



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

TESIS DOCTORAL

**La acústica virtual como herramienta para
el estudio del patrimonio arquitectónico.
Aplicación en la Catedral de Valencia**

Autora: Elena Díaz Rubio

Directora: Alicia Giménez Pérez

Tutor: Francisco Juan Vidal

Marzo 2023

Programa de Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Agradecimientos

Quiero mostrar mi gratitud a todas las personas e instituciones que, directa o indirectamente, han intervenido en la realización de esta tesis doctoral.

Al Ministerio de Ciencia e Innovación por los proyectos de investigación BIA2012-36896 y BIA2016-76957-C3-3-R en los que se enmarca este trabajo.

A la Catedral de Valencia por su colaboración y por facilitar el acceso para realizar la medición acústica, en particular al canónigo Jaime Sancho.

A mi directora de tesis, Alicia Giménez, por darme la oportunidad de adentrarme en el campo de la investigación, por los conocimientos brindados y por el tiempo dedicado.

A mi tutor de tesis, Francisco Juan, por su ayuda en el desarrollo de esta investigación.

A todos los miembros del Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG por contribuir en el desarrollo de esta investigación, especialmente a Salvador Cerdá, Jaume Segura, Rosa Cibrián y Rafael Fayos por su tiempo y dedicación.

A mis padres, Hermes y Gloria, por confiar siempre en mí y por los valores y principios que me han inculcado.

A mi hermana, Ana, por ser mi referente y por sus sabios consejos.

A Rubén por su paciencia y por su apoyo incondicional.

Resumen

Los recintos de culto son construcciones patrimoniales de importantes valores culturales, históricos, artísticos y arquitectónicos. Además, presentan una sonoridad característica que debe ser objeto de especial protección. En este sentido, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) ha reconocido el sonido de los recintos de culto como una parte importante de nuestro patrimonio cultural inmaterial, estableciendo como prioridad su preservación. En este ámbito, la acústica virtual se presenta como una herramienta muy eficaz para el estudio del patrimonio sonoro de los recintos de culto. A través de simulaciones acústicas, es posible analizar en detalle el comportamiento acústico de los diferentes espacios y estudiar la evolución sonora de los templos. La acústica virtual permite predecir y percibir el resultado acústico de cualquier propuesta de intervención antes de su realización práctica, con lo que se presenta una nueva variable a tener en cuenta a la hora de afrontar la restauración del patrimonio: la acústica arquitectónica. Asimismo, la simulación acústica y visual ofrece la posibilidad de realizar turismo virtual por los recintos de culto, fomentando el estudio y disfrute de sus valores patrimoniales. Con todo ello, en esta investigación se ha aplicado la acústica virtual en el estudio del patrimonio sonoro, tanto interior como exterior, de la Catedral de Valencia.

Palabras clave: acústica arquitectónica, patrimonio sonoro, restauración, simulación acústica, paisaje sonoro.

Abstract

Places of worship are patrimonial constructions of important cultural, historical, artistic and architectural values. In addition, they have a characteristic sound that must be the object of special protection. In this sense, the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) has recognized the sound of places of worship as an important part of our intangible cultural heritage, establishing its preservation as a priority. In this field, virtual acoustics is presented as a very effective tool for studying the sound heritage of places of worship. Through acoustic simulations, it is possible to analyze in detail the acoustic behavior of different spaces and study the sound evolution of temples. Virtual acoustics makes possible to predict and perceive the acoustic result of any intervention proposal before its practical implementation, thus presenting a new variable to consider when dealing with heritage restoration: architectural acoustics. Likewise, acoustic and visual simulation offers the possibility of carrying out virtual tourism around places of worship, promoting the study and enjoyment of their heritage values. With all this, in this research virtual acoustics has been applied in the study of the sound heritage, both inside and outside, of the Cathedral of Valencia.

Keywords: architectural acoustics, sound heritage, restoration, acoustic simulation, soundscape.

