

TRABAJO FINAL - PARÁMETROS ACÚSTICOS (USINA DEL ARTE)

Alejo Cohen

*Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: cohen51134@estudiantes.untref.edu.ar*

Matías Di Bernardo

*Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: matias.di.bernardo@hotmail.com*

Ciro Lockey

*Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: lockey51042@estudiantes.untref.edu.ar*

Matías Vereertbrugghen

*Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: matias.veree@gmail.com*

Este informe presenta una caracterización acústica integral del auditorio principal del complejo Usina del Arte, ubicado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Se llevaron a cabo mediciones in situ de parámetros acústicos objetivos que describen el tiempo de reverberación, la claridad, la inteligibilidad, la percepción de eco y relaciones de energía como D/R y LF, junto con el análisis de parámetros subjetivos derivados de respuestas al impulso binaurales procesadas. Los resultados indican un tiempo de reverberación global de 1,92 s, valores de claridad inferiores a los umbrales recomendados para una adecuada inteligibilidad del habla, y valores adecuados para la música sin refuerzo sonoro. El análisis también evidenció la injerencia de las características del estímulo sobre el comportamiento de la sala, resultando en variaciones notorias sobre el τ_e . Se proponen mejoras en tres aspectos clave: reducir el ruido de fondo mediante ajustes en aislamiento y ventilación; optimizar la difusión sonora con secuencias QRD no periódicas; y equilibrar la respuesta espectral corrigiendo la absorción en bajas frecuencias.

Keywords: Acústica de recintos, Tiempo de Reverberación, Parámetros Acústicos, Mediciones Acústicas, Usina del Arte, Respuesta al Impulso.

1. Introducción

Los parámetros acústicos obtenidos mediante la respuesta al impulso son las principales herramientas disponibles a la hora de caracterizar y evaluar el comportamiento de un recinto. Al considerar al mismo como un sistema lineal e invariante en el tiempo, el estudio de la respuesta al impulso permite realizar una caracterización completa de una sala.

En el marco de la materia “Instrumentos y Mediciones Acústicas” de la carrera Ingeniería de Sonido de la Universidad Nacional de Tres de Febrero, se llevó a cabo la caracterización del auditorio la Usina del Arte el día 9 de Junio de 2025. Se registraron una totalidad de 162 respuestas al impulso monoaurales, provenientes de 27 posiciones de micrófono y 3 posiciones de fuente con dos sweeps sinusoidales por combinación. Además, se generaron respuestas al impulso binaurales mediante la utilización de un HATS Kemar y un micrófono Soundfield.

Luego se realizó el posprocesamiento de la información, obteniendo diversos parámetros temporales y energéticos de la sala, pudiendo estudiarlos en el dominio energético, temporal, frecuencial, espacial y perceptivo.

En este informe primero se introduce la historia del auditorio a evaluar, seguido de una recapitulación del estado del arte y del marco teórico empleado para el análisis de parámetros acústicos. Luego se detalla el procedimiento de la medición realizada para proceder con el análisis y conclusiones de los resultados.

Los resultados muestran, en líneas generales, un comportamiento adecuado para una sala de conciertos de estas características. Sin embargo, ciertos aspectos como la curva de tiempo de reverberación, el ruido de fondo y el comportamiento de los difusores dejan lugar a potenciales mejoras.

2. Usina del Arte

La Usina del Arte es un centro cultural ubicado en el barrio de La Boca, en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. El edificio originalmente fue construido a comienzos del siglo XX para albergar la Compañía Ítalo Argentina de Electricidad (CIAE), y funcionó como una planta generadora de energía eléctrica. Su arquitectura, de estilo florentino-industrial, destaca por el uso de ladrillo a la vista y detalles ornamentales que remiten al Renacimiento italiano (Figura 1).



Figura 1: Vista exterior del complejo.

Tras décadas de abandono, el gobierno porteño impulsó su recuperación a partir de 2007, transformando el edificio en un espacio cultural moderno, con la incorporación de salas de exposición, espacios para actividades educativas y un auditorio sinfónico de primer nivel. La Usina del Arte fue inaugurada como centro cultural en 2012.

El diseño acústico del auditorio principal de la Usina del Arte (Figura 2), realizado por el ingeniero Gustavo Basso, se basó en el concepto de acústica natural, buscando una respuesta sonora equilibrada sin necesidad de amplificación electrónica. Para ello, Basso implementó una estructura desacoplada del edificio original mediante el sistema box-in-box, que busca asegurar un alto aislamiento del ruido exterior —especialmente relevante por la cercanía de la autopista—. El acondicionamiento interior se logró combinando superficies difusoras, un reflector acústico suspendido por encima del escenario y materiales nobles como la madera de guatambú. El tiempo de reverberación fue calibrado en torno a los 2 segundos, y se priorizó la distribución uniforme de las reflexiones tempranas laterales, con el objetivo de generar una sensación envolvente y precisa tanto para intérpretes como para el público. Según el propio Basso, el propósito fue que “la sala haga justicia a la música que allí se presentará”.



Figura 2: Vista general del auditorio.

Hoy, la Usina del Arte es un ícono de la reconversión patrimonial en Argentina, y su auditorio es reconocido por su excelencia acústica, albergando conciertos sinfónicos, ciclos de música contemporánea y eventos internacionales [1].

3. Estado del Arte

Los parámetros acústicos son magnitudes cuantitativas que describen cómo se comporta el campo sonoro dentro de un espacio cerrado. Se utilizan para evaluar la calidad acústica de recintos como salas de conciertos, auditorios, teatros, aulas y estudios de grabación. Estos parámetros permiten caracterizar aspectos como el tiempo de reverberación, la claridad del sonido, la percepción espacial y la inteligibilidad de la palabra. Su medición y análisis son fundamentales tanto en la etapa de diagnóstico de un recinto existente como en el diseño y optimización de nuevos espacios, con el objetivo de garantizar condiciones acústicas adecuadas según el uso previsto.

Su estudio comenzó formalmente a principios del Siglo XX, cuando Sabine sentó las bases de la acústica arquitectónica al desarrollar la fórmula del tiempo de reverberación (RT_{60}) en base a métodos experimentales, relacionando el volumen de una sala con la absorción de sus superficies.

Más tarde, investigadores como Beranek [2] y Schroeder [3] introdujeron nuevos conceptos vinculados a la percepción subjetiva, como la claridad (C_{80}) y la definición (D_{50}), entre otros.

En las décadas de 1980 y 1990, el desarrollo de modelos computacionales, mediciones binaurales y normas como la ISO 3382 [4] permitió estandarizar una amplia gama de parámetros acústicos.

Un avance clave fue el desarrollado por Angelo Farina [5] a fines de los años 1990, quien propuso el uso de señales de excitación especiales, como la señal de barrido exponencial (*exponential sine sweep*), para obtener la respuesta al impulso de un recinto con alta precisión y bajo nivel de distorsión. Este método permitió una mejora significativa en la relación señal-ruido y en la eliminación de armónicos no lineales durante la medición. La propuesta de Farina no solo facilitó la medición en campo, sino que también sentó las bases para su implementación digital mediante software especializado, haciendo más accesible y confiable el estudio acústico de espacios reales.

Con el avance tecnológico del Siglo XXI, el análisis de parámetros acústicos pasó de métodos puramente experimentales a enfoques predictivos y computacionales, como el trazado de rayos, los métodos de imágenes y los modelos de partículas. Estas técnicas permiten simular la propagación del sonido y calcular parámetros como el tiempo de reverberación, la energía lateral o la función de transferencia binaural con alta precisión antes de construir un recinto. Herramientas como Odeon [6], CATT-Acoustic [7] y EASE [8] se han convertido en estándares en la práctica profesional.

Actualmente, el estudio de parámetros acústicos no solo busca caracterizar la calidad sonora de

un espacio, sino también optimizar su diseño en función del uso previsto, con criterios tanto físicos como perceptuales. La tendencia actual apunta a una integración de modelos físicos con algoritmos perceptivos y de machine learning, abriendo nuevas posibilidades en acústica predictiva y diseño asistido.

4. Marco Teórico

4.1 Frecuencia de Schroeder

La frecuencia de Schroeder (f_s) es un umbral que delimita la transición entre dos modelos de análisis acústico para un recinto. Por debajo de esta, la respuesta está dominada por modos propios discretos, lo que exige un análisis mediante la acústica ondulatoria y resulta en un comportamiento altamente sensible a las posiciones de la fuente y el receptor. Por encima de f_s , en cambio, la densidad modal es tan alta que los modos se solapan significativamente, permitiendo que la respuesta sea descrita de manera más eficiente y precisa mediante la acústica estadística o geométrica. Su expresión matemática queda detallada en la Ecuación 1, derivada de las investigaciones del Dr. Manfred Schroeder [3].

$$f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{RT}{V}} \quad (1)$$

Donde f_s es la frecuencia de Schroeder en Hz, RT el tiempo de reverberación en segundos, y V el volumen del recinto en m^3 .

Si bien no es un umbral que define una transición abrupta, se trata de un concepto fundamental para el estudio de recintos que permite estimar en la frecuencia en la que sucede esta transición. El campo sonoro es menos uniforme por debajo de dicho rango, por lo que se vuelve más relevante la posición de medición.

A lo largo de los años se propusieron diversos métodos para calificar la respuesta modal de un recinto, como los criterios de Bolt y Bonello entre otros. Básicamente, estos buscan evitar modos pronunciados, donde múltiples fenómenos modales se ubican dentro de un ancho de banda reducido.

4.2 Parámetros Temporales

4.2.1 Tiempo de Reverberación (T_{20} , T_{30} y EDT)

El Tiempo de Reverberación (RT_{60}) es uno de los parámetros acústicos más representativos del comportamiento de un recinto. Se define como el tiempo que tarda el nivel de presión sonora en decaer 60 dB desde que se interrumpe la emisión de la fuente sonora.

En la práctica, la medición directa de una caída de 60 dB suele verse limitada por el piso de ruido del recinto, por lo que la norma ISO 3382-1 [4] propone calcular el tiempo de reverberación a partir de decaimientos parciales extrapolados a 60 dB mediante una regresión lineal de mínimos cuadrados (Figura 3). Típicamente T_{20} , tiempo extrapolado a partir de un decaimiento de 20 dB (de -5 a -25 dB) y T_{30} , tiempo extrapolado a partir de un decaimiento de 30 dB (de -5 a -35 dB).

Adicionalmente, se introduce el parámetro EDT (Early Decay Time), que estima el RT_{60} a partir de los primeros 10 dB de atenuación (de 0 a -10 dB). Este valor está relacionado con la percepción subjetiva de la reverberación, ya que refleja el comportamiento inicial del campo reverberante.

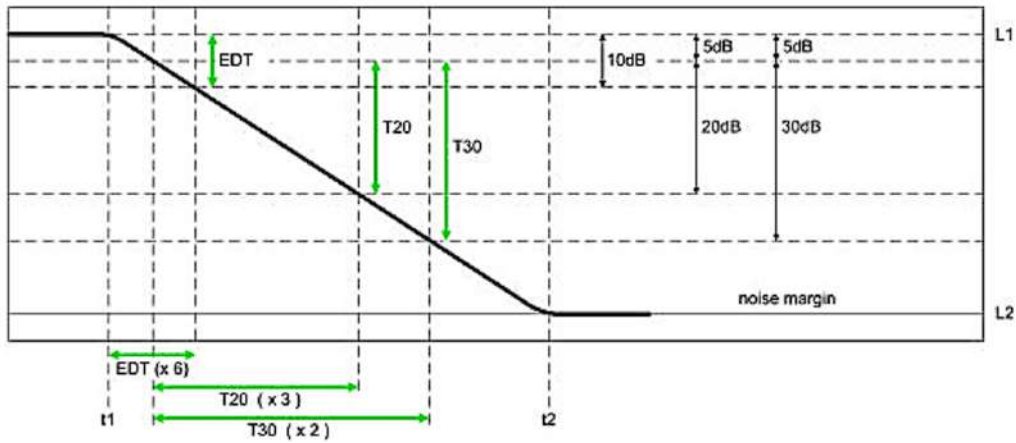


Figura 3: Exposición de los distintos parámetros que definen el tiempo de reverberación.

Tiempos de reverberación $T_{mid} = [1,7 s - 2 s]$ fueron propuestos por Beranek [2] como idóneos para una sala de conciertos, en base al estudio de los tiempos observados en las salas más reconocidas y destacadas.

4.3 Parámetros Energéticos

4.3.1 Fuerza (G)

El factor fuerza cuantifica el refuerzo de presión sonora aportado por la sala en comparación a la condición de campo libre. En rigor, se define como la diferencia en el nivel SPL de una fuente omnidireccional ubicada en el escenario, medida en un punto específico de la sala, y el nivel SPL de la misma fuente medida a una distancia de 10 m en condición anecoica. Según la norma ISO 3382, el parámetro G se calcula como:

$$G = 10 \log \left(\frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \right) \quad (2)$$

En la ecuación presentada, $p(t)$ corresponde a la presión sonora instantánea obtenida a partir de la respuesta al impulso medida en el punto de análisis, mientras que $p_{10}(t)$ se refiere a la presión sonora instantánea de una respuesta al impulso registrada a una distancia de 10 metros, ya sea en condiciones de campo libre o dentro de una cámara anecoica. Se toma $t = 0$ como el momento de llegada del sonido directo. El límite superior de integración, ∞ , debe entenderse como un instante de tiempo suficientemente posterior, tal que la curva de decaimiento haya alcanzado al menos una caída de 30 dB.

De acuerdo a lo estipulado por Beranek [9], valores entre $[4 - 7 dB, 5 dB]$ resultan frecuentes en salas de 'gran calidad acústica'.

4.3.2 Claridad (C_{50} y C_{80})

Este parámetro describe la relación entre la energía sonora temprana y la energía sonora tardía o reverberante. Se define el parámetro C_{50} como *Claridad de la Palabra* y el parámetro C_{80} como *Claridad Musical*; donde el número de cada uno hace referencia al tiempo de integración, como se observa en las Ecuaciones 3 y 4.

$$C_{50} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

donde $p(t)$ representa la presión acústica instantánea en el punto de medición como función del tiempo t .

4.4 Parámetros de Inteligibilidad

4.4.1 Speech Transmission Index (STI)

El Speech Transmission Index (STI) es un parámetro objetivo que cuantifica la inteligibilidad del habla en un recinto, ya sea natural o mediado por un sistema electroacústico. Fue desarrollado por Tammo Houtgast y Herman Steeneken en la década de 1970 [10], y desde entonces se ha convertido en un estándar internacional ampliamente aceptado. El STI se basa en la conservación de las modulaciones de amplitud de la señal del habla a través del canal de transmisión.

Este índice se deriva de la función de transferencia de modulación (*Modulation Transfer Function, MTF*), la cual describe cómo las modulaciones del habla (típicamente entre 0,63 Hz y 12,5 Hz) son atenuadas por el entorno. Factores como la reverberación, el ruido de fondo y la distorsión afectan negativamente a estas modulaciones, disminuyendo así el valor del STI.

El STI varía entre 0 (ninguna inteligibilidad) y 1 (inteligibilidad perfecta), y puede calcularse a partir de medidas objetivas de la respuesta al impulso del recinto, tanto con como sin presencia de ruido.

Tabla 1: Niveles de inteligibilidad del habla según el índice STI (ISO 60268-16 [11]).

STI	Nivel de inteligibilidad
0,00–0,30	Muy pobre
0,30–0,45	Pobre
0,45–0,60	Aceptable
0,60–0,75	Buena
0,75–1,00	Excelente

4.4.2 Articulation Loss of Consonants (%Alcons)

El parámetro %Alcons (*Articulation Loss of Consonants*) fue propuesto por V.M.A. Peutz en 1971 como una medida cuantitativa de la pérdida de inteligibilidad del habla [12], específicamente de las consonantes, en recintos cerrados. Se basa en la observación de que las consonantes, al tener menor energía que las vocales, son más susceptibles a ser enmascaradas por el ruido de fondo y la reverberación.

Una vez obtenido el valor de STI se estima el valor de %Alcons según:

$$\%Alcons = 170 \cdot e^{-5,4 \cdot STI} \quad (5)$$

Tabla 2: Niveles de inteligibilidad del habla según el porcentaje de pérdida de consonantes (Alcons).

Alcons (%)	Nivel de inteligibilidad
0–5	Excelente
5–10	Buena
10–15	Aceptable
15–20	Deficiente
>20	Inadecuada

4.5 Parámetros Espaciales

4.5.1 Echo Criterion (EK)

Plantea la relación entre el incremento de energía dado un intervalo de tiempo $\frac{\Delta\tau_s(t)}{\Delta\tau_E}$. Permite determinar si una reflexión o conjunto de ellas se perciben como eco.

$$EK = \frac{t_s(\tau) - t_s(\tau - \tau_E)}{\Delta\tau_E} \quad (6)$$

donde $\Delta\tau_E$ corresponde al intervalo de tiempo crítico el cual se analiza, 9 ms para el habla (*Echo Speech*) y 14 ms para la música (*Echo Music*), mientras que t_s se obtiene de la siguiente ecuación

$$t_s(\tau) = \frac{\int_{t=0}^{\tau} |h(t)|^n \cdot t \, dt}{\int_{t=0}^{\tau} |h(t)|^n dt} \quad (7)$$

donde $h(t)$ corresponde a la presión del sonido y el exponente n corresponde a un valor tabulado, siendo igual a 1 para el análisis del *Echo Music* e igual a $2/3$ para el *Echo Speech*. Los valores críticos para que una reflexión se perciba como eco serán cuando $EK \geq 1,8$ para *Echo Music* y $EK \geq 1$ para *Echo Speech*.

4.5.2 Lateral Fraction (LF)

Este parámetro relaciona la energía lateral y no lateral durante los primeros 80 ms. Se obtiene de una medición en la cual se utilizan un micrófono omnidireccional y uno bidireccional. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$LF = 10 \log \left(\frac{\int_{10ms}^{80ms} p_{bi}(t)^2 dt}{\int_{0ms}^{80ms} p_{omni}(t)^2 dt} \right) [dB] \quad (8)$$

donde p_{bi} corresponde a la presión sonora registrada por el micrófono bidireccional apuntando a noventa grados de la fuente, es decir, con su eje nulo hacia la fuente y p_{omni} corresponde a la presión registrada por el micrófono omnidireccional, ambos en el mismo punto. Los valores sugeridos por Glen Ballou [13] se encuentran entre $[0, 1 - 0, 25]$.

4.5.3 Obtención de señales omnidireccional y bidireccional

El micrófono SoundField emplea cuatro cápsulas en configuración tetraédrica cuyos preamplificadores se denominan A-Format:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} LF \\ RF \\ LB \\ RB \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Mediante la matriz de conversión estándar (basada en Gerzon, 1985[14] y el manual SoundField[15]) se pasa a B-Format:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{A}. \quad (10)$$

De aquí se extraen directamente:

$$W = \frac{1}{2}(LF + RF + LB + RB), \quad Y = \frac{1}{2}(-LF + RF - LB + RB), \quad (11)$$

siendo W la señal omnidireccional y Y la bidireccional lateral. Este procedimiento es el indicado para parámetros como Lateral Fraction u otros índices de dirección sonora.

4.5.4 Direct to Reverberant ratio (D/R)

Este parámetro refleja el cociente, en un punto dado, entre la presión sonora del sonido directo y del sonido reverberante para una misma fuente.

$$\frac{D}{R} = 10 \log \left(\frac{\int_0^Q p^2(t) dt}{\int_Q^\infty p^2(t) dt} \right) \quad [dB] \quad (12)$$

donde Q es el instante en el cual se considera que llega energía del sonido directo. Un valor de D/R de $0dB$ implica equipotencia de los factores, es decir, que ese punto en el espacio se encuentra a la distancia crítica. Sin embargo, en una sala de concierto típica es raro ver tal fenómeno, y el D/R suele tener valores inferiores a los $-3dB$.

4.5.5 Interaural Cross-Correlation Coefficient (IACC)

Este es el coeficiente de correlación cruzada interaural, el cual es un parámetro acústico que cuantifica el grado de similitud entre las señales sonoras que llegan al oído izquierdo y al derecho de una persona. Su valor se encuentra entre 0 y 1, siendo un valor de alta correlación si se encuentra cerca de 1. Este se puede obtener usando la siguiente ecuación.

$$IACC = \max_{\tau \in [-1 \text{ ms}, 1 \text{ ms}]} \left| \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) \cdot p_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt}} \right| \quad (13)$$

Donde:

- $p_L(t)$ y $p_R(t)$: señales acústicas en los oídos izquierdo y derecho, respectivamente.
- τ : retardo temporal (entre -1 y $+1$ ms), que simula el desfase natural entre ambos oídos.
- t_1 y t_2 : límites del intervalo de análisis, típicamente 0 y 80 ms, correspondientes a los primeros instantes de la respuesta al impulso (RIR).

Valores de entre $[0, 55 - 0, 59]$ se consideran aceptables a buenos, mientras que valores entre $[0, 28 - 0, 38]$ resultan idóneos para una sala de conciertos [2].

Éste parámetro representa el máximo de la función de correlación cruzada interaural normalizada IACF.

4.5.6 Acoplamiento acústico

Cuando se interconectan acústicamente dos recintos con tiempos de reverberación significativamente distintos, la curva de decaimiento de energía acústica en uno de ellos puede verse afectada por la del otro. Si el área de conexión es considerablemente menor que la superficie de cada sala, es posible observar que la pendiente de la curva de decaimiento del recinto menos reverberante se reduce a partir de cierto momento. Este fenómeno se conoce como acoplamiento acústico.

La constante de acoplamiento (CC) cuantifica cuánto se modifica la pendiente de decaimiento de un recinto al ser acoplado con otro. Cuanto mayor es el valor de CC, mayor es el efecto del acoplamiento:

$$CC = \frac{RT_{60}}{RT_{15}} \quad (14)$$

En condiciones normales, los parámetros T_{60} y T_{15} de un recinto son similares, ya que la curva de decaimiento energético tiende a comportarse como una línea recta. Sin embargo, en presencia de

acoplamiento acústico significativo, esta relación cambia: al disminuir la pendiente después de un cierto tiempo, la energía tarda más en descender de 0 dB a 60 dB que de 5 dB a 20 dB, resultando en $T_{60} > T_{15}$. Cuanto mayor es el acoplamiento, mayor será esta diferencia.

Por último, dado que la relación señal-ruido necesaria para poder medir T_{60} es difícil de conseguir en la práctica, se suele reemplazarlo por el T_{30} para el cálculo de acoplamiento.

4.5.7 Listener Envelopment (LEV)

El LEV es un parámetro perceptual que indica qué tanto el oyente se siente “envuelto” por el campo sonoro, gracias a las reflexiones tardías y difusas que llegan desde los lados. Su cálculo relaciona la fuerza tardía G_{late} y la fracción lateral tardía, ambas en frecuencias medias.

$$LEV = 0,5 G_{late} + 10 \log(LF_{late}) \quad (15)$$

Donde el G_{late} esta dado por la siguiente ecuación:

$$G_{late} = G - 10 \log\left(1 + 10^{\frac{C_{80}}{10}}\right) \quad (16)$$

Según la norma ISO 3382, el rango típico para este parámetro está entre $-14dB$ y $1dB$.

4.6 Soporte de Escenario (Stage Support)

Los parámetros de soporte de escenario se introducen en el Anexo C de la norma ISO 3382-1 para evaluar de forma objetiva las condiciones acústicas en la plataforma de una orquesta desde la perspectiva de los músicos [4]. Estos parámetros cuantifican la facilidad con la que los intérpretes pueden escucharse entre sí y la respuesta que perciben de la sala. Se miden con la fuente y el receptor a una distancia de 1 m.

4.6.1 Soporte Temprano (ST_{Early})

El Soporte Temprano (ST_{Early}) se relaciona con la cohesión del ensamble musical, es decir, la capacidad de los músicos para escucharse mutuamente. Se define como la relación, en decibelios, entre la energía sonora reflejada que llega entre 20 ms y 100 ms, y la energía del sonido directo (primeros 10 ms) [4].

$$ST_{Early} = 10 \log \left(\frac{\int_{20\text{ms}}^{100\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{0\text{ms}}^{10\text{ms}} p^2(t) dt} \right) \quad [\text{dB}] \quad (17)$$

donde $p(t)$ es la presión sonora instantánea de la respuesta al impulso.

4.6.2 Soporte Tardío (ST_{Late})

El Soporte Tardío (ST_{Late}) está asociado a la reverberancia percibida por los músicos, es decir, la respuesta acústica de la sala tal como ellos la sienten. Se define como la relación, en decibelios, entre la energía reflejada que llega después de los 100 ms, hasta 1 s después, y la energía del sonido directo [4].

$$ST_{Late} = 10 \log \left(\frac{\int_{100\text{ms}}^{1000\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{0\text{ms}}^{10\text{ms}} p^2(t) dt} \right) \quad [\text{dB}] \quad (18)$$

donde $p(t)$ es, igualmente, la presión sonora instantánea de la respuesta al impulso.

4.7 Autocorrelation Function (ACF) y τ_e

La función de autocorrelación es el proceso matemático similar a la convolución que evalúa la similitud entre dos señales. Un valor alto de ACF indica alta similitud, mientras que uno bajo representa señales dispares. Se compara una señal con su versión retardada en el tiempo, obteniendo una función que depende del retardo. La función de autocorrelación se define por:

$$\varphi_p(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} p'(t) \cdot p'(t + \tau) dt \quad (19)$$

Donde $p'(t)$ representa la presión sonora en función del tiempo, subjetivada mediante la curva de ponderación A, la cual hace las veces de función de transferencia para la curva de sensibilidad del oído humano. Al graficar la autocorrelación entre la forma de onda y su versión con retardo como función del desplazamiento, se obtiene la llamada 'Running autocorrelation function' (r-acf) y su duración τ_e . La curva $r - acf$ muestra un máximo para desplazamiento cero y decrece conforme este incrementa.

Por otro lado, τ_e denota la duración efectiva de la $r - acf$, marcado por el punto en que esta decae 10 dB a partir de su máximo. Puede ser obtenido al extrapolar la pendiente inicial del decaimiento de la autocorrelación a los $-10dB$, ajustando la envolvente de la ACF normalizada de 0 a 5 dB con una línea recta y extrapolarlo esta función lineal hasta que alcance 10 dB.

4.8 Just Noticeable Difference (JND)

El JND es la mínima variación en una magnitud o estímulo que un observador puede detectar y percibir como un cambio real. Este umbral se determina mediante pruebas experimentales y estudios subjetivos, y su valor puede variar según el tipo de estímulo y las condiciones de la percepción. La Tabla 3 presenta valores típicos de JND para diferentes parámetros relevantes en este estudio.

Tabla 3: Valores de JND para parámetros de interés.

T_{30}	EDT	STI	D/R	%AlCons	LF
5 %	5 %	3 %	2 dB	3 %	5 %

4.9 Valores de referencia

En su libro 'Acoustics in Halls for Speech and Music' [16], Gade establece la referencia de valores deseables para diversos parámetros acústicos de acuerdo al uso estipulado de una sala (Tabla 4).

Tabla 4: Valores de referencia para parámetros de interés.

	T_{30} [s]	EDT [s]	C_{80} [dB]	IACC	G [dB]	LF
Sala Sinfónica	2–2,4	2,2	-1	0,5	3	0,2–0,25
Sala Música de Cámara	1,5	1,4	3	0,4	10	0,15–0,2

Basadas en encuestas subjetivas, estas referencias sirven para contrastar los parámetros obtenidos y evaluar su idoneidad de acuerdo al caso de aplicación.

