Taita Ullpu y su Ayllu, a Marcela Guerra, al Taita Alex y a mamá Rosa. Gracias por todos sus valiosos conocimientos, herramientas y medicinas, que sembraron en mí, Jaylli Jaylli.

REFERENCIAS

[1] Convulsión: Revista Europea de Epilepsia “Conectado al sonido: El efecto del sonido en el cerebro epiléptico” Volumen 102, noviembre de 2022, páginas 22-31 eprint:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S105913112200214X

[2] Dussel, E. Transmodernidad e interculturalidad (interpretación desde la filosofía de la liberación) (2004)

[3] Litvinoff, Diego. Posimagen. Terrorismo en/ de la visibilidad contemporánea (2023)

[4] Miyara Federico. El sonido, la música y el ruido. Publicado en Tecnopolitan (2001)

[5] Murray, R. El nuevo paisaje sonoro una manual para el maestro de música moderno. Canadá. BMI Canadá Limited. (1969).

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Circuitos aurales en el marco de una red de territorios

Mg. Luna, Fabián Esteban. [†,1]

[†] Universidad Nacional Tres de Febrero, Buenos Aires

[1] fluna@untref.edu.ar

Resumen El artículo está enmarcado en el proyecto de investigación Red de Circuitos Aurales[1] [1]-[3] con radicación en la UNTREF. En este proyecto se plantea la señalización, descripción y puesta en valor de aquellos sitios que poseen particularidades en sus entornos acústicos también llamados Paisajes Sonoros. El proyecto realiza estas acciones en Reservas, parques naturales municipales, provinciales y áreas naturales protegidas públicas y privadas. También se extienden estas actividades en ámbitos urbanos [4]. El artículo desarrolla, con enfoque interdisciplinario, tres ejes temáticos vinculados al proyecto de la Red de Circuitos Aurales: (A) Paisajes sonoros y memoria colectiva, (B) Ecología acústica y educación ambiental, y (C) prácticas estéticas y dimensión social de la escucha. Estos ejes se articulan a partir de indagaciones aurales de campo, talleres de escucha, cartografías participativas, entrevistas y encuestas planteadas en esta investigación.

Palabras clave: Paisajes sonoros, ecología acústica, memoria colectiva, educación ambiental.

Abstract This article is part of the Aural Circuits Network research project [1]-[3], based at UNTREF. This project proposes the identification, description, and enhancement of places with distinctive acoustic environments, also known as Soundscapes. The project carries out these activities in reserves, municipal and provincial natural parks, and public and private protected natural areas. These activities are also extended to urban zones [4]. The article develops, with an interdisciplinary approach, three thematic axes linked to the Aural Circuits Network project: (A) Soundscapes and collective memory, (B) Acoustic ecology and environmental education, and (C) aesthetic practices and the social dimension of listening. These axes are articulated through aural field investigations, listening workshops, participatory mapping, and interviews proposed in this research.

keywords: Soundscapes, acoustic ecology, collective memory, environmental education

1. INTRODUCCIÓN

El sonido organiza espacios, marca temporalidades y condensa memorias [5]. Sin embargo, las políticas ambientales y las gestiones de preservación han privilegiado históricamente lo visual, subestimando la dimensión sonora de los entornos [6]. La Red de Circuitos Aurales plantea el diseño y señalización de recorridos de escucha en áreas tanto agrestes como urbanas con el fin de tomar conciencia acústica de estos territorios y poner en valor su patrimonio inmaterial. El artículo relaciona ejes, de manera integrada, que permiten comprender las diferentes dimensiones de este trabajo: cómo los sonidos constituyen memoria colectiva; cómo la ecología acústica se puede vincular con prácticas para el bienestar individual y comunitario; y de qué modo la educación ambiental propicia transformaciones sociales que habilitan a concebir nuestros entornos desde una dimensión aural con un enfoque crítico/reflexivo.

2. MARCOS TEÓRICOS

Paisaje sonoro: esta noción fue propuesta e impulsada por el compositor y pedagogo canadiense Raymond Murray Schafer en la década de 1970. Investigó cómo los paisajes sonoros influyen en la percepción de los seres vivos e incluso pueden reflejar la identidad cultural de un lugar [5].

[1] Proyecto de investigación Red de Circuitos Aurales que incluye a la propuesta que aquí presentamos (web del proyecto: www.reddecircuitosaurales.ar). Web-autor: www.linktr.ee/fabianestebanluna

Ecología acústica: campo interdisciplinario que estudia interacciones entre los sonidos, la naturaleza y las comunidades [7]; incorpora análisis cuantitativos (métricas acústicas) [8] y cualitativos. (percepciones) [9].

Acustemología: perspectiva que entiende la escucha como conocimiento situado y práctica cultural. La escucha que implica prácticas sociales, memoria y pertenencia. Desde estas perspectivas, los sonidos actúan como portadores de sentido y formas de apropiación y pertenencia histórica en relación a los territorios [10], [11].

Educación ambiental y política ciudadana de la escucha: prácticas artístico-pedagógicas [12]-[16] que utilizan lo sonoro para sensibilizar, enseñar y generar formas de participación y producción [17]-[19]. Se plantea también la escucha como esfera pública y política, cuando lo sonoro promueve acciones colectivas [20]. La idea de "ciudadanía acústica" articula derechos (a un ambiente sonoro saludable), deberes y prácticas participativas de gestión de lo sonoro [21], [22].

3. METODOLOGÍA

La investigación combina métodos mixtos y participativos aplicados en el marco del proyecto de la Red de Circuitos Aurales:

Relevamiento acústico: prácticas aurales multiescala (horarias, estacionales).

Cartografía colaborativa [23]: plataforma para reportes georreferenciados de circuitos y paisajes sonoros aportados por los integrantes de esta investigación, gestores y custodios de los territorios, visitantes ocasionales y comunidades.

Prácticas colectivas y talleres: Paseos sonoros (*soundwalks*) [24], [25], sesiones de discusión sobre estrategias de escucha, y registro/reflexión de experiencias aurales.

Entrevistas semiestructuradas: a guardaparques, pobladores, estudiantes y propietarios quienes aportaron narrativas sobre transformaciones sonoras del entorno, impactos y significados.

Análisis cualitativo y mixto: codificación temática de testimonios y triangulación con datos de relevamientos acústicos.

Estas aproximaciones metodológicas privilegian la co-producción de conocimiento con diferentes actores, robusteciendo la investigación al combinar saberes empíricos y sensibles.

4. EJE (A) — PAISAJES SONOROS Y MEMORIA COLECTIVA

Los sonidos actúan como marcas temporales y culturales [13]: el canto de una especie endémica, el rumor de un curso de agua, o la voz de comerciantes ambulantes constituyen emisiones sonoras que anudan experiencias y relatos. La memoria colectiva aquí no es solo archivo informativo, sino un entramado que orienta prácticas de pertenencia.

4.1 Evidencias empíricas

Identificación de *Marcas sonoras* [16] mediante entrevistas, relevamiento de paisajes sonoros en territorios y grabaciones, se identificaron sonidos recurrentes reconocidos como identitarios por pobladores locales, guardaparques y propietarios.

Mapas sonoros: la cartografía participativa mostró correlaciones entre lugares de memoria sonora y áreas de valor biológico y cultural.

Recuperación de relatos: los testimonios revelaron cómo la escucha activa y posibilita remembranzas (anécdotas, prácticas preexistentes desarrolladas en los territorios) que no emergen en inventarios tradicionales.

4.1.1 Implicancias

Patrimonio inmaterial: acciones para inventariar y proteger *Marcas sonoras* [16] como parte de políticas culturales.

Gestión territorial: incorporar variables sonoras en planes de manejo de los territorios para preservar condiciones acústicas que sostienen identidades locales.

5. EJE (B) — ECOLOGÍA ACÚSTICA Y EDUCACIÓN AMBIENTAL

La literatura que relaciona el ruido y la salud documenta efectos fisiológicos (estrés, trastornos del sueño) y cognitivos (atención, concentración). Inversamente, la exposición a sonidos naturales o ámbitos acústicamente no polucionados está asociada con la restauración psicológica y la reducción del estrés [26], [27].

5.1 Resultados

Patrones acústicos: en los puntos de escucha de los circuitos agrestes (que llamamos auditorios) se registraron índices significativamente más altos de lo que Schafer denomina entornos *hi-fi* [16], a diferencia de aquellas zonas perimetrales (también llamadas “de amortiguamiento”) afectadas por ruido antropogénico.

Observaciones conductuales: durante los paseos sonoros [19] se constató en los testimonios mayor atención aural sostenida durante las prácticas de escucha profunda [17].

5.1.1 Interpretación

Bienestar aural: la escucha consciente en entornos naturales emerge como potencial para la salud pública preventiva.

Integración en salud comunitaria: fomentar circuitos de bienestar aural como complementos a políticas de salud en entornos periurbanos.

Necesidades futuras: incorporación de mediciones biomédicas para robustecer y fundamentar vínculos entre paisajes sonoros *hi-fi* y salud.

6. EJE (C) — PRÁCTICAS ESTÉTICAS Y DIMENSIÓN SOCIAL DE LA ESCUCHA

Las artes sonoras funcionan como dispositivos que articulan producciones artístico-pedagógicas y concientización individual y colectiva de las escuchas [18], [20], [24].

6.1 Prácticas implementadas

Diseño de auditorios (zonas agrestes): se desarrollaron plataformas con criterios estéticos con integración del entorno y del cuidado del medio ambiente (materiales reciclables) que buscan focalizar y jerarquizar las prácticas aurales [1].

Talleres en centros de enseñanza: se combinaron análisis de grabaciones de paisajes sonoros con ejercicios creativos de composición sonora, partituras analógicas con fundamentación de estas experiencias. Las acciones se desarrollaron en el marco del currículo de la materia “Estéticas sonoras

contemporáneas", en el Conservatorio de la Escuela Superior en Música J. P. Esnaola (Terciario). Bs. As. Argentina.

6.1.1 Resultados

Competencias desarrolladas: principios de acústica, pensamiento crítico sobre el impacto humano en los entornos sonoros, habilidades técnicas en grabación y edición de audio.

Cambio actitudinal: los estudiantes evidenciaron mayor atención de los paisajes sonoros mediante prácticas aurales que permitieron focalizar y poner en valor los entornos sonoros.

Comunidad: la implicación en la búsqueda, registro y análisis de los paisajes sonoros fomentó la apropiación y pertenencia de los territorios en donde cada participante realizó las actividades.

7. PROPUESTAS

Promover en planificación y gestión de los territorios normas de protección de paisajes sonoros *hi-fi* como parte del patrimonio inmaterial.

Implementar circuitos urbanos de bienestar aural en metrópolis con alta polución acústica.

Diseñar currículos académicos que integren la escucha crítica de los paisajes sonoros.

Fomentar las prácticas aurales como vía para implementar políticas de divulgación y sensibilización comunitaria.

8. DISCUSIÓN INTEGRADORA

Los tres ejes interactúan: la preservación y concientización de paisajes sonoros promueve la memoria colectiva de los entornos; la articulación con la educación multiplica la capacidad de la apropiación de los paisajes sonoros *hi-fi* por parte de los estudiantes y comunidades; y la ecología acústica aporta métricas que legitiman demandas sociales de hábitat. Juntos constituyen una matriz que permite transformar la escucha en práctica pública y a su vez de argumentación política: desde la evidencia acústica hasta la concientización y sensibilización aural ciudadanía.

Se evidencia, además, una tensión: la mediación tecnológica (*apps*, grabadores) potenció el alcance de estas prácticas y su documentación, pero también planteó el desafío de evitar que la tecnología sustituya la experiencia directa de escucha. La solución pasa por un diseño didáctico que use la tecnología como herramienta de registro y reflexión, no como fin.

9. CONCLUSIONES

La Red de Circuitos Aurales demuestra que los paisajes sonoros requieren enfoques integrados para su estudio y puesta en valor. Para esto, se requiere integrar estudios y proyectos que desarrollen la cartografía de los territorios con un enfoque aural que sean funcionales tanto para las comunidades como también aplicables en la gestión de políticas públicas. Y diseñar materiales pedagógicos transversales para la educación formal y no formal.