Resum

Els recintes de culte són construccions patrimonials d'importants valors culturals, històrics, artístics i arquitectònics. A més, presenten una sonoritat característica que ha de ser objecte d'especial protecció. En aquest sentit, l'Organització de les Nacions Unides per a l'Educació, la Ciència i la Cultura (UNESCO) ha reconegut el so dels recintes de culte com una part important del nostre patrimoni cultural immaterial, establint com a prioritat la seua preservació. En aquest àmbit, l'acústica virtual es presenta com una eina molt eficaç per a l'estudi del patrimoni sonor dels recintes de culte. A través de simulacions acústiques, és possible analitzar detalladament el comportament acústic dels diferents espais i estudiar l'evolució sonora dels temples. L'acústica virtual permet predir i percebre el resultat acústic de qualsevol proposta d'intervenció abans de la seua realització pràctica, amb el que es presenta una nova variable a tindre en compte a l'hora d'afrontar la restauració del patrimoni: l'acústica arquitectònica. Així mateix, la simulació acústica i visual ofereix la possibilitat de realitzar turisme virtual pels recintes de culte, fomentant l'estudi i gaudi dels seus valors patrimonials. Amb tot això, en aquesta investigació s'ha aplicat l'acústica virtual en l'estudi del patrimoni sonor, tant interior com exterior, de la Catedral de València.

Paraules clau: acústica arquitectònica, patrimoni sonor, restauració, simulació acústica, paisatge sonor.

Índice

Prólogo.....	13
---------------------	-----------

Parte I. Acústica de la Catedral de Valencia

Capítulo 1. Introducción	17
1.1. Antecedentes.....	17
1.1.1. Acústica virtual en recintos de culto.....	17
1.1.2. Evaluación de la calidad acústica de recintos cerrados.....	21
1.1.3. Predicción de parámetros acústicos en recintos cerrados.....	31
1.2. Justificación de la investigación.....	33
1.3. Evolución constructiva de la Catedral de Valencia.....	34
1.4. Objetivos.....	45
1.4.1. Objetivos generales.....	45
1.4.2. Objetivos específicos.....	45
Capítulo 2. Metodología	47

2.1.	Toma de datos.....	47
2.1.1.	Toma de datos geométricos.	47
2.1.2.	Toma de datos acústicos.	51
2.2.	Simulación acústica.....	54
2.2.1.	Simulación acústica de la Catedral de Valencia en la actualidad.....	54
2.2.2.	Simulación acústica de la Catedral de Valencia con audiencia.....	56
2.2.3.	Simulación acústica de la Catedral de Valencia en 1972.....	58
2.3.	Mejora del acondicionamiento acústico.	59
2.4.	Auralización.....	60
2.5.	Simulación visual.....	60
Capítulo 3. Resultados		65
3.1.	Determinación y análisis de parámetros acústicos objetivos.....	65
3.1.1.	Parámetros de reverberación (T_{30} , EDT, BR y Br).....	66
3.1.2.	Parámetros de energía (G, C_{80} , C_{50} y T_s).	75
3.1.3.	Parámetros de espacialidad (LF y 1-IACC _E).	94
3.1.3.	Parámetros de inteligibilidad (STI)	102
3.2.	Determinación del tiempo de reverberación óptimo (T_{OP}).	104
3.3.	Calibración del modelo acústico con <i>Odeon</i>	105
3.4.	Influencia de la presencia de audiencia en la acústica del recinto.	111
3.5.	Comparativa del comportamiento acústico (actualidad-1972).	113
3.6.	Propuesta de mejora del acondicionamiento acústico.	115
3.7.	Auralización del sonido de la Catedral de Valencia.....	129
3.8.	Renderizado de la simulación visual.	129
3.9.	Recorrido virtual.	134
Capítulo 4. Conclusiones y discusión		135
4.1.	Discusión de los resultados.....	135
4.2.	Utilidad de la investigación.	136
4.3.	Líneas futuras de investigación.....	137