4.10 Noise Criteria

Las curvas de ruido establecidas por el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares permiten categorizar el ruido de fondo presente en un recinto a partir de un único valor [17]. El método consiste

en una serie de curvas de Nivel de Presión Sonora en función de la frecuencia entre las bandas de octava de 63 y 8000 Hz. Se dice que un recinto tiene un valor NC específico igual a la mínima curva que no es superada por el espectro de ruido en ninguna banda (Figura 4).

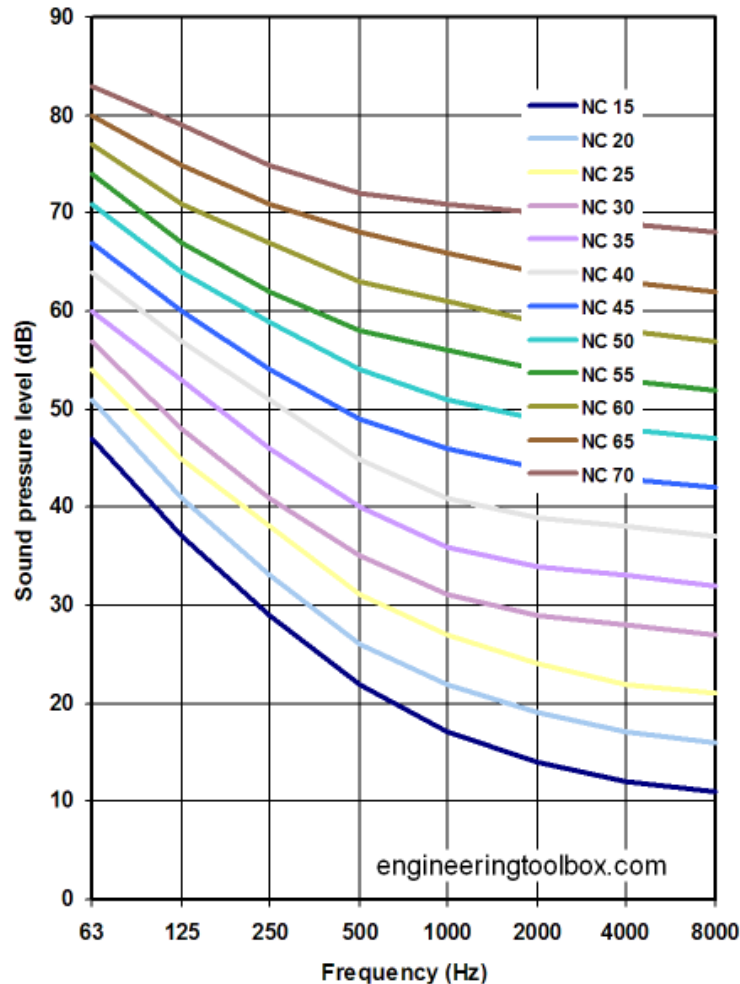


Figura 4: Curvas NC.

La forma de las curvas NC no es plana; permite mayores niveles de presión sonora en bajas frecuencias que en altas. Este diseño se basa en la percepción auditiva humana, que es menos sensible a las bajas frecuencias y, a su vez, considera los sonidos agudos como más molestos o propensos a enmascarar la inteligibilidad del habla. Por lo tanto, las curvas buscan representar contornos de igual aceptabilidad, convirtiéndose en un indicador de la calidad acústica ambiental más representativo que un simple nivel ponderado en dBA.

La aplicación de este criterio varía según el uso del espacio. Para recintos que demandan condiciones de silencio críticas, como las salas de concierto o estudios de grabación, se especifican valores muy bajos, del orden de NC-15 a NC-20. En contraste, para una oficina privada se considera aceptable un NC-30 o NC-35, mientras que en un lobby o área de circulación, un NC-40 podría ser adecuado. Estos valores buscan garantizar que el ruido de los sistemas de ventilación y aire acondicionado (HVAC) no interfiera con la actividad principal del recinto. Para el presente estudio, resultan de especial interés las curvas NC-20 y NC-15, al ser estas las recomendadas para salas sinfónicas.

5. Procedimiento

5.1 Relevamiento

Durante la visita a la Usina del Arte, en paralelo a la preparación del equipamiento necesario para realizar las mediciones pertinentes, se efectuó un relevamiento detallado y completo del auditorio. Este contó con el objetivo de analizar en profundidad sus características tanto constructivas como de comportamiento acústico, aspectos que pueden no resultar evidentes visualizando planos o descripciones disponibles en Internet. En la Figura 5, se observa el plano de planta del auditorio.

En cada área del recinto se inspeccionaron los materiales y características de las superficies, detalles de diseño arquitectónico, dimensiones específicas (no presentes en los planos), posicionamiento de butacas y la distribución y diseño de los difusores. Además, se realizó un análisis perceptivo de la respuesta acústica del recinto y se evaluó la línea de visión de las diferentes áreas de audiencia. A continuación, se presenta una descripción detallada de cada una de las áreas principales del auditorio.

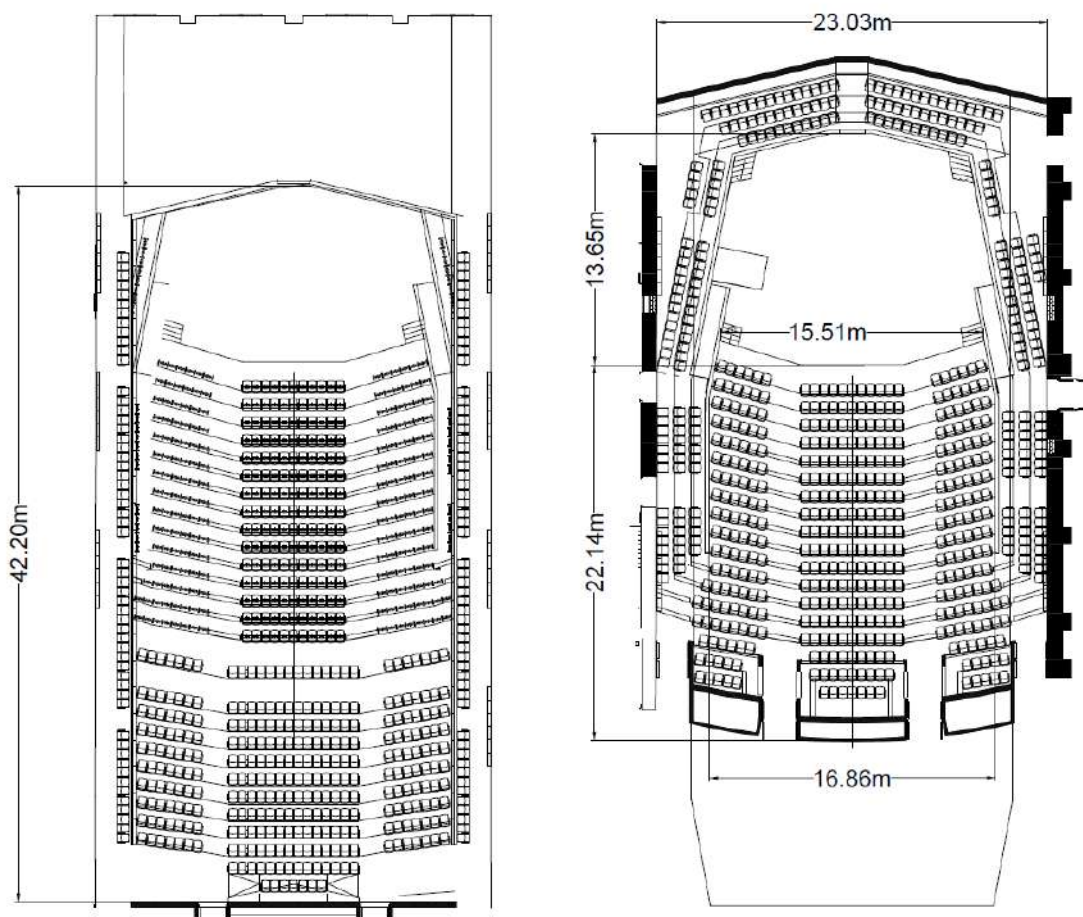


Figura 5: Planos del auditorio. La figura de la izquierda detalla la planta del segundo piso. La figura de la derecha muestra la planta principal, incluyendo la platea, los balcones laterales y el escenario.

5.1.1 Escenario

El escenario (Figura 6) se encuentra 88 cm por sobre el suelo, y su superficie es de madera flotante, cubriendo aproximadamente 187 m^2 . Desde el punto de vista acústico, resulta importante destacar el hecho de que la totalidad de su superficie se encuentra sobre una cavidad de aire, resultando en un gran sistema masa-resorte.

Sus paredes traseras y laterales presentan un tratamiento acústico mediante paneles de madera perfilada, configurados como celdas difusoras de tipo QRD7.



Figura 6: Escenario del auditorio.

El acceso al mismo se realiza mediante escaleras ubicadas en ambos laterales, tanto en la parte frontal (conexión con el área de audiencia) como en la posterior (conexión hacia camarines, depósitos y pasillos internos del edificio). Además, existen rampas laterales (con barandas metálicas en paralelo) que lo vinculan con los balcones de la planta baja (PB). En la parte trasera del escenario se encuentran dos puertas individuales, mientras que en los laterales existen accesos de puertas dobles ocultos bajo el nivel del piso, los cuales se utilizan para permitir el ingreso de instrumentos de gran porte u otros elementos voluminosos. Las puertas están construidas en chapa metálica tipo antidisturbios, aunque se encuentran mimetizadas mediante calcomanías que replican el patrón de los difusores.

En la parte posterior y delantera del piso del escenario se encuentran aberturas de ventilación, las cuales están compuestas por rejas metálicas que alojan en su interior conductos de aluminio galvanizado de zinc. También se observa un enrejado en el frente del escenario —es decir, la cara frente al público— que forma parte del mismo sistema de ventilación. Este frente está revestido en madera enchapada.

La superficie que se eleva detrás del escenario es asimétrica respecto del resto de las superficies y de la orientación del recinto. Esta consiste en el QRD7 mencionado en la parte superior y es un panel de madera liso en la parte inferior (justo detrás de los asientos).

5.1.2 *Reflector Acústico*

Uno de los elementos más característicos de la sala es el reflector acústico colocado sobre el escenario (Figura 7). Este está compuesto por una estructura de hierro recubierta con madera de guatambú y suspendida mediante cables de acero del techo, cubriendo una extensión de aproximadamente 12m de largo, por 10m de ancho.

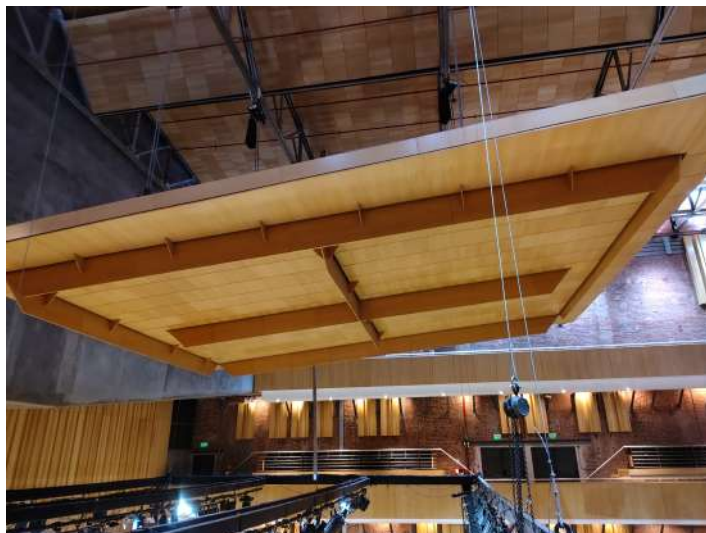
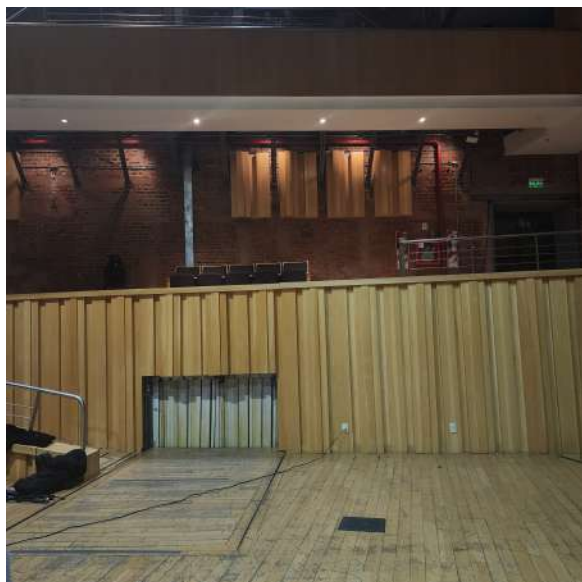


Figura 7: Reflector acústico

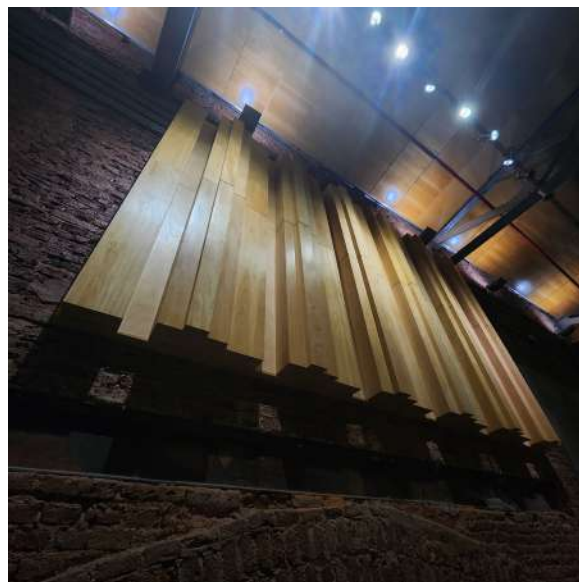
Su disposición y ángulo de inclinación (regulables mediante un motor con poleas encima de ella) se corresponden con la intención de generar una mayor distribución energética, redirigiendo la parte del campo acústico que iría al techo, hacia la audiencia.

5.1.3 Difusores

Otro elemento destacado del diseño acústico del recinto son los difusores del tipo QRD7 (Figura 8). Presentes en dos modulaciones de la misma secuencia numérica, cubren una porción considerable de las paredes laterales, y prácticamente la totalidad de los extremos de la sala.



(a) Superficies difusoras (Sec. #1)



(b) Paneles difusores (Sec. #2)

Figura 8: Elementos difusores

$$\text{Secuencia de Difusores} : [0, 2, 2, 0, 3, 4, 3] \quad (20)$$

Si bien la secuencia es la misma, a modo de simplificar su análisis, llamaremos 'Secuencia #1' a aquella utilizada en los laterales del escenario y paredes extremo, y 'Secuencia #2' a la presente en los paneles difusores suspendidos sobre las paredes laterales.

La primera, cuenta con un ancho de celda de 10 cm y una profundidad máxima idéntica. La segunda, presenta un ancho de celda de 13 cm y una profundidad máxima de 25 cm. A continuación se presenta en el rango espectral de funcionamiento de los difusores en la Tabla 5:

Secuencia	Ancho total [m]	F_{min} [Hz]	F_{max} [Hz]	$F_{min} * 0,6$ [Hz]
#1	0,7	981	1717	589
#2	0,91	490	1320	294

Tabla 5: Parámetros de los difusores.

Si bien no es el caso para los paneles difusores (Sec. #2), la primer secuencia se repite de manera considerable: Grandes extensiones de superficie se encuentran cubiertas por ella, por lo que resulta de interés el estudio de la evolución del ACQF conforme se repite la secuencia (Tabla 6).

Repeticiones	-	1	2	3
ACQF	0,412	1,027	1,580	2,035

Tabla 6: ACQF en función de las repeticiones del difusor.

Como se puede observar, la secuencia aumenta su autocorrelación en gran medida conforme se repite, por lo sería esperable observar una baja en el coeficiente de difusión de los mismos, implicando comportamiento lobular en el patrón de reflexión de los difusores (Figura 9).

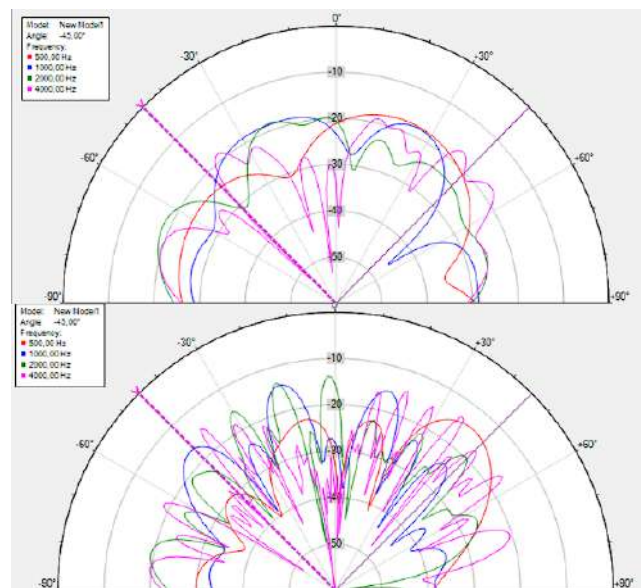


Figura 9: Patrón polar sin repetición (arriba) y para tres bloques (abajo).

El análisis polar evidencia el comportamiento previamente mencionado, donde la repetición de la secuencia resulta en difusión subóptima.

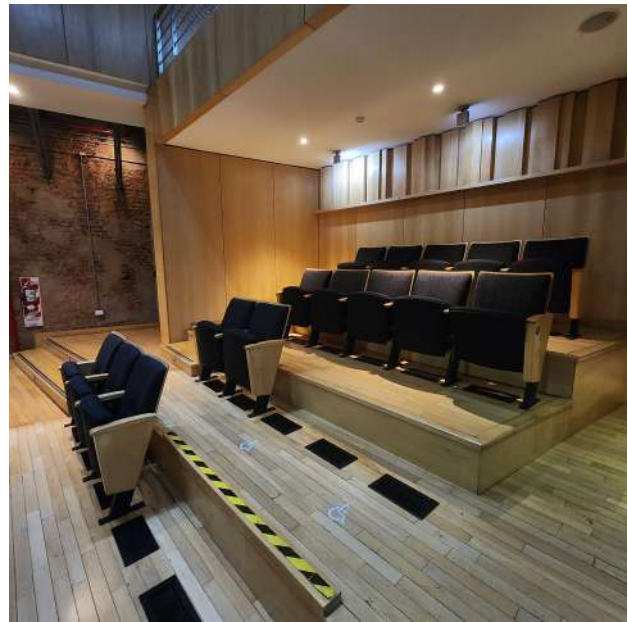
5.1.4 Planta Baja - Platea Baja Central

El piso de la planta baja está revestido en madera, del mismo tipo que el escenario (parquet). La pared del fondo está dividida en dos; una mitad inferior de superficie de madera perfilada lisa y difusores QRD7 en la mitad superior (Figura 10).

La platea se divide en tres bloques de asientos: dos laterales y uno central. Los bloques laterales poseen filas de seis butacas, mientras que el bloque central está compuesto por filas de once. El bloque central tiene sus asientos ordenados en el tipo grilla y los laterales en tipo scattered o difuso.



(a) Vista desde el escenario, a la audiencia.



(b) Espacio bajo bandeja en PB.

Figura 10: Platea baja central.

Cada fila se ubica sobre un escalón de distinta altura a la de los escalones del pasillo. En total, se cuentan 18 filas de asientos, pero varían en la cantidad de asientos.

El bloque central no se extiende hasta el fondo del recinto, sino que finaliza antes de alcanzar la pared posterior, donde, debajo de la bandeja del primer piso se ubica un sector de FOH cuyo piso está alfombrado. En dicha zona cubierta, el techo es de yeso tipo Durlock. Además, allí se tienen 6 lugares dedicados para espectadores con algún tipo de discapacidad motriz.

De los asientos de los extremos a las paredes hay una separación de 8 cm. Los pasillos de circulación son de 166 cm de ancho. La altura de los escalones es de 12 cm para los pasillos generales y de 18 cm para los escalones cercanos a la puerta. El ancho de los pasillos de los balcones que están conectados con las puertas de acceso es de 2m.

Debajo de cada butaca se observan rejillas de ventilación integradas al sistema de climatización, excepto en las primeras 4 filas.

5.1.5 1er Piso - Platea Alta Central

La tribuna ubicada en el 1er piso (Figura 11a), por encima de la planta baja, cuenta con tres bloques de audiencia. El bloque central con 14 asientos por fila y los laterales con 7 asientos por fila. Justo delante de la 1era fila, hay una baranda metálica de seguridad que facilita la visión de las primeras filas. El ancho de los pasillos es de 176 cm y los escalones son de 20 cm de alto.



(a) Platea alta central.



(b) Asientos en el empotrado de la pared trasera.

Figura 11: Balcones

La pared del fondo está constituida en su totalidad por difusores QRD7, y cuenta con una cabina para sonidista o iluminación en altura. Debajo de dicha cabina, hay un espacio empotrado para 7 asientos (Figura 11b). Además, se tienen dos rejillas de ventilación y dos pares de puertas de acceso, cuyos Soundlocks son más grandes que los del resto del recinto. Las paredes laterales (justo al lado de los bloques laterales de audiencia) son paneles lisos de madera.

Por otro lado, se tienen aberturas de ventilación debajo de todos los asientos, excepto en las primeras 2 filas.

Como comentario adicional, la autopista está a la altura del 1er piso, que no se percibe como un problema de ruido concreto, por lo que se entiende que se logró controlar dicho potencial problema.

5.1.6 2do Piso - Balcones Superiores

El área compuesta por las butacas del último nivel, considerada como el segundo piso (Figura 12), por encima de la bandeja del primero, tiene un piso alfombrado presentando en cada costado, una sola fila de 16 asientos. Se constató que, en caso de reposar contra el respaldo, la línea de visión del espectador en estas butacas es nula debido a la pared de contención, por lo que para poder ver el escenario se debe inclinar hacia adelante.



Figura 12: Balcón superior.



Figura 13: Rampa superior trasera.

Las paredes traseras son de ladrillo sin revoque, con algunas geometrías semicirculares con revoque de cemento. En dichas paredes se tienen colgados paneles de difusores QRD7 concatenados. Por otro lado, la pared sobre el escenario, a la misma altura del nivel en cuestión, es una rampa que se conecta con una salida de emergencia trasera (Figura 13). En dicho sector la pared que bordea la rampa es de concreto. Esta pared frontal tiene también rejillas de ventilación.

5.1.7 Balcones - PB y 1er Piso

Las paredes traseras de los balcones son de ladrillo expuesto, con paneles difusores QRD7 distribuidos cubriendo secciones de las mismas. Los difusores están espejados de un lado del auditorio respecto del otro, colgados al revés. A su vez, el cielorraso de los balcones es de placa de yeso (Figura 14a).



(a) Balcón 1er piso.



(b) Balcón adyacente al escenario

Figura 14: Balcones

En las butacas de los balcones traseros al escenario (PB) no hay aberturas de ventilación. En los balcones laterales al escenario, solo en la 2da fila, y, en los balcones laterales al área de audiencia de PB, en la 1er y 3era fila (Figura 14b).

Por otra parte, en los balcones del 1er piso, la 2da fila se ubica sobre una estructura de madera que está elevada una altura equivalente a 5 escalones (respecto del pasillo que lleva a una de las puertas de salida lateral). Además, se tienen 16 asientos por fila.

En cuanto a los accesos, hay dos puertas dobles en cada lado (en cada balcón lateral).

El muro o baranda que determina el límite de los balcones son paneles lisos de madera, cuya profundidad es de 22 cm y se logró detectar que esta estructura contiene una cavidad de aire. Vale mencionar que en la primera fila hay muy poca visibilidad debido a dicho muro.

5.1.8 Techo

El techo del auditorio tiene forma inclinada a dos aguas, con su estructura metálica expuesta a la vista y está revestido con paneles de madera lisa que cubren toda la superficie. En el eje longitudinal de la sala, se destaca un volumen triangular invertido que recorre la superficie en su totalidad (Figura 15). Por otro lado, el techo cuenta con vigas que sostienen la nube, luces y a los sistemas de refuerzo sonoro.

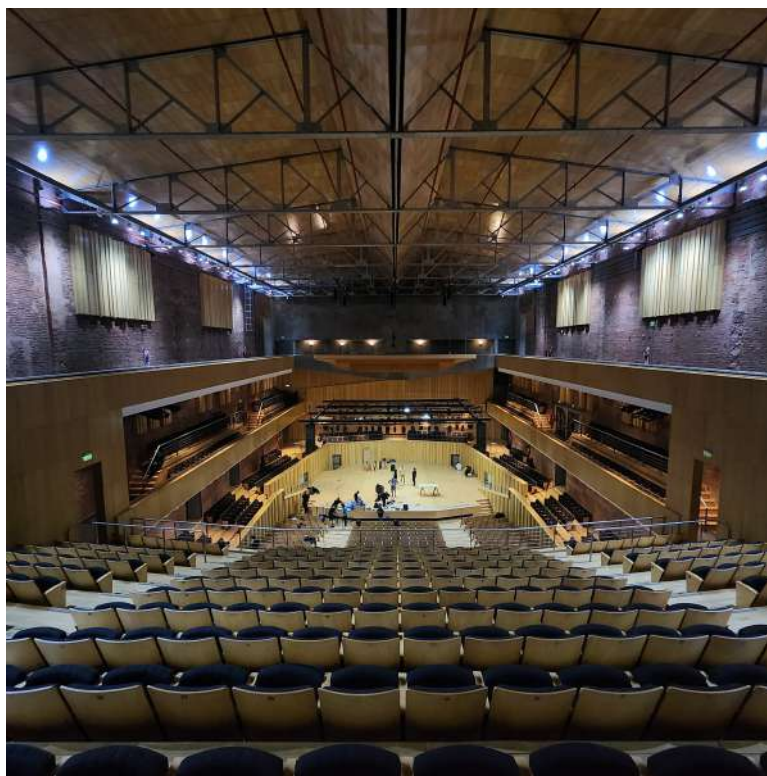


Figura 15: Plano general del techo

5.1.9 Butacas

En cuanto las butacas instaladas en el auditorio, estas corresponden al modelo "Zeta 2" del fabricante nacional Rassegna [18] (Figura 16).



Figura 16: Butaca utilizada

Están montadas sobre estructuras metálicas y tanto los respaldos como los apoyabrazos y la superficie inferior del asiento están contruidos en madera. El respaldo y la base del asiento están tapizados y acolchonados. En la Figura 17 se observan las butacas dispuestas en la Usina del Arte.