REFERENCIAS

[1] F. E. Luna, *Circuitos Aurales y paisajes sonoros*. Actas del III Congreso Internacional de artes: revueltas del arte. UNA. Buenos Aires https://assets.una.edu.ar/files/file/rectorado/2024/jia/eje-3/EJE%203.3_13.%20LUNA.pdf (2023).
[2] F. E. Luna, *Una red de Circuitos Aurales*. Actas de Atemporánea: IV Festival Internacional de Música Contemporánea del Conservatorio Superior de Música "Astor Piazzolla". Buenos Aires. Argentina.

https://cmbsas-caba.infd.edu.ar/sitio/wp-content/uploads/2023/12/Actas-de-Atempora%CC%81nea-2023.pdf (2023).
[3] F. E. Luna, *Acuerdos y tensiones para la puesta en práctica de una red de circuitos de escucha territorial*. Actas del 1er Congreso Latinoamericano de Ciencia, Tecnología y Sociedad. Desafíos y Escenarios de Postpandemia. Edit. Universidad Nacional de San Luis. Argentina. https://www.academia.edu/99535737/Acuerdos_y_tensiones_para_la_puesta_en_pr%C3%A1ctica_de_una_red_de_circuitos_de_escucha_territorial (2022).
[4] F. E. Luna, *Circuitos de contemplación sonora en contextos urbanos*. Coda II. Experiencias, ensayos e investigación en educación musical. Revista de actas del EPPEM - 2024 de la Escuela Superior de Educación Artística en Música Juan Pedro Esnaola. Buenos Aires. Argentina. https://drive.google.com/file/d/1VZ5GzuNTYxqSlXuSDDLQjbflTxelQ5pK/view (2024).
[5] R. M., Schafer, *El paisaje sonoro y la afinación del mundo*. Intermedio. Barcelona. España. (2013).
[6] A. Ford, Adam, *En busca del silencio. La atención plena en un mundo ruidoso*. Edit. Siruela. España. (2017).
[7] K. Wrightson, *Una introducción a la Ecología Acústica*. eMe Estudio de música electroacústica. Recuperado el 16/7/2023 https://www.eumus.edu.uy/eme/ps/txt/wrightson.html . (2006).
[8] ITSGOIA, *Mapa de ruido de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires*. ITSGOIA – Informe Técnico de la Subgerencia Operativa de Impacto Acústico. URL: https://buenosaires.gob.ar/impacto-acustico/mapa-de-ruido (2020).
[9] UNESCO, Convention for the Safeguarding of the Intangible Cultural Heritage.World Health Organization (WHO). Environmental Noise Guidelines for the European Region. (2005).
[10] S. Feld, *Waterfalls of song: An acoustemology of place. In Senses of Place*. SAR Press. (1996).
[11] S. Feld, *Una acustemología de la selva tropical*. Revista Colombiana de Antropología. 49 (1): 217-239 (2013).
[12] R. M., Schafer, *Hacia una educación sonora*. Pedagogías musicales abiertas, Buenos Aires. (1994).
[13] R. M., Schafer, *El Nuevo paisaje sonoro. Un manual para el maestro de música moderno*. Ricordi. Buenos Aires. (1985).
[14] R. M., Schafer, *El rinoceronte en el aula*. Ricordi. Buenos Aires. (1985).
[15] R. M., Schafer, *Limpieza de oídos*. Ricordi. Buenos Aires. (1984).
[16] R. M., Schafer, *Our Sonic Envionment and The Soundscape the Tuning of the World*. Destiny Books. Rochester, Vermont. (1977).
[17] P. Oliveros, *Deep Listening. Una práctica para la composición sonora*. Dobra Robota Editora. Buenos Aires. (2019).
[18] B. Truax, *Acoustic Communication*. Ablex Publishing. (2001).
[19] H. Westerkamp, *Soundwalking. Sound Heritage*, Volumen III número 4, Victoria B.C. (1974).
[20] L. Kühne, *Sobre relaciones aurales* estructurales *en el espacio público*. Comp: Lukas Kühne y Fabrice Lengronne. *Forma y sonido. Quince años de arte sonoro en el Uruguay*. Edit. Universidad Nacional de Quilmes. Bernal. Argentina. (2021).
[21] B. LaBelle, *Acoustic Territories. Sound Culture and Every day*. Continuum.NY. (2010).
[22] B. LaBelle, *Agencia sónica. El sonido y las formas incipientes de resistencia*. Universidad de JAEN. UJA. España. (2020).
[23] Iconoclasistas, *Manual de mapeo colectivo. Recursos cartográficos críticos para pprocesos territoriales de creación colaborativa*. Buenos Aires: Tinra Limón. https://iconoclasistas.net/ (2013).
[24] H. Westerkamp. *Tres ideas. Entrevista de Leonardo Fiorelli a H. Westerkam*. Escuela Universitaria de Música. Uruguay. https://www.eumus.edu.uy/eme/ps/txt/wester_ent.html (2003).
[25] H. Westerkamp. *Soundwalking as Ecological Practice*, In The West Meets the East, Proceeding for the International Conference on Acousytic Ecology. Hirosaki University, Hirosaki, Japan. https://hildegardwesterkamp.ca/writings/writings-by/?post_id=14&title=%E2%80%8Bsoundwalking-as-ecological-practice---2023-update:-spanish-translations-published---2-publicaciones-en-espanol (2006).
[26] F. K. Aletta, Soundscape descriptors and predictive models. Landscape and Urban Planning. (2019).
[27] R. A. Domínguez Ruiz, *Violencia acústica y cuerpo social. Ruido en las ciudades latinoamericanas*. Congreso ALAS. Chile. Academia web. https://www.academia.edu/16851064/Violencia_ac%C3%BAstica_y_cuerpo_social_El_ruido_en_las_ciudades_latinoamericanas (2011).

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Análisis y caracterización de corredores urbanos para la calidad acústica. Casos de estudio en Tafí Viejo

Juarez, Isabel [†,1]; Cazón Narvaez, Agustina [†,2]; Garzón, Beatriz [†,3]; Cancino, Victor Luis [‡,4]

[†] Grupo de Hábitat Sustentable y Sostenible (GHabSS); Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional de Tucumán (UNT) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET). Av. Néstor Kirchner 1900, San Miguel de Tucumán, CP 4000, Tucumán.

[‡] FAU, UNT.

[1] isabeljuarez.arq@gmail.com, [2] agus.cazon93@gmail.com, [3] bgarzon2022@gmail.com, [4] luiscancino.1804@gmail.com

Resumen El Paisaje Sonoro, entendido como el conjunto de sonidos que caracterizan un determinado entorno, no sólo es una herramienta para aprender a escuchar y valorar el entorno acústico urbano, sino que también es un medio para generar conciencia sobre la emisión de los diversos sonidos y los efectos negativos provocados por la contaminación acústica. En relación a ello, el presente trabajo, estudia el comportamiento acústico de dos principales corredores urbanos de la ciudad de Tafí Viejo, en la provincia de Tucumán. Este análisis permite considerar la adecuación acústica como una variable clave en el diseño urbano y edilicio, promoviendo entornos sonoros más sustentables y saludables. La investigación se desarrolla en base a una metodología mixta que combina enfoques cualitativos y cuantitativos. Cualitativos, mediante la realización de encuestas y entrevistas a usuarios, residentes y actores claves en la toma de decisiones, etc.; y cuantitativos, a través de la sistematización de los datos obtenidos a través de mediciones acústicas con instrumental normado. Los resultados revelan niveles de contaminación acústica superiores a los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud, y con usuarios que perciben disconfort sonoro. Esto refuerza la necesidad de integrar criterios acústicos en la planificación urbana.

Palabras clave: paisaje sonoro, ejes urbanos, sustentabilidad.

Abstract
The soundscape, understood as the set of sounds that characterize a given environment, is not only a tool for learning to listen to and appreciate the urban acoustic environment, but also a means of raising awareness about the emission of various sounds and the negative effects caused by noise pollution. In relation to this, this study examines the acoustic behavior of two main urban corridors in the city of Tafí Viejo, in the province of Tucumán. This analysis allows acoustic adequacy to be considered a key variable in urban and building design, promoting more sustainable and healthy sound environments. The research is based on a mixed methodology that combines qualitative and quantitative approaches. Qualitative approaches include surveys and interviews with users, residents, and key decision-makers, etc.; quantitative approaches include the systematization of data obtained through acoustic measurements with standardized instruments. The results reveal noise pollution levels above the limits recommended by the World Health Organization, with users perceiving noise discomfort. This reinforces the need to integrate acoustic criteria into urban planning.

Keywords: soundscape, urban axes, sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las ciudades enfrentan múltiples desafíos ambientales que afectan la calidad del hábitat y la salud de sus habitantes. Entre ellos, la contaminación acústica se destaca por su impacto creciente en contextos urbanos, comúnmente minimizado o normalizado por los ciudadanos, y asociada principalmente al transporte motorizado, a actividades comerciales y a la intensificación del uso del espacio público [1]. Estudios previos en América Latina [2],[3] han demostrado que los

corredores viales son focos de ruido, debido al tránsito vehicular, especialmente motocicletas y transporte público, y a la densificación urbana.

En diversos estudios, se indica que la exposición crónica a niveles sonoros elevados se relaciona con alteraciones del sueño, estrés, efectos cardiovasculares y pérdida de calidad de vida [4],[5]-[6]. Según la OMS (*Organización Mundial de la Salud*), el ruido es el segundo factor ambiental más perjudicial para la salud y la exposición prolongada a niveles de ruido superiores a 55 dBA durante el día y 45 dBA durante la noche, puede provocar efectos negativos en el bienestar de la población [7]. En grandes y pequeñas ciudades, se observan patrones similares: múltiples estudios muestran que ejes viales y corredores urbanos suelen registrar niveles de ruido por encima de los umbrales recomendados, y que las políticas de control y adaptación acústica muchas veces son insuficientes o fragmentadas [8], [9].

Paisaje sonoro se define como el conjunto de eventos acústicos que caracterizan un espacio y es una herramienta fundamental para evaluar el confort urbano, ya que permite ampliar la mirada, desde una perspectiva física hacia una interpretación socio-cultural del entorno o ambiente. Este término o en su denominación en inglés como *soundscape* es abordado por la norma ISO 12913-1 como "la percepción del entorno acústico, en contexto, por una persona o grupo de personas" [10], lo que introduce la dimensión subjetiva en el análisis acústico. Así, la investigación no solo se centra en datos técnicos, sino también en la percepción y valoración de los usuarios. Tal es así, que permite comprender el entorno acústico como una dimensión esencial de la calidad urbana, no sólo en términos físicos, sino también perceptivos y culturales, "como parte integral de la experiencia urbana" [11]. Por lo cual, reconocer el paisaje sonoro como parte del diseño urbano implica, no solo controlar niveles de ruido, sino también promover entornos auditivos que favorezcan el bienestar social y ambiental.

Partiendo de este marco, la ciudad de Tafí Viejo, en la provincia de Tucumán, presenta corredores urbanos de alta densidad vehicular y actividad comercial, que generan condiciones acústicas críticas para los residentes y usuarios. Dicha ciudad no es ajena a la problemática del ruido urbano: el incremento del parque automotor, la escasa regulación del uso del suelo, la ausencia de criterios acústicos en el diseño urbano y la insuficiencia de áreas verdes contribuyen a un entorno acústicamente degradado. Debido a esto, el presente trabajo se propone analizar el comportamiento acústico de dos de estos corredores urbanos principales, integrando y combinando metodologías cuantitativas y cualitativas, a través de mediciones con instrumentales normalizados para cuantificar niveles de presión sonora y su variación temporal, y herramientas cualitativas para captar las percepciones y las demandas sociales vinculadas al paisaje sonoro. Los espacios públicos urbanos se convierten en territorios clave para diagnosticar, comprender y mitigar los efectos del ruido, al ser lugares de encuentro, recreación y tránsito cotidiano. Por lo que este abordaje mixto, permite no sólo diagnosticar el estado acústico actual de los ejes, sino también proponer criterios de adecuación urbana que integren y articulen normativa, diseño urbano y acciones de gestión territorial.

2. METODOLOGÍA Y EVALUACIÓN ACÚSTICA

El área de estudio comprende dos corredores principales de la ciudad de Tafí Viejo, caracterizados por un alto flujo vehicular y actividades comerciales, institucionales y residenciales. La investigación adopta una metodología mixta, que combina técnicas cualitativas y cuantitativas.

Para la evaluación sonora, se efectuaron mediciones acústicas mediante sonómetros normados, siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 4113 [12], en dos periodos:

a) Eje 1: septiembre de 2020, en contexto de DISPO (*Distanciamiento Social, Preventivo y Obligatorio*), según Decreto de la Nación Argentina [13].

b) Eje 2: abril de 2023, con funcionalidad normal de actividades.

En cada uno de los ejes, se distinguen 15 puntos estratégicos, que permiten conocer las condiciones y características del sector; elegidos en base a los cruces con calles o avenidas, con mayor concentración de actividades y diferente tránsito peatonal y vehicular. En cada uno se analizaron las situaciones físicas, sociales, culturales y ambientales de su entorno, con la influencia de espacios verdes públicos en cada corredor.

Paralelamente, se realizaron 20 encuestas a residentes y usuarios de los corredores analizados, con el fin de relevar percepciones sobre la temática. Los datos fueron procesados para su comparación con los valores admisibles de la OMS, lo que permitió articular información objetiva y subjetiva para la caracterización de los paisajes sonoros urbanos en cuestión.

2.1 Sectores urbanos analizados

Tafí Viejo es una ciudad ubicada a 12 km al Noroeste de SMT (*San Miguel de Tucumán*), con una población estimada de 85.548 habitantes [14] y constituye el segundo municipio más poblado de la provincia de Tucumán, detrás de SMT. Su estructura urbana presenta un trazado compacto, con ejes viales que articulan la movilidad y sus diversas actividades. Además, es conocida como la “Capital Nacional del Limón”, por su producción y exportación de cítricos, lo cual le da un perfil agroindustrial importante.