Parte II. Acústica del Tribunal de las Aguas

Capítulo 1. Introducción	141
1.1. Antecedentes.....	141
1.1.1. Acústica virtual en entornos abiertos de interés patrimonial.	141
1.1.2. Evaluación de la calidad acústica de paisajes sonoros.....	143
1.2. Justificación de la investigación.	144
1.3. Historia del Tribunal de las Aguas.....	145
1.4. Entorno del Tribunal de las Aguas.....	150
1.5. Objetivos.	152
1.5.1. Objetivos generales.....	152
1.5.2. Objetivos específicos.	152
Capítulo 2. Metodología	153
2.1. Toma de datos.....	153
2.1.1. Toma de datos geométricos.	153
2.1.2. Toma de datos acústicos.	155
2.2. Simulación acústica.....	158
2.2.1. Levantamiento del modelo acústico.....	158
2.2.2. Calibración del modelo acústico.	159
2.2.3. Simulación de la presencia de público.....	161
2.3. Auralización.....	162
2.4. Simulación visual.....	167
2.5. Evaluación del paisaje sonoro del Tribunal de la Aguas.	169
Capítulo 3. Resultados	171
3.1. Determinación y análisis de parámetros acústicos objetivos.	171
3.1.1. Parámetros de reverberación (T_{30} y EDT).	172
3.1.2. Parámetros de energía (G , C_{80} , C_{50} y T_S).....	176
3.1.3. Parámetros de inteligibilidad (STI).....	184
3.2. Calibración del modelo acústico con <i>Odeon</i> y <i>CATT-Acoustic</i>	184

3.3.	Influencia de la presencia de audiencia en la acústica del entorno.....	198
3.4.	Caracterización de la fuente habla.	200
3.5.	Auralización del sonido del Tribunal de las Aguas.....	201
3.6.	Renderizado de la simulación visual.	201
3.7.	Recorrido virtual.	205
3.8.	Determinación y análisis de parámetros psicoacústicos.....	206
Capítulo 4. Conclusiones y discusión		209
4.1.	Discusión de los resultados.....	209
4.2.	Utilidad de la investigación.	210
4.3.	Líneas futuras de investigación.....	211
Bibliografía		213
Índice de figuras.....		221
Índice de tablas		231
Índice de ecuaciones		237
Difusión de los resultados		239

Prólogo

En esta investigación, se ha aplicado la acústica virtual en el estudio de la Catedral de Valencia. Además de la importancia del patrimonio sonoro en el interior de este recinto de culto, en el exterior, concretamente bajo la Puerta de los Apóstoles, tiene lugar el Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia. Se trata de un evento patrimonial, incluido en la Lista Representativa del Patrimonio Cultural Inmaterial de la UNESCO desde 2009, donde la transmisión del sonido es un factor preferente. Con ello, el objetivo de este trabajo es el estudio del patrimonio sonoro, tanto en el interior como en el exterior, de la Catedral de Valencia, siguiendo una metodología de medición, modelizado, calibración y auralización. Para un mejor seguimiento de la investigación realizada, la tesis se ha estructurado en dos partes, la primera dedicada al interior de la Catedral de Valencia y la segunda al entorno del Tribunal de las Aguas, si bien ambos elementos forman parte conjuntamente del patrimonio sonoro de la Catedral de Valencia.

En la primera parte de este trabajo, se ha realizado un estudio acústico del interior de la Catedral de Valencia. A partir de los datos obtenidos en la medición acústica, se han determinado y analizado los parámetros acústicos del recinto. Se ha construido y calibrado el modelo acústico de la Catedral de Valencia en la actualidad, verificando los resultados con los obtenidos en la medición acústica. Sobre este modelo, se han realizado los cambios necesarios para simular acústicamente la presencia de audiencia y los cambios producidos con las reпрistinaciones realizadas en las últimas décadas. Asimismo, se ha realizado una propuesta de mejora del acondicionamiento acústico para los usos específicos de la música religiosa y la

palabra, conociendo de antemano el resultado a través de simulaciones acústicas. A partir del modelo acústico calibrado, se ha obtenido el sonido auralizado de la Catedral de Valencia para la música de órgano y el canto coral. Paralelamente, se ha construido y texturizado el modelo visual de la Catedral de Valencia. Mediante la fusión de ambos modelos, acústico y visual, se ha obtenido un recorrido virtual en el que tanto la imagen como el sonido se corresponden con el elemento real simulado.