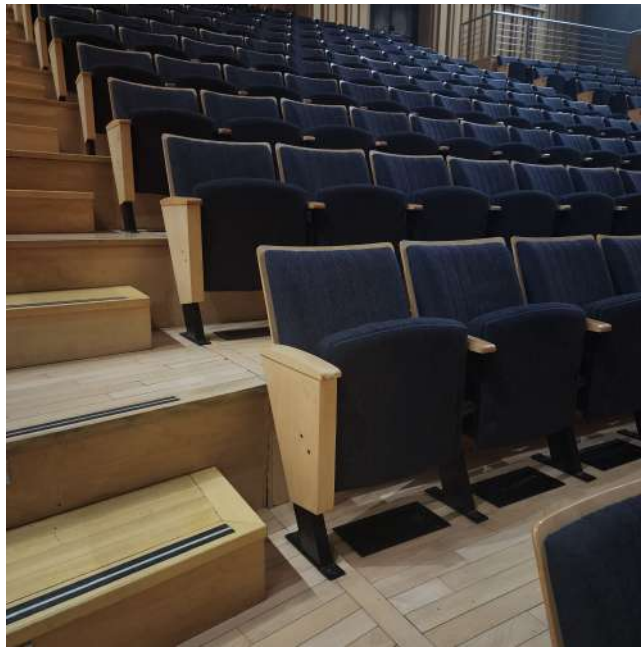


Figura 17: Butacas situadas en el auditorio. Debajo, son visibles las aberturas de ventilación.

El ancho de la base de los asientos es de 60 cm (de un apoyabrazo a otro), y la profundidad es de 45 cm y de 70 cm para los casos de asiento cerrado o abierto, respectivamente. El respaldo tiene una altura de 90 cm y ancho de 50 cm.

El espacio entre filas para circulación es de 53 cm con el asiento cerrado o de 48 cm con el asiento abierto. En el caso de la 1era fila del balcón, se tienen 40 cm entre el asiento abierto y el muro divisorio.

5.2 Simulación en EASE 4.3

En una instancia previa, se realizó la simulación del recinto en el software EASE 4.3. Éste proceso comienza con la obtención de los planos del recinto, cortesía de la técnica del mismo, y su posterior representación en un modelo tridimensional en SketchUp.

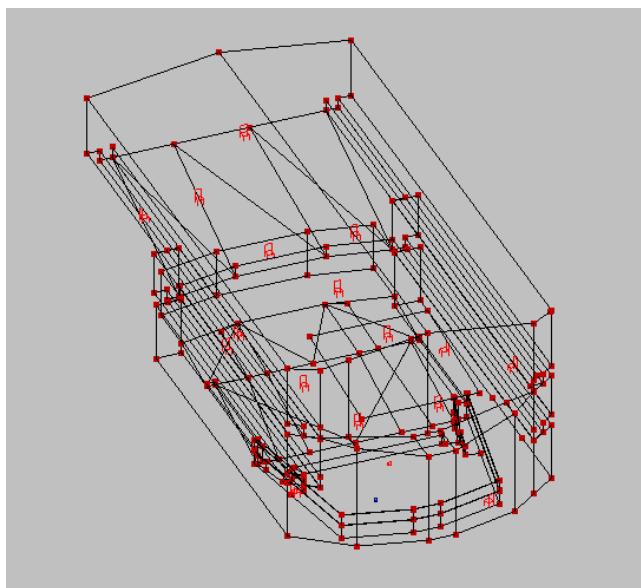


Figura 18: Modelo generado en EASE

Luego, dicho modelo es ingresado a EASE (Figura 18), donde se asignan materiales con sus

respectivos coeficientes de absorción y scattering a las superficies. A continuación, se asignan las áreas de audiencia, fuentes y puntos de medición de los cuales luego se obtendrá una respuesta al impulso. Se llevó a cabo un proceso iterativo de ajuste de coeficientes y superficies, a modo de obtener parámetros acordes a mediciones preexistentes del recinto. Una vez el modelo se vio suficientemente ajustado en términos generales, se procedió a realizar su completa caracterización en base al módulo de ray-tracing del software. Se eligió utilizar una configuración donde se generen 800.000 rayos por fuente, y se analicen las reflexiones de hasta orden 20, en una ventana de tiempo prudencial sugerida por el manual del software como el producto entre el máximo orden de reflexiones y el tiempo medio de vuelo para un rayo en la sala.

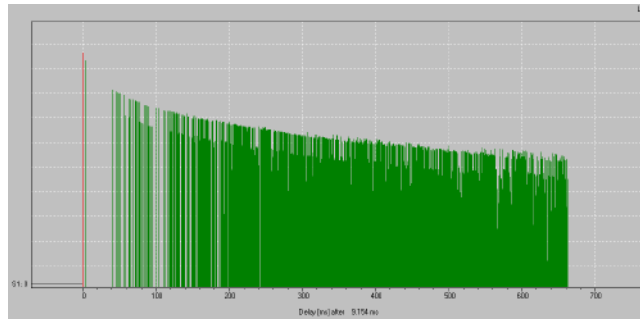


Figura 19: Reflectograma sintético.

El módulo de ray-tracing arroja como resultado un reflectograma (Figura 19) para cada posición de medición, al cual luego se añade una cola estadística de ruido blanco gaussiano modulado por una exponencial decreciente, a modo de aportar mayor densidad de reflexiones en la parte tardía de la respuesta al impulso. En base a éstas respuestas sintéticas es que se calculan los parámetros del recinto virtual.

5.2.1 Comportamiento Modal

En base al modelo tridimensional generado para la simulación en EASE, se estimó el volúmen del auditorio en:

$$V = 15,700 \text{ m}^3 \quad (21)$$

considerando además un tiempo de reverberación global de $T_{30} = 1,92 \text{ s}$ obtenido a partir de este mismo y estudios previos de la sala, se puede calcular la frecuencia de Schroeder del recinto, obteniendo:

$$f_s = 22,1 \text{ Hz} \quad (22)$$

Considerando además que los estímulos se configuraron para comenzar en 40 Hz , se puede concluir que el estudio cubre la parte del espectro donde el comportamiento de la sala es determinado mayoritariamente por reflexiones y el campo difuso, por lo que se omitirá el análisis modal de la misma.

5.2.2 Consideraciones Adicionales

La inspección in situ de la Usina del Arte permitió relevar condiciones y particularidades espaciales que no habrían podido ser detectadas mediante registros gráficos o documentación secundaria. A continuación, y a modo de resumen, se describen y explayan consideraciones importantes acerca de detalles o aspectos generales que resultan de interés desde el punto de vista del comportamiento acústico del recinto.

En primer lugar, se detectaron diversos elementos que, debido a sus características constructivas, implican un comportamiento resonante en bajas frecuencias, con posible incidencia en la respuesta acústica del recinto en ese rango. Entre ellos, se destaca un amplio volumen que se encuentra debajo de la platea baja central, destinado a ventilación, al cual tienen visión directa todas las aberturas ubicadas bajo las butacas (exceptuando las correspondientes a los balcones). Asimismo, se identificaron superficies huecas en los muros de madera que delimitan los laterales de los balcones —ubicados detrás de los paneles difusores—, así como en los cielorrasos de yeso ubicados sobre los balcones, en el sector posterior de la planta baja (debajo de la platea alta) y en la parte trasera del escenario. Estas configuraciones favorecen un comportamiento similar, funcionando como cavidades resonantes en el rango de baja frecuencia.

Por otro lado, vale mencionar que en la composición del piso del auditorio, solo hay alfombra en los balcones del 1er y 2do piso. El resto es piso de madera flotante. A su vez, dicha alfombra se presenta en la cara interna de los muros divisorios de los balcones.

Habiéndose comentado el asunto de la ventilación del lugar, los planos indican cuáles filas cuentan con aberturas y cuáles no. El escenario dispone de una abertura de ventilación orientada tanto hacia la audiencia como hacia la superficie del piso del escenario. Además, existen aberturas en las paredes traseras del segundo piso, así como en las paredes de concreto del mismo nivel, ubicadas por encima del escenario. Es importante destacar que se detectó un alto nivel de ruido proveniente de la ventilación en las butacas de las primeras filas del área de audiencia del primer piso, específicamente en el sector izquierdo mirando hacia el escenario.

En cuanto a los accesos, todas las puertas son del tipo antidisturbios. Sus dimensiones son de 180 cm de ancho por 210 cm de alto. Las paredes en las que están instaladas son de ladrillo revocado con cemento. Además, todas ellas tienen un sistema SoundLock, de dos puertas, con un volumen interno con material absorbente en las paredes, techo de chapa y piso alfombrado (Figura 20).



Figura 20: Sistema de Soundlock para las puertas de los accesos al auditorio.

5.3 Medición

Las mediciones para obtener la respuesta al impulso se llevaron a cabo según la norma ISO 3382-1 [4]. Los estímulos utilizados consistieron en un *log-sine sweep* de 60 segundos entre 40 Hz y 18 kHz, cuatro audios musicales anecoicos con distintos τ_e y 10 segundos de ruido rosa pseudoaleatorio con idéntico ancho de banda que el barrido. Se utilizó una fuente omni direccional para reproducir los sine sweeps según indica la norma, mientras que los audios anecoicos y el ruido rosa se emitieron con la fuente bidireccional, cuyo patrón directivo refleja mejor el comportamiento de una fuente real. Los sine sweep se repitieron 2 veces para tener menor incertidumbre. Los valores de τ_e de los audios elegidos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Valores de τ_e mínimos y promedios por estímulo.

Estímulo	τ_e mín [ms]	τ_e prom [ms]
Orquesta	45,52	90,60
Batería	854,10-6	11,38
Bajo abierto	665,11	4839,44
Cantante	41,24	126,64

El equipamiento utilizado incluyó una placa de audio RME Fireface UFX+ para grabación y una RME Fireface UCX para reproducción; dos preamplificadores RME OctaMic XTC; quince micrófonos Earthworks M50 de campo libre; un micrófono SoundField SPS200; una cabeza binaural Gras Sound and Vibration KEMAR 45BM; una fuente omnidireccional Outline GSR con subwoofer SUB 118; un altavoz bidireccional JBL EON 515XT; un telémetro láser Bosch DLE 70; tres sonómetros Svantek 959 y tres calibradores Svantek SV-30-A.

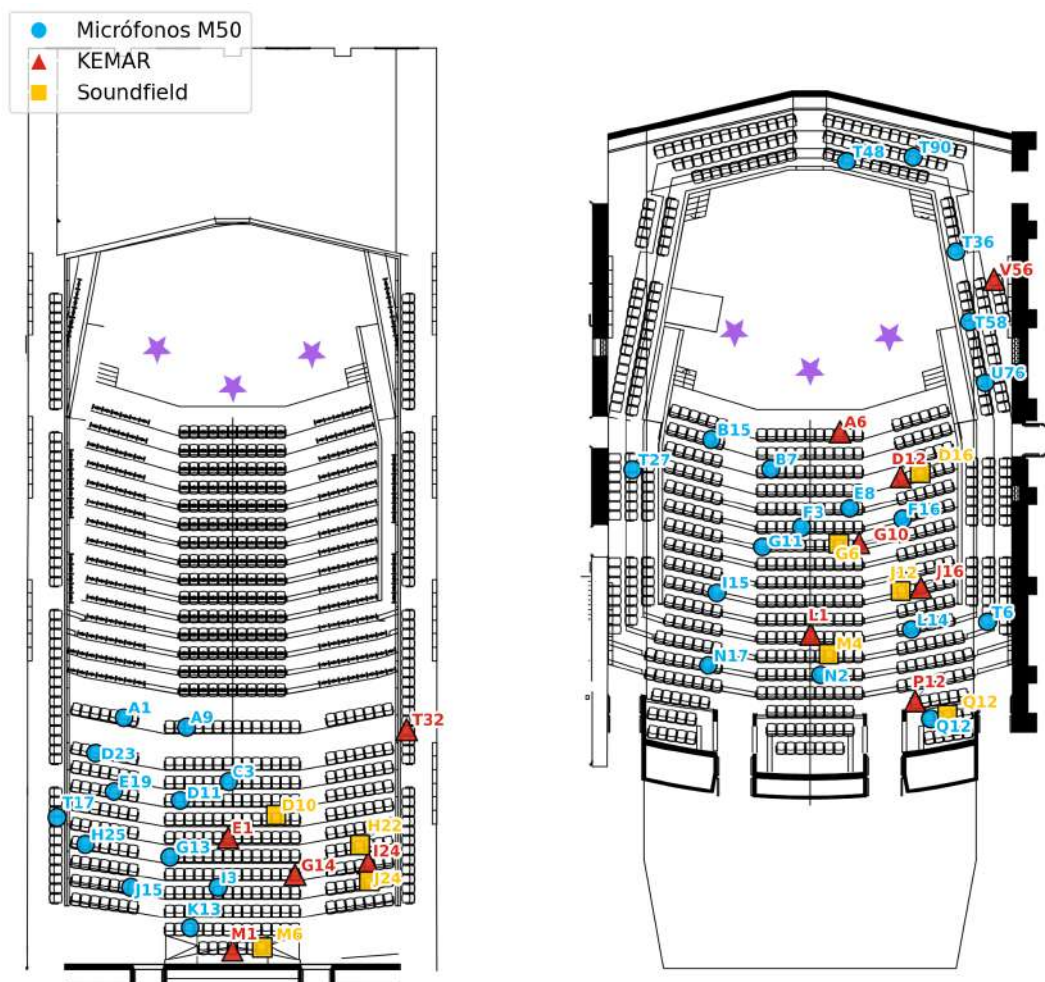


Figura 21: Posicionamiento de fuentes y micrófonos. La figura izquierda muestra la disposición en el segundo piso y la derecha en planta. Las estrellas representan las posiciones de fuente.

Al comienzo de la medición, se registró el ruido de fondo en ocho posiciones distintas del teatro —cinco en planta baja, una en cada nivel de balcones y una en el centro de la platea alta— y en el exterior de la entrada principal para caracterizar el aislamiento del auditorio, y se realizó una prueba de niveles midiendo con el sonómetro en la última fila y garantizando una relación señal a ruido que

sea mayor a 40 dB. Luego de esta primera aproximación se verificó con un sweep de prueba tener un nivel de señal adecuado en el punto más crítico (el más alejado) sin que sature por exceso de nivel el primer micrófono.

Para la disposición de los micrófonos se asume simetría del recinto y se busca cubrir la mayor cantidad posibles de puntos en 3 tandas de medición. Si bien la pared trasera del escenario presenta una geometría asimétrica, se asume simetría para poder realizar un mapeo mas denso del recinto considerando que la superficie asimétrica es muy chica en comparación con respecto a la simetría general del recinto.

Finalmente, en la Figura 21 se detallan los planos de planta baja, segundo piso y balcones laterales, incluyendo cotas y posiciones de micrófonos y fuentes, con distinción de colores para los distintos tipos de micrófonos utilizados. En la práctica, esta medición se realizó en 3 tandas para poder movilizar la computadora de grabación en un punto central y poder aprovechar al máximo la cantidad de micrófonos disponibles en relación a la cantidad de cable necesario para realizar todo el mapeo del auditorio.

Por último, se realizó una medición para determinar los parámetros de escenario donde se posicionaron los micrófonos como indica la Figura 22, la altura de la fuente y los micrófonos se fija en 1,5 m acorde a la metodología de medición de Gade. La posición de la fuente se ubica en el centro geométrico del escenario, y los micrófonos se distancian a un metro.

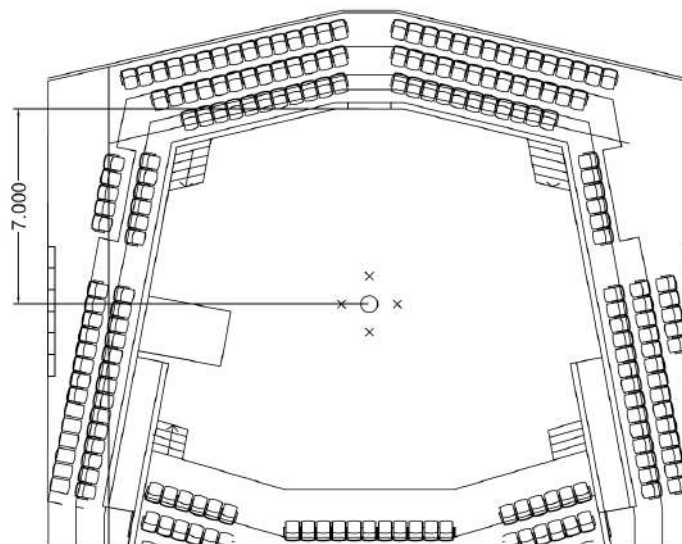


Figura 22: Configuración de medición de escenario por método de Gade. El círculo representa la posición de fuente y las cruces la ubicación de los micrófonos.

5.4 Procesamiento

5.4.1 Clasificación del material

El primer paso en la etapa de procesamiento es obtener las respuestas al impulso de las grabaciones de los sine sweeps logarítmicos, esto se realiza con un script en Python donde se convoluciona cada sine sweep con el filtro inverso asociado para obtener la respuesta al impulso.

Luego se realiza un recorte y clasificación del material, donde se divide las mediciones por planta, tipo de micrófono y estímulo. Una vez organizadas todas las mediciones, se procede a calcular los diferentes parámetros acústicos.

5.4.2 Parámetros calculados con software comercial

Con las mediciones RIRs capturadas con los micrófonos omnidireccionales Earthworks, se calculan los parámetros T_{20} , T_{30} , EDT , C_{50} y C_{80} con el software Audacity, utilizando el plugin Aurora Acoustical Parameters [19]. Para el mismo conjunto de micrófonos, los parámetros STI , $AlCons$, $EchoSpeech$ y $EchoMusic$ se calculan con el software EASERA [20]. El parámetro IACC (early y late) también se calcula con el plugin Aurora pero se utilizan las grabaciones binaurales obtenidas con la cabeza binaural Kemar, donde se procesan las RIRs y los audios anecoicos. Todos los valores obtenidos de ambos softwares se procesan en Python para generar los gráficos, mapeos y resultados presentados en este informe.

5.4.3 Parámetros calculados con software propio

Luego, el resto de parámetros se calculan con scripts específicos para cada uno. El Lateral Fraction se calcula procesando las mediciones del SoundField mediante el software VVMic for Tetramic [21] para obtener la señal capturada por un micrófono omnidireccional y por un micrófono bidireccional (figura de ocho) como se explica en la Sección 4.5.3. Con la separación de los dos tipos de señales, se calcula el Lateral Fraction según Ecuación 8.

Por otro lado, para determinar el Strenght Factor (G) se debería tener una grabación anecoica o en campo libre a 10 metros de la fuente. Como no se dispone de dicha grabación, se procede a generar una referencia artificial en base a la medición mas cercana (a 1 metro) de la fuente para simular una medición semi-anecoica. A esta medición de referencia se le disminuyen -20 dB de amplitud para simular la atenuación por distancia en campo libre. Esta referencia es una estimación aproximada, ya que, además, en el momento de realizar la medición a 1 metro de la fuente (medición de 'stage') se bajó el nivel de la fuente para evitar recortes por *clipping* o saturación, y, al no contar con el valor exacto con el que se modificó la ganancia, es imposible mantener una referencia correcta del valor de G. En consecuencia, los valores presentados tienen validez como valores relativos pero no son confiables a la hora de hablar de valores de G absolutos. El cálculo se realiza según Ecuación 2. Con los valores de G y Lateral Fraction se calcula el LEV según Ecuación 15.

Para calcular el D/R Ratio, es necesario determinar el tiempo (o muestra) donde termina el sonido directo y comienza el campo reverberante. Este valor varía con la posición, pero, para simplificar la obtención del parámetro, se toma de referencia el micrófono de la posición mas cercana y se calcula el parámetro ACd [ms] con el software Texture Analyzer [22]. Este valor cuantifica el fin del paquete de sonido directo y se toma de referencia para el cálculo de D/R Ratio según Ecuación 12.

Adicionalmente, se calcularon los parámetros de Soporte de Escenario (ST_{Early} y ST_{Late}) según la norma ISO 3382-1. Para ello, cada respuesta al impulso fue primero procesada con un banco de filtros de fase cero para obtener su descomposición en bandas de octava (de 250 Hz a 4000 Hz). Sobre cada señal filtrada, se calculó la energía en las ventanas temporales correspondientes al sonido directo (0-10 ms), temprano (20-100 ms) y tardío (100-1000 ms). Para garantizar la estabilidad numérica del cociente energético en bandas de baja energía, se añadió una constante epsilon a los términos del cociente antes de realizar el cálculo logarítmico. Los resultados finales presentados corresponden al promedio del conjunto de mediciones.

Para el cálculo de τ_e y de ACF se utiliza el software desarrollado por la cátedra [23], donde se procesan todos los audios anecoicos registrados con los micrófonos Earthworks. Como también se calcula el valor de τ_e original de los audios se puede cuantificar la variación de τ_e mínimo entre los audios anecoicos originales y los grabados.

Se omitió el calculo acoplamiento acústico ya que se considera que no se tiene un cambio de secciones que encierren diferente volúmenes en el auditorio estudiado. Tampoco se analiza la respuesta modal del recinto porque la frecuencia de Schroeder es demasiado baja para que la respuesta modal tenga alguna influencia significativa en el recinto.

5.4.4 Pre-procesamiento de RIRs y Mapeos

Se procesan las RIRs para hacer un análisis subjetivo de los parámetros T_{20} , T_{30} , EDT , C_{50} , C_{80} , STI , $AICons$, $EchoSpeech$, $EchoMusic$, LF , D/R . El procesamiento subjetivo consiste en realizar una integración de las respuestas al impulso utilizando diferentes tiempos de ventana para cuantificar los tiempos de percepción del sistema de audición humano en respuesta a los diferentes estímulos. Se utiliza una versión en Python del código *Subjetivador de RIRs* de la cátedra, utilizando tiempos de ventana de 10 ms , 100 ms y 350 ms .

Se desarrolló una metodología programática en Python para la visualización espacial de parámetros acústicos. El proceso inicia con la carga y centralización de datos de diversas fuentes en una estructura anidada unificada, aplicando pre-procesamiento como el promediado de valores y la normalización de identificadores de micrófono a un formato numérico.

Posteriormente, se integran las coordenadas espaciales de los micrófonos y los contornos de las áreas de medición. A estos datos se les aplican transformaciones geométricas, incluyendo el cálculo de puntos simétricos, escalado y desplazamiento para alinear la geometría con diferentes imágenes base. La visualización final se genera mediante interpolación espacial, utilizando una técnica de aumento de datos donde se estiman valores para los vértices del contorno, forzando al mapa de calor a adoptar la forma deseada. El sistema fue orquestado por un script principal `main.py` que genera gráficos individuales y comparativos de múltiples subtramas, utilizando las librerías *Pandas* para la manipulación de datos y *Matplotlib* para la visualización.

6. Resultados

6.1 Ruido de fondo

Previo a registrar respuestas al impulso, se tomó el nivel de ruido de fondo en la sala vacía (Figura 23). Para ello, se registró el nivel L_{eqZ} por bandas en ocho posiciones utilizando un sonómetro Svan-tek SVAN-959. Esto resulta de particular importancia dada la ubicación de la sala en proximidades de una autopista de gran caudal, próxima a avenidas importantes, y está comprendida dentro de un complejo con múltiples espacios.

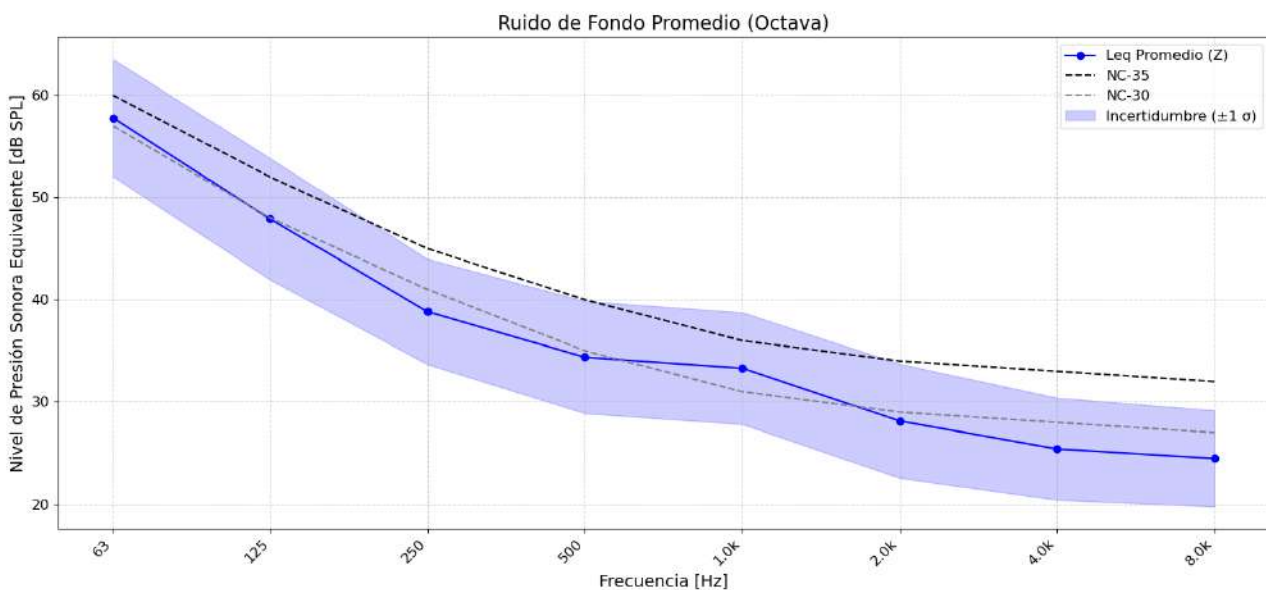


Figura 23: Ruido de fondo promediado [dBZ]

El nivel de ruido de fondo no resultó satisfactorio dado que se ubica bajo la curva NC-35, siendo el criterio recomendado para un recinto de este tipo la curva NC20. Se considera que si bien el diseño es

del tipo 'box-in-box' y se utilizaron soundlocks en los ingresos no proveyeron aislamiento suficiente, aunque la evaluación sensorial in-situ realizada el día de la medición sugiere a la ventilación como probable fuente de ruido en bajas frecuencias.

	LAeq	LZeq
Nivel [dB]	32,6	72,54
Incertidumbre	2,25	1,34

Tabla 8: Niveles equivalentes ponderados y sus incertidumbres

6.2 Tiempo de Reverberación (T30 y EDT)

6.2.1 Resultados Objetivos

En la Figura 24 se presentan los resultados del T30 y el EDT, ponderando las tres zonas de audiencia principales. Ambas curvas muestran un comportamiento similar, con un pico en la banda de 500 Hz que alcanza aproximadamente 1,9 s. Como es de esperar, el tiempo de reverberación decae en altas frecuencias, principalmente debido a la absorción del aire.

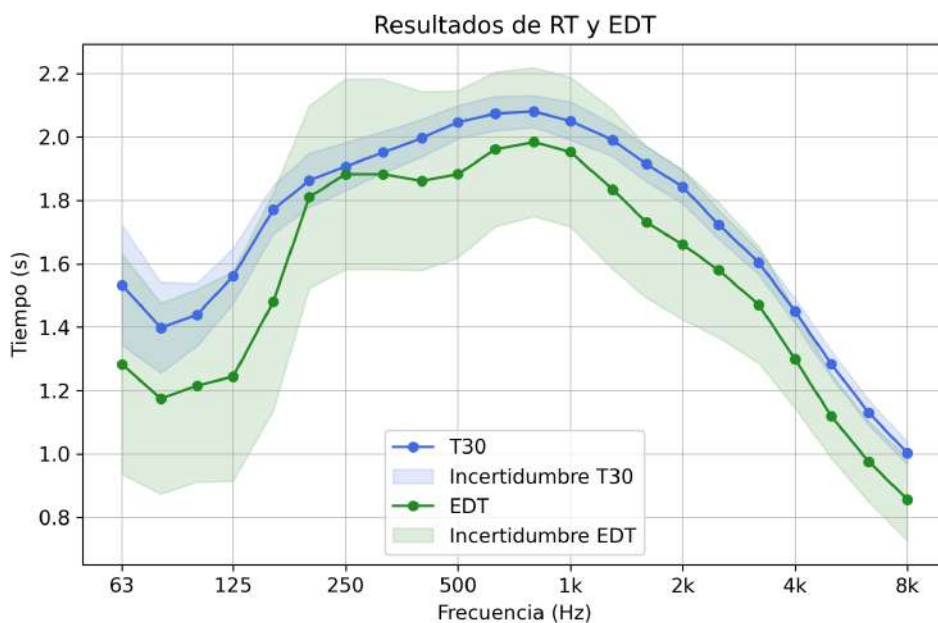


Figura 24: Resultados de RT y EDT de toda la sala ponderados con su incertidumbre asociada.