Por su proximidad con SMT, muchas personas residen en esta ciudad, pero trabajan o realizan actividades cotidianas (educativas, administrativas, comerciales, de salud) en la capital provincial. Esta dinámica lo convierte en ciudad “dormitorio”, que puede inferirse por la interrelación funcional con SMT y su vinculación con el transporte público.

Este trabajo se orienta al análisis de la calidad acústica en espacios públicos urbanos exteriores de dos corredores principales y sus áreas de influencia en la ciudad de Tafí Viejo. Para ello, se seleccionaron como casos de estudio: Eje 1) Avenida del Perú Sud, y Eje 2) Calle San Martín.

Ambos ejes poseen una relevancia particular dentro de la estructura urbana del municipio, aunque con características diferenciadas en cuanto a sus dinámicas sociales, funcionales y de movilidad. La elección de estos corredores responde al interés de establecer una comparación entre ellos, considerando su papel en la vida cotidiana de los habitantes y su impacto en la percepción sonora del entorno.

2.1.1 Avenida del Perú Sud

Representa una vía principal de ingreso desde el sur, por lo cual contiene una alta densidad vehicular, peatonal y presencia de transporte público. Tiene un recorrido en diagonal, que permite conectar al municipio con las principales vías, rompiendo con la estructura de damero que lo estructura. En alguno de sus cruces con calles rectas, se generan sectores de espacios verdes como plazoletas que dan imagen de hitos o nodos dentro del eje, con la posibilidad de transformarlos en interesantes puntos sustentables.

En la figura 1 se puede ver los 15 puntos críticos analizados, de los cuales 3 son puntos verdes que nos permitirán comparar sus condiciones acústicas dentro del eje: Punto 3: Plazoleta Gral. San Martin; Punto 8: Plazoleta Gral. Belgrano; Punto 11: Plazoleta de la Madre.

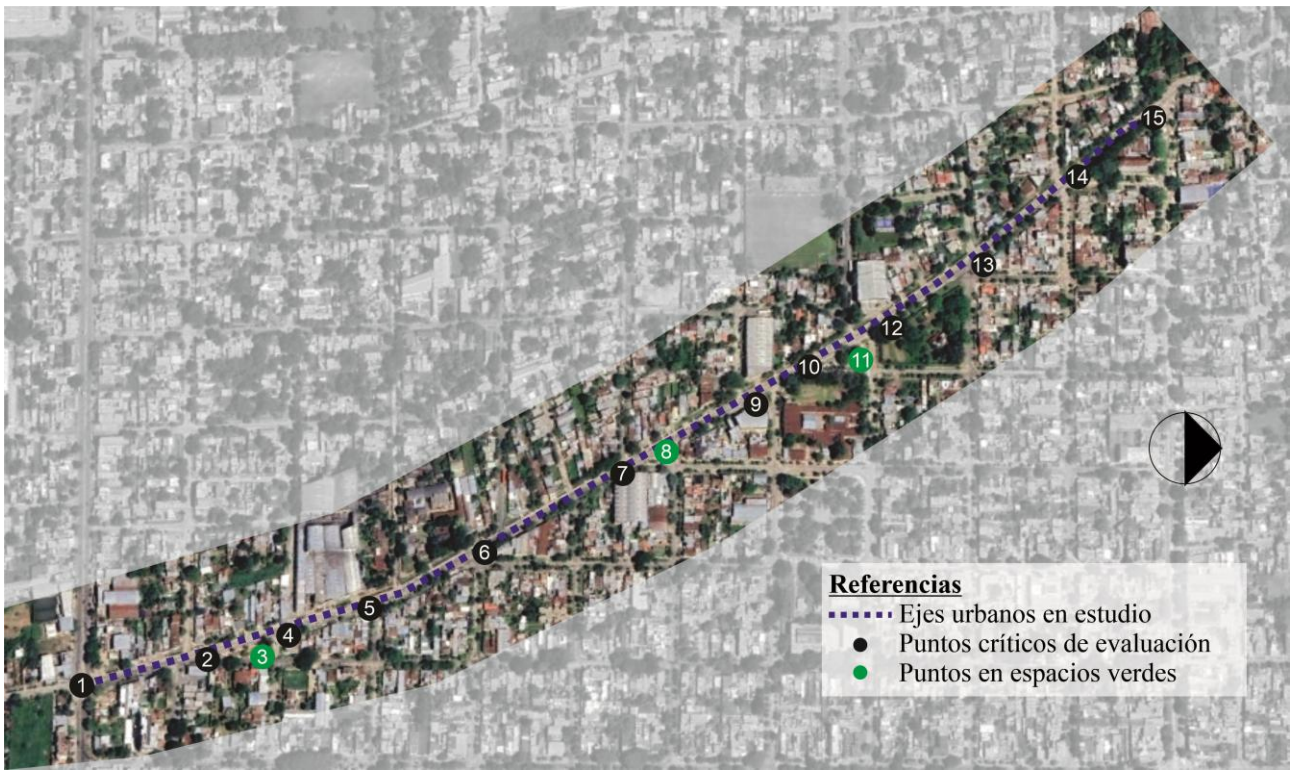


Figura 1: Puntos seleccionados en eje 1.

2.1.2 Calle San Martín

Al estar cercano a instituciones municipales, se caracteriza por ser un corredor con diversas actividades: residenciales, comerciales y administrativas, con intensa actividad peatonal y vehicular. A diferencia del eje 1, se desarrolla de manera recta, con circulación en dirección unificada de Norte a Sur, por lo cual es una vía de salida del centro de la ciudad. Se analizan los puntos, con la presencia del espacio verde de Plaza Bartolomé Mitre, para analizarlos y luego comparar con el primer eje en estudio.

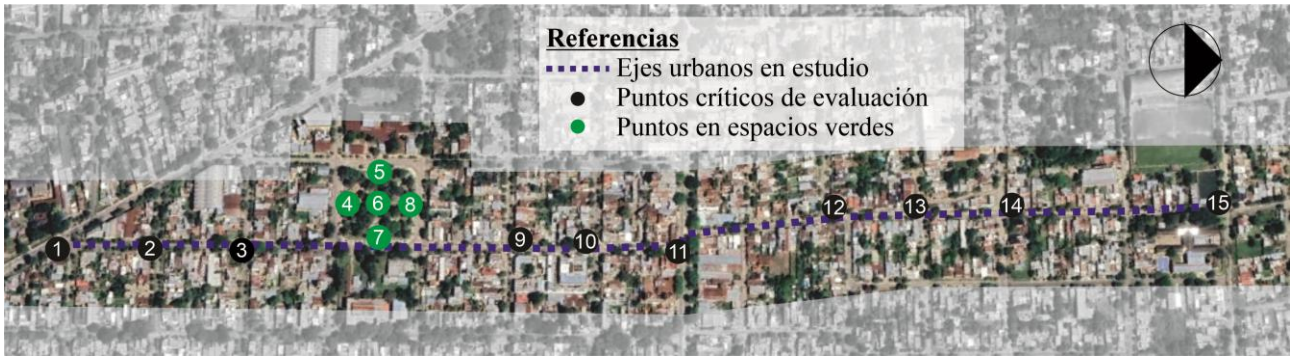


Figura 2: Puntos seleccionados en eje 2.

Ambos corredores concentran gran parte de la actividad urbana, lo que los convierte en puntos clave para evaluar la calidad acústica.

2.2 Enfoque cuantitativo

Para el análisis de los indicadores cuantitativos de las condiciones acústicas, en las mediciones de niveles de presión sonora, se realizaron considerando las siguientes especificaciones de la norma IRAM 4113: “Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental, I y II parte” e ISO 1996-1:

- *Instrumental*: Sonómetro Digital marca Lutron (Integrating Sound Level Meter SL-4035SD) clase 2 con levantamiento de datos en una tarjeta de memoria para grabar los valores en un Software de Hoja de Cálculos que incluye el registro de niveles sonoros en tiempo real, cada 2 segundos.
- *Indicadores sonoros registrados*:
  - El nivel sonoro equivalente (LAeq) constituye uno de los indicadores más utilizados en estudios de contaminación acústica urbana, ya que representa un valor único que sintetiza la energía acústica total registrada durante un período de tiempo determinado. LAeq permite comparar diferentes escenarios acústicos y evaluar su impacto en la exposición de la población, constituyendo la métrica de referencia en normativas internacionales y locales.
  - Por su parte, los niveles percentiles se emplean para caracterizar la variabilidad temporal del paisaje sonoro. Entre los más utilizados se encuentran:

    L10: nivel sonoro que se supera durante el 10% del tiempo de medición. Se interpreta como un indicador de los picos de ruido o de los eventos más frecuentes de elevada intensidad, generalmente asociados al tráfico vehicular pesado o a situaciones de tránsito intenso.

    L90: nivel sonoro que se supera durante el 90% del tiempo de medición. Se lo considera un estimador del ruido de fondo o nivel sonoro basal del área, ya que refleja los valores más estables en ausencia de eventos puntuales de elevada magnitud.

  La combinación de LAeq, L10 y L90 permite obtener una descripción integral del ambiente acústico: mientras el LAeq resume la exposición total, los percentiles ofrecen información sobre la estructura interna del ruido urbano, diferenciando entre el ruido basal y los eventos sonoros dominantes. Esta metodología resulta particularmente útil en la caracterización de corredores urbanos con alta variabilidad en el flujo vehicular, como los de Tafí Viejo, donde conviven periodos de tráfico intenso con momentos de relativa tranquilidad.
- Periodos: fueron efectuadas en dos periodos y en cada uno de los canales, en horarios de mayor actividad y mayor circulación vehicular. Cada medición tuvo una duración de 10 a 15 minutos.
  - Eje 1 en septiembre 2020, en el intervalo de 16 a 19 horas;
  - Eje 2 en abril 2023, entre 11 a 14 horas.

2.3 Enfoque cualitativo

En la investigación cualitativa, las encuestas constituyen una herramienta fundamental aplicada al estudio del paisaje sonoro, ya que permiten recoger percepciones, actitudes y valoraciones subjetivas de los usuarios respecto al entorno acústico. Mientras que las mediciones instrumentales aportan información objetiva acerca de los niveles de presión sonora, las encuestas contribuyen a comprender cómo los individuos interpretan y experimentan dichos niveles en su vida cotidiana [15]. Además, posibilita evaluar variables como el grado de molestia, la identificación de fuentes sonoras más perturbadoras, y la percepción de impactos en la salud y calidad de vida. [16], [17].

Algunos trabajos [18] demostraron que, en áreas residenciales de Curitiba (Brasil), la percepción de la molestia asociada al tráfico vehicular superaba la predicción basada únicamente en indicadores acústicos normativos. De manera similar, estudios en Argentina evidencian que los habitantes de corredores urbanos valoran de forma diferenciada los sonidos de origen natural y los de origen antrópico, incluso cuando los niveles de presión sonora son comparables [19]. Por lo tanto, la inclusión de encuestas en investigaciones de paisaje sonoro no solo aporta información cualitativa clave, sino que también refuerza la pertinencia de incorporar la dimensión social en la planificación urbana y en las estrategias de mitigación acústica.

3. RESULTADOS

En relación al análisis cuantitativo, con el registro de datos de las mediciones se realizaron fichas de relevamiento y gráficos de niveles de presión sonora, permitiendo la comparación en los distintos puntos y a su vez, caracterizar cada sector. También, se elaboraron perfiles urbanos, donde se consideraron las características físicas y morfológicas de cada punto crítico implicado en el estudio, como ser, anchos de vereda, distancias entre calzadas, alturas de fachada de las construcciones inmediatas y la vegetación presente.

El análisis cualitativo fue derivado de los resultados de las encuestas realizadas a 20 personas en cada eje, permitiendo visualizar mediante gráficos de porcentajes la valoración subjetiva de la temática.

3.1 Resultados de las mediciones

Las mediciones y relevamiento en cada eje fueron ejecutadas en forma conjunta el mismo día. Los datos obtenidos fueron comparados con el valor de referencia de 55 dB(A).

3.1.1 Eje 1 – Avenida Perú del Sud:

En la Figura 3, se puede observar la comparación de los valores de LAeq, L10 y L90, respecto al valor recomendado por la OMS em todos los puntos del eje en consideración. El punto 11 representa el menor nivel de LAeq con 66,6 dBA, de acuerdo al resto del eje urbano, el cual fue relevado en uno de los 3 espacios verdes. En el punto 5 del cruce de Av. Perú del Sud con calle San Juan, se midió el valor intermedio de 72,3 dBA para LAeq, donde se localiza una fábrica de plásticos. El sector más conflictivo fue en el punto 9 del cruce con calle Bartolomé Mitre, donde se aprecian los mayores niveles con valores de 78,5 dBA, al estar en presencia de diversas actividades como ser: instituciones educativas, depósitos con entradas y salidas de camiones, comercios y residencias.