En la segunda parte de este trabajo, se ha realizado un estudio acústico del entorno del Tribunal de las Aguas. A partir de los datos obtenidos en la medición acústica, se han determinado y analizado los parámetros acústicos del paisaje sonoro. Se ha construido y calibrado el modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas, verificando los resultados con los obtenidos en la medición acústica. Con el objetivo de analizar la aplicabilidad de las herramientas utilizadas habitualmente en el estudio acústico de recintos cerrados para el estudio de entornos abiertos de interés patrimonial, se ha realizado un estudio comparativo de la calibración del modelo con los programas informáticos *CATT-Acoustic* y *Odeon*. Sobre el modelo acústico calibrado, se han realizado los cambios necesarios para simular acústicamente la presencia de audiencia. Con el objetivo de lograr un elevado grado de realismo en la auralización del sonido, se ha realizado una grabación en cámara anecoica de una sesión del Tribunal de las Aguas y se ha caracterizado la fuente habla propia del alguacil. Paralelamente, se ha construido y texturizado el modelo visual del entorno del Tribunal de las Aguas. Mediante la fusión de ambos modelos, acústico y visual, se ha obtenido un recorrido virtual en el que tanto la imagen como el sonido se corresponden con el elemento real simulado. A partir de la simulación completa, se ha lanzado una encuesta a través de una plataforma digital con el objetivo de determinar y analizar los parámetros psicoacústicos del paisaje sonoro estudiado.

Parte I

Acústica de la

Catedral de Valencia

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes.

1.1.1. Acústica virtual en recintos de culto.

El concepto de acústica virtual engloba una serie de técnicas informáticas y de procesamiento de señal acústica que permiten estudiar y recrear el comportamiento acústico de diferentes entornos. La acústica virtual es una herramienta que se ha utilizado en gran medida en el estudio acústico de salas de espectáculos (teatros, óperas, auditorios, salas de conciertos...). Sin embargo, su aplicación en el estudio del comportamiento acústico de recintos de culto es relativamente reciente (Planells Pérez, 2017).

Las diferencias existentes entre las salas de espectáculos y los recintos de culto hacen que sea necesario adaptar la forma de trabajo y establecer protocolos de actuación específicos. Debido a la complejidad geométrica de este tipo de espacios patrimoniales, pueden aparecer zonas que tengan un comportamiento acústico singular en las que valores medios del recinto no resulten representativos. Por ello, en el estudio acústico de los recintos de culto resulta necesario analizar el comportamiento de las diferentes zonas y subzonas (Pedrero et al., 2014). Asimismo, la complejidad geométrica de los recintos de culto requiere simplificar los modelos acústicos virtuales con el objetivo de optimizar el proceso de simulación acústica (Giménez et al., 2011).

En este ámbito de estudio, encontramos diferentes autores que han estudiado la relación entre la forma arquitectónica y el comportamiento acústico de los recintos de culto (Carvalho, 1994; Galindo, 2003; Berardi U. , 2014). Sin embargo, la singularidad de este tipo de construcciones puede derivar en resultados acústicos inesperados, por lo que para conocer con exactitud su comportamiento acústico resulta necesario realizar estudios acústicos específicos (Planells Pérez, 2017). Con ello, diversos autores han centrado su investigación en el estudio acústico de diferentes espacios de culto de importantes valores patrimoniales:

Pedrero et al. (2014) realizaron un estudio sobre el comportamiento acústico de la Catedral de Toledo (España). A partir de los datos obtenidos de una extensa campaña de medición acústica, analizaron las diferencias existentes en los distintos espacios que componen el recinto. Asimismo, estudiaron las distintas características acústicas para los diferentes usos litúrgicos que se desarrollan en el templo.

Woszczyk et al. (2014) llevaron a cabo un estudio acústico de la gótica Catedral Grace en San Francisco (California). En esta investigación, se desarrolló un estudio comparativo de diferentes metodologías de medición acústica para determinar los parámetros acústicos en grandes espacios de culto.