De particular interés es la disminución observada en bajas frecuencias, alrededor de los 125 Hz. Este comportamiento sugiere la presencia de mecanismos de absorción por resonancia, lo cual es consistente con el relevamiento constructivo del auditorio. En dicho relevamiento se identificaron múltiples elementos que explican este fenómeno, como el gran volumen de aire bajo la platea, las cavidades en muros y cielorrasos, y el piso de madera flotante. Estos sistemas actúan como resonadores de panel, explicando la efectiva atenuación en esa región del espectro.

El análisis de los parámetros temporales revela que el EDT es consistentemente inferior al T_{30} en todas las zonas de la audiencia, indicando que la sala se percibe con una claridad subjetiva mayor a la que sugeriría su tiempo de reverberación global. La causa principal de este comportamiento radica en el diseño del recinto, donde el público rodea parcialmente el escenario. A diferencia de una sala tradicional, estas áreas de audiencia actúan como una gran superficie de absorción, reduciendo

drásticamente la energía de las reflexiones tempranas (especialmente las laterales) y provocando, en consecuencia, un decaimiento inicial más rápido.

Esta diferencia entre ambos parámetros se vuelve aún más notoria en el rango de bajas frecuencias. Dicho efecto se explica por la estructura del escenario que, como se identificó en el relevamiento, consiste en una superficie de madera flotante. Esta construcción funciona como un resonador de panel, absorbiendo energía de forma selectiva en esa banda del espectro y atenuando con particular eficacia las reflexiones tempranas de baja frecuencia.

Si bien la curva de reverberación no es perfectamente plana, sería interesante realizar mediciones con la sala ocupada. Es posible que en la etapa de diseño se haya previsto que la absorción del público atenúe el pico observado en la banda de 500 Hz. De todas formas, esto confirmaría una considerable variabilidad acústica entre las condiciones de sala vacía y sala llena.

Los resultados globales, presentados en la Tabla 9, sitúan el T_{30} promedio en 1,92 s. Este valor se aproxima al límite inferior del rango recomendado para salas de conciertos sinfónicos, aunque su elevada duración lo hace poco adecuado para la música amplificadas.

Tabla 9: Resultados de RT y EDT globales

Parámetro	Planta Baja	Planta Alta	Balcones	Global
T_{30} [s]	$1,90 \pm 0,03$	$1,96 \pm 0,02$	$1,89 \pm 0,02$	$1,92 \pm 0,04$
EDT [s]	$1,56 \pm 0,10$	$1,77 \pm 0,05$	$1,47 \pm 0,11$	$1,63 \pm 0,15$

Las Figuras 25 y 26 se ilustra los mapeos espaciales de los parámetros T_{30} y EDT. Se observa que, en ambos casos, los valores incrementan en el área de audiencia del segundo piso y decrecen en la proximidad del escenario, un comportamiento coherente con la teoría. Es interesante observar que las variaciones espaciales de T_{30} son muy bajas, donde el tiempo de reverberación en el segundo piso es prácticamente constante, mientras que en el mapeo de EDT se observan mayores variaciones.

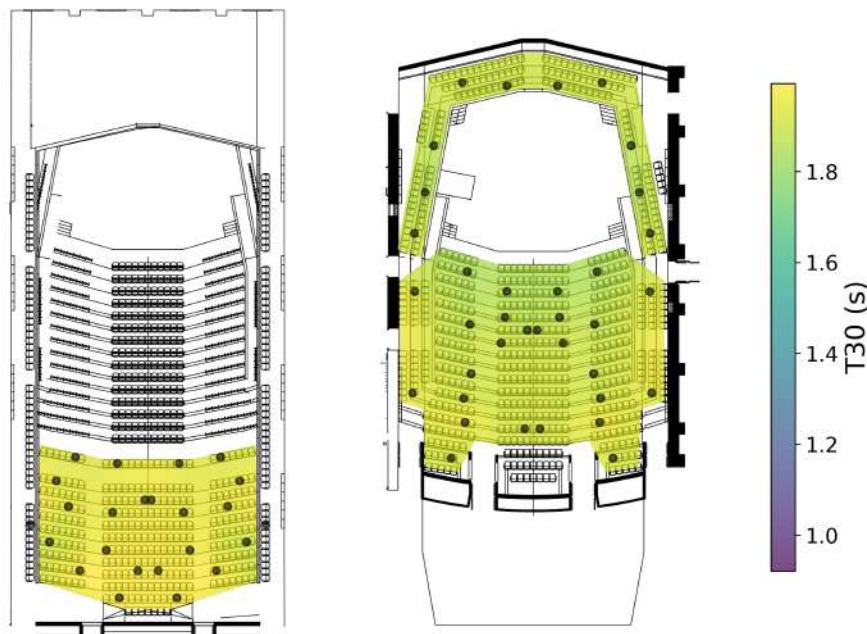


Figura 25: Mapeo en base a resultados de T_{30} .

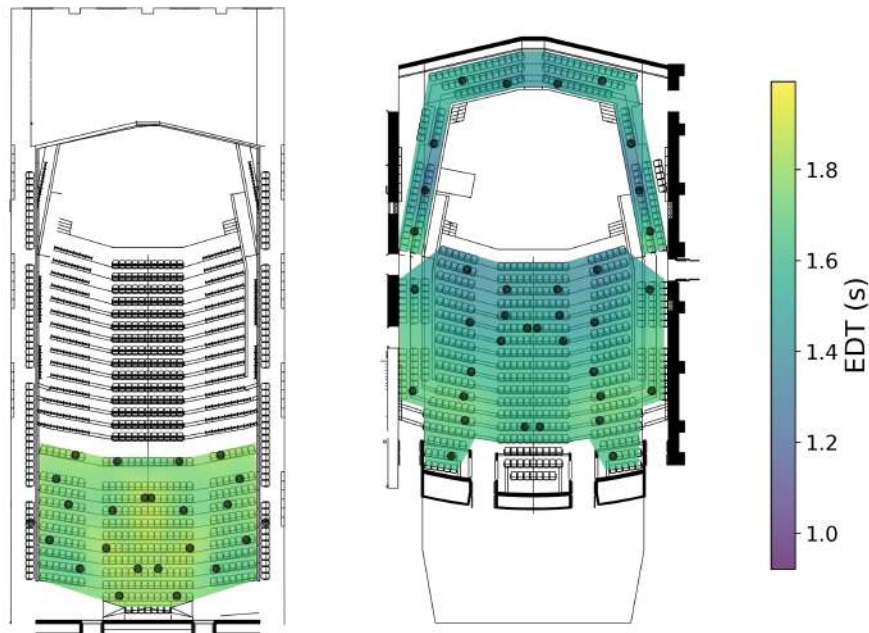


Figura 26: Mapeo en base a resultados de *EDT*.

6.2.2 Resultados Subjetivos

Los valores procesados para todas las distintas ventanas de integración subjetivas se presenta en la Tabla 10. Se puede observar que los resultados no varían al cambiar el tiempo de integración, esto indica que se mantiene la misma percepción de T30 y EDT para cualquier estímulo independientemente del τ_e específico de cada programa musical. Cuando se compara el T30 subjetivo respuesta al objetivo no encontramos diferencias, pero si se encuentra una leve diferencia cuando se compara el EDT, donde se observa una discrepancia de 0,2 segundos entre el valor objetivo y el valor subjetivo promedio.

Tabla 10: Valores de T30 y EDT en diferentes ventanas temporales

Parámetro	Ventana	Planta Baja	Planta Alta	Balcones	Global
T30 [seg]	10 ms	$2,02 \pm 0,24$	$1,93 \pm 0,17$	$2,10 \pm 0,28$	$2,00 \pm 0,23$
T30 [seg]	100 ms	$1,93 \pm 0,23$	$1,86 \pm 0,08$	$1,95 \pm 0,19$	$1,91 \pm 0,18$
T30 [seg]	350 ms	$1,96 \pm 0,23$	$1,95 \pm 0,12$	$2,02 \pm 0,19$	$1,97 \pm 0,19$
EDT [seg]	10 ms	$1,46 \pm 0,16$	$1,46 \pm 0,12$	$1,09 \pm 0,24$	$1,40 \pm 0,21$
EDT [seg]	100 ms	$1,41 \pm 0,13$	$1,43 \pm 0,12$	$1,09 \pm 0,25$	$1,36 \pm 0,20$
EDT [seg]	350 ms	$1,41 \pm 0,15$	$1,42 \pm 0,13$	$1,08 \pm 0,25$	$1,36 \pm 0,21$

Las comparación en el espacio de la respuesta subjetiva para los 3 tipos de ventana del T30 se presenta en la Figura 27. En el Anexo A se presenta el mapeo de la respuesta subjetiva del EDT. En el mapeo espacial se puede observar la mínima variación del T30 ante distintas ventanas de integración.

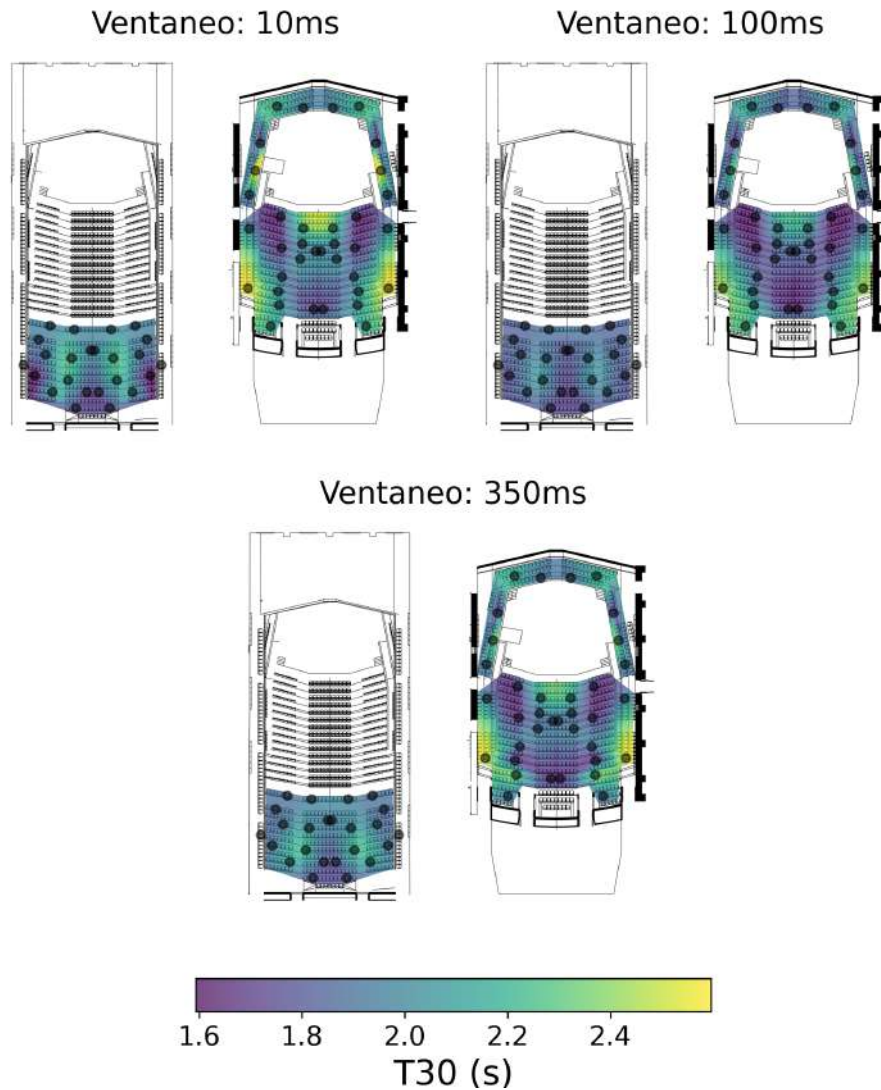


Figura 27: Mapeo con la comparación de T30 subjetivo con distintas ventanas de integración.

6.3 Claridad (C_{50} y C_{80})

6.3.1 Resultados Objetivos

Los resultados de claridad se presentan en la Figura 37 en función de los parámetros C_{50} y C_{80} (calculado en tercios de octava). Como se puede ver, ambas curvas tienen la misma tendencia y el C_{80} es consistentemente más elevado respecto al C_{50} , lo cual indica que el recinto presenta mejores condiciones de claridad para programas musicales que para la palabra hablada. La claridad aumenta en altas frecuencias debido a la disminución del RT en esa zona del espectro. Se puede notar que los resultados tienen una incertidumbre alta; esto se debe a las variaciones espaciales de esta característica.

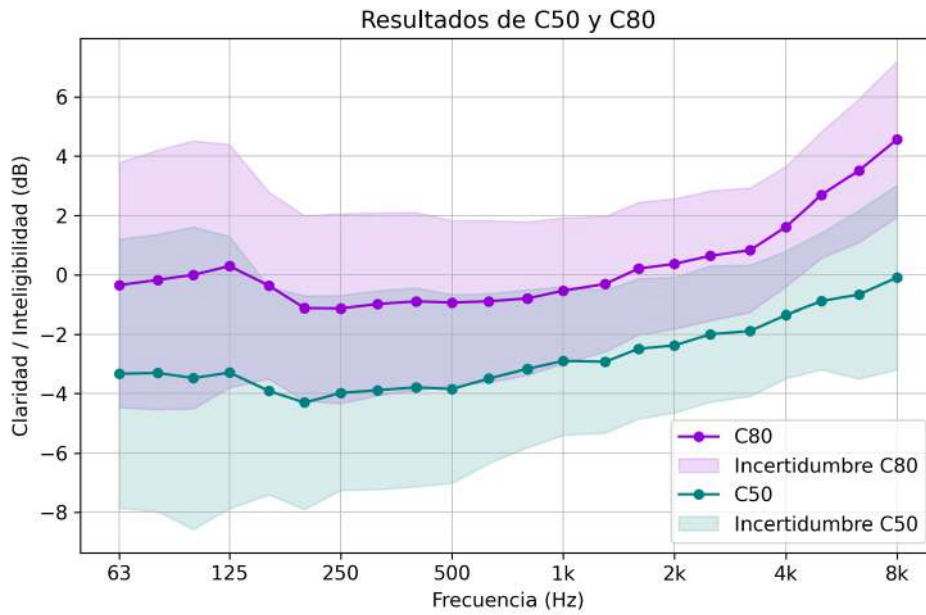


Figura 28: Variación de C_{50} y C_{80} por frecuencia.

Los resultados globales de claridad, desagregados por zona, se presentan en la Tabla 11. Como es de esperar, los valores de claridad de los balcones son los más altos dada su cercanía respecto al escenario. Le sigue la planta baja y, finalmente, la planta alta presenta los peores resultados, ya que es la zona donde el campo sonoro es predominantemente reverberante.

El valor global de C_{80} , de 1,02 dB, se sitúa entre los valores recomendados por Gade para salas de concierto de música orquestal (-1 dB) y música de cámara (3 dB). Esto sugiere que el recinto posee una claridad adecuada para ambos géneros, aunque con una ligera tendencia hacia la música que requiere mayor detalle).

Según la ISO 3382, para un buen valor de claridad de habla, el C_{50} debe ser mayor a 0 dB, criterio que para este auditorio no se cumple.

Tabla 11: Resultados promediados para los parámetros C_{50} y C_{80} por zona.

Parámetro	Planta Baja	Planta Alta	Balcones	Global
C_{50} [dB]	$-1,23 \pm 2,15$	$-4,33 \pm 0,91$	$0,80 \pm 1,87$	$-1,73 \pm 2,69$
C_{80} [dB]	$1,26 \pm 1,87$	$-1,32 \pm 0,84$	$3,55 \pm 1,82$	$1,02 \pm 2,49$

La distribución espacial de estos parámetros se detalla en las Figuras 29 y 30. En concordancia con la tabla 11, se puede notar que la zona del segundo piso presenta los valores más bajos de claridad, mientras que en las cercanías del escenario se observan los más altos.

Es interesante analizar la zona de audiencia que rodea el escenario. Si bien esta configuración puede absorber algunas reflexiones tempranas, su principal efecto es aumentar significativamente la relación entre el sonido directo y el campo reverberante para los espectadores cercanos. Esto se traduce en una mejora sustancial de la claridad, acercando la audiencia a la fuente sonora.

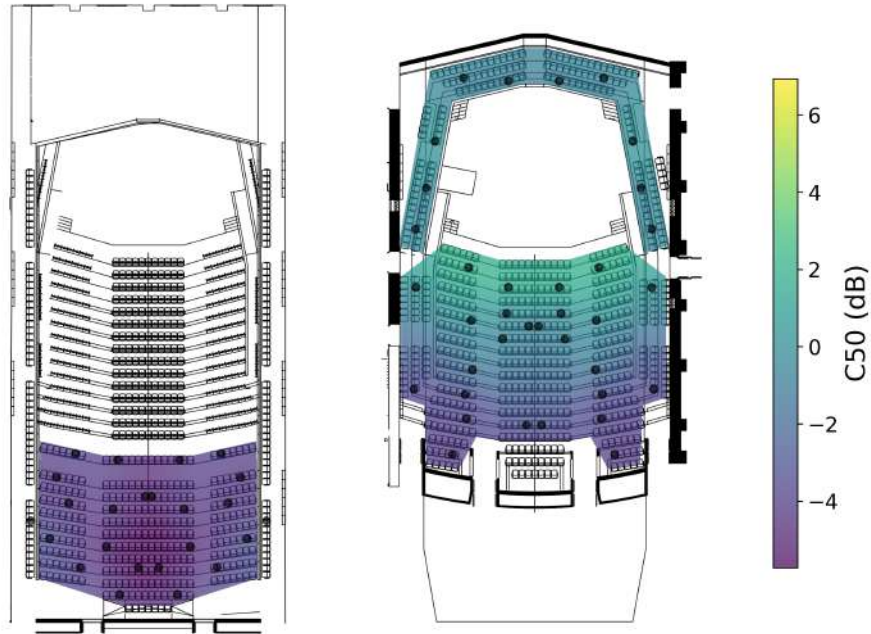


Figura 29: Mapeo en base a resultados de C_{50} .

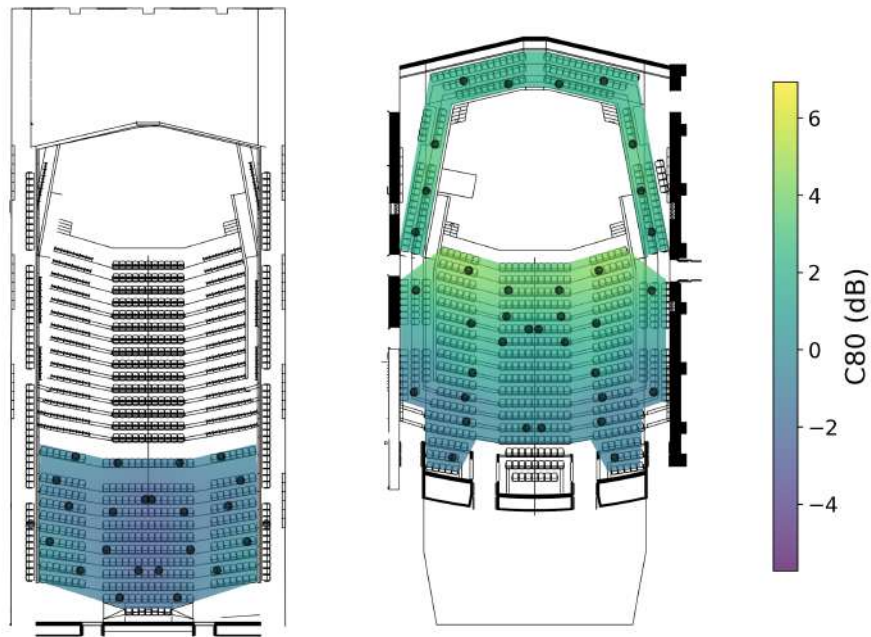


Figura 30: Mapeo en base a resultados de C_{80} .

6.3.2 Resultados Subjetivos

Los resultados de C_{50} y C_{80} para distintas ventanas de integración subjetiva se presentan en la Tabla 12. Ambos parámetros aumentan respecto al valor objetivo con un incremento aproximado entre 1 y 2 dB. También se observa un pequeño incremento en ambos parámetros al pasar de la ventana de 10ms a la ventana de 100 ms o 350 ms. El mapeo de ambos parámetros para los diferentes tiempos de integración se puede ver en el Anexo A.

Tabla 12: Valores de C50 y C80 en diferentes ventanas temporales

Parámetro	Ventana	Planta Baja	Planta Alta	Balcones	Global
C50 [dB]	10 ms	$-0,41 \pm 2,91$	$-1,69 \pm 2,58$	$2,27 \pm 3,04$	$-0,10 \pm 3,25$
C50 [dB]	100 ms	$0,03 \pm 2,75$	$-1,56 \pm 2,34$	$2,41 \pm 3,05$	$0,15 \pm 3,13$
C50 [dB]	350 ms	$0,02 \pm 2,70$	$-1,45 \pm 2,25$	$2,36 \pm 3,06$	$0,17 \pm 3,06$
C80 [dB]	10 ms	$2,05 \pm 2,61$	$1,14 \pm 2,16$	$5,45 \pm 2,26$	$2,70 \pm 2,95$
C80 [dB]	100 ms	$2,46 \pm 2,43$	$1,25 \pm 2,17$	$5,48 \pm 2,32$	$2,89 \pm 2,87$
C80 [dB]	350 ms	$2,44 \pm 2,39$	$1,35 \pm 2,11$	$5,48 \pm 2,34$	$2,92 \pm 2,83$

Estos resultados indican que el valor de C50 y C80 calculado presenta mejoras al ser percibido de forma subjetiva, donde se logran valores de claridad de la palabra superiores a 0 dB. También la tendencia muestra que ante estímulos con mayor τ_e , la claridad aumenta ligeramente.

6.4 Inteligibilidad (*STI* y *AlCons*)

6.4.1 Resultados Objetivos

En la Tabla 13 se presentan los resultados globales para los parámetros de inteligibilidad de STI y AlCons.

Parámetro	Platea Baja	Platea Alta	Balcones	Global
STI	$0,54 \pm 0,04$	$0,47 \pm 0,01$	$0,55 \pm 0,01$	$0,51 \pm 0,04$
AlCons [%]	$9,71 \pm 2,12$	$12,78 \pm 0,80$	$7,30 \pm 1,45$	$10,07 \pm 2,69$

Tabla 13: Resultados de STI y AlCons por sector.

Observando los resultados de Speech Transmission Index (STI), se tiene que todos los sectores presentan valores dentro de la categoría ‘Aceptable’, expresando que se tendrá una correcta inteligibilidad de la palabra en todo el recinto. Además, la incertidumbre para todos ellos se encuentra por encima del JND para el parámetro. Si bien no se tendrá uniformidad entre los diferentes sectores (la incertidumbre global es de [0,04; 8 %]) y entre las ubicaciones de una misma área de audiencia (la máxima la tiene la planta baja con [0,04; 7 %]), la variación será baja.

En el caso del parámetro Articulation Loss of Consonants (%AlCons), la platea baja y balcones presentan valores dentro de la categoría de una ‘Buena’ inteligibilidad, con 9,71 y 7,30 %, respectivamente. Por su parte, la platea alta se ubica con una inteligibilidad ‘Aceptable’ dado que su resultado es mayor (12,78 %).

Estos resultados presentan una incertidumbre superior a las de STI. La desviación global entre sectores resultó en una desviación del 27 % (siendo de 2,69 %), denotando cierta variación entre el grado de pérdida de consonantes según la ubicación. Luego, la platea baja presenta la máxima desviación del 22 % (2,12 %), y la platea alta la mínima del 6 % (0,80 %). Entonces, en la platea baja y balcones (de 1,45 %; que implica el 19 %), se tendrá menos uniformidad de la inteligibilidad de consonantes.

En las Figuras 31 y 32 se observan los mapeos desarrollados para los parámetros de STI y AlCons, respectivamente.

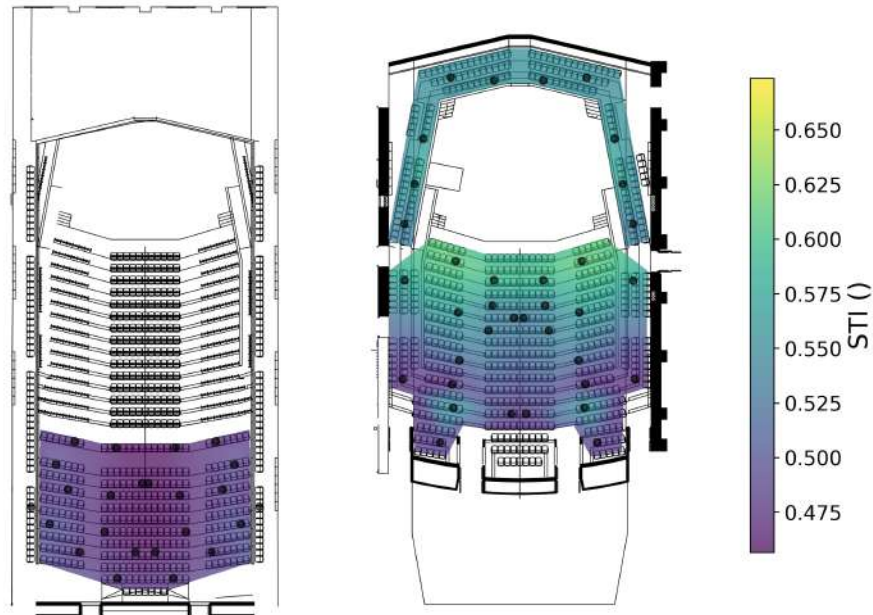
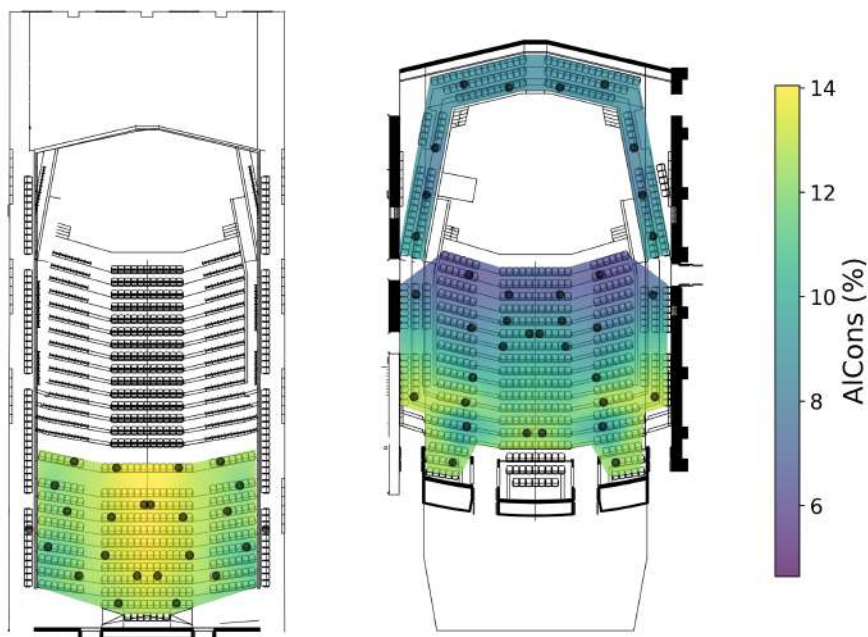


Figura 31: Mapeo en base a resultados de *STI*.