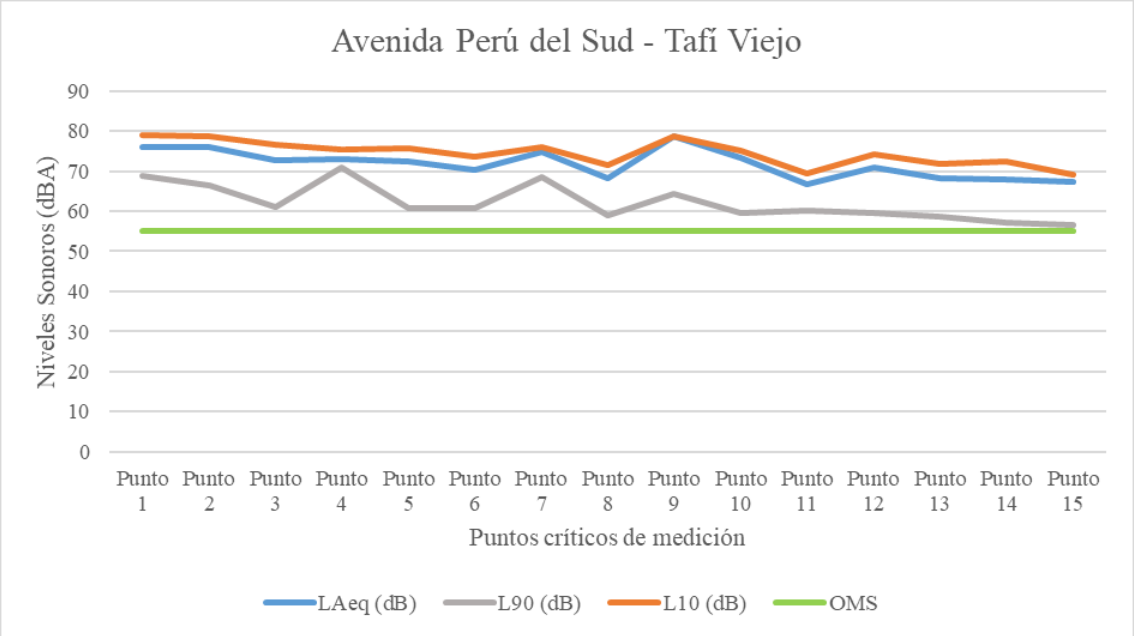


Figura 3: Resultados de las mediciones obtenidas en el eje 1.

3.1.2 Eje 2 – Calle San Martín:

Respecto al segundo eje en estudio, se pudieron obtener valores de percentil L90 por debajo de los 55 dBA, que representa un posible ruido de fondo en el corredor. De igual manera que el eje 1, los valores son superiores en lo que corresponde a Nivel Sonoro Continuo (LAeq) en todos los puntos del canal urbano.

Los valores menores se muestran en el Punto 6 ubicado en el centro de la Plaza Bartolomé Mitre, con registro LAeq de 63 dBA. En el punto 1 del cruce de calles San Martín y Entre Ríos al inicio de la medición, con LAeq de 67,7 dBA representan los valores intermedios. Los registros más elevados resultaron en el Punto 11 con 75,8 dBA, en el cruce del corredor en estudio con otra vía de carácter estructurante de la ciudad como lo es Avenida Alem.

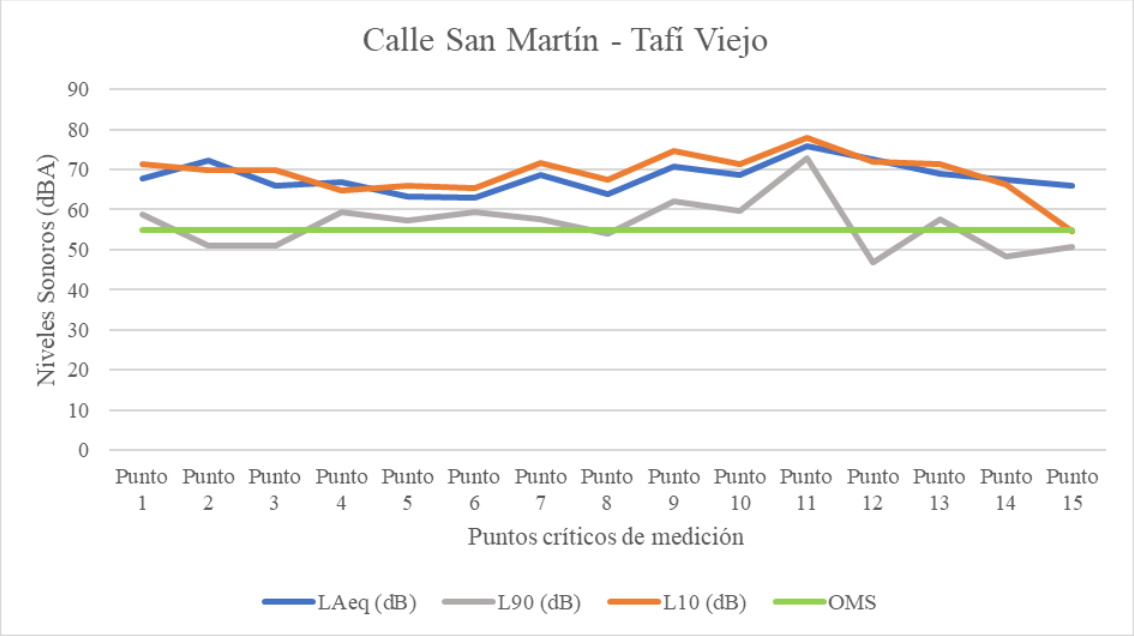


Figura 4: Resultados de las mediciones obtenidas en el eje 2.

3.1.3 Comparación

Los resultados muestran que los niveles de presión sonora en ambos corredores superan ampliamente los valores recomendados por la OMS, especialmente en ambos periodos y horarios relevados, ya que, en algunos puntos, los registros superaron los 78 dBA. De la comparación de ambos ejes, se podría señalar que en el corredor de calle San Martín se presentan niveles acústicos menores al eje de Avenida Perú del Sud.

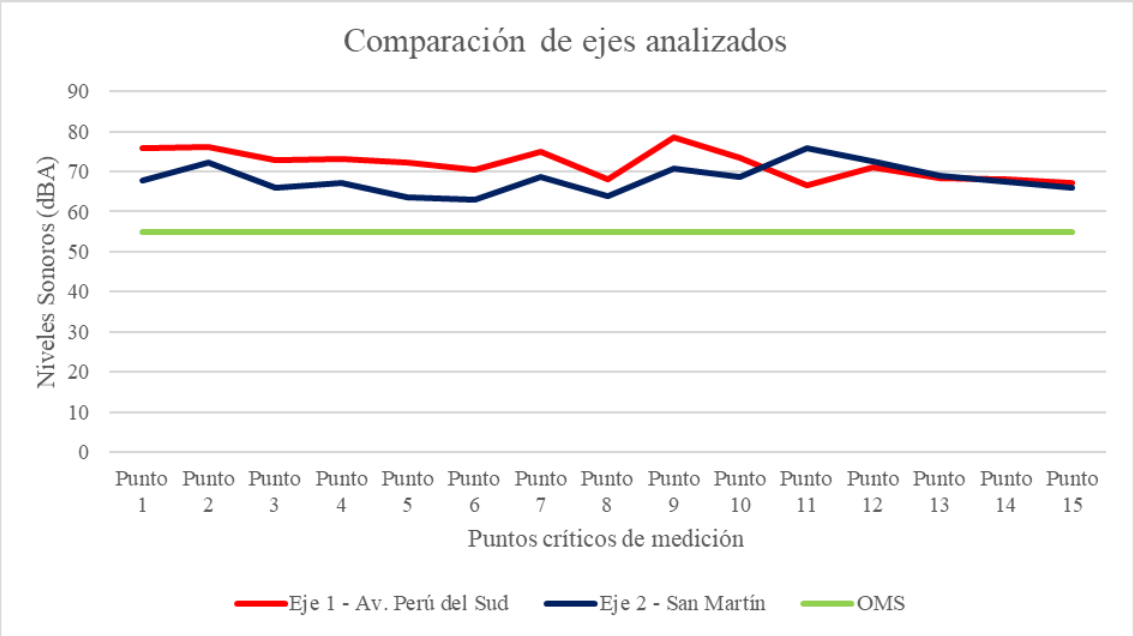


Figura 5: Comparación de las mediciones obtenidas en ambos ejes.

Si bien ambos corredores son importantes en la trama urbana de la ciudad, la calle San Martín tiene actividades con menos incidencia del tránsito vehicular. En el tramo entre Avenida Alem y calle Monteagudo es semipeatonal el eje 2, con algunas obras recientes como ser: ensanchamientos de vereda para dar mayor espacio de circulación peatonal, nuevo mobiliario urbano y mejoras en la parquización de áreas verdes.

Cabe destacar que los niveles mayores se dieron en el eje 1, donde a pesar de tener mayor tránsito pesado y mayor circulación de vehículos, fue relevado en periodo de DISPO con habilitación de algunas actividades, y no funcionando en su normalidad.

3.2 Resultados de las encuestas

Las encuestas fueron realizadas en conjunto a las mediciones sonoras, en paralelo al relevamiento de las condiciones actuales de cada eje. Esta herramienta permitió conocer la opinión de los residentes, usuarios que habitan y/o circulan por estos corredores. Las preguntas contenían, por un lado, la frecuencia y movilidad en el sector, cuales sonidos perciben en sus hogares y actividades interrumpidas por estos ruidos; y por otro, conocimientos acerca del ruido como problemática ambiental, legislaciones y efectos en la salud. Los resultados cualitativos se tabularon en gráficos de porcentajes que permiten visualizar y analizar, desde lo subjetivo, los criterios de quienes habitan o transitan regularmente esos ejes.

3.2.1 Eje 1 – Avenida Perú del Sud:

La figura 6 muestra resultados de 4 preguntas realizadas a los encuestados donde, el 70 % vive en la zona, y el 80 % recorre "*Casi todos los días*" por este sector. En cuanto a los sonidos, hay pequeñas diferencias entre los identificados, pero los referidos al vehículo son los que tienen mayor puntuación, e interrumpen actividades como *"Dormir"* (24 %) y *"Trabajo"* (22 %).

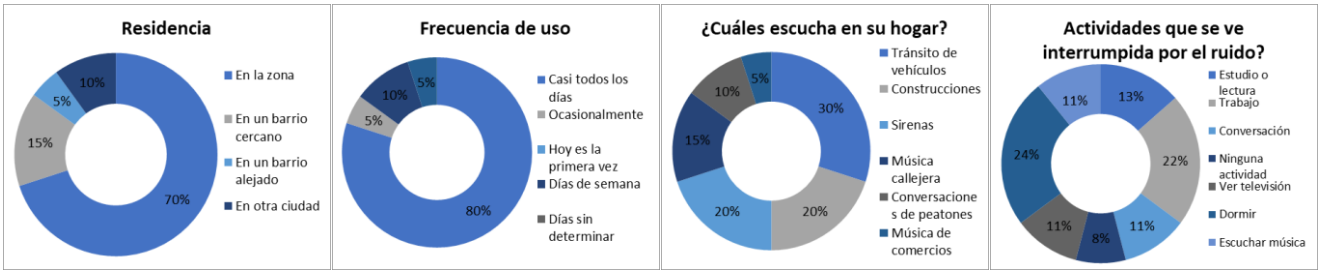


Figura 6: resultados de las encuestas sobre movilidad, frecuencia de uso y ruidos del eje 1.

En su mayoría, con el 75 % indican "*No"* conocer legislaciones sobre el ruido ambiental, pero 55 % "*Si"* lo consideran un contaminante ambiental. Un 80 % considera que *"la zona es ruidosa"* y que *"ha experimentado estrés o fatiga luego de una jornada ruidosa"*.

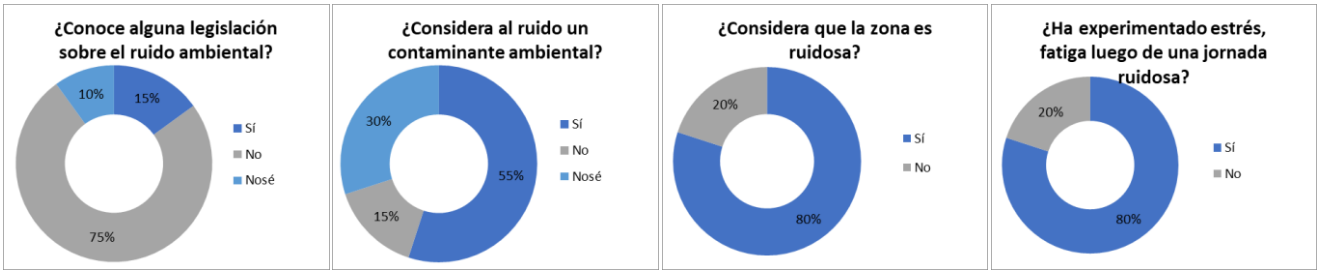


Figura 7: resultados de las encuestas sobre conocimientos acerca del ruido del eje 1.