Postma et al. (2016) realizaron una recreación virtual, tanto acústica como visual, de un concierto en el interior de la Catedral de Notre-Dam de Paris (Francia). Aplicando la acústica virtual, generaron un modelo acústico calibrado y auralizaron el sonido de una actuación del Conservatorio de París. Paralelamente, construyeron un modelo visual y le aplicaron texturas realizadas a partir de fotografías de los materiales reales. Mediante la fusión de ambos modelos, acústico y visual, se obtuvo una representación realista de un concierto en el interior del templo. Partiendo de los datos obtenidos en la medición acústica realizada en esta investigación, Katz et al. (2020) realizaron un estudio comparativo de la acústica de la Catedral de Notre-Dam antes y después del incendio que tuvo lugar en 2019.

Álvarez Morales (2016) llevó a cabo un estudio sobre el patrimonio acústico de las catedrales andaluzas más representativas: las catedrales de Cádiz, Córdoba, Granada, Jaén, Sevilla y Málaga (España). A través de simulaciones acústicas, se analizó la influencia de la ubicación y orientación de la fuente sonora y la presencia de público en la acústica de los seis recintos de culto.

Alonso Carrillo (2016) realizó un estudio sobre la sonoridad de la Catedral de Sevilla (España) y la Catedral de Granada (España), con el objetivo de ampliar sus valores patrimoniales. Asimismo, mediante el empleo de la acústica virtual, se recuperaron las diferentes etapas sonoras de los templos.

Planells Pérez (2017) desarrolló una investigación sobre el comportamiento acústico de la Basílica de Santa María de Elche (España). En este estudio, se utilizó

la acústica virtual para analizar la influencia del espacio arquitectónico y la presencia de público en la acústica del recinto. Asimismo, se analizó el comportamiento acústico del templo durante la representación del Misteri d'Elx, una obra teatral de origen medieval declarada Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad en 2008 por la UNESCO.

Álvarez Morales et al. (2019) estudiaron el comportamiento acústico de la Catedral de Bristol (Inglaterra) y realizaron auralizaciones basadas en extractos específicos de habla y canto que forman parte de las prácticas litúrgicas y celebraciones culturales propias del templo. La caracterización acústica del recinto incluye un análisis de las diferentes fuentes sonoras involucradas en los usos actuales y pasados, así como la revisión de los cambios arquitectónicos acústicamente significativos a lo largo de la historia.

Alberdi Causse (2019) realizó un estudio sobre la evolución acústica de los recintos religiosos del periodo barroco a partir del estudio de tres iglesias ubicadas en Sevilla (España): San Telmo, San Luis de los Franceses y Santa María Magdalena. A través de simulaciones acústicas, se analizaron las variaciones en el campo sonoro desde el siglo XVIII hasta nuestros días, teniendo en cuenta la evolución constructiva de los tres templos. Asimismo, se estudió la influencia de la posición de la fuente sonora y la posición de los oyentes en la acústica de los templos.

D'Orazio et al. (2020) aplicaron la acústica virtual en el estudio del patrimonio sonoro del Baptisterio de San Juan (Italia). Tomando como base los datos obtenidos en la medición acústica, construyeron y calibraron acústicamente cuatro modelos virtuales correspondientes a los distintos usos del baptisterio. A través de simulaciones acústicas, se analizó la influencia de la presencia de público en la acústica del recinto.

Balestra (2021) llevó a cabo un estudio acústico de la Catedral de Santiago de Compostela (España). Tomando como base los resultados obtenidos en una amplia medición acústica, se generó un modelo virtual del templo. Con ello, además de caracterizar acústicamente el recinto, se presenta la posibilidad de analizar las variaciones acústicas producidas derivadas de las modificaciones realizadas en algunas de sus áreas. En este mismo ámbito, Moreno Iglesias (2020) realizó el diseño y validación de un modelo geométrico para el estudio acústico de la Capilla de la Corticela (Catedral de Santiago de Compostela, España). En esta investigación, se analizaron las características y deficiencias acústicas del recinto y se aportaron posibles configuraciones, hipótesis y soluciones para su mejora acústica.