Se puede ver que en la platea alta las ubicaciones cercanas a las paredes presentan una leve mejoría respecto de las centrales en cuanto al valor del *STI*. Por otro lado, la mejoría de inteligibilidad a medida que se está más próximo al escenario se describe claramente en el gráfico correspondiente a la platea baja y balcones, siendo los asientos más lejanos los que tienen peores valores de *STI*, similares a los de la platea alta.

Figura 32: Mapeo en base a resultados de *AICons*.



En cuanto al *AICons*, la pérdida de consonantes es más marcada en el centro de la platea alta, en sintonía con lo mencionado para *STI*. Luego, en la platea baja, se ve cómo dicho parámetro es más

bajo en las primeras filas de la platea baja respecto de los balcones alrededor del escenario. Además, se ve cómo aumenta progresivamente hacia las últimas filas de la platea.

6.4.2 Resultados Subjetivos

En la Tabla 14 se presentan los resultados subjetivos de STI y AICons para los tres tipos de ventana bajo análisis.

Parámetro	Ventana [ms]	Platea Baja	Platea Alta	Balcones	Global
STI	10	0,52 ± 0,05	0,48 ± 0,01	0,59 ± 0,04	0,53 ± 0,06
STI	100	0,53 ± 0,04	0,48 ± 0,02	0,59 ± 0,04	0,53 ± 0,06
STI	350	0,53 ± 0,04	0,48 ± 0,01	0,59 ± 0,05	0,53 ± 0,06
AICons [%]	10	10,02 ± 2,30	12,59 ± 1,57	7,36 ± 1,51	10,14 ± 2,78
AICons [%]	100	10,01 ± 2,27	12,89 ± 0,85	7,36 ± 1,51	10,24 ± 2,76
AICons [%]	350	9,99 ± 2,24	12,95 ± 0,81	7,35 ± 1,51	10,25 ± 2,77

Tabla 14: Promedios y desviaciones de STI y AICons para distintas ventanas temporales y sectores.

En primer lugar, se puede ver que tanto para STI como para AICons los resultados subjetivos no varían significativamente según el tiempo de ventana de integración. Por lo tanto, esto lleva a entender que no se tendrán variaciones de inteligibilidad según el tipo de discurso o señal. Sin embargo, este comportamiento es esperado, ya que los parámetros evalúan un mismo tipo de estímulo (la palabra hablada). Además, se observa que los subjetivos no varían considerablemente respecto de los objetivos. Se asume que esto ocurre debido a que el cálculo realizado para la obtención de los mismos a partir de las respuestas al impulso medidas ya contempla (y se independiza de) las características del tipo de señal que corresponde a la palabra hablada. En el caso de STI, los resultados en balcones son los que presentan mayores diferencias (menores al 7 %). Para AICons, se dan en la platea alta, aunque aun así no se consideran significativas (menores al 1,5 %). Por otro lado, la incertidumbre asociada a los resultados bajo análisis también es aproximadamente la misma entre ventanas de integración y en relación a los resultados objetivos. Se da un único caso cuya desviación difiere significativamente (casi en un 50 %) para el AICons resultante en la platea alta, con una ventana de 10 ms.

Los mapeos de STI y AICons para las distintas ventanas subjetivas pueden verse en las Figuras 52 y 53, respectivamente, del Anexo A. En ellos se observa la misma tendencia descrita para los mapeos de resultados objetivos.

6.5 Factor de nivel sonoro (G)

En la Figura 33 se puede observar el valor promedio por posición del parámetro G en función de la frecuencia, donde se puede ver que el nivel de fuerza sonora decae con la frecuencia, y que hay una gran variación según la posición de micrófono. Esta variación se representa graficando las posiciones *B7* y *N2* que están en el centro de la planta baja y presentan un mayor nivel de factor sonoro, en cambio el asiento *K12* de la última fila y el *T48* del asiento trasero por estar a una mayor distancia o contrario a la emisión de la fuente reciben menor cantidad de nivel de presión sonora. La caída en altas frecuencias se puede deber a al efecto de la absorción del aire, principalmente en las secciones más alejadas donde también se observa una diferencia mayor entre las filas cercanas y las filas lejanas. Esta respuesta se condice con la respuesta de T30 donde se notaba una mayor absorción en altas frecuencias, también producto de la absorción del aire.

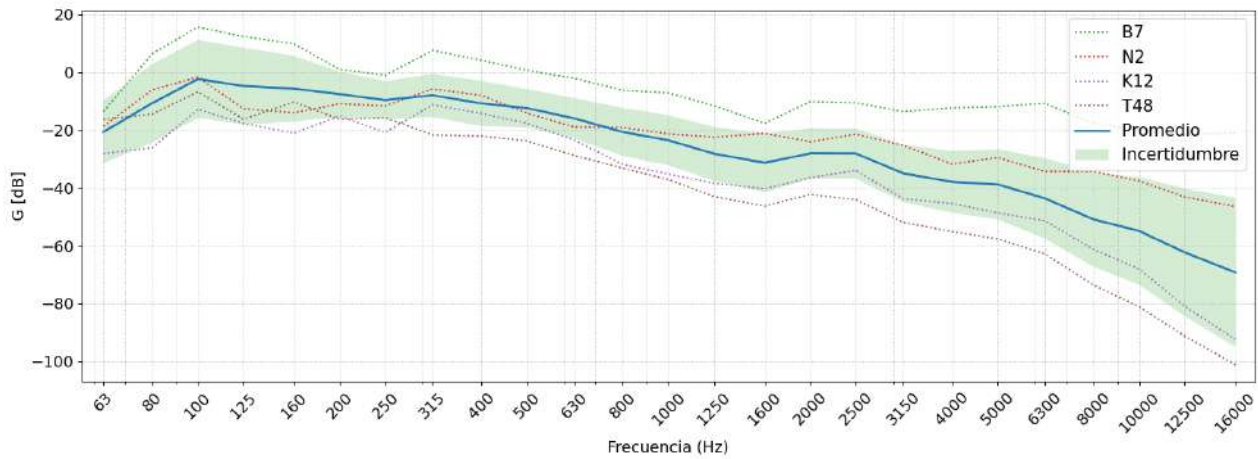


Figura 33: Valor de G promedio de todas las posiciones.

En la Tabla 15 se puede ver el valor global, donde se calcula la suma energética en frecuencia para las diferentes secciones del auditorio. Se puede ver como hay una diferencia de nivel sonoro entre la sección de plata baja respecto a la sección de la planta alta y los balcones, donde la diferencia en el G global es de casi 2 dB. Además del factor de distancia, la pantalla acústica presente sobre el escenario también contribuye a que el nivel en la planta inferior sea ligeramente superior al del resto de secciones.

Tabla 15: Valores de factor de nivel sonoro G con sus incertidumbres

Parámetro	Planta Baja	Planta Alta	Balcones	Global
G [dB]	$9,88 \pm 1,40$	$8,34 \pm 1,41$	$7,85 \pm 0,88$	$8,89 \pm 1,58$

En la Figura 34 se observa la distribución del valor global de G en el espacio. Se puede observar que en todas las posiciones se cumple el criterio de tener un $G > 0$. Sin embargo, hay que aclarar que estos valores no son exactos en cuanto a su valor de amplitud por las limitaciones descritas en al Sección 5.4. Por estos motivos, es más pertinente evaluar el nivel relativo presentado en el mapeo, donde se observa que la diferencia de G entre las primeras filas (valores más altos de G) y las últimas filas de la planta de arriba (valores más bajos de G) ronda los 7 dB, lo cual es una diferencia aceptable considerando las dimensiones de la sala. Además, se puede ver una distribución bastante homogénea del factor de nivel sonoro, lo que se traduce en un auditorio con un buen nivel de escucha en general.

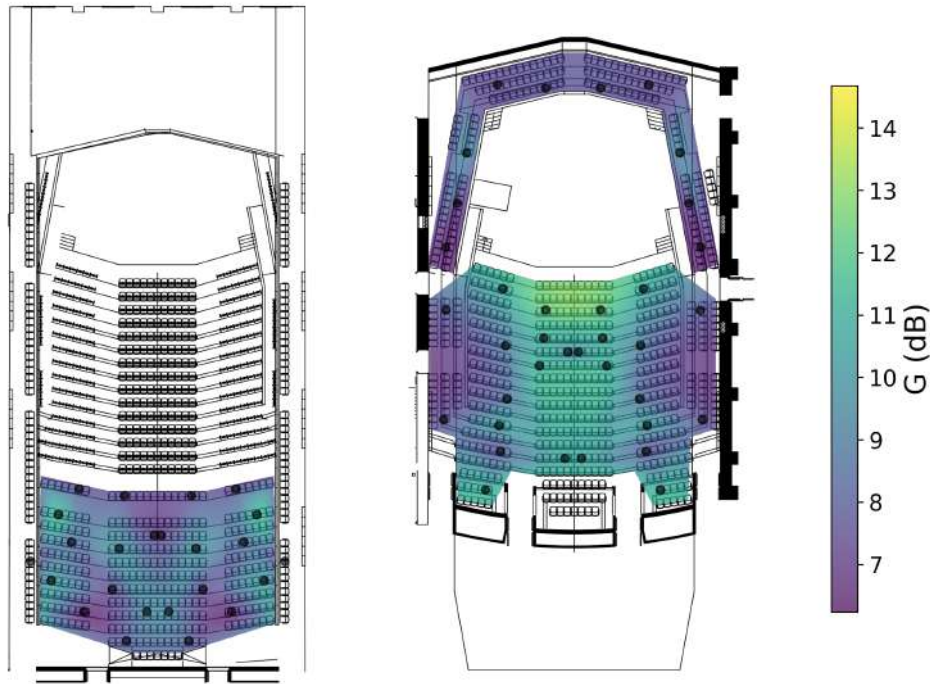


Figura 34: Mapeo de factor de nivel sonoro G.

Es pertinente explicar que para tener valores relativos del factor sonoro se utilizaron las grabaciones de ruido rosa, que se reprodujeron con la fuente direccional. Esto explica el bajo nivel en el sector de balcones alrededor del escenario, donde si bien hay poca distancia entre la fuente y estas butacas, la direccionalidad de la fuente juega un papel fundamental para entender como se distribuye la energía sonora. Esto también explica porque en el gráfico en frecuencia que promedia todas las mediciones, se observa mas nivel de energía en bajas frecuencias (donde la direccionalidad de la fuente tiende a ser omnidireccional) que en altas.

6.6 Lateral Fraction (LF)

6.6.1 Resultados objetivos

El lateral fraction se calcula a partir de las mediciones obtenidas del micrófono SoundField, con lo cual no se cuenta con suficientes puntos para hacer un mapeo. En su lugar, se presenta las Tablas 16 y 17, donde se muestran los valores de LF por posición.

Tabla 16: LF objetivo – Planta Baja

Fuente y Posición	Lateral Fraction
Fuente 1 D16	$0,63 \pm 0,28$
Fuente 2 G6	$0,55 \pm 0,11$
Fuente 3 J12	$0,94 \pm 0,04$
Fuente 3 M4	$0,52 \pm 0,19$
Fuente 3 Q16	$0,61 \pm 0,14$
Global	$0,65 \pm 0,15$

En ambas tablas de puede observar que se cuenta con un LF medio, con ciertos puntos que da un valor alto. Según Ballou, los valores sugeridos se encuentran entre 0.1 y 0.25, con lo cual los valores

obtenidos exceden esta recomendación. Esto indica que en la percepción sonora del recinto gran parte de la información proviene de los laterales. La causa de esto se puede deber a la gran cantidad de difusores de la sala, lo que genera una imagen estéreo amplia y sin un punto de referencia claro.

Tabla 17: LF objetivo – Segundo Piso

Fuente y Posición	Lateral Fraction
Fuente 1 H22	$0,99 \pm 0,11$
Fuente 2 J24	$0,72 \pm 0,09$
Fuente 3 M6	$0,41 \pm 0,11$
Fuente 3 D10	$0,78 \pm 0,14$
Global	0.72 ± 0.11

Los valores muy altos (cercaos a 1) pueden ser perjudiciales para la escucha, ya que indican que la energía temprana proviene principalmente por reflexiones laterales, lo que produce una imagen sonora ambigua donde se dificulta identificar la fuente sonora dentro del espacio. Es interesante analizar que los valores que presentan un LF cercano a 1 (*J12* y *H22*) son los asientos que tienen un difusor muy cercano, mientras que las posiciones que están en el medio (*M4*, *G6* y *M6*) presentan valores alrededor de 0.5. Esta observación indicaría que tal vez sería mejor alternar los difusores con material absorbente para dar mas fuerza al sonido directo y lograr una mayor definición a la imagen estéreo del campo sonoro. Este cambio es una sugerencia, ya que si bien el parámetro no esta dentro de las recomendaciones, puede ser una resultado satisfactorio según los criterios y propósitos del auditorio.

6.6.2 Resultados subjetivos

Para el análisis variando la ventana de integración, se presenta el valor de LF por frecuencia en las Figuras 35 y 36. Al evaluar el LF por frecuencias se puede ver una tendencia a incrementar su valor en frecuencia, sobre todo para los valores que en bajas frecuencias comienzan con un LF bajo. Esto es congruente ya que en altas frecuencias las fuentes emiten de forma mas direccional, con lo cual el nivel del sonido directo depende mucho de la posición de fuente y receptor, lo que implica una mayor diferencia entre el sonido frontal respecto al sonido lateral.

Resulta particularmente llamativo el resultado en frecuencia de la posición *J12* y *H22* donde incluso en bajas frecuencias presenta un valor cercano a 1 de LF. La hipótesis de adjudicar a los difusores este comportamiento no sería tan justificable en el rango de frecuencias menor a 600 Hz ya que según lo analizado la frecuencia mínima de los difusores esta en 600 Hz para el difusor de la planta baja y en 300Hz para el de la planta superior.

Respecto a la variación según la ventana de integración, se observa que la respuesta en frecuencia del LF sigue siempre una tendencia similar a la respuesta original. Con el ventaneo de 350 ms se observa de forma mas pronunciada como aumenta el LF por frecuencia.

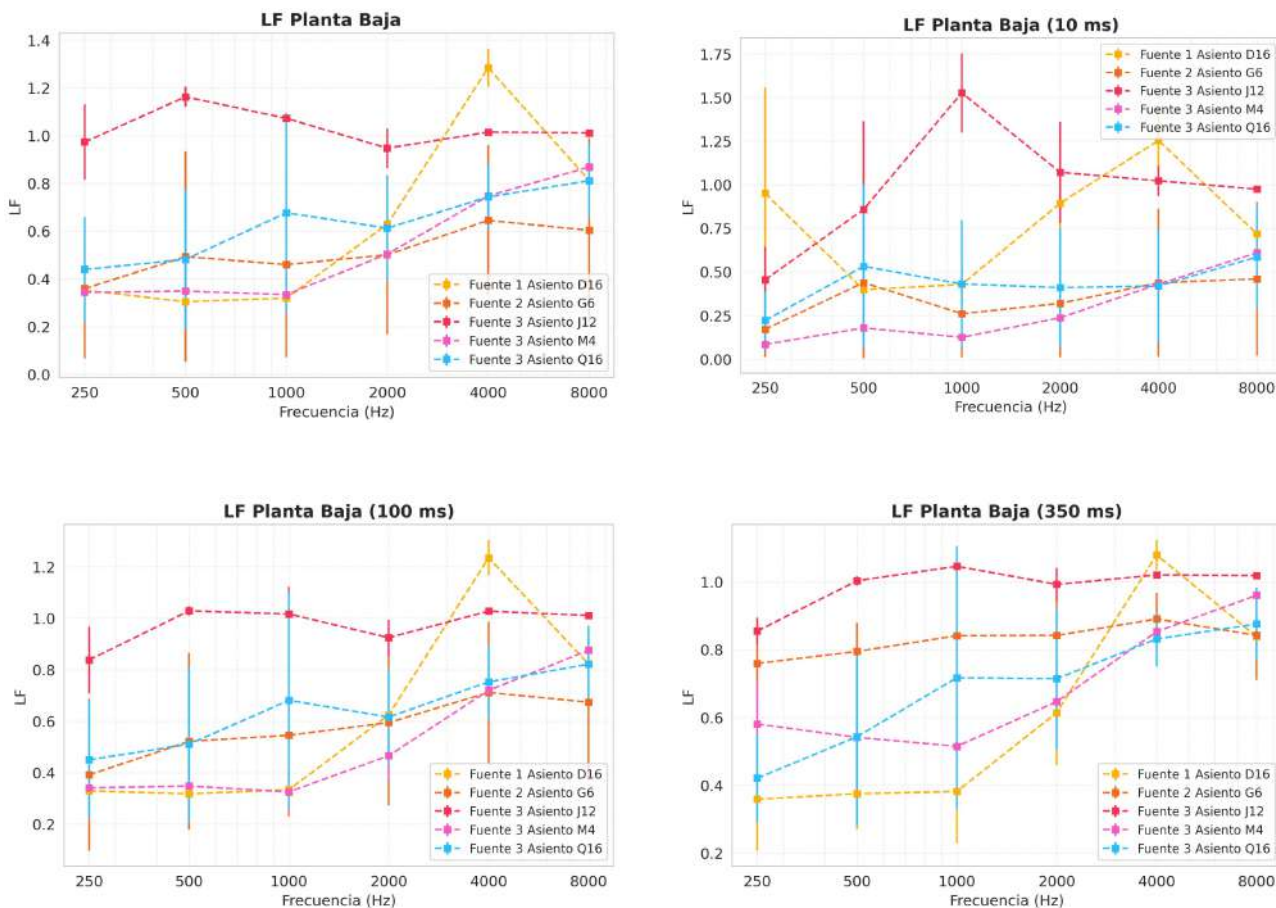


Figura 35: Comparación de LF en Planta Baja: General, 10 ms, 100 ms y 350 ms.

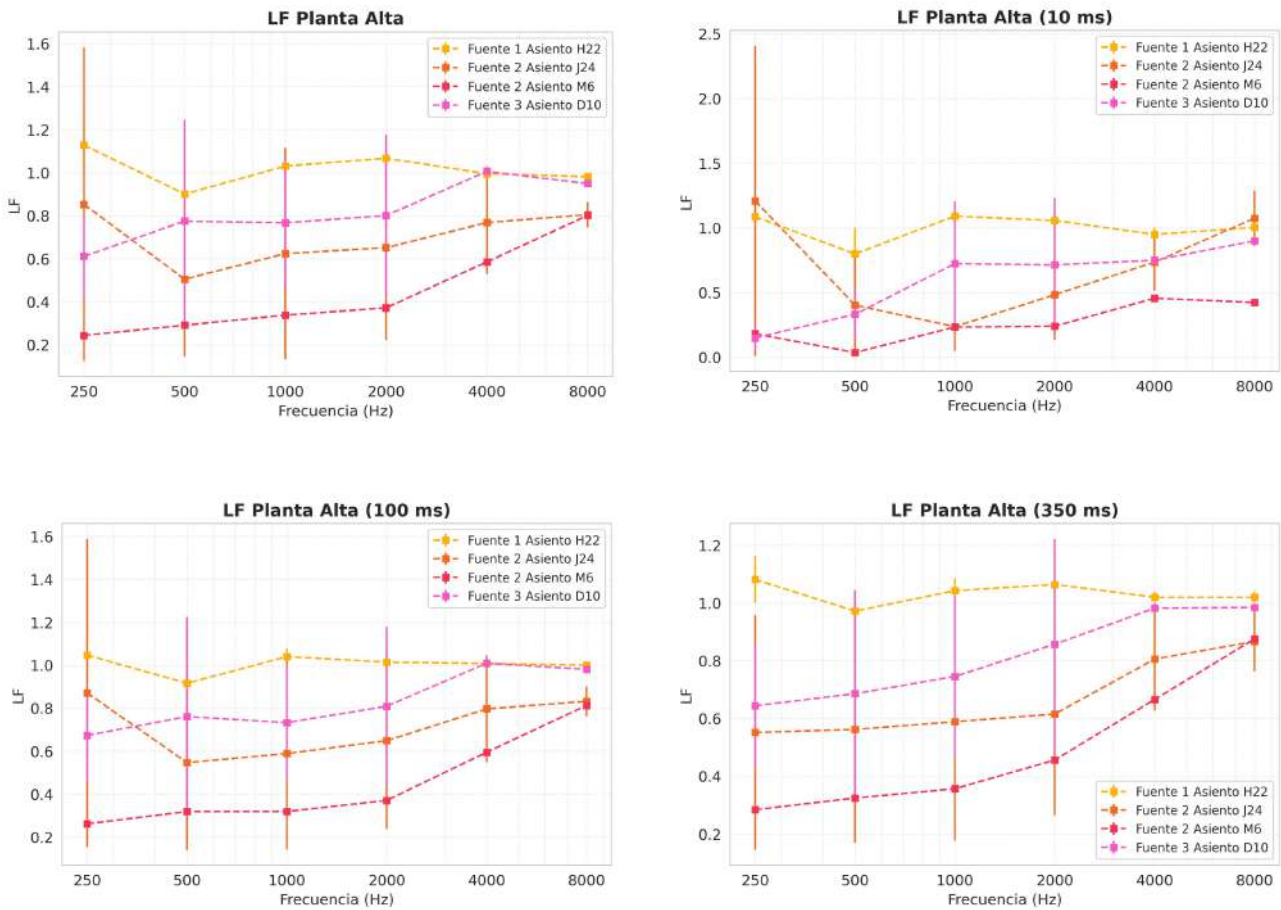


Figura 36: Comparación de LF en Planta Alta: General, 10 ms, 100 ms y 350 ms.

En las Tablas 18 y 19 se comparan los diferentes valores de LF según la ventana de integración. Se puede observar que a medida que la ventana de integración aumenta, el valor de LF tiene de subir. Esto indica que según la dinámica propia del programa musical que se reproduce, el panorama sonoro del auditorio varía. Esta tendencia se observa principalmente para las posiciones donde el LF en 10 ms es bajo, en las posiciones donde el LF es alto el valor de LF tiende a ser estable al variar el tiempo de integración.

Tabla 18: LF subjetivado – Planta Baja

Fuente y Posición	LF 10ms	LF 100ms	LF 350ms
Fuente 1 D16	0,44 ± 0,28	0,61 ± 0,36	0,68 ± 0,36
Fuente 2 G6	0,2 ± 0,01	0,58 ± 0,08	0,75 ± 0,13
Fuente 3 J12	0,95 ± 0,11	1,04 ± 0,08	1,07 ± 0,07
Fuente 3 M4	0,27 ± 0,09	0,53 ± 0,20	0,74 ± 0,17
Fuente 3 Q16	0,36 ± 0,14	0,66 ± 0,15	0,74 ± 0,19

En concreto, los resultados indican que para señales con un τ_e bajo la relación entre sonido directo y sonido lateral es baja, indicando mayor presencia del sonido directo; en cambio, para señales con un τ_e alto, el LF indica una mayor presencia de sonido lateral. Este factor temporal se suma a las diferencias en frecuencia propias de cada instrumento lo que genera un campo sonoro mixto donde la presencia espacial de los elementos de un programa musical dependen de las características propias del ensamble o programa musical en particular.

Tabla 19: LF subjetivado – Segundo Piso

Fuente y Posición	LF 10ms	LF 100ms	LF 350ms
Fuente 1 H22	1,00 ± 0,10	1,00 ± 0,04	1,03 ± 0,04
Fuente 2 J24	0,69 ± 0,35	0,71 ± 0,12	0,67 ± 0,12
Fuente 2 M6	0,26 ± 0,14	0,45 ± 0,20	0,49 ± 0,21
Fuente 3 D10	0,60 ± 0,26	0,83 ± 0,13	0,82 ± 0,13

6.7 Interaural Cross-Correlation (IACC Early y IACC Late)

6.7.1 IACC a partir de respuestas al impulso

El comportamiento general observado para el IACC es el esperado. La tendencia muestra valores cercanos a 1 para bajas frecuencias, bajando la correlación conforme sube la frecuencia, lo cual es esperable considerando las dimensiones del HATS. Éste presenta una distancia externa entre transductores de aproximadamente 20 cm, por que a las grandes longitudes de onda presentes en bajas frecuencias no se generaría una rotación de fase suficiente como para que el sonido directo baje su correlación, observable en la curva de IACC Early.

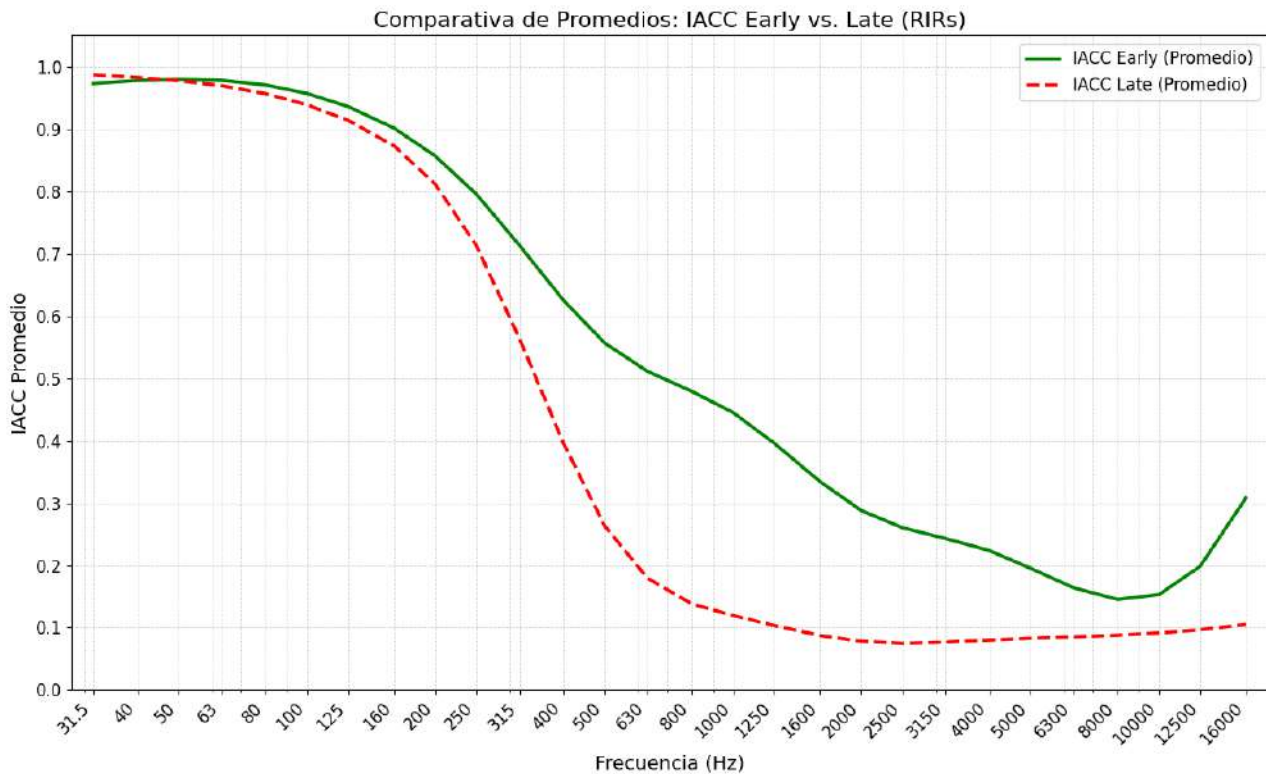


Figura 37: Comparación IACC Early - Late promedio.