3.2.2 Eje 2 – Calle San Martín:

De acuerdo al lugar donde viven, el 80 % reside en la zona de estudio y un 45 % con una frecuencia de "*casi todos los días*". Los sonidos de *"Bocinas de vehículos"* (21 %) y *"Música callejera"* (19%) fueron los más votados como aquellos que se escuchan en el interior de sus viviendas, donde el 39 % opinó que no interrumpía *"ninguna actividad"*.

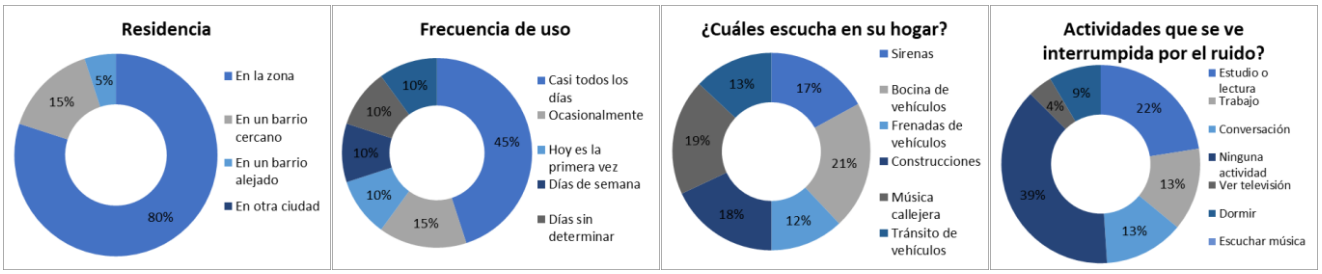


Figura 8: resultados de las encuestas sobre movilidad, frecuencia de uso y ruidos del eje 2.

Por su parte, el 46 % denotó que "No" conoce legislaciones sobre el ruido ambiental. El 53 % "No" considera al ruido como un contaminante ambiental. Sobre si la zona es ruidosa, el 65 % marcó afirmativamente y que el 70 % experimentó estrés o fatiga luego de una jornada ruidosa.

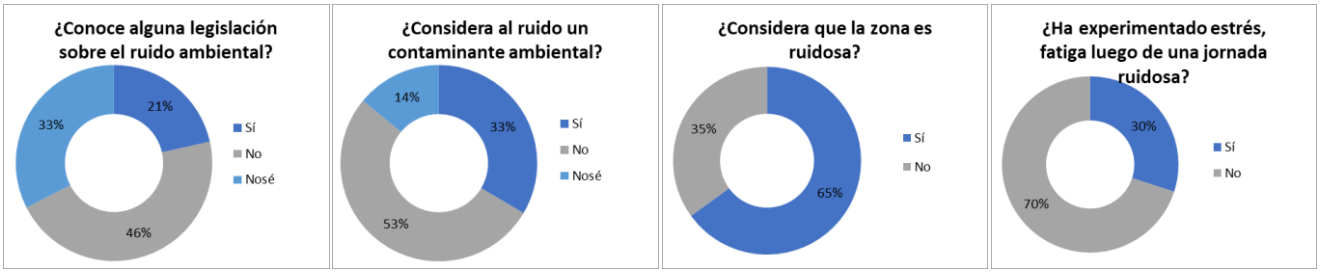


Figura 9: resultados de las encuestas sobre conocimientos acerca del ruido del eje 2.

3.2.3 Comparación

En comparación de los resultados de las encuestas realizadas en ambos ejes, coinciden que la mayoría son residentes y *viven en la zona*, con una frecuencia de *"Casi todos los días"*. Consideran en ambos, que el ruido afecta su descanso, trabajo y calidad de vida, identificando al *tránsito vehicular*, en particular las motocicletas, como la fuente de sonido con más molestias en sus hogares.

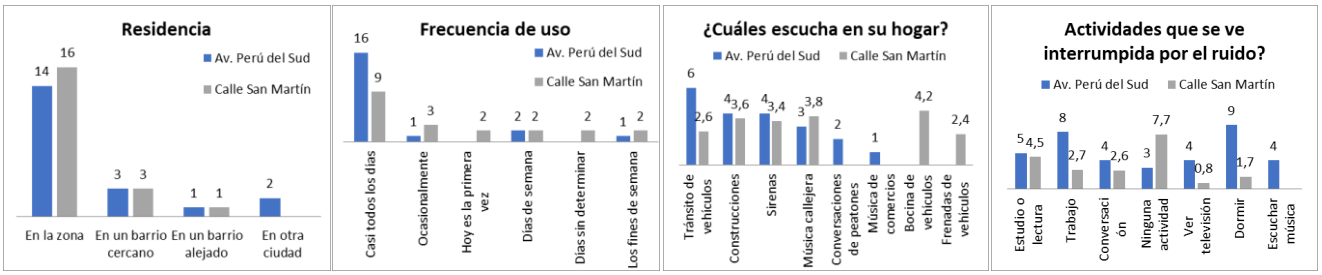


Figura 10: comparación de resultados de las encuestas sobre movilidad, frecuencia de uso y ruidos.

Asimismo, los encuestados señalaron la falta de conocimiento sobre regulaciones, normativas o legislaciones locales y/o de medidas de control para la situación acústica. En cuanto a diferencias en las respuestas, en el eje 1 apuntan al ruido como contaminante ambiental y que si experimentaron

estrés a causa del ruido, mientras que en el eje 2 no lo consideran de la misma manera y tampoco tuvieron situaciones de estrés.

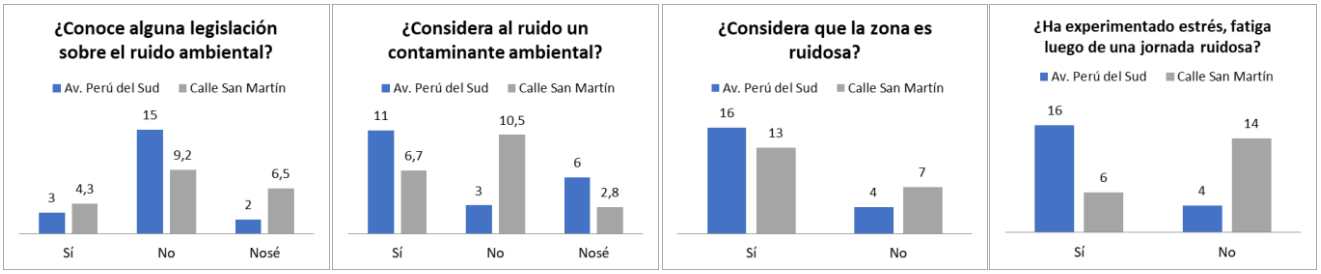


Figura 11: comparación de resultados de las encuestas sobre conocimientos acerca del ruido.

El cruce entre los datos subjetivos confirma las diferencias en cuanto a la calidad de ambos espacios públicos y la percepción del entorno de parte de sus usuarios. Claro está que considerar estos aspectos en el diseño urbano, permite generar espacios más confortables y positivos para el hábitat de estas comunidades.

4. DISCUSIÓN

Los resultados coinciden con estudios realizados en otros corredores urbanos latinoamericanos de escala intermedia, donde el transporte vehicular constituye la principal fuente de contaminación acústica [20], [21]. La diferencia de niveles entre los dos corredores analizados podría deberse a la mayor presencia de transporte pesado y flujo continuo en Av. Perú del Sud, frente a una dinámica más comercial y peatonal en Calle San Martín. Sin embargo, en ambos casos, los valores superan los umbrales de confort acústico.

En el contexto argentino, investigaciones previas han demostrado la presencia de elevados niveles de presión sonora en núcleos urbanos, evidenciando impactos sobre el confort acústico en viviendas y espacios públicos. En particular, en zonas céntricas de San Miguel de Tucumán los niveles superan los 90 dB(A) en horas pico, duplicando los valores recomendados por la OMS de 55 dB(A) durante el día. Este fenómeno afecta particularmente a la población que utiliza o habita los espacios públicos exteriores, donde se registran niveles de exposición sostenidos.

Además, la escasa percepción ciudadana del ruido como contaminante ambiental y el bajo conocimiento de las normativas vigentes dificultan la implementación de pautas efectivas para la calidad sonora. La coincidencia entre los niveles sonoros registrados y la percepción de los habitantes refuerza la importancia de abordar el paisaje sonoro no sólo desde parámetros físicos y objetivos, sino también desde su dimensión social. Si bien el estudio se limita a dos corredores de una ciudad y a períodos específicos de medición, evidencia y refuerza la necesidad de plantear estrategias de mitigación del ruido urbano. Entre las cuales, se recomiendan:

- Diseño y revalorización de espacios verdes.
- Diseño urbano, con incorporación de equipamientos e infraestructura fonoabsorbentes.
- Restricciones horarias para la movilidad y tránsito pesado.
- Normativas de control acústico.

5. CONCLUSIONES

El estudio evidencia que los corredores urbanos de Tafí Viejo presentan niveles de contaminación acústica superiores a los límites recomendados, lo cual impacta de manera negativa en la salud y el bienestar de la población. La percepción social obtenida coincide con los datos objetivos, reforzando la necesidad de integrar criterios acústicos en la gestión y planificación territorial.

A pesar de que en el eje 1 de Av. Perú del Sud las mediciones fueron realizadas en pandemia (periodo DISPO), los resultados objetivos fueron superiores en su mayoría a calle San Martín. Esto evidencia que la calidad y diseño urbano influyen positivamente en la percepción y vivencias de los corredores urbanos. Asimismo, también demuestra la necesidad de mejorar los espacios verdes ya que influyen en el bienestar y calidad de vida, no tan solo desde lo térmico y paisajístico, sino también generando zonas de confort acústico, social y cultural.

REFERENCIAS

[1] W. M. J. P. Sánchez-Vivas, V. W. Rojas-Lujan, y F. Tello-Yance, "La contaminación acústica y concientización de los derechos ambientales en los ciudadanos de Piura, Perú," Cienciamatria. Revista Interdisciplinaria de Humanidades, Educación, Ciencia y Tecnología, vol. 10, no. 19, pp. 126–143, Noviembre 2024. DOI:10.35381/cm.v10i19.1355

[2] P. H. T. Zannin y F. Bunn, "Noise annoyance through railway traffic - a case study," Journal of Environmental Health Science & Engineering, vol. 12, no. 1, p. 14, 2014. DOI:10.1186/2052-336X-12-14

[3] B. Zamorano-Gonzáleg, Y. Velázquez-Narváez, F. Peña-Cárdenas, L. Ruiz-Ramos, Ó. Monreal-Aranda, V. Parra-Sierra y J. I. Vargas-Martínez, "Exposición al ruido por tráfico vehicular y su impacto sobre la calidad del sueño y el rendimiento en habitantes de zonas urbanas" *Estudios Demográficos y Urbanos*, vol. 34, no. 3, pp. 601–629, 2019. DOI:10.24201/edu.v34i3.1743

[4] R. Ibarra Sarlat, "Contaminación acústica: problema ambiental que vulnera el derecho humano a una vivienda digna y decorosa en la Ciudad de México," *Revista de Investigación en Derecho, Criminología y Consultoría Jurídica*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, vol. 13, no. 26, pp. 173–208, Marzo 2020.

[5] A. M. Mamani-Valdez y M. Mendoza-Aquino, "Contaminación acústica y su percepción ambiental en la comunidad educativa del cercado de Tacna, 2019," ING, vol. 2, no. 1, pp. 254–264, Julio 2020.

[6] J. Solórzano-Muñoz y M. Osejos-Merino, "Contaminación acústica y su incidencia en la salud de habitantes de la ciudad de Portoviejo – Ecuador," Polo del Conocimiento, vol. 8, no. 7, pp. 746–764, 2023. DOI:10.23857/pc.v8i7.5811

[7] World Health Organization, Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018.

[8] R. Rhiannon, Y. Smith, K. Chen y M. Chloe, "Contaminación acústica y cognición humana: una revisión sistemática actualizada y un metaanálisis de pruebas recientes," Environment International, vol. 158, p. 106905, 2022.

[9] W. Llaque, V. Rojas, E. Yache y V. Lituma, "Contaminación sonora en áreas urbanas y el derecho ambiental equilibrado, Trujillo, Perú," Iustitia Socialis. Revista Arbitrada de Ciencias Jurídicas, vol. VIII, no. 2, pp. 26–40, 2023. DOI:10.35381/racji.v8i2.2894

[10] International Organization for Standardization, ISO 12913-1:2014, Acústica — Paisaje sonoro — Parte 1, Ginebra, Suiza, 2014.

[11] J. Kang y B. Schulte-Fortkamp, Soundscape and the Built Environment. Boca Raton: CRC Press, 2016.

[12] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, IRAM 4113: Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 1 - Magnitudes básicas y métodos de evaluación; Parte 2 - Determinación de niveles de ruido ambiental. Buenos Aires, Argentina, 2013.

[13] Argentina. Ministerio de Justicia y Derechos Humanos, "Aislamiento social preventivo y obligatorio," Decreto 714/2020 DECNU-2020-297-APN-PTE, Boletín Oficial No. 15887/20v., 20 marzo 2020. [En línea]. Disponible: https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/234257/20200831

[14] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC), Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. Buenos Aires, Argentina: INDEC, 2022.