En el ámbito de la acústica virtual en recintos de culto, encontramos diversos autores que han estudiado la posibilidad de mejorar el acondicionamiento acústico de estos espacios patrimoniales para sus dos usos fundamentales, la música religiosa

y la palabra. A través de simulaciones acústicas, se puede predecir y percibir el resultado acústico de las propuestas de intervención antes de su realización práctica. Debido al grado de protección de los recintos de culto, las propuestas de intervención deben basarse en el respeto a sus valores históricos, artísticos y arquitectónicos. Las intervenciones propuestas por los siguientes autores proporcionan una clara mejora del comportamiento acústico de los recintos estudiados:

Carmona et al. (2009) realizaron una propuesta de mejora del acondicionamiento acústico de la Iglesia de San Lorenzo de Sevilla (España), mediante la instalación de paneles de yeso laminado perforado sobre ciertas paredes del recinto, siendo respetuosos con las formas y acabados originales del templo.

Romero et al. (2010) estudiaron la acústica de la Iglesia Sant Agustí de Vinaròs en Castellón (España) y realizaron una propuesta de rehabilitación acústica para adaptarla a sala de uso múltiple. Para ello, los autores proponen la incorporación de elementos de madera, textiles y láminas de vidrio en forma de concha acústica.

Bueno et al. (2012) realizaron una propuesta de rehabilitación acústica de la Iglesia de Santa Ana de Moratalaz (España) mediante la incorporación de revestimientos absorbentes reversibles, dispuestos estratégicamente desde el punto de vista acústico y arquitectónico.

Iannace (2016) desarrolló una investigación sobre los sistemas de insonorización para la corrección acústica de grandes espacios de culto, siendo el caso de estudio la Catedral de Benevento (Italia). Se plantea la posibilidad de utilizar material cerámico aplicado en las paredes laterales para la corrección acústica de componentes de baja frecuencia y láminas microperforadas transparentes colocadas bajo el techo para la corrección acústica de componentes de media y alta frecuencia.

Iannace et al. (2019) realizaron una propuesta de mejora acústica de la Iglesia de San Pío X en Matera (Italia) mediante la incorporación de materiales absorbentes sobre la superficie de las bóvedas laterales.

Guerrero García (2020) estudió la posibilidad de implantar un nuevo sistema de sonorización en la Catedral de Santiago de Compostela (España), respetando la estética del recinto. Para ello, propone la actualización de los equipos de apoyo electroacústico instalados actualmente por otros más modernos y/o eficientes. A través de simulaciones acústicas, se realizó una valoración de los sistemas viables existentes en el mercado que puedan mejorar la acústico del recinto.

En el ámbito de la Catedral de Valencia, el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UEG realizó una extensa campaña de medición acústica en el interior del recinto. Por parte del propio grupo, se inició el análisis de los resultados obtenidos (Montell et al., 2012), quedando este estudio paralizado hasta la fecha de

inicio de esta investigación. Por otro lado, se realizó la medición acústica de la Capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia. En este ámbito, Montell Serrano (2010) desarrolló una investigación centrada en la aplicación acústica virtual en el estudio de edificios del patrimonio artístico-cultural. Fruto de esta investigación, se obtuvo la simulación acústica y visual de la Capilla del Santo Cáliz, proporcionando al espectador una experiencia completa, línea en la que seguimos en este trabajo con el estudio de la Catedral de Valencia tanto interior (entorno cerrado), como exterior en la Puerta de los Apóstoles (entorno abierto), sede del Tribunal de las Aguas, elementos importantes de nuestro patrimonio cultural.

1.1.2. Evaluación de la calidad acústica de recintos cerrados.

Para el estudio y simulación del comportamiento acústico de recintos cerrados, se utilizan diversas magnitudes acústicas relacionadas con la percepción subjetiva de los oyentes. Estas magnitudes se pueden determinar objetivamente a partir de la medición de respuestas impulsivas en los recintos estudiados. En este ámbito de estudio, cabe destacar las importantes aportaciones realizadas por Beranek (1962; 1993), quien puede considerarse como el padre de los parámetros de calidad acústica en recintos cerrados.