Por otro lado, en el caso del IACC Late se observa una tendencia similar, pero con una caída pronunciada que ocurre para frecuencias más bajas en comparación al parámetro previo. Ésto puede explicarse por la mayor densidad de reflexiones en los instantes tardíos de la respuesta al impulso, generando diferencias no solo temporales sino potencialmente espectrales entre la información captada por cada micrófono.

La diferencia entre ellos para el rango por encima de 500 Hz, podría explicarse por el tiempo de establecimiento del campo difuso. Para el caso temprano, éste podría no haberse establecido completamente, llevando a valores más altos de autocorrelación. Por otro lado, en el caso tardío, la energía arribando a los transductores sería predominantemente difusa, llevando a valores bajos de IACC.

Respecto al efecto de los difusores, es oportuno recordar que dadas sus características de diseño, su rango de funcionamiento comienza en aproximadamente 600 Hz y 300 Hz para la secuencia #1 y #2 respectivamente. Su efecto se vuelve notorio sobre el IACC, siendo estas frecuencias próximas a los puntos de inflexión en la curva del parámetro.

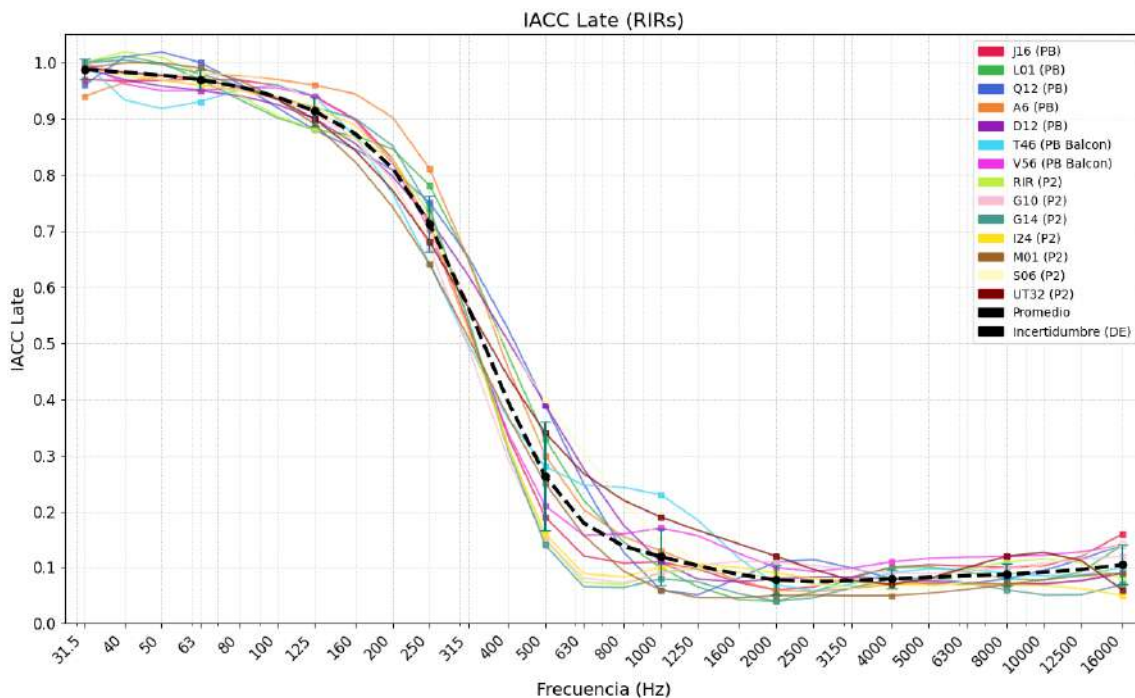
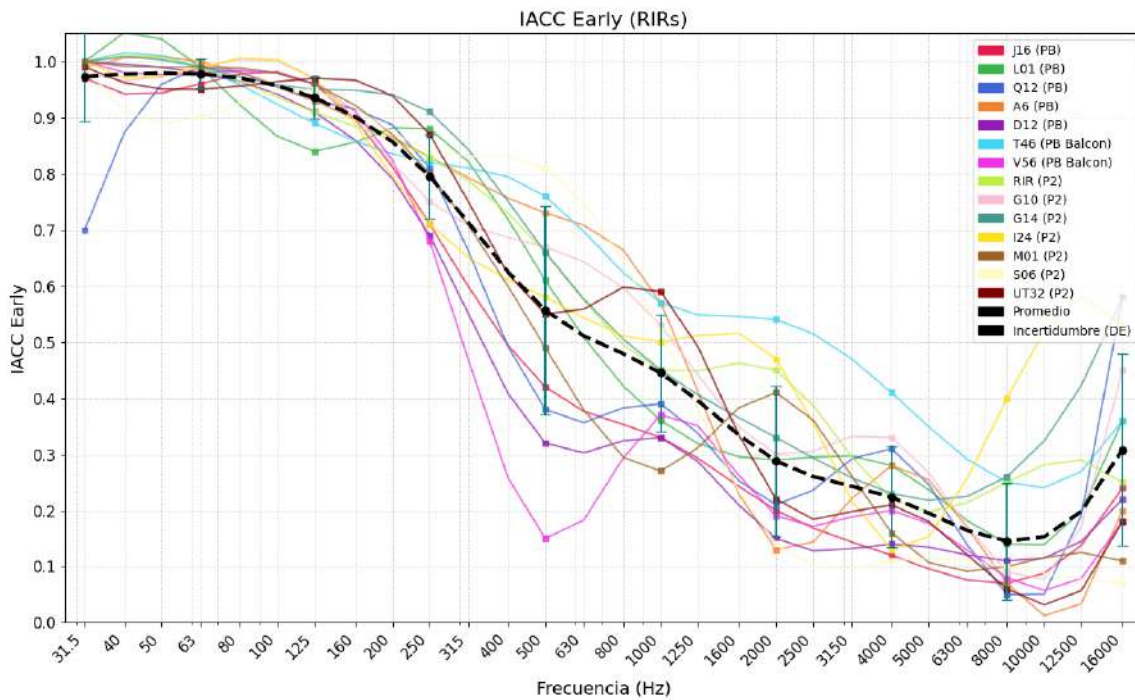


Figura 38: IACC Early (arriba), IACC Late (abajo)

Por otro lado, si se analiza la homogeneidad del parámetro en su distribución espacial, se puede observar que la parte temprana presenta una mayor variación que la tardía. Se destaca por ejemplo,

el caso de la posición 'PB Balcon', que al estar próxima a una pared podría presentar reflexiones tempranas que reduzcan la correlación entre señales. Un comportamiento similar se presenta para el caso de M01 (P2), la cual se encuentra en una esquina del recinto. En el caso de la parte tardía, la menor dispersión de los resultados obtenidos podría explicarse por una condición libre de reflexiones tempranas, presentando un campo más difuso y estable, lo que contribuiría a su homogeneidad.

6.7.2 IACC a partir de audios anecoicos

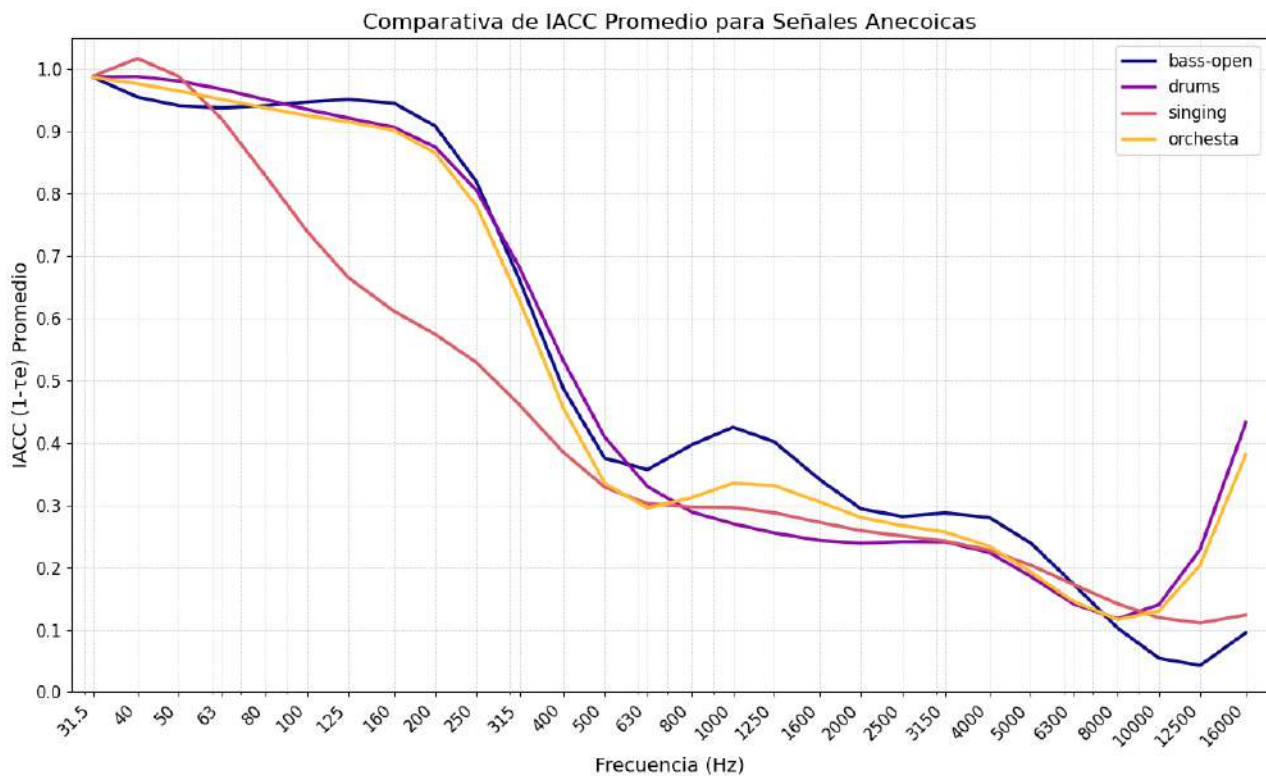


Figura 39: Promedios de IACC

Al analizar los promedios para el caso de los audios anecoicos, podemos observar una dispersión relativamente baja entre ellos, excepto para el caso de la voz cantada. Curiosamente, esta diferencia se da principalmente en bajas frecuencias, viéndose mitigada a partir de 500 Hz. Esto podría estar relacionado a la carga espectral de las señales, dado que la voz cantada era femenina, y no presentaba energía considerable en la parte baja del espectro. Siendo que una mayor extensión y distribución espectrales contribuyen a una mejor calidad de la respuesta al impulso obtenida, resulta esperable que una pobre excitación del recinto lleve a posibles errores de cálculo. Por otro lado, considerando la proximidad entre curvas, los resultados parecen indicar una baja injerencia del τ_e sobre el IACC, dado que las señales presentan valores dispares del primero, pero baja dispersión en el segundo.

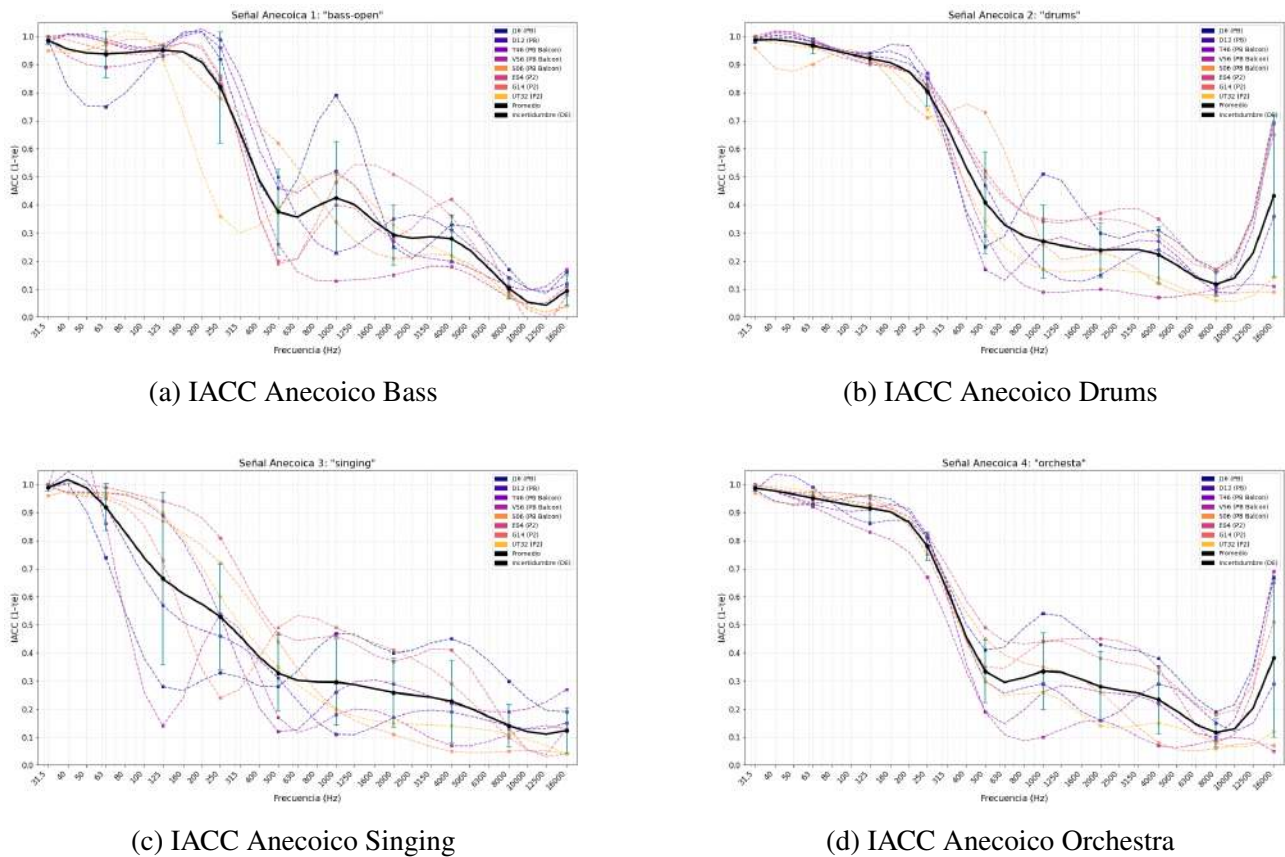


Figura 40: IACC anecoico por estímulo

6.8 Direct to Reverberant Ratio (D/R)

6.8.1 Resultados Objetivos

En la Tabla 20 se presentan los resultados obtenidos para el parámetro D/R. Se puede observar que todos los sectores cuentan con un D/R menor a 0 dB, lo que es común en auditorios, e implica que las ubicaciones medidas se posicionan a una distancia mayor a la distancia crítica del recinto, siendo la energía del campo reverberante mayor a la del sonido directo.

Parámetro	Platea Baja	Platea Alta	Balcones	Global
D/R [dB]	-3,72 ± 2,45	-7,75 ± 1,70	-2,26 ± 0,99	-4,14 ± 3,06

Tabla 20: Valores promedio de D/R con incertidumbre para cada sector y valor global.

El sector de la platea alta cuenta con el mínimo valor de D/R, siendo de -7,75 dB, y el máximo corresponde a los balcones con -2,26 dB. Los resultados varían claramente entre una ubicación y otra, mostrando una lógica dependencia de la distancia de medición. Además, vale destacar que estos datos se condicen con lo obtenido para los parámetros de inteligibilidad (STI y AICons), los cuales muestran una peor inteligibilidad en la platea alta, respecto del resto de los sectores.

En cuánto a la incertidumbre obtenida, está directamente relacionada con la variación de posición entre los puntos de medición utilizados en cada sector, que resulta en la variación de D/R debido a la distancia a la fuente. Esto puede verificarse al observar los mapeos en la Figura 41.

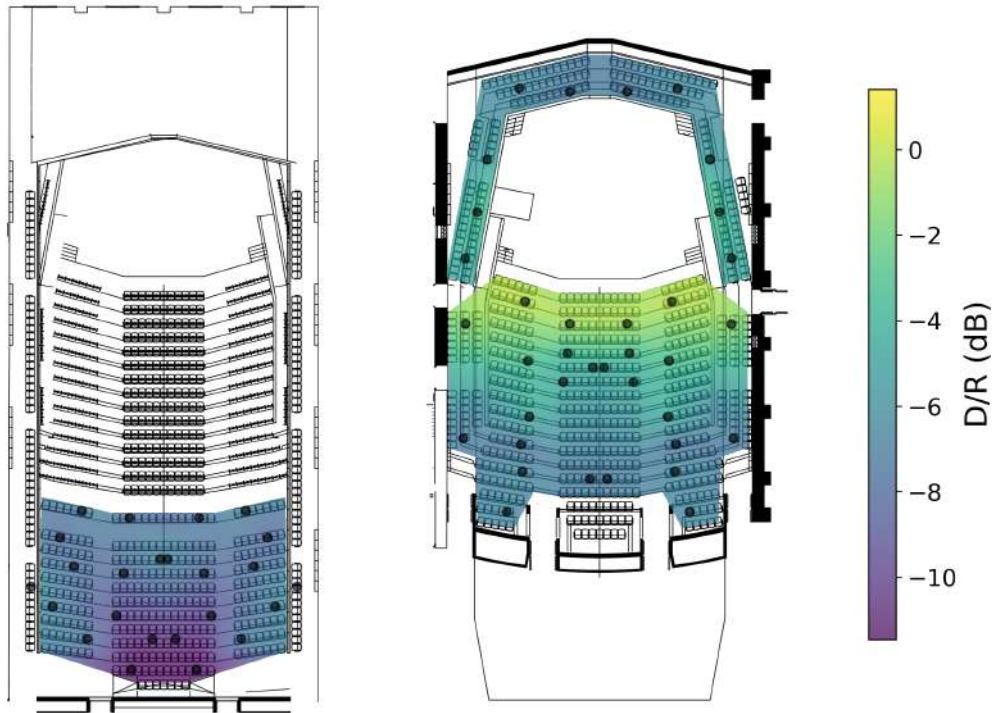


Figura 41: Mapeo en base a resultados de D/R.

Además, en el mapeo se observa cierta uniformidad para las posiciones ubicadas en los balcones que rodean al escenario. A su vez, las filas delanteras de la platea baja cuentan con valores de D/R cercanos a 0 dB, lo que resulta en una posible mejor inteligibilidad en esas ubicaciones, en concordancia con su cercanía al escenario.

6.8.2 Resultados Subjetivos

En la Tabla 21 se muestran los resultados globales subjetivados con las tres ventanas de integración bajo estudio.

Ventana [ms]	Global
10	$-0,42 \pm 2,04$
100	$-0,02 \pm 2,12$
350	$0,00 \pm 2,12$

Tabla 21: Valores globales de D/R y su incertidumbre para distintas ventanas de integración.

Se puede observar que el D/R global aumenta sustancialmente al ser procesado con las ventanas de integración. Además, se tiene que mientras mayor sea el tiempo de la ventana, más aumenta su valor y se acerca a 0 dB, tal como ocurre para la ventana de 350 ms. Sin embargo, la incertidumbre obtenida de las tres ventanas equivale a 1 JND para este parámetro, lo que indica que se tendrá una variación perceptible de la relación entre energía de campo directo y campo reverberante para las diferentes posiciones del auditorio.

Este comportamiento se confirma al observar los mapeos de los resultados subjetivados en la Figura 42, que muestra que las posiciones cercanas al escenario cuentan con valores mayores a 0 dB y las lejanas menores, derivando en los resultados promedio ya mencionados.

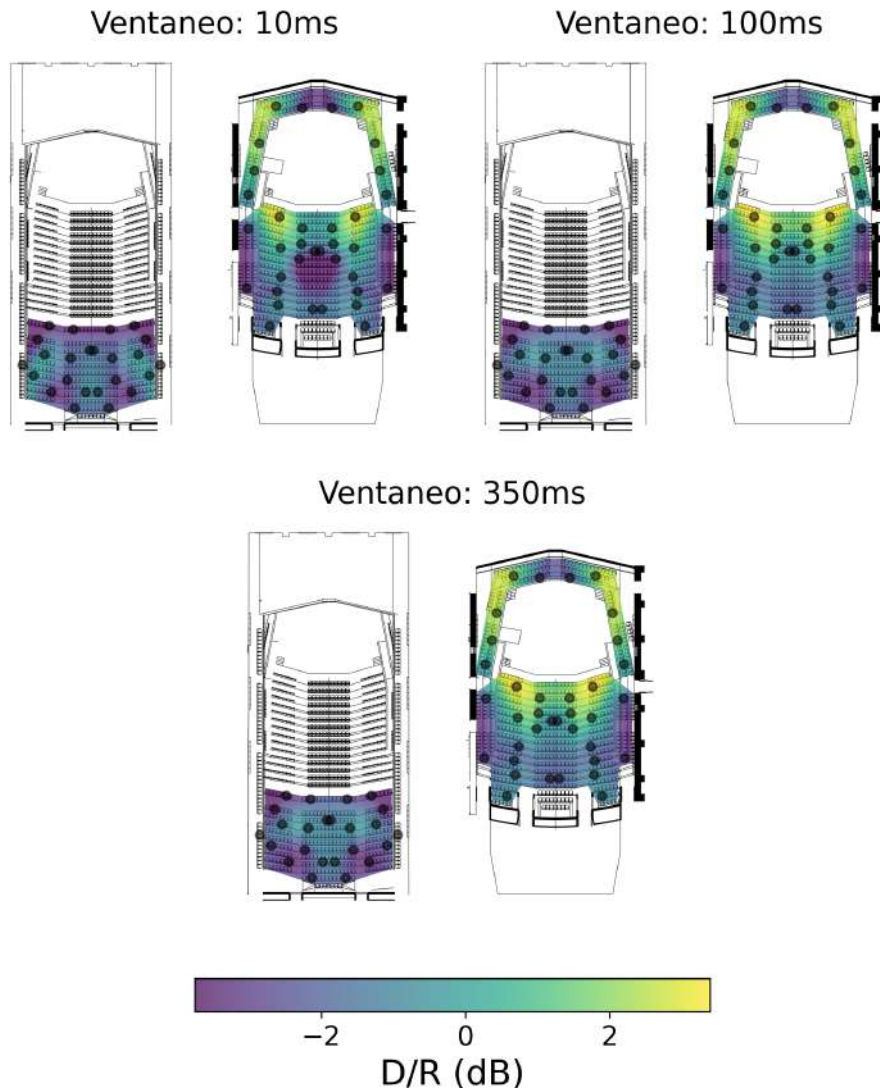


Figura 42: Mapeo en base a resultados subjetivos de D/R.

6.9 Parámetros de escenario (ST_{Early} y ST_{Late})

En la Figura 43 se presentan los resultados del Soporte Temprano (ST_{early}) y Tardío (ST_{late}) por bandas de octava. Es importante notar que, aunque el eje vertical esté invertido, un valor más alto (menos negativo) representa un mayor soporte. Por lo tanto, los resultados muestran que el ST_{early} es consistentemente más fuerte que el ST_{late} en todas las bandas, lo cual es la relación deseable en el diseño de escenarios. La distribución de ambos parámetros a través de las frecuencias es, además, relativamente homogénea.

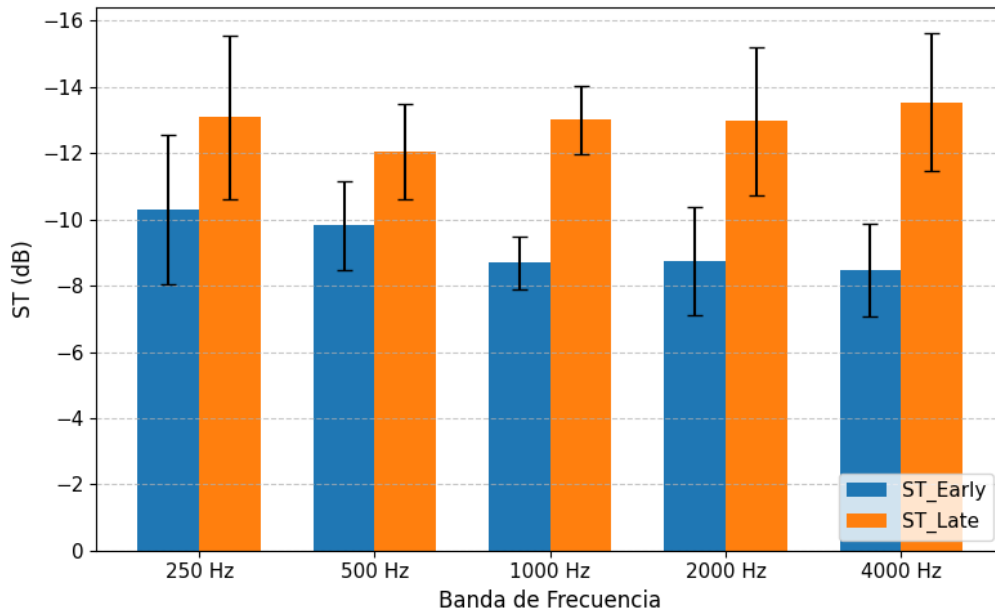


Figura 43: Resultados de Stage Support por bandas de octava

Como se muestra en la Tabla 22 promedio globales fueron de $ST_{early} = -9,25 \pm 0,78$ dB y $ST_{late} = -12,54 \pm 0,88$ dB. A primera vista, si se comparan estos resultados con los rangos óptimos establecidos en la investigación fundamental de Gade (1989) [24], los valores medidos se encontrarían dentro de lo esperado para un buen desempeño acústico. Gade concluyó que los valores de ST_{early} para orquestas sinfónicas deberían rondar los -12 dB ± 1 dB [24].

Tabla 22: Valores globales de Soporte de Escenario (ST)

Parámetro	Valor [dB]
ST_{Early}	$-9,25 \pm 0,78$
ST_{Late}	$-12,54 \pm 0,88$

No obstante, es crucial considerar que los parámetros ST, aunque estandarizados, presentan limitaciones importantes que han sido documentadas en investigaciones más recientes. Estudios como el de Dammerud et al. (2010) [25] sostienen que las mediciones de ST realizadas en un escenario vacío tienen una validez física y relevancia subjetiva muy limitadas. Una de las críticas principales es que el parámetro ST_{early} , al ser una medición omnidireccional, ignora por completo la dirección de llegada de las reflexiones, un factor que resulta fundamental para la percepción de ensamble entre los músicos [25]. Por lo tanto, aunque los valores de ST puedan parecer adecuados, es posible que no reflejen problemas reales derivados de la falta de reflexiones laterales coherentes, una característica que podría esperarse en un escenario de diseño abierto como el evaluado.