[15] M. C. Delgadillo y A. E. Pérez, "Evaluación de contaminación sonora vehicular en el centro de la ciudad de Tarapoto, San Martín, 2015," Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo, vol. 3, no. 2, pp. 33–47, 2017.

[16] C. A. Sereno y E. Schenkel, "Un abordaje teórico para la integración de enfoques cuali-cuantitativos y cuanti-cualitativos como estrategia metodológica," *Revista Huellas, vol*. 28, no. 1, 2024.

[17] P. San Martín-Ahumada, "Efectos del aislamiento social y la cuarentena sobre el bienestar subjetivo de los chilenos durante el brote de COVID-19," Scielo Chile, Santiago de Chile, 2020.

[18] G. Román, "Evaluación de los niveles de ruido ambiental en casco urbano de la ciudad de Tarija, Bolivia," Acta Nova, vol. 8, no. 3, pp. 421–432, 2017.

[19] L. Fernández, "Urbanismo y ecología en Buenos Aires: un recorrido por la planificación urbana en su contexto ecológico-regional," Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, vol. 8, no. 1, pp. 12–27, 2016. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1590/2175-3369.008.001.se01

[20] S. Bonilla-Bedoya, A. Estrella, F. Santos y M. Á. Herrera, "Forests and urban green areas as tools to address the challenges of sustainability in Latin American urban socio-ecological systems," Applied Geography, vol. 125, p. 102343, 2020. DOI:10.1016/j.apgeog.2020.102343

[21] J. M. Barrigón-Morillas, G. Rey-Gozalo, D. Montes-González, P. A. Moraga y R. Vílchez-Gómez, "Noise Pollution and Urban Planning," Current Pollution Reports, vol. 4, pp. 208–219, 2018. DOI:10.1007/s40726-018-0095-7

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Paisajes sonoros subterráneos. Investigación-creación desde una concepción ecosófica.

Brianza, Alejandro †, ‡, 1

† Centros de Estudios y Producción Sonora y Audiovisual [CEPSA], Universidad Nacional de Lanús, Remedios de Escalada

‡ Doctorado en Humanidades - Música, Universidad del Litoral, Santa Fe

1 alejandrobrianza@gmail.com

Resumen Paisajes sonoros subterráneos es un proyecto de investigación - creación, de registro y composición de paisajes sonoros iniciado en el año 2015 en el que intento retratar de forma particular los sistemas de trenes subterráneos de distintas ciudades del mundo.
Entendiendo a mi propia práctica como compositor y artista sonoro dentro del giro etnográfico [1], la búsqueda detrás de este proceso de composición –que cuenta con una colección de 12 paisajes sonoros– está ligada además a un posterior proceso de reflexión en el que se busca comprender, desde la ecosofía sonora [2] y siempre a partir de la escucha, costumbres específicas, niveles de desarrollo tecnológico, y las problemáticas y prácticas culturales y sociales subyacentes en cada una de estas ciudades, entendiendo –en estos términos– qué rasgos significativos [3] las acercan y cuáles las alejan independientemente de su posición geográfica.
Se propone en esta presentación explicitar el contexto de su paso a proyecto doctoral, como también la propuesta epistemológica y metodológica implicada en el proceso de investigación y creación sonora, que parte de una escucha tan atenta como crítica de los entornos que nos rodean.

Palabras clave: Paisaje sonoro, composición electroacústica, ecosofía, escucha

Abstract Paisajes sonoros subterráneos is a research - creation project, of recording and composition of soundscapes initiated in 2015 in which I try to portray in a particular way the subway train systems of different cities around the world.
Understanding my own practice as a composer and sound artist within the ethnographic turn [1], the search behind this composition process –which has a collection of 12 soundscapes– is also linked to a subsequent process of reflection in which I seek to understand, from the sound ecosophy [2] and always from listening, specific customs, levels of technological development, and the underlying cultural and social problems and practices in each of these cities, understanding –in these terms– which significant features [3] bring them closer and which ones distance them regardless of their geographical position.
The purpose of this presentation is to explain the context of its conversion into a doctoral project, as well as the epistemological and methodological proposal involved in the process of research and sound creation, which starts from an attentive and critical listening of the environments that surround us.

Palabras clave: soundscape, electroacoustic composition, ecosophy, listening

1. INTRODUCCIÓN

La palabra *soundscape* –paisaje sonoro– fue popularizada en 1977 por Murray Schafer en su libro *The tuning of the world* –La afinación del mundo–, cristalizando el trabajo realizado desde la década anterior desde la dirección del World Soundscape Project [WSP]. Este proyecto de la Simon Fraser University, con fines ecológicos, apuntaba a la conciencia sonora del ambiente y sobre todo a comprender acerca de la contaminación sonora, algo muy novedoso para aquellas épocas. En el equipo de trabajo también se encontraban otros pioneros del área: Barry Truax, Bruce Davis, Hildegard Westerkamp, Peter Huse y Howard Broomfield, quienes bajo el paraguas del proyecto WSP realizaron grandes grabaciones de paisajes sonoros en diversas ciudades, de Canadá en primera instancia y de Europa, posteriormente, para avanzar sobre esta temática.

Describiéndolo como todo entorno sonoro que es entendido y tratado como campo de estudio, Schafer apuntó por primera vez a las palabras *sound* –sonido– y *landscape* –paisaje– en esta dirección, creando no solo un nuevo concepto que trascendería hasta nuestros días, sino una disciplina de estudio en sí misma, ligada precisamente a la caracterización de espacios a partir de su entorno sonoro, permitiéndonos conocer a través de aquello que los sonidos nos revelan por sí mismos. Además, el concepto abre una doble posibilidad ontológica: puede aplicarse para referir tanto a espacios reales como a construidos, como lo son las composiciones musicales electroacústicas [3] que buscan replicar esos propios espacios.
Barry Truax es tal vez, junto a Hildegard Westerkamp –ambos partes del equipo original de WSP–, el mayor exponente tanto en la composición electroacústica de paisajes sonoros como en un extenso desarrollo teórico proveniente de años de investigación y creación acerca de las posibilidades de este subgénero de la música electroacústica. Apoyándose en los desarrollos previos realizados por Pierre Schaeffer a partir de la utilización de sonidos provenientes de registro microfónico en la llamada música concreta y de los aportes de Luc Ferrari con su propuesta de música anecdótica, Truax se interesó particularmente por el lugar en que se posicionan estéticamente los compositores al trabajar con material sonoro evocativo proveniente del entorno. Esto le permitió agregar a la definición de paisaje sonoro de Murray Schafer que los sonidos originales deben necesariamente ser reconocibles en las producciones electroacústicas y tanto el contexto como las asociaciones simbólicas que están implícitas en él, deben hacerse, en contraparte, presentes en aquella persona que participe de la escucha [4].

En esto hay algo clave: los paisajes sonoros no siempre son representaciones fieles de la realidad que representan. También Truax [5] aborda esta problemática comprendiendo que la práctica compositiva en general –a menos que el estilo del artista esté muy impuesto o sea un sello claro en su obra– oscila entre representaciones más o menos realistas de los entornos encontrando dos categorías de las que se sirve para definir dos situaciones paradigmáticas en relación a la fidelidad que guardan con el mundo real. Por un lado, entonces, encontramos a la fonografía, que pretende transparencia –Levack Drever [6] habla en cambio de objetividad y neutralidad, lo cual puede tomarse como equivalente– al evitar toda manipulación posterior a la instancia de grabación de campo [5]. El problema que debemos conocer de esta pretendida objetividad está, así como en la fotografía, en que la grabación será solo una porción de la realidad, y de hecho será la porción que quien opere el grabador haya decidido registrar, eligiendo qué incluir y qué excluir.

Opuestamente, encontramos al paisaje sonoro virtual, que como práctica compositiva habilita a utilizar técnicas electroacústicas para ampliar las posibilidades de una producción. Aunque siempre basándose en grabaciones de campo, en lugar de pretender una representación literal [5], se convierten en herramientas plausibles de su uso no solo el ajuste de niveles en una mezcla, la ecualización o la enfatización de la imagen estéreo, sino que también recursos narrativos como la elipsis temporal, la inclusión de personajes que sirvan de anclaje para distintos puntos de escucha, procesos y distorsiones de espacio y tiempo, compresiones, desarrollos, sustituciones y adaptaciones libradas a la creatividad de cada compositor en búsqueda de un realismo simulado que evoque el contexto, pero qué también sea también disparador de nuevas sensaciones en el oyente.

Makis Solomos nos comparte que “la historia de la música reciente puede leerse como una historia de la escucha y sus mutaciones” [7, p. 54] realizando un recorrido certero sobre el lugar que la escucha ocupa en las músicas de Cage, Schaeffer y Nono, como también en los arriba mencionados Schafer y Westerkamp, destacando que lo que acontece en la música de estos últimos es una interacción entre la escucha y el mundo real –el medio– apareciendo un “espacio común”. En este sentido, si consideramos a los procesos de individualización cada vez mayores que transitamos en lo cotidiano, y que erosionan el bien común hasta hacerlo desaparecer [7], podemos reconocer en la escucha de ese

espacio compartido una escucha consciente, un acto de resistencia y de alto valor epistémico que merece la pena ser estudiado: en este acto, al contrario de la concepción moderna entre sujeto y el mundo, quien escucha y el medio se co-constituyen al interactuar el uno con el otro.

Esto toma una especial importancia al respecto de una revalorización de la ecología al respecto de la escucha: Roberto Barbanti, apoyándose en la concepción ecosófica planteada por Felix Guattari, reflexiona acerca de una escucha que está actualmente disociada, atomizada y que por lo tanto es necesario reunirla, "abrirse al otro, acogerlo con agrado, prestarle atención, sentirlo en el poder de su fuerza y agentividad vivas" [2, p.7]. Esto habilitaría una nueva *aisthésis*, una nueva forma de relacionarnos con el mundo a través de nuestros sentidos:

> La caminata, la deriva y el atravesar paisajes, colaborar con los seres vivos y estudiar sus lenguajes, sumergirse críticamente en medios técnicos y desviarse de ellos, reapropiarse de los cuerpos y reformular los relatos históricos dominantes. [2, p.14]

La caminata, la deriva y otros de estos recursos mencionados por Barbanti han sido motor de múltiples acciones en el mundo del arte y, de hecho, la composición de paisajes sonoros no es ajena. Esta forma de entender al paisaje sonoro se inscribe además en un momento histórico que atraviesa al arte contemporáneo en su generalidad y que es denominado giro etnográfico [1]. Esto nos permite pensar al paisaje sonoro no solo como una posibilidad para la composición sonora –entendiéndola además como un subgénero de la música electroacústica– sino también como una representación realista con un fuerte carácter narrativo que actúa como metáfora, como punto de inflexión entre la relación entre sujeto y medio [7] y que conforma además una manera más de escuchar con otros y a otros [2].

Entendiendo a mi propia práctica como compositor y artista sonoro dentro del mencionado giro etnográfico, comencé en el año 2015 un trabajo de registro y composición de paisajes sonoros en el que intento retratar de forma particular los sistemas de trenes subterráneos de distintas ciudades del mundo. La búsqueda detrás de este proceso de composición –que cuenta con una colección de 12 paisajes sonoros– está ligada además a un posterior proceso de reflexión en el que se busca comprender, siempre a partir de una escucha basada en la ecosofía sonora, costumbres específicas, niveles de desarrollo tecnológico, y las problemáticas y prácticas culturales y sociales subyacentes en cada una de estas ciudades, entendiendo –en estos términos– qué rasgos significativos [3] las acercan y cuáles las alejan independientemente de su posición geográfica. Adicionalmente, se persigue como objetivo sistematizar una serie de recursos técnicos y conceptuales para ponerlos a disposición de la creación sonora.

En el año 2021, esta propuesta se ancló entonces en el marco del Doctorado en Humanidades con mención en Música de la Universidad Nacional del Litoral, consolidándose como una investigación doctoral en curso. Este encuadre académico ha permitido profundizar y dar un sustento teórico-metodológico a aquella búsqueda artística inicial, transformando el proyecto en un espacio sistemático donde la creación y la reflexión avanzan se relacionan íntimamente. La investigación se estructura así en dos ejes complementarios: uno teórico-epistémico, centrado en la indagación sobre la escucha ecosófica y la búsqueda de la construcción de una nueva *aisthesis*; y otro práctico, volcado a la composición misma de los paisajes sonoros y a la sistematización de los recursos y metodologías que de ella emergen.

Las preguntas orientadoras al respecto del eje epistémico son entonces: ¿qué conceptos provenientes de la ecosofía sonora pueden sistematizarse dentro de una metodología posible para el trabajo con

registro de campo y la posterior composición de paisajes sonoros? ¿Qué recursos poéticos puestos en juego en el proceso compositivo de estos paisajes sonoros colaboran en la escucha de y con otras personas? ¿Qué reflexiones se desprenden de la composición y escucha de los paisajes sonoros de los sistemas de trenes subterráneos de estas ciudades entendiéndolas como espacios comunes?