En esta investigación, se han seleccionado los parámetros acústicos que son mayoritariamente utilizados por la comunidad científica para la evaluación de la calidad acústica de recintos de culto. Estas magnitudes se pueden clasificar en los siguientes grupos teniendo en cuenta su relación con diferentes cualidades subjetivas (Giménez & Marín, 1988; Giménez et al., 2001):

- Parámetros de reverberación: tiempo de reverberación (T_R), tiempo de caída inicial (EDT), calidez (BR) y brillo (Br).
- Parámetros de energía: fuerza sonora (G), claridad musical (C_{80}), claridad para la palabra (C_{50}) y tiempo central (T_S).
- Parámetros de espacialidad: fracción de energía lateral (LF), índice de correlación cruzada interaural ($IACC$).
- Parámetros de inteligibilidad: índice de transmisión del habla (STI).

1.1.2.1. Tiempo de reverberación (T_R).

El tiempo de reverberación (T_R) se define como la duración requerida para que la energía acústica media en un recinto decaiga en 60 dB una vez que ha cesado la emisión de la fuente sonora. Se expresa en segundos y su rango típico es de 1 a 3 s.

En la práctica, para determinar el tiempo de reverberación se puede evaluar un rango dinámico inferior a 60dB y extrapolar los resultados a un tiempo de

decrecimiento de 60dB. Si se utilizan valores de decrecimiento entre 5 dB y 25 dB, el tiempo de reverberación se denomina T_{20} . Si se utilizan valores de decrecimiento entre 5 dB y 35 dB, el tiempo de reverberación se anota como T_{30} .

El promediado en frecuencia de número único del tiempo de reverberación ($T_{R,mid}$) se calcula para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la reverberación percibida por los oyentes. El valor de $T_{R,mid}$ se calcula mediante la Ecuación 1:

$$T_{R,mid} = \frac{T_R^{500Hz} + T_R^{1000Hz}}{2} \text{ (s)} \quad (1)$$

El umbral diferencial (*JND*) del promedio en frecuencia de número único del tiempo de reverberación ($T_{R,mid}$) se establece en el 5% relativo. Variaciones superiores de este parámetro resultan perceptibles para el oído humano (UNE-EN ISO 3382-1)

Diversos autores han realizado investigaciones con el objetivo de determinar el tiempo de reverberación óptimo de los recintos. En este ámbito, Sendra et al. (1997), establecieron la Ecuación 2 para determinar el tiempo de reverberación óptimo de los recintos según su uso y volumen considerando la sala ocupada:

$$T_{OP} = k \cdot u \cdot i \cdot V^{1/3} \text{ (s)} \quad (2)$$

donde k es un coeficiente dependiente de la frecuencia, u es un coeficiente dependiente del uso del local, i es un coeficiente que tiene en cuenta la existencia o no de apoyo electroacústico y V es el volumen del recinto.

En la Tabla 1.1, se indican los valores del coeficiente k según la frecuencia. En la Tabla 1.2, se indican los valores del coeficiente u según el uso del recinto. El coeficiente i adopta el valor de 0,85 para recintos con apoyo electroacústico y 1,00 para recintos sin apoyo electroacústico (Sendra et al., 1997).

Tabla 1.1. Valores del coeficiente k según la frecuencia.

F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
k	1,30	1,15	1,10	0,90	0,90	0,90

Tabla 1.2. Valores del coeficiente u según el uso del recinto.

Uso	Palabra	Música de ópera	Música de cámara	Música sinfónica	Música wagneriana	Música religiosa
u	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100

BeraneK (1993) y Knudsen y Harris (1998) proporcionan gráficas para determinar el tiempo de reverberación óptimo de los recintos teniendo en cuenta su volumen y uso considerando la sala ocupada para frecuencias de 500 Hz (Figuras 1.1 y 1.2).