6.10 Listener Envelopment (LEV)

Los valores de Listener Envelopment que se presentan corresponden a puntos en el espacio capturados con el micrófono SoundField, que por la baja densidad de puntos no amerita realizar un mapeo espacial. El LEV relaciona los valores, el Factor de Nivel Sonoro (G) que fueron mapeados para los micrófonos omnidireccionales y el valor de lateral fraction (LF) que fueron calculados para posiciones de SoundField. Como se tiene un valor global mas homogéneo del valor de G, se decide utilizar un valor interpolado de G para cada posición de SoundField.

Los valores globales de LEV se presentan en la Tabla 23. Se puede observar que el valor global esta dentro del rango de valor típico que se indica en la norma ISO 3382 (-14 db a 1 dB), ubicándose dentro del margen superior, lo que indica una gran inmersión sonora dentro del auditorio.

Tabla 23: Valor global de LEV y su incertidumbre

Parámetro	Valor [dB]	Incertidumbre [dB]
LEV global	0,38	1,05

En la Figura 44 se observa el valor de LEV por posición de SoundField, donde se puede apreciar la variabilidad del parámetro. La tendencia indica que en general se cuenta con una envolvente acústica que se ubica en un rango alto, con puntos específicos donde el LEV supera el valor recomendado como las posiciones *PB J12* y *PA H22*. Como este parámetro depende del LF, estos puntos se corresponden con los puntos donde se obtuvieron valores elevados de lateral fraction.

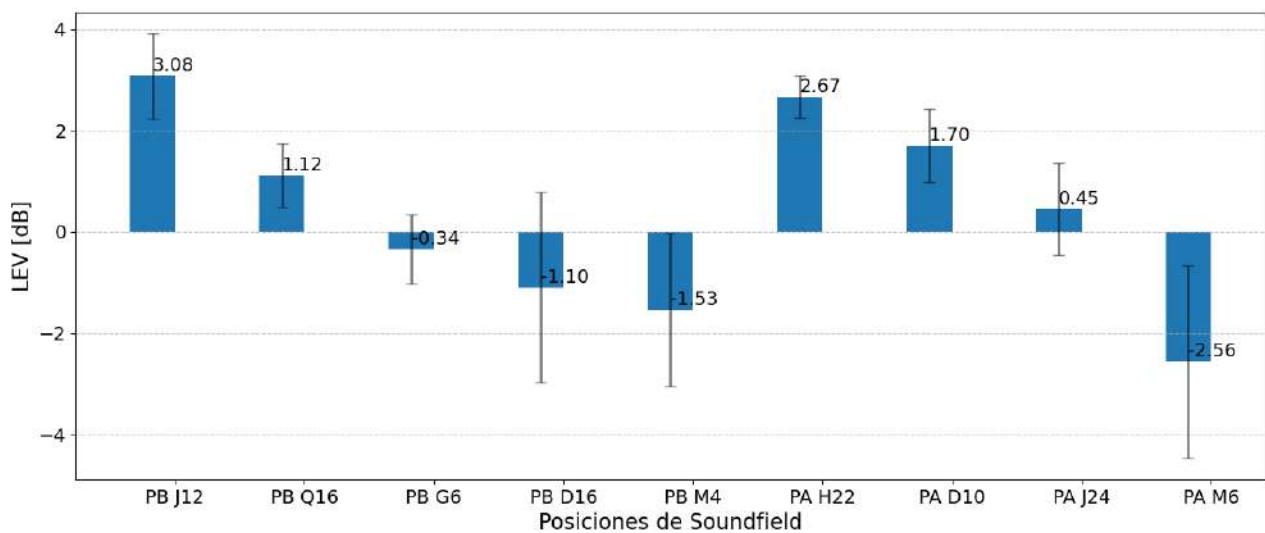


Figura 44: Valores de LEV por posición de SoundField.

Es pertinente remarcar que si bien se puede hacer un análisis cualitativo, los valores de LEV presentados están sujetos a el error que se arrastra en la medición del parámetro G, con lo cual es mas importante remarcar la variabilidad espacial del parámetro que el valor de amplitud final que esta sujeto a errores sistemáticos.

6.11 Echo Speech - Echo Music (EKS y EKM)

6.11.1 Resultados Objetivos

En la Tabla 24 se presentan los valores globales obtenidos para Echo Speech y Echo Music, por sector. En primer lugar, para las plateas centrales baja y alta se observa que los valores obtenidos para Echo Speech y Echo Music resultan como máximo de 0,73 s y 0,77 s en la zona alta, siendo inferiores los de la baja. Se entiende que estos valores son aceptables (menores a 1 s y a 1,8 s, respectivamente), expresando que en estas ubicaciones no se percibirá como eco a una reflexión.

Sin embargo, ambas condiciones empeoran para el caso de los balcones, con valores respectivos de 1,03 s y 0,92 s. Esto indica que para el caso de palabra hablada, puede ocurrir que en los balcones se perciba eco debido a reflexiones sobre superficies lejanas. No obstante en dicho sector, si bien se tiene una situación desfavorable respecto de la de las plateas, la escucha de una pieza musical no implicará la percepción del fenómeno mencionado.

Parámetro	Planta Baja	Planta Alta	Balcones	Global
Echo Speech [s]	$0,72 \pm 0,27$	$0,73 \pm 0,16$	$1,03 \pm 0,29$	$0,81 \pm 0,28$
Echo Music [s]	$0,69 \pm 0,23$	$0,77 \pm 0,15$	$0,92 \pm 0,26$	$0,78 \pm 0,23$

Tabla 24: Valores globales e incertidumbre de Echo Speech y Echo Music por sector.

En cuanto a la incertidumbre, exceptuando el caso de la platea alta, los valores que describen el parámetro Echo Speech son los que presentan mayor desviación (los más altos se encuentran entre 0,27 s y 0,29 s), respecto de los del Echo Music (entre 0,23 s y 0,26 s). La platea baja presenta el mayor porcentaje de desviación para el Echo Speech y el Echo Music, con 37,5 % y 33,3 %, respectivamente, en relación a las otras zonas de audiencia.

Por su parte, la platea alta es el sector que menos desviación presenta, tanto para la palabra hablada como para un programa musical, siendo de 0,16 s (22 %) y 0,15 s (19 %), respectivamente. Esto indica que entre las ubicaciones de esa área del auditorio, se tendrá mayor uniformidad en la respuesta relacionada al tiempo entre la llegada del sonido directo y de las reflexiones lejanas, respecto de la platea baja y los balcones.

En las Figuras 45 y 46 se presenta el mapeo de ambos parámetros, donde se verifica de forma visual el análisis realizado a partir de los valores globales. Es curioso cómo se destaca un valor alto respecto a los demás en el sector intermedio de la platea baja. Esto se puede deber a alguna reflexión tardía particular que afecta a solo ese sector de la planta. Por otro lado, se tiene similitud entre las ubicaciones de los balcones que bordean el escenario y un comportamiento aproximadamente uniforme entre las ubicaciones de la planta alta.

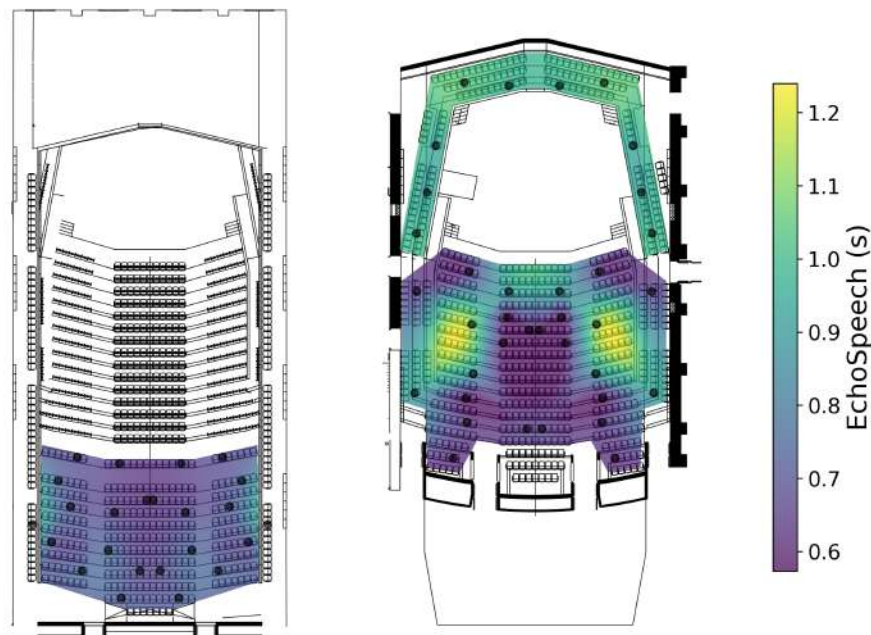


Figura 45: Mapeo en base a resultados de *Echo Speech*.

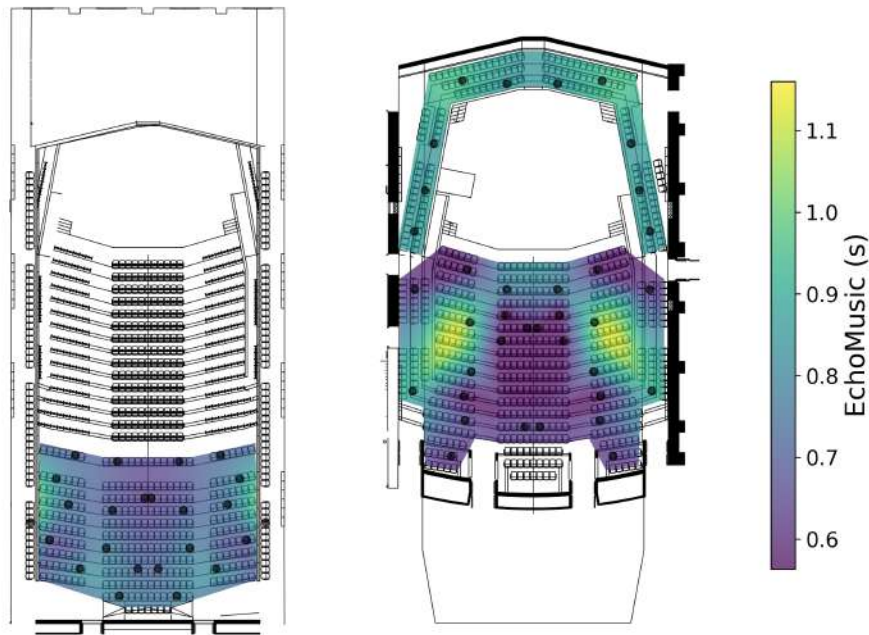


Figura 46: Mapeo en base a resultados de *Echo Music*.

6.11.2 Resultados Subjetivos

En la Tabla 25 se muestran los resultados de Echo Speech y Echo Music subjetivados para los tres tipos de ventanas.

Parámetro	Ventana [ms]	Planta Baja	Planta Alta	Balcones	Global
Echo Speech [s]	10	0,93 ± 0,28	0,87 ± 0,25	1,82 ± 0,82	1,16 ± 0,64
Echo Speech [s]	100	2,53 ± 0,88	2,37 ± 1,27	2,06 ± 1,10	2,34 ± 1,11
Echo Speech [s]	350	1,37 ± 1,07	1,18 ± 0,94	1,38 ± 0,99	1,31 ± 1,01
Echo Music [s]	10	1,04 ± 0,40	0,96 ± 0,39	2,40 ± 1,28	1,39 ± 0,98
Echo Music [s]	100	3,37 ± 1,27	3,34 ± 2,19	2,81 ± 1,71	3,20 ± 1,77
Echo Music [s]	350	1,71 ± 1,60	1,43 ± 1,46	1,76 ± 1,51	1,62 ± 1,53

Tabla 25: Promedios e incertidumbre de Echo Speech y Echo Music subjetivados para distintas ventanas temporales y sectores.

Se puede ver que las respuestas al impulso subjetivadas arrojan resultados desfavorables en ambos parámetros para todos los tiempos de ventana analizados. Los valores globales de Echo Speech resultan mayores a 1 s en al menos un 16 %, denotando una clara percepción de eco para dicho tipo de señal en todas las ubicaciones bajo estudio. El mayor resultado, de peor condición, corresponde a la ventana de 100 ms, siendo de 2,34 s.

Analizando con mayor profundidad, para la ventana de 10 ms los balcones son los que presentan mayor valor de Echo Speech (1,82 s), y para la de 100 ms, la planta baja (2,53 s). Este último presenta el mayor valor en comparación al resto, independientemente de la ventana y ubicación. Por último, para la ventana de 350 ms, tanto la planta baja como los balcones son los sectores con mayor valor de este parámetro; 1,37 s y 1,38 s, respectivamente.

Por otro lado, las únicas ubicaciones que presentan valores de Echo Speech dentro de lo pretendido ($ES < 1$) son las plateas baja y alta (0,93 s y 0,87 s, respectivamente), para un tiempo de ventana de 10 ms.

Se observa que para la mayoría de posiciones los valores se encuentran por debajo de 1,8 s. Observando los valores globales, la ventana de 100 ms presenta el único valor de esta categoría que se encuentra por encima del límite a partir del cual se percibe el eco, siendo de 3,20 s. Por el contrario, el mínimo valor global es de 1,39 s y corresponde a la ventana de 10 ms.

Este resultado se explica en detalle observando que las plateas baja y alta contienen los menores valores de Echo Music para una ventana de 10 ms, y por otro lado, las mismas ubicaciones, analizadas con la ventana de 100 ms, resultan en los mayores valores encontrados entre todos los casos estudiados de este parámetro.

Comparando los valores entre sectores, los mayores diferencias respecto al resto pertenecen a los balcones, excepto para la ventana de 100 ms, que, si bien es alto (2,81 s) y supera el límite de 1,8 s, las otras dos áreas de audiencia presentan valores superiores. Por lo tanto, podría decirse que este último es el que presenta una peor condición relativa al resto respecto del eco percibido en las diferentes áreas de audiencia.

Además, el valor de incertidumbre para todas las ubicaciones y ventanas analizadas también resulta significativamente mayor a los de los resultados objetivos.

En el caso del Echo Speech, las máximas desviaciones se dan para la plateas alta (0,94 s; 80 %) y baja (1,07 s; 78 %) con una ventana de 350 ms, y las mínimas para las mismas ubicaciones, siendo la de la baja (0,28 s; 30 %) levemente mayor a la de la alta (0,25 s; 28 %), con una ventana de 10 ms.

Para Echo Music, esta tendencia se repite, pero con incertidumbres superiores a las del parámetro anterior. En este caso, las plateas baja y alta presentan respectivos valores mínimos de 0,40 s (38 %) y 0,39 s (40 %), con ventana de 10 ms. Los máximos ocurren también en las plateas baja y alta, 1,60 s (94 %) y 1,46 s (102 %), respectivamente, con ventana de 350 ms.

En resumen, los resultados subjetivos obtenidos tanto para Echo Speech como para Echo Music muestran una dependencia del tamaño de ventana. Esto indica un diferente comportamiento de la respuesta acústica del recinto según el tipo de estímulo. Además, esto no solo varía al cambiar el tipo de señal, sino que también se tiene una respuesta variada entre los sectores del auditorio. A su vez, las incertidumbres obtenidas muestran que no se tendría uniformidad de la percepción de eco entre las diferentes ubicaciones de un mismo sector.

En las Figuras 54 y 55 del Anexo A se presentan los mapeos subjetivos de Echo Speech y Echo Music, respectivamente.

En ellos se observa mayor uniformidad entre las diferentes ubicaciones para cada tipo de ventana. Además, se ve claramente cómo con la ventana de 100 ms se tienen valores superiores en todo el recinto respecto de los otros dos casos.

6.12 Autocorrelación e integración temporal (ACF y τ_e)

Los resultados obtenidos evidencian la influencia de la sala sobre la percepción del estímulo. La totalidad de los estímulos mostró un incremento de entre [28,1-451,5] % para el τ_e promedio, por lo que se puede concluir que el aporte reverberante de la sala conlleva a una mayor duración de la autocorrelación y en consecuencia a una mayor espacialidad percibida.

Respecto al caso específico del estímulo percusivo, una posible explicación para el notorio incremento en su duración de la autocorrelación podría nacer directamente de la escasa duración original. Un elemento percusivo, grabado en un entorno anecoico cuenta con una duración muy corta, por lo que el añadido de reflexiones tempranas por parte de la sala aumenta en un gran percentil la duración de la autosimilitud. De la misma manera, para estímulos sostenidos como es el caso de la orquesta o particularmente del contrabajo, se observa un menor incremento percentil. Esto se condice con la naturaleza del estímulo, donde el añadido de la cola reverberante por parte de la sala se superpone con el mismo. Es decir, para estímulos cortos, la cola reverberante añadida es identificable frente a la señal original, mientras que para estímulos sostenidos puede no serlo tanto, llevando a una disparidad en el incremento del τ_e .

Tabla 26: Variación de los parámetros $\tau_{e,min}$ y $\tau_{e,mean}$ de cuatro señales anecoicas al ser reproducidas en el recinto, medidos en milisegundos [ms].

Señal	Parámetros $\tau_{e,min}$			Parámetros $\tau_{e,mean}$		
	Original	Medido	Diferencia	Original	Medido	Diferencia
Bass-Open	665.11	642.09	-23.02 (-3.5 %)	4,839.44	6,200.24	1,360.80 (28.1 %)
Drums	0.00085	28.90	+28.90 ($3,4 \cdot 10^3$ %)	11.38	62.76	51.38 (451.5 %)
Singing	41.24	44.58	+3.34 (8.1 %)	126.64	223.75	97.11 (76.7 %)
Orchestra	45.52	74.86	+29.34 (64.5 %)	90.60	159.51	68.91 (76.1 %)

Considerando el uso de caso de este recinto como sala de conciertos, este comportamiento puede ser beneficioso, dado que contribuye a la percepción de espacialidad y envolvimiento (LEV) del oyente. Habiendo dicho eso, la demostrada dependencia de este fenómeno respecto al τ_e de la señal original evidencia la necesidad de las diferentes escuelas de diseño acústico para los distintos casos de uso.

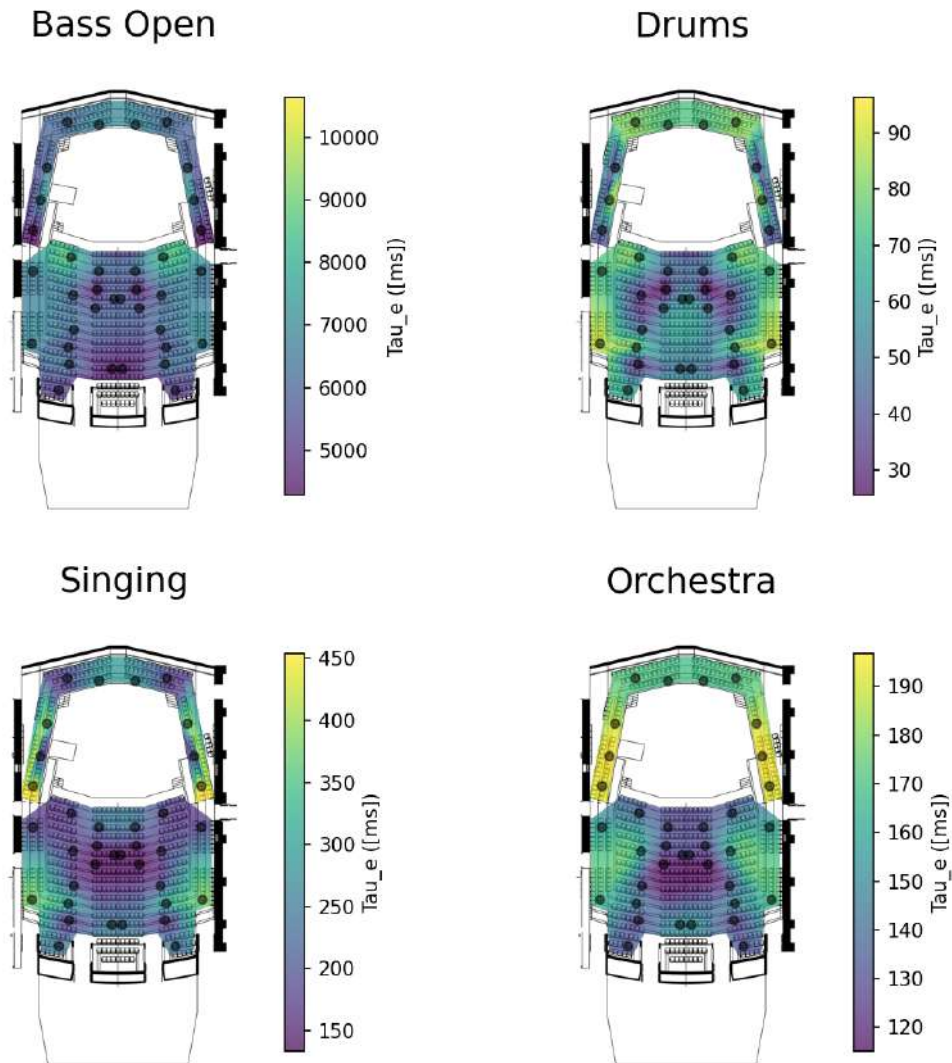


Figura 47: Mapeo comparativo τ_e promedio

En lo que a los mapeos respecta Figura 47, es importante destacar que ante la significativa va-

riación entre los rangos de τ_e de los distintos estímulos, resulta imposible representarlos a todos con la misma escala. Sin embargo, las tendencias generales son las mismas: Se observa un incremento del parámetro en las proximidades a paredes, donde la presencia de reflexiones tempranas podría contribuir al incremento de la duración de la autocorrelación.

7. Simulación en EASE

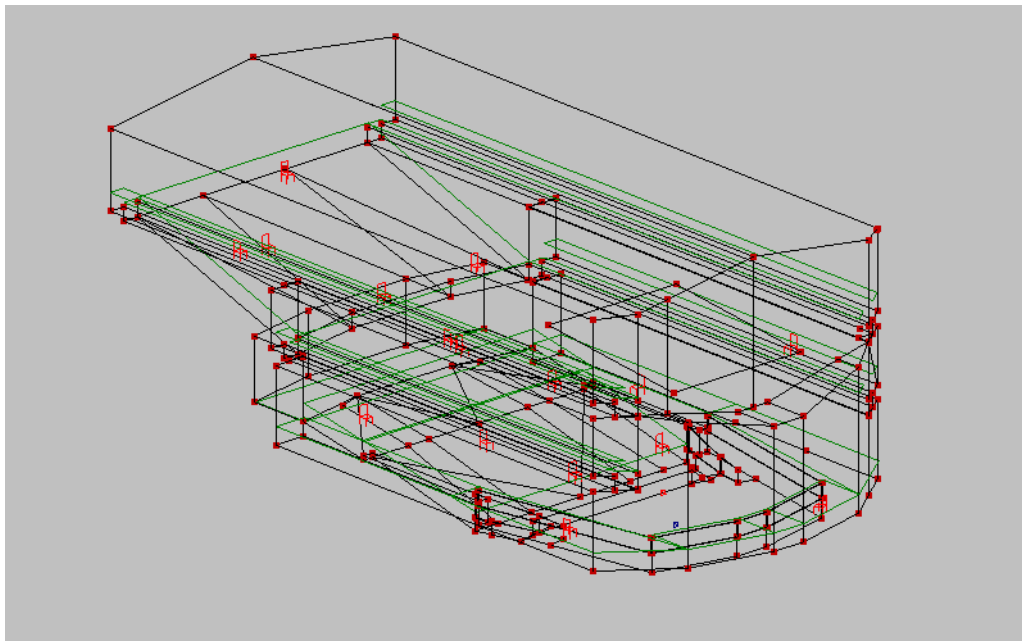


Figura 48: Modelo tridimensional en EASE 4.3

Sacando provecho a simulaciones previamente realizadas [26] (Figura 48) en el marco de la materia, se realizó una comparación de los valores obtenidos para los principales parámetros tanto en simulación como medición. Resulta oportuno destacar que los valores obtenidos simulaciones mediante deberían ser considerados como referencia y no resultados de precisión.

Frecuencia [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Simulado [s]	1,944	2,074	2,218	1,997	1,325	1,205	1,238
Medido [s]	1,73	1,95	2,06	1,98	1,72	1,39	1,00
Dif	0,214	0,124	0,158	0,017	-0,395	-0,185	0,238
Dif %	-11,01 %	-5,98 %	-7,12 %	-0,85 %	29,81 %	15,35 %	-19,22 %

Tabla 27: Comparación de T_{30} entre distintas condiciones y medición en bandas de octava.

La tendencia general sugiere una sobre-estimación de los tiempos de reverberación en la simulación, lo cual podría atribuirse a diferencias entre coeficientes y áreas de absorción asignadas al modelo. En el caso particular de la banda de 125 Hz, el relevamiento realizado el día de la medición permitió identificar grandes superficies de madera con cámara de aire por detrás, pudiendo funcionar a modo de resonador de membrana y resultando en absorción para bajas frecuencias. Para el caso de las bandas de 2 kHz y 4 kHz, se observa una tendencia contraria, lo cual podría explicarse por un error en la asignación de coeficientes de absorción de las butacas, dado que son la única superficie presente con comportamiento absorbente en medias-altas frecuencias.

Tabla 28: Valores obtenidos de EDT en la simulación, por zonas de audiencia y diferencias con la medición, en segundos.

	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Simulado [s]	1,944	2,074	2,218	1,997	1,325	1,205	1,238
Medido [s]	1,55	1,90	2,00	1,90	1,75	1,50	1,05
Dif	0,394	0,174	0,218	0,097	-0,425	-0,295	0,188
Dif %	-20,26 %	-8,39 %	-9,83 %	-4,86 %	32,08 %	24,48 %	-15,18 %

Una tendencia similar a la del T_{30} es observable para el EDT, indicando que posiblemente las diferencias sean atribuibles a la energía y densidad de reflexiones tempranas, más que al campo reverberante tardío.

	Prom	STI medido	%Alcons medido	Dif	Dif %
STI	0,544	0,51 ±0,04	-	-0,034	-6,25 %
%Alcons	9,303 %	-	10,07 ±2,69 %	-0,767 %	-7,62 %

Tabla 29: Comparación entre valores simulados y medidos de STI y %Alcons.

Por otro lado, los parámetros de inteligibilidad resultaron acordes a lo simulado, manteniendo una desviación inferior al 8 %. Habiendo dicho esto, los valores medidos son ligeramente peores a lo esperado, posiblemente atribuible a la subestimación del tiempo de reverberación para las bandas de $2kHz$ y $4kHz$ en el caso simulado.

LF Global	
Simulado	0,725
Medido	0,69
Dif %	-4,83 %

Tabla 30: Lf global promedio.

Por último, el valor de LF resultó dentro de un margen del 5 % de lo simulado, indicando que la representación de superficies fue adecuada para representar la relación entre energía directa y lateral para el promedio de puntos de medición.

8. Conclusiones

El proceso de relevamiento, medición y análisis de la Usina del Arte fue un proceso sumamente valioso y enriquecedor. Se logró realizar una caracterización detallada del recinto, evaluando el comportamiento del mismo bajo métricas energéticas, temporales y de inteligibilidad, tanto objetivas como subjetivas.

En lo que al tiempo de reverberación respecta, éste se encuentra dentro del rango sugerido para una sala de conciertos, aunque presenta un leve incremento en medias frecuencias. Sin embargo, al no contar con mediciones en condición de sala llena, no se puede determinar de manera concluyente la dimensión del problema.