Y al respecto de la técnica son: ¿cuáles son los rasgos significativos que se destacan desde la propia escucha del registro de campo de los sistemas de trenes subterráneos de cada una de estas ciudades? ¿Qué recursos técnicos pueden sistematizarse dentro de una metodología posible para el trabajo con registro de campo y la posterior composición de paisajes sonoros?

El presente escrito busca, precisamente, dar a conocer el estado actual de este proceso. Al exponer los objetivos, la metodología y las consideraciones que lo orientan, se pretende abrir un diálogo con la comunidad académica, enriqueciéndolo. Este carácter dialógico se considera fundamental, ya que el proyecto se concibe como un organismo dinámico, susceptible de ajustes y refinamientos en pos de alcanzar una mayor profundidad y solidez en su desarrollo.

2. OBJETIVOS Y PRODUCTOS ESPERADOS

Dicho esto, los objetivos generales y específicos que persigue esta investigación responden también a la división en ejes propuesta más arriba. Por otro lado, también es necesario leer a los objetivos de eje como metas imbricadas, ya que para poder cumplirlas es necesario avanzar en primera instancia con la conceptualización, para luego crear y por último analizar y reflexionar sobre lo creado.

En el eje práctico, la investigación se materializará en la creación de una colección en formato álbum que reúna los paisajes sonoros compuestos a partir de registros de campo en sistemas de trenes subterráneos de diversas ciudades. Este quehacer concreto se desglosa en una secuencia operativa: en primer término, se sistematizará una metodología de trabajo para el registro y la composición sonora; sobre esta base, se propondrá un abanico de conceptos compatibles con la ecosofía sonora, los cuales se pondrán a prueba en distintas composiciones.

De manera paralela y entrelazada, el eje teórico-epistémico tiene como objetivo general indagar los modos en los que la composición de estos paisajes sonoros puede articularse con una escucha ecosófica en pos de una nueva *aisthesis*. Esta indagación se llevará adelante en distintas etapas: se establecerán los rasgos significativos, así como las diferencias y similitudes entre cada ciudad, mediante una escucha ecosófica de las composiciones. Asimismo, se relacionará críticamente la escucha ecosófica con las prácticas de registro de campo que alimentan la composición. Esto concluirá con una reflexión profunda acerca de la relación entre la composición, los recursos poéticos movilizados y la experiencia de escucha de estos paisajes, entendiendo a las ciudades y sus subterráneos como medios sonoros y espacios comunes en sí mismos.

3. PROPUESTA METODOLÓGICA

La concepción ya mencionada de contemplar una parte práctica y otra teórica se enmarca dentro de la línea de la llamada investigación-creación, donde la creación artística se completa o complementa con un texto teórico reflexivo que le brinda sustento conceptual [8] o en palabras de Sophie Stévance y Serge Lacasse [9], un proceso de creación que vela en su camino por una producción artística acompañada de un discurso de naturaleza teórica.

Como la investigación - creación requiere de la fabricación de un método propio que se amolde a las necesidades de cada proyecto particular, sirven aquí los aportes de Falk Hübner [10] y de su denominado modelo del terreno común, que ofrece una red de lentes o perspectivas a través de las

cuales –y en combinación con la teoría propia de cada proyecto–, se puede pensar y elaborar el diseño de la investigación de maneras no lineales. Esto posibilita distintas instancias de reflexión que a su vez, pueden retroalimentar tanto a la metodología como a la estructura posible para el documento final, incluso posibilitando la aparición de nuevas preguntas y reflexiones posteriores al respecto.

En este sentido, respecto a la creación, los paisajes sonoros en todos los casos están construidos exclusivamente con registro de campo realizado durante viajes en los subterráneos, caminatas y detenciones en las estaciones y andenes de cada ciudad.

Cada viaje cuenta con una fase de preproducción en la cual recopilo información antes de subirme siquiera al tren, lo que me permite salir a capturar determinadas situaciones sonoras de antemano: cuáles son las estaciones importantes o más transitadas, cuáles son las cabeceras, cuáles son las conexiones, si hay estaciones bajo tierra o a nivel, lo antiguo o moderno de cada línea, e incluso a veces logro entablar conversaciones con la gente del lugar obteniendo datos muy enriquecedores. Solo entonces, y con un plan de producción en mente enciendo la grabadora –Zoom H5 con monitoreo vía auriculares– y emprendo el viaje, que suele durar mañanas o tardes enteras. El material crudo excede fácilmente la hora de grabación para concluir en fragmentos de aproximadamente cinco minutos en los que busco condensar los rasgos significativos [3] según la experiencia vivida en cada ocasión.

Esta metodología de trabajo, además se ve atravesada por una búsqueda conceptual ligada a la ecosofía sonora [2]. Así, de cada experiencia y después de algunos idas y vueltas entre la teoría y la práctica surgen distintos cruces en pos de la fabricación de un método propio [10] que permite adoptar distintas estrategias en cada ciudad. Por ejemplo, en Buenos Aires el recurso puesto en juego es la caminata sonora; en Bruselas y en Medellín las posibilidades y límites del vococentrismo y verbocentrismo [11]; en Lima, la contaminación acústica; en São Paulo la utilización de la elipsis; en Valparaiso la presencia de música callejera; en Ciudad de México la presencia de venta ambulante, en Madrid la utilización del recurso de cut-up [12]; en Panamá la incertidumbre frente a la –en ese entonces– recién anunciada pandemia del COVID-19.

Tanto el registro de sonido de campo como el proceso de composición se refleja en un cuaderno de campo o bitácora, que posibilita la posterior confección de una memoria crítica, un informe realizado al finalizar el proceso creativo a partir de las notas que se hayan tomado, con la intención de avanzar hacia la construcción de nueva teoría o bien nuevas preguntas, guiando la continuación del trabajo en lo sucesivo [8].

A posteriori, hay una vuelta tanto sobre la memoria crítica como sobre los propios paisajes sonoros, entendiendo que el sujeto y el medio sonoro se co-constituyen [7] y buscando una relación directa entre los rasgos significativos [3] que tengan lugar en cada una de estas ciudades con las teorías existentes respecto a los estudios sonoros, las prácticas sociales y los espacios socio-político-geográficos en los que cada una de estas ciudades están ubicadas. Este análisis persigue el objetivo de sistematizar los recursos utilizados desde lo conceptual, lo técnico y lo sonoro, que más allá de integrar la práctica propia, pueden articularse en una posible metodología de trabajo para la composición de paisajes sonoros en términos generales

4. CONSIDERACIONES FINALES

A modo de cierre, es menester volver a mencionar que esta presentación se configura como una parte constitutiva de una investigación doctoral en curso, desarrollada dentro del marco del Doctorado en Humanidades con mención en Música de la Universidad Nacional del Litoral. Este trabajo se inscribe en una búsqueda por ampliar los horizontes de la investigación-creación en música, pretendiendo

tender puentes entre la práctica compositiva, la reflexión teórica y la escucha profunda de nuestros entornos sonoros.

En el contexto de este encuentro, la presentación de este planteo busca, ante todo, abrir un espacio de diálogo e intercambio, ya que el propósito fundamental de esta etapa es darlo a conocer para entablar conversaciones con colegas y especialistas cuyas perspectivas, provenientes de diversos campos de las humanidades, los estudios sonoros o la creación musical, puedan enriquecer sustancialmente su desarrollo. Confío en que este foro será un terreno fértil para identificar resonancias, contrastar enfoques y forjar colaboraciones potenciales.

Sin embargo, por ello, es importante subrayar que tanto la estructura como los métodos y hasta los mismos objetivos aquí delineados, si bien han madurado de su estado más embrionario, no dejan de comprenderse como una cartografía inicial, un punto de partida dinámico y susceptible de ser reformulado: este proyecto se concibe como un organismo vivo, abierto a las transformaciones que surjan del propio proceso de investigación y, muy especialmente, de los valiosos aportes que puedan emerger de la comunidad académica que, continuando el razonamiento, no son entendidas como desviaciones, sino como ajustes necesarios en pos de robustecer y profundizar la lógica de la investigación-creación.

5. AGRADECIMIENTOS

Siendo que transito esta formación doctoral sin contar con el respaldo de una beca, no puedo dejar de reconocer y agradecer de manera profunda un apoyo institucional que ha hecho posible la continuidad de este proyecto. En este sentido, resulta fundamental destacar el papel que ha tenido ADUNLa, cuya asistencia económica me ha permitido cubrir, año tras año, los costos de matriculación. Este acompañamiento no solo ha allanado el camino administrativo y financiero, sino que también da cuenta de la confianza depositada tanto de mi investigación como en las de otros colegas docentes, respaldando fuertemente nuestro crecimiento y formación académica.

REFERENCIAS

[1] A. Guasch, *El arte en la era de lo global 1989-2015*. Madrid: Alianza Editorial, 2016.

[2] R. Barbanti, *Les sonorités du monde – De l'écologie sonore à l'écosophie sonore.* Les presses du réel, 2023.

[3] R. M. Schafer, *El paisaje sonoro y la afinación del mundo.* Barcelona: Intermedio, 2013.

[4] B. Truax, "Soundscape Composition as Global Music: Electroacoustic Music as Soundscape," *Organized Sound,* vol. 13, no. 2, pp. 103-109, 2008.

[5] B. Truax, "Sound, listening and place: the aesthethic dilemma," *Organised Sound*, vol. 17, pp. 193-201, 2012.

[6] J. L. Drever, "Soundscape Composition: the Convergence of Ethnography and Acousmatic Music," *Organised Sound*, vol. 7, pp. 21-27, 2002.

[7] M. Solomos, "L'écoute musicale comme construction du commun," *Circuit*, vol. 28, no. 3, pp. 53-64, 2018.

[8] R. López Cano y U. San Cristóbal, *Investigación artística en música. Problemas, métodos, experiencias y modelos*. Barcelona: Fondo para la Cultura y las Artes, 2014.

[9] S. Stévance y S. Lacasse, Les Enjeux de la recherche-création en musique : institution, définition, formation. Québec: Presses de l'Université Laval, 2013.

[10] F. Hübner, Method, Methodology and research design in artistic research. Londres y Nueva York: Routledge, 2024.

[11] M. Chion, *La Audiovisión*. Buenos Aires: Paidós, 2008.

[12] W. Burroughs, *La revolución electrónica*. Buenos Aires: Caja Negra, 2013.

XIX Congreso Argentino de Acústica AdAA2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE

Método ultrasónico para control de la degradación de aceites

Verstraeten, F.[†,1]; Corach, J. [†,‡,2]; González, M. G.[†,‡,3]; Ciocci Brazzano, L.[†,‡,4]; Acosta, E. O.[†,5]; Sorichetti, P. A.[†,6];

[†] Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Buenos Aires, Argentina

‡ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

[1] fverstraeten@fi.uba.ar, [2] jcorach@fi.uba.ar, [3] mggonza@fi.uba.ar, [4] bciocci@fi.uba.ar, [5] eacosta@fi.uba.ar, , [6] psorich@fi.uba.ar

RESUMEN AMPLIADO

Resumen Cuando un aceite vegetal es sometido a altas temperaturas por períodos relativamente prolongados, tienen lugar cambios en las propiedades físico-químicas del aceite, debido a alteraciones en su composición, formación de gomas y compuestos tóxicos. La detección de éstos es fundamental en la industria alimenticia, por lo que resulta de interés contar con métodos que puedan detectarlos de forma rápida. En este trabajo se presenta un método basado en la técnica optoacústica para el estudio de la calidad de aceite vegetal para consumo humano. Se describe una configuración experimental que, a través de pulsos de ultrasonido generados por láser, permite medir la velocidad y la atenuación del sonido de la muestra. La determinación de estos parámetros hace posible detectar el envejecimiento de los aceites estudiados. Finalmente, es necesario destacar que este método tiene el potencial de extenderse a otros aceites comestibles, no comestibles, vegetales y minerales.

Palabras clave: ultrasonido, optoacústica, aceites.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceites vegetales comestibles son un producto alimenticio de principal importancia a nivel mundial, tanto por su volumen de producción, como por su impacto económico. Por ejemplo, la industria aceitera, principalmente de girasol y de soja, es una de las más importantes en Argentina, teniendo un impacto muy significativo en el producto bruto interno nacional. La calidad de los aceites puede deteriorarse tanto por el mero paso del tiempo, como por la adulteración con sustancias de menor calidad. En particular, en aplicaciones como la fritura industrial (en fábricas de alimentos procesados o en restaurantes), la exposición a altas temperaturas durante periodos extensos, produce cambios físico-químicos, incluyendo cambios en su composición, formación de gomas y compuestos tóxicos. Existen numerosos métodos para evaluar la calidad de los aceites comestibles, pero todos requieren de equipos costosos, preparación de muestras engorrosas y personal altamente especializado. Por el contrario, las técnicas ultrasónicas son técnicas no destructivas, rápidas, precisas, económicas, repetibles, portátiles y sencillas. Además, la combinación del ultrasonido con otras técnicas, tiende a mejorar la evaluación de la calidad y la precisión de la detección [1].