Si bien el tiempo de reverberación global (T_{30}) de 1,92 s se alinea con las recomendaciones para salas sinfónicas, la respuesta en frecuencia no es plana. Presenta un significativo desbalance espectral con un marcado descenso en bajas frecuencias, producto de la absorción generada por las cavidades

de aire y estructuras resonantes bajo el escenario y en áreas de la audiencia. Esta falta de energía reverberante en la región grave puede afectar negativamente la calidez sonora del recinto.

El T30 presenta resultados homogéneos a través del espacio, una cualidad positiva atribuida a la alta difusión de la sala. En contraste, el EDT presenta mayores variaciones espaciales, ya que depende en mayor medida de las reflexiones tempranas.

Los indicadores de claridad confirman la especialización del recinto para programas musicales. El valor global de Claridad de la Palabra C_{50} fue de $-1,73 \pm 2,69$ dB, un resultado que se encuentra por debajo de los mínimos recomendados para una buena inteligibilidad del habla sin refuerzo sonoro. En contraste, el valor de Claridad Musical C_{80} promedió $+1,02 \pm 2,49$ dB, situándose en un rango considerado adecuado para la ejecución de música sinfónica y de cámara.

El factor de nivel sonoro G presenta valores coherente y garantizan un buen nivel de escucha en toda la sala, con un valor global de $8,89$ dB.

El LF global obtenido fue de $0,65$, que si bien se encuentra en un margen elevado indica una sala con una gran sensación de espacialidad. Esto se confirma con el LEV de global de $0,38$ dB, que se encuentra entre los valores recomendados y de gran involucencia.

Respecto a la duración de la autocorrelación, los resultados muestran incrementos notorios para el τ_e promedio reproducido en la sala respecto al original, aunque en distinta proporción para los diferentes estímulos: Aquellos con un valor original menor, se vieron incrementados en mayor medida. Con ello, se evidencia que la sala no solo contribuye a la percepción de espacialidad, sino que además esta responde de manera diferente de acuerdo al estímulo.

La inteligibilidad del habla en el recinto es generalmente buena, con valores de STI aceptables en todos los sectores y baja variabilidad entre ubicaciones. En cuanto a %AICons, la inteligibilidad es buena en platea baja y balcones, y aceptable en la platea alta, aunque con mayor dispersión, especialmente en la platea baja.

Los resultados subjetivados coinciden con los objetivos, sin variaciones relevantes según el tipo de señal o ventana de integración, lo que indica consistencia y confiabilidad en la evaluación realizada.

La relación entre el sonido directo y el campo reverberante expresa en sus resultados una predominancia de este último en todo el recinto, con peores condiciones en la platea alta y mejor relación D/R cerca del escenario, lo que sugiere mayor inteligibilidad en esas zonas. En los resultados subjetivados, el valor de D/R aumenta con la ventana de integración, aunque con variaciones perceptibles entre ubicaciones.

Respecto al IACC obtenido mediante respuestas al impulso convencionales, no se obtuvieron valores fuera de lo esperado. La mayor dispersión en la parte temprana es atribuible a reflexiones de bajo orden y mayor amplitud comparativa al resto del campo, lo que puede producir cambios bruscos en la autosimilitud de la señal. Además, la baja dispersión presente en los resultados obtenidos para los distintos estímulos parece indicar baja influencia del parámetro τ_e sobre el IACC.

Los parámetros de soporte de escenario cumplen numéricamente con lo esperado ($ST_{early} \approx 9,25$ dB, superior a ST_{late}), lo que en teoría favorece el ensamble musical; sin embargo, al medirse en un escenario vacío con técnica omnidireccional, se omite la dirección de las reflexiones tempranas—clave para la comunicación entre músicos—por lo que estos valores, aunque estándares, podrían no reflejar problemas reales de soporte lateral en el escenario.

Luego, respecto a los parámetros de Echo Criteria, los resultados de Echo Speech muestran que podría percibirse eco en los balcones, mientras que el Echo Music se mantiene dentro de los límites aceptables en todas las áreas. En los análisis subjetivados, el Echo Speech supera el umbral de percepción en todo el recinto, especialmente con ventanas largas en la planta baja. Por su parte, el Echo Music presenta valores mayormente aceptables (aunque superiores a los objetivos), con algunos casos aislados fuera de rango, principalmente en plateas. Los balcones tienden a mostrar peores condiciones, aunque no siempre concentran los valores más altos.

La comparación con los resultados simulados permite validar los obtenidos, descartando errores sistemáticos graves y reforzando las hipótesis desarrolladas.

En base a los problemas acústicos detectados, se proponen tres áreas de mejora prioritarias. En primer lugar, es fundamental reducir el elevado nivel de ruido de fondo, lo que implica una revisión del aislamiento general y un rediseño del sistema de ventilación para mitigar sus emisiones. En segundo lugar, se recomienda optimizar el tratamiento difusor mediante la implementación de secuencias QRD no periódicas para asegurar una difusión más homogénea y efectiva. Finalmente, para corregir el desbalance espectral del tiempo de reverberación, sería necesario intervenir sobre las estructuras que actúan como resonadores, reduciendo su sobreabsorción en bajas frecuencias para lograr una respuesta más equilibrada.

9. Preguntas

9.1 ¿Qué problemas acústicos presenta la sala medida?

En primer medida, la sala presenta un nivel de ruido de fondo superior a lo sugerido para un recinto de este tipo. La medición arrojó niveles acordes a la curva NC-35, mientras que la referencia para una sala sinfónica es de al menos NC-20. Se destaca al sistema de ventilación como potencial causa del problema.

Luego, si bien el diseño de los difusores no es inherentemente incorrecto, su aplicación sí lo es. Se utiliza una única secuencia en todo el recinto, recubriendo grandes extensiones de superficie a costo de excesiva reiteración de la misma. Esto disminuye la efectividad de los difusores, ya que incrementa la autocorrelación de la secuencia resultante, llevando a comportamiento lobular en vez de difusión estocástica.

Luego, los valores de claridad indican un desempeño por debajo de los recomendado para palabra hablada. Si bien los valores de STI están dentro de valores aceptables, por el análisis del EchoSpeech también se encuentran problemas en las señales de habla en zonas particulares donde se podría percibir eco en señales de voz.

Si bien el problema de la claridad, u otros problemas menores como un Lateral Fraction elevado, se presentan como atributos negativos, esto depende mucho las aplicaciones del auditorio. En el caso de la Usina del arte, si principalmente se utiliza para eventos de música acústica sin palabra hablada, no sería recomendable tomar alguna decisión de diseño pensando en mejorar estos parámetros si las señales afectadas no forman parte del tipo de programa musical que se presenta en el auditorio.

Como se detalló en la sección de resultados, el tiempo de reverberación presenta un significativo desbalance espectral. La curva de RT exhibe una forma de tipo pasa-banda, con un marcado descenso en bajas frecuencias y un pico en la región de 500-600 Hz. Esta caída en la región grave se atribuye a una sobreabsorción por parte de resonadores mecánicos y cavidades de aire, como las presentes bajo el escenario y en la platea. Se hipotetiza que la absorción del público en la sala llena podría atenuar el pico en frecuencias medias, aplanando así la respuesta. No obstante, esta es una conjetura que requeriría mediciones en condiciones de ocupación para ser corroborada.

9.2 ¿Cómo mejoraría la acústica de la sala medida? (liste 3 actividades a realizar en orden de prioridad, de mayor efecto a menor efecto).

- **Silenciadores y aislamiento:** Una revisión de la condición de aislamiento por parte del techo y de los accesos es requerida, considerando aplicar medidas mitigantes de ser necesario. Por otro lado, se vuelve necesario el rediseño de los conductos de ventilación, incorporando soluciones como conductos absorbentes, recorridos tortuosos y/o silenciadores reactivos para mitigar el ruido de los mismos. Sería prudente también, evaluar la condición del flujo de aire a la salida de los conductos, dado que excesiva velocidad de partículas o bordes pronunciados podrían llevar a sibilancias o flujo turbulento, generando ruido adicional.
- **Difusores:** Es requerida la generación de nuevas secuencias QRD7 que permitan bajar el valor ACQF de la secuencia resultante de concatenar bloques. Además, podría contemplarse extender el rango de funcionamiento de los difusores al modificar su ancho de celda, profundidad y ancho total por bloque.
- **Tiempo de reverberación:** Para incrementar el RT de bajas frecuencias, se deben identificar las superficies que funcionan como resonadores de membrana o de Helmholtz para reducir su absorción. Esto se logra rigidizando los resonadores de membrana o sellando las aberturas en los de Helmholtz.

9.3 ¿Cómo relacionaría la inteligibilidad de la fuente con la variación del TAUe que produce la sala en cada posición?

Quedo evidenciado por la variación de τ_e en los diferentes audios anecoicos la influencia de la sala en la dinámica de la señal, principalmente para señales con un τ_e bajo (como el audio de batería). Es interesante analizar que si la variación de τ_e en el espacio dependiera solo del tiempo de reverberación, los mapeos de la Figura 47 serían homogéneos, pero como se puede ver en la figura, los valores varían considerablemente con la posición.

Esto es un factor que los parámetros tradicionales de inteligibilidad no tienen en cuenta, ya que un incremento del τ_e podría generar una pérdida de inteligibilidad. Y justamente, en los sectores donde la diferencia de τ_e es mayor (los balcones) métricas tradicionales como el C50 o el STI marcan buenos valores de inteligibilidad. Es decir, que los cambios temporales de la señal también afectan a la inteligibilidad, y en general no se tiene en cuenta en las métricas tradicionales.

9.4 Pregunta de investigación

Cual es el impacto del τ_e en la inteligibilidad de la palabra? Como varían las métricas tradicionales de inteligibilidad en función del τ_e ?

Referencias

- [1] Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. *Usina del Arte*. Website. Recuperado el 23 de julio de 2025. s.f. URL: <https://baespacios.buenosaires.gob.ar/contenido/67593-usina-del-arte>.
- [2] Leo L. Beranek. *Acoustics*. 2nd. McGraw Hill, 1969.
- [3] Manfred R. Schroeder. «The “Schroeder frequency” revisited». En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 99.5 (mayo de 1996), págs. 3240-3241. ISSN: 0001-4966.
- [4] *ISO 3382-1:2009 Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*. International Organization for Standardization, 2009.
- [5] Angelo Farina. «Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique». En: *Audio Engineering Society Convention 108*. Paris, France, feb. de 2000.
- [6] Odeon A/S. *ODEON Room Acoustics Software*. Software de modelado y simulación de acústica de recintos, basado en métodos de imagen y trazado de rayos. Odeon A/S. 2023.
- [7] CATT Acoustics AB. *CATT-Acoustic*. Software de predicción y auralización acústica mediante trazado de rayos, incluyendo el algoritmo TUCT/RTC. CATT Acoustics AB. 2024.
- [8] *EASE - Enhanced Acoustic Simulator for Engineers* <https://www.afmg.eu/en/ease>. AFMG, 2025.
- [9] Leo L. Beranek. «The sound strength parameter G and its importance in evaluating and planning the acoustics of halls for music». En: *Journal of the Acoustical Society of America* 129.5 (2011), págs. 3020-3026. DOI: 10.1121/1.3573983.
- [10] Tammo Houtgast y Herman J.M. Steeneken. «A physical method for measuring speech-transmission quality». En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 67.1 (1980), págs. 318-326.
- [11] *IEC 60268-16:2020 – Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by the speech transmission index*. International Electrotechnical Commission, 2020.
- [12] V. M. A. Peutz y W. Klein. «Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room». En: *Journal of the Audio Engineering Society* 19.11 (dic. de 1971), págs. 915-922.
- [13] Glen Ballou. *Handbook for sound engineers*. Taylor & Francis, 2013.
- [14] Michael A. Gerzon. *Ambisonics*. Journal of the Audio Engineering Society, 1985.
- [15] *SoundField Microphone User Manual*. SoundField Ltd. 2010.
- [16] Christian J. Gade. *Acoustics in Halls for Speech and Music*. 2.^a ed. New York: Springer, 2007. ISBN: 9780387747713.
- [17] ANSI/ASA. *ANSI/ASA S12.2-2019: Criteria for Evaluating Room Noise*. ANSI/ASA Standard. American National Standards Institute / Acoustical Society of America, 2019.
- [18] Rassegna S.A. *ZETA 2 CURVA*. Website. Recuperado el 23 de julio de 2025. s.f. URL: <https://www.rassegna.com.ar/producto/zeta-2-curva/>.
- [19] Aurora Acoustics. *Aurora Acoustical Parameters Plugin*. Software plugin. 2025. URL: <https://www.auroraacoustics.com/plugin>.
- [20] Data Physics Corporation. *EASERA*. Acoustic measurement and analysis software. 2024. URL: <https://www.dataphysics.com/easera/>.
- [21] Tetramic. *VVMic for Tetramic*. Software for acoustic measurements. 2025. URL: <https://www.tetramic.com/vvmic>.
- [22] Alejandro Bidondo. *Texture Analyzer*. Software para análisis acústico. 2025. URL: <https://alejandrobidondo.wordpress.com/>.

- [23] Shigeru I. Sato y Shuichi Wu. «Comparison of different calculation methods of effective duration of the running autocorrelation function of music signals». En: *Acta Acustica united with Acustica* 97.3 (2011), págs. 432-440.
- [24] A. C. Gade. «Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in Concert Halls. II: Field Experiments and Synthesis of Results». En: *Acustica* 69.6 (1989), págs. 249-262.
- [25] J. J. Dammerud, M. Barron y E. Kahle. «Objective assessment of acoustic conditions on concert hall stages - limitations and new strategies». En: *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics (ISRA 2010)*. Melbourne, Australia, 2010.
- [26] S. Carro et al. *Simulación computacional basada en acústica geométrica de una sala de conciertos*. Trabajo académico. Instrumentos y mediciones Acústicas, Ingeniería de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF). Caseros, Argentina, 2025.

Anexo A. Mapeos Subjetivos

Mapeos subjetivo de EDT, C_{50} , C_{80} , EchoSpeech, EchoMusic, STI y AICons.

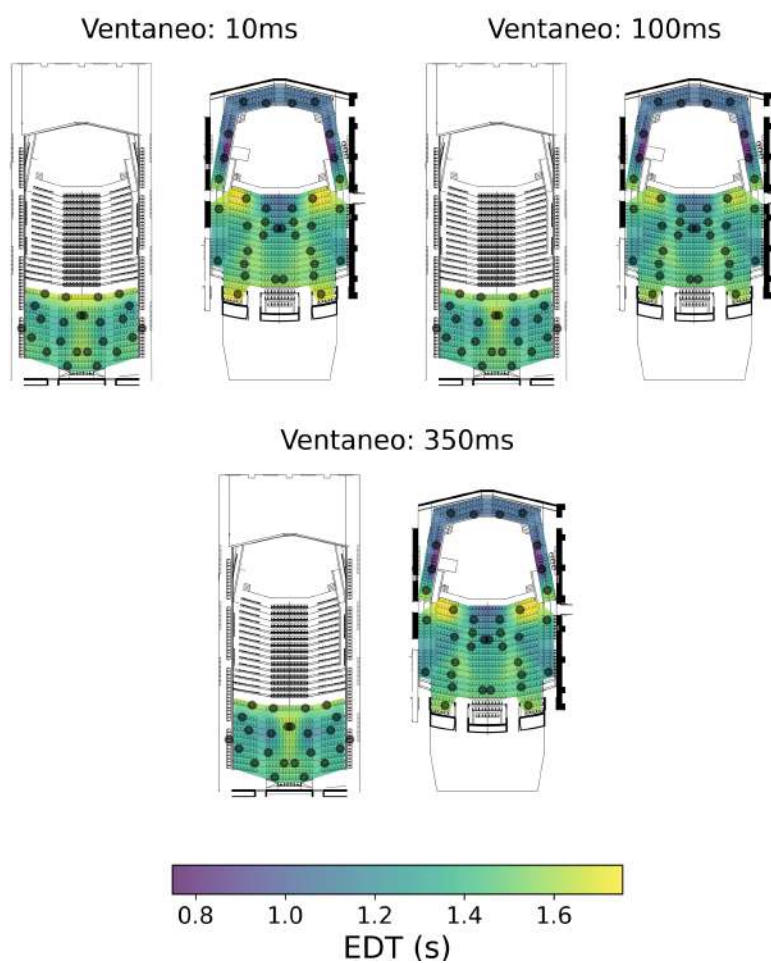


Figura 49: Mapeo con la comparación de EDT subjetivo con distintas ventanas de integración.

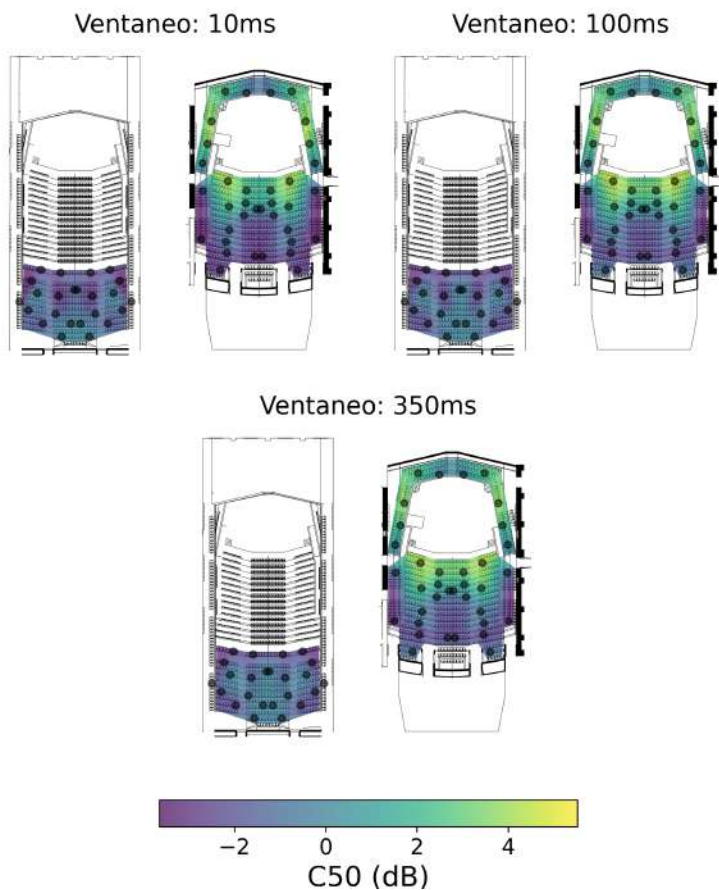


Figura 50: Mapeo con la comparación de C_{50} subjetivo con distintas ventanas de integración.

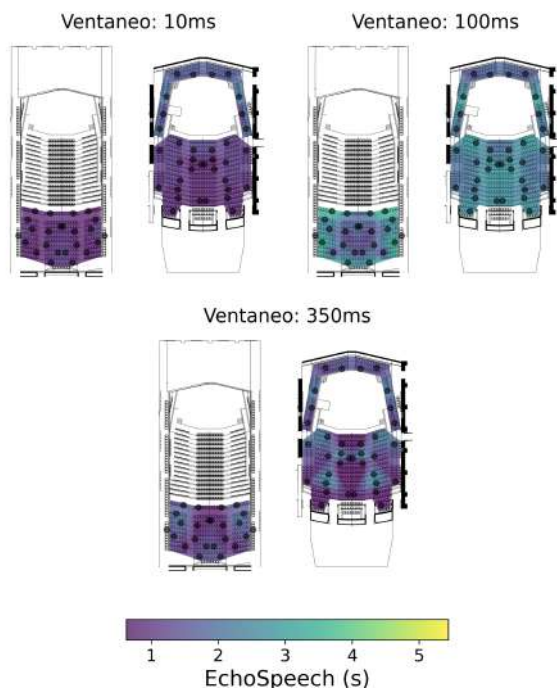


Figura 54: Mapeo de Echo Speech subjetivo con distintas ventanas de integración.

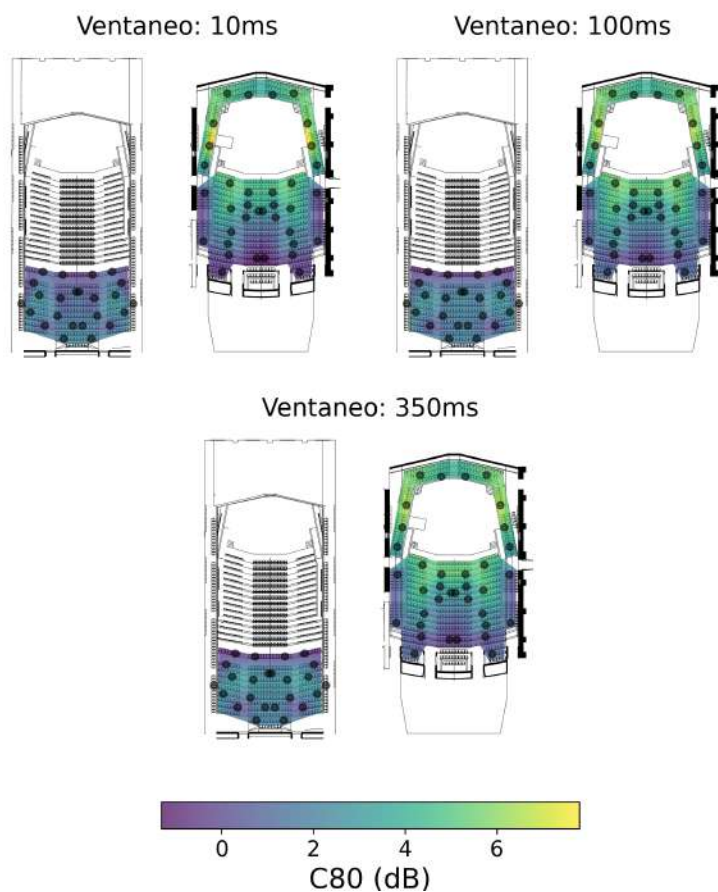


Figura 51: Mapeo con la comparación de C80 subjetivo con distintas ventanas de integración.

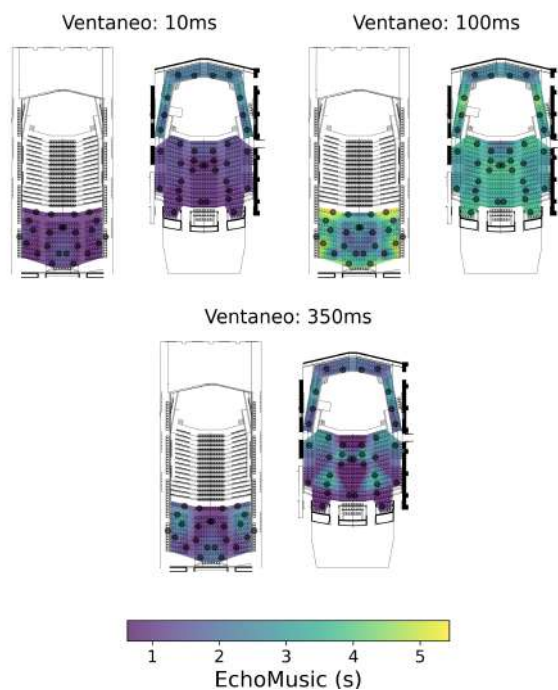


Figura 55: Mapeo de Echo Music subjetivo con distintas ventanas de integración.

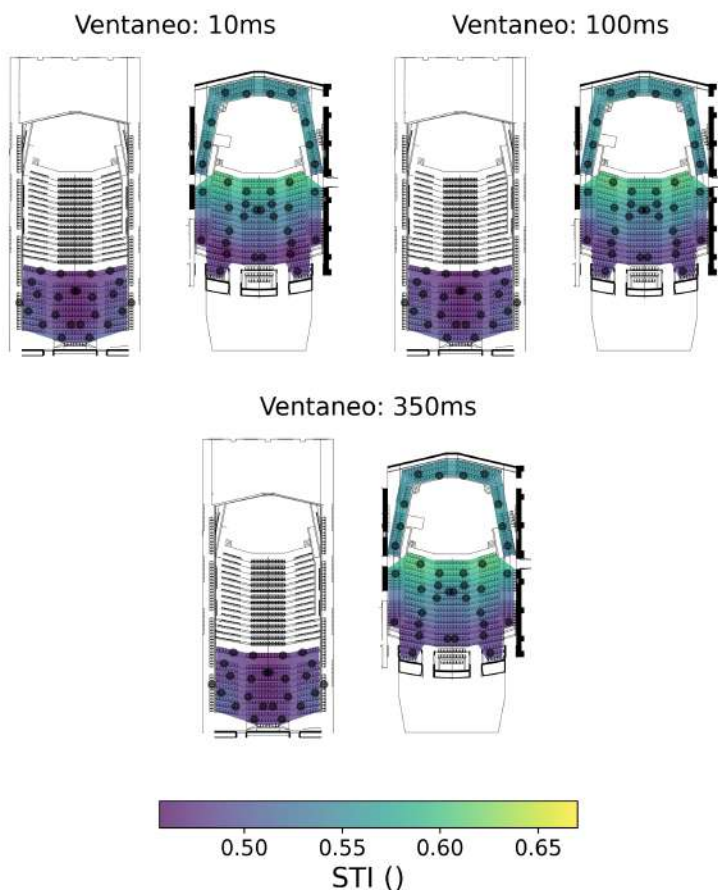


Figura 52: Mapeo con la comparación de STI subjetivo con distintas ventanas de integración.

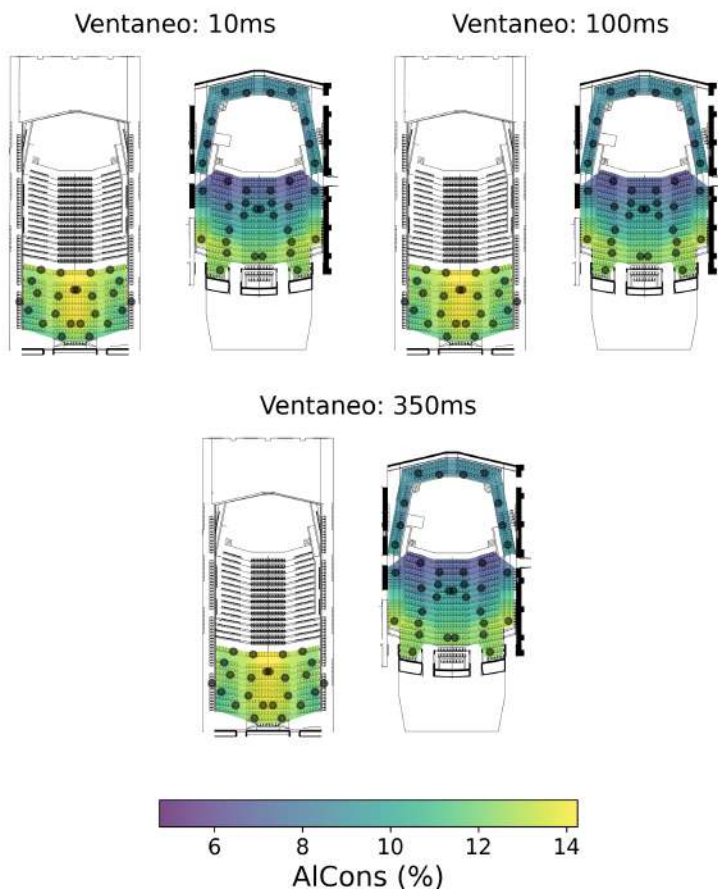


Figura 53: Mapeo con la comparación de AICons subjetivo con distintas ventanas de integración.