En este trabajo se presenta un sistema para medir el envejecimiento de aceites vegetales comestibles basado en el método ultrasónico del tipo transmisor-receptor combinado con la técnica optoacústica (OA). En este caso, la técnica OA es usada para generar ultrasonido de banda ancha utilizando un breve pulso láser sobre una superficie ópticamente absorbente [2]. Se muestra que este esquema permite medir simultáneamente la velocidad y la atenuación del sonido de la muestra bajo estudio.

2. MÉTODO Y MATERIALES

En este trabajo utilizamos la técnica OA para monitorear la degradación de un aceite de girasol comercial. De una misma botella separamos tres muestras: una sin usar (muestra testigo); una envejecida en un horno a 120 °C durante 24 h; y otra utilizada para freír carne vacuna (un solo uso,

filtrada para remover las impurezas visibles y sin sal agregada). En todos los casos, medimos la señal OA de la muestra a 15 °C. En las Fig. 1 se muestra la configuración experimental. La señal OA se genera con un haz láser pulsado (Continuum Minilite I que emite pulsos de luz a 532 nm, 5 ns de duración y a una tasa de repetición de 10 Hz) que es usado para irradiar una de las caras de la cubeta de cuarzo (volumen interno de 24 x 10 x 30 mm^3 con paredes de 3 mm de espesor) en la que encuentra contenida la muestra bajo estudio. Esa cara está cubierta con una fina capa (0.05 mm) de pintura de grafito que absorbe la totalidad de la radiación láser. El calentamiento y posterior expansión de la capa de grafito genera un pulso de presión de banda ancha que se propaga atravesando la muestra hasta llegar al otro extremo donde se encuentra un sensor piezoeléctrico [3,4]. Este detector fue implementado en nuestro laboratorio siguiendo los pasos detallado en [5]. Para generar una onda de presión con un frente de onda plano se iluminó de forma homogénea la película de grafito usando una lente divergente con distancia focal de 50 mm para expandir el haz. La medición de la energía del pulso láser se llevó a cabo con un piroeléctrico (Coherent J-10MB-LE) midiéndose valores en torno a 3,5 mJ. Por otro lado, la señal OA fue amplificada (EG&G Optoelectronics Judson PA-400) y posteriormente digitalizada con un osciloscopio (Tektronix TDS 2024). Esta configuración experimental permite medir la velocidad del sonido v_s y la atenuación acústica α de la muestra. A partir del tiempo de arribo de la señal OA al sensor y, conocidas las dimensiones y la velocidad del sonido de las paredes de la celda (6000 m/s), se puede obtener v_s. Por otro lado, para determinar α, se debe medir una muestra de referencia (en este caso agua destilada) y también descontar el efecto de transmisión acústica que ocurre en las interfaces vidrio-muestra. Este último se calcula a partir de la primera reflexión interna que ocurre dentro de la pared de vidrio lindera al detector.

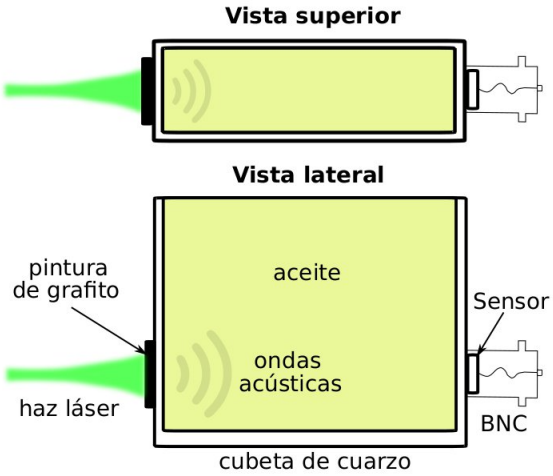


Figura 1: Configuración experimental.

3. RESULTADOS

En la Fig. 2 se muestran las señales OA medidas y sus espectros. En la Fig. 2.a se presentan también las v_s calculadas a partir de los tiempos de arribo. Por otro lado, en la Fig. 2.b se puede apreciar un aumento de la dispersión del pulso de ultrasonido no solo cuando se pasa de agua a aceite sino también a medida que se degrada el aceite por calentamiento. Los resultados muestran la importancia de medir tanto v_s como α ya que la muestra de fritura no presenta cambios en el espectro pero sí en el tiempo de arribo. En el caso de la muestra calentada, los cambios son apreciables en ambos parámetros, agregándose también un fuerte efecto dispersivo.

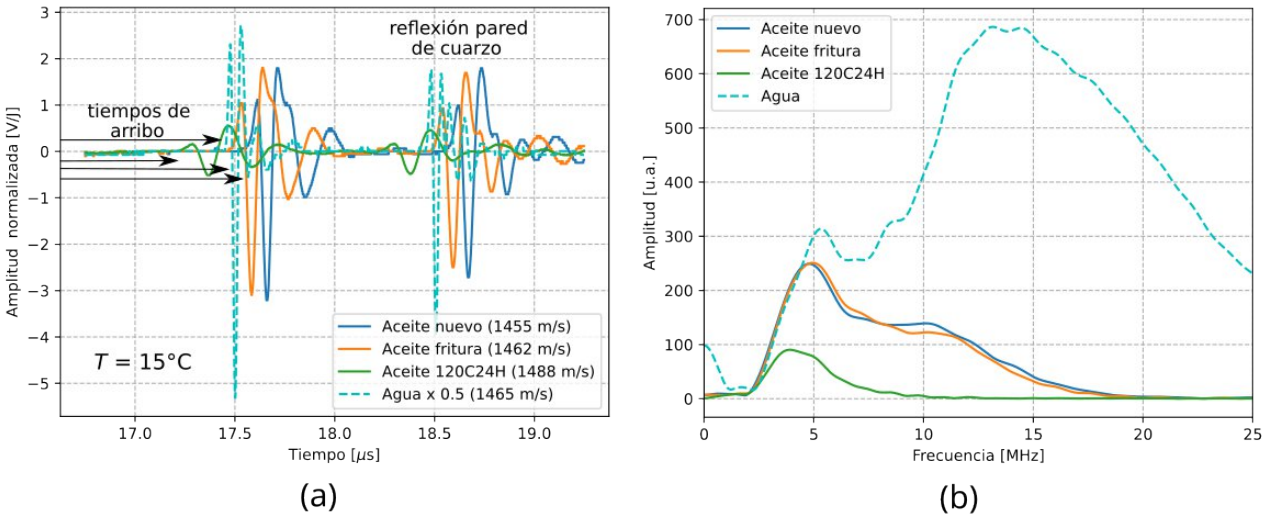


Figura 2: (a) Señales OA en función del tiempo. (b) Espectros de las señales OA medidas.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan y analizan resultados de un sistema de medición de propiedades acústicas basado en la técnica optoacústica. Se muestra que es posible detectar la degradación de aceite comestible de girasol a través de la medición simultánea de la velocidad del sonido y la atenuación acústica de la muestra. Asimismo, es posible determinar indirectamente la densidad (fuertemente asociada a la degradación del aceite), convirtiendo al sistema de medición en un dispositivo multiparamétrico. En futuros trabajos se incluirá un sistema óptico que permita determinar la absorbancia de la muestra, permitiendo determinar cuatro parámetros en forma simultánea.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Buenos Aires (UBACYT 20020190100032BA, 20020190100275BA y 20020220400304BA), CONICET (PIP 11220200101826CO, 11220200102112CO) y la Agencia I+D+i (PICT 2020-3741).

REFERENCIAS

[1] M. Zarezadeh, M. Aboonajmi, M. Ghasemi-Varnamkhasti, “Applications of ultrasound techniques in tandem with non-destructive approaches for the quality evaluation of edible oils”, *J. Food Sci. Technol.* vol. 59, no. 8, pp. 2940–2950, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s13197-022-05351-1

[2] L. Cusato, M. Estevez, G. Santiago, M. G. González, “Characterization of Liquids by Photoacoustic Technique: Study of Broadband Piezoelectric Sensors”, *Elektron*, vol. 1, no. 1, pp. 8-15, 2017. DOI: https://doi.org/10.37537/rev.elektron.1.1.14.2017

[3] M. G. González, P. A. Sorichetti, G. D. Santiago, “Modeling thin-film piezoelectric polymer ultrasonic sensors”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 1, no. 85, pp. 115005, 2014. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4901966

[4] C. Haisch, “Photoacoustic spectroscopy for analytical measurements”, *Meas. Sci. Technol.,* vol. 23, no. 1, 012001, 2012. DOI: 10.1088/0957-0233/23/1/012001

[5] A. Fernández Vidal, L. Ciocci Brazzano, C. L. Matteo, P. A. Sorichetti, M. G. González, “Parametric modeling of wideband piezoelectric polymer sensors: Design for optoacoustic applications”, *Rev. Sci. Instrum.,* vol. 1, no. 88, 2017. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4986771.

Apellido	Páginas	Apellido	Páginas
Abadía,Leandra	117	Lopez,Lautaro Matias	105
Abramovich,Juana	378	López,Juan F	367
Accolti,Ernesto	89; 220; 293; 347	Luna,Fabián Esteban	401
Acosta,Alejandro	281	Lutowicz,Analía	378
Acosta,Eduardo	425	Marañón Di Leo,Julio	191; 196
Armas,Alejandro	23; 72	Maristany,Arturo	117
Arrieta,Gabriela	117	Miño,Jésica	378
Azzurro,Adrián	129	Mira,Manuel	367
Bacigalupo,Fernando	80	Miyara,Federico	317
Barbuto,Valeria	378	Moreno,Ana M	367
Basso,Gustavo	53; 305	Musolino,Lautaro	13; 239
Batallan,David Leonardo	137; 145	Niemetschek,Sebastián	23
Becerra Araneda,Abraham A	23	Nocetti,Fabrizio	322
Bevilacqua,Gaspar	93	Novarino,Santiago	183; 187
Bidondo,Alejandro	1; 13	Núñez Berté,Alejandra	72
Brazzano,Ligia Ciocci	425	Oieni,Valentina	347
Brianza,Alejandro	418	Ortega Brook,Antonio	277
Brito,Maria Sol	261	Parisi,Virginia	203
Busnelli,Roberto	23	Payo,Damian	203
Caccia,Matias	105	Perez Villalobo,Jorge A	153
Calcagno,Esteban	281	Petrosino,Jorge	89; 214; 356
Cancino,Víctor Luis	35; 406	Piceda,Laura Berenice	159; 232; 332; 340
Cardoso,Ana	378	Posse,Carlos Manuel	23; 305
Cazón Narvaez,Agustina	35; 406	Proscia,Martín	277
Cerviño,Joaquín	232; 322; 332; 340	Ramirez,Cristian E	153
Charles Mengeon,Martiniano	356	Rey,María Victoria	378
Ciannamea,Emiliano	80	Rodríguez,Leandro Enrique	61; 265
Contarde,Cecilia Belén	159	Romero,José	183
Cortez,Franco	220	Romero,Luciano N	153
Cortínez,Víctor H	169	Rossi,Lucia	80
Cravero,Gabriel A	367	Ruido,Evangelina	159
Delnero,Juan Sebastian	191; 196	Ruiz,Dario	203; 277
Di Bernardo,Matías	47	Russell,Nicolás	281
Di Giorgio,Lucas	129	Sabater,Andrés	179; 183; 187
Dominguez,Patricia N	169	Saraullo,Julia	183; 187
Echapresto Garay,Iban	191; 196	Sepúlveda Amaro,Martín E	367
Echarren,Ariel	293	Sequeira,Martín	129
Eguía,Manuel C	251; 277; 340	Slavin,Juan	179
Farina,María Andrea	53; 61; 80	Sorichetti,Patricio	425
Fernandez Vilca,Melina S	153	Spiousas,Ignacio	251
Ferreyra,Sebastián P	367	Stefani,Pablo	80
Galarza,Germán	72; 80	Stoklas,Cecilia	169
Gallego,Santiago	183; 187	Talarico,Jonatan Axel	137; 145
Garzón,Beatriz	35; 406	Tomeo,Daniel	23; 72
Gauvron,Indio	61	Vásquez Martínez,Jennifer	389
Gerez,Federico	261; 322	Vechiatti,Nilda	72; 80
Girón,Pablo	129	Velis,Ariel Gustavo	305
Gomez,Valeria Sol	251	Vereertbrugghen,Matías	47
Gonzalez,Sergio Gustavo	61	Vergara,Ramiro O	159; 232; 281; 322; 332; 340
González,Martín	425	Verstraeten,Federico	425
Guzmán,Alberto Diego	159	Verzero,Lorena	378
Hinalaf,María	153	Viskovic,Manuel	332
Iasi,Federico	72; 80	Yajnes,Marta Edith	23
Juarez,Isabel	35; 406	Yarbouh,Yamili	367
Laborde,Teresa	378	Yebra,Carlos J	153
Lamas,Matías F	153	Zanardi,Esteban	105
Lizaso,Georgina	89; 214; 356	Zerbino,Raúl Luis	305
Lombera,Esteban	232; 261; 281; 322; 332; 340		

Anverso de contratapa en blanco

XIX
CONGRESO ARGENTINO
DE ACÚSTICA
AdAA2025

ISBN 978-631-91690-0-3