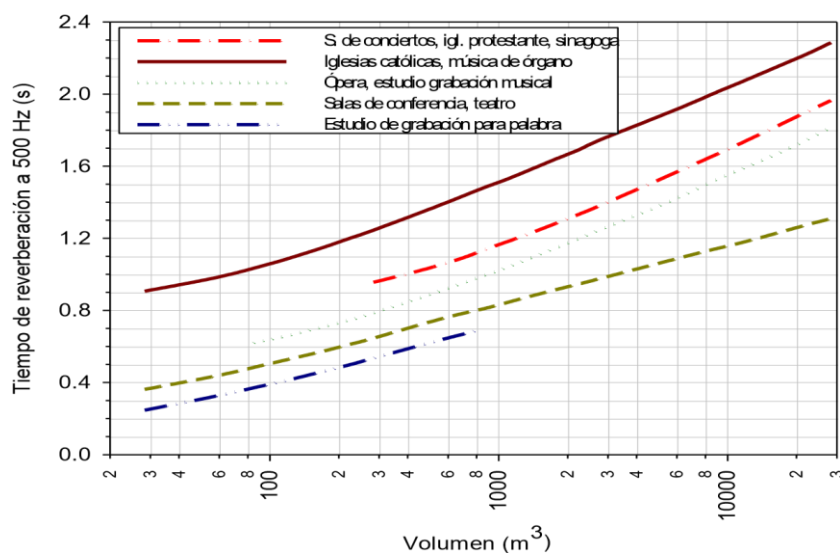


Figura 1.1. Valores óptimos del tiempo de reverberación a 500 Hz (BeraneK, 1993).

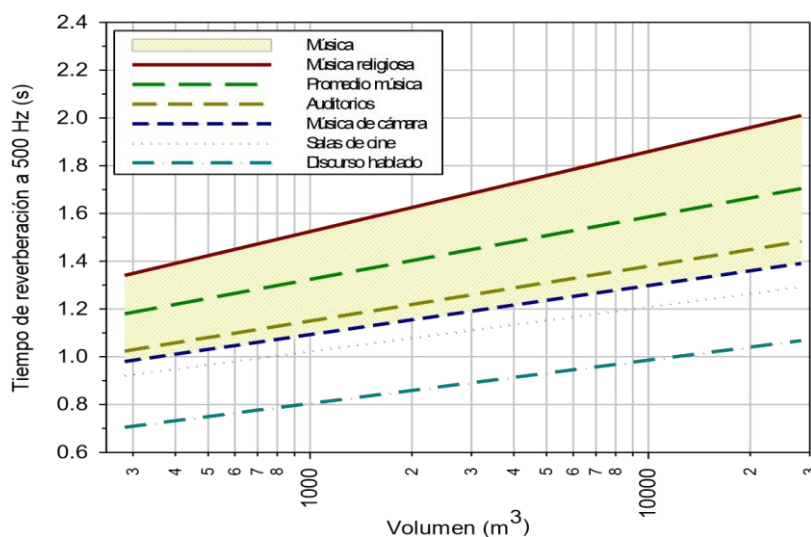


Figura 1.2. Valores óptimos del tiempo de reverberación a 500 Hz (Knudsen & Harris, 1998)

1.1.2.2. Tiempo de caída inicial (EDT).

El tiempo de caída inicial (EDT) se define como la duración requerida para que la energía acústica media en un recinto decrezca en 60 dB una vez que ha cesado la emisión de la fuente sonora, calculado a partir de la pendiente de caída de los primeros 10 dB. Se expresa en segundos y su rango típico es de 1 a 3 s.

El promediado en frecuencia de número único del tiempo de caída inicial (EDT_{mid}) se calcula para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la reverberación percibida por los oyentes. El valor de EDT_{mid} se calcula mediante la Ecuación 3:

$$EDT_{mid} = \frac{EDT^{500Hz} + EDT^{1000Hz}}{2} \quad (s) \quad (3)$$

El umbral diferencial (JND) del promediado en frecuencia de número único del tiempo de caída inicial (EDT_{mid}) se establece en el 5% relativo. Variaciones superiores de este parámetro resultarían perceptibles para el oído humano (UNE-EN ISO 3382-1).

En recintos con una difusión homogénea del sonido, la curva de decrecimiento es prácticamente lineal, por lo que las diferencias entre el tiempo de reverberación y el tiempo de caída inicial serán mínimas. No obstante, en recintos con una distribución del sonido no uniforme, los valores del tiempo de caída inicial son generalmente menores que los del tiempo de reverberación. Con ello, resultan adecuados valores de EDT próximos a T_R (Beranek, 1993).

En el ámbito de la acústica en recintos de culto, Martellota (2008) realizó un estudio experimental sobre las condiciones de escucha preferidas por los oyentes en iglesias católicas. En este estudio, se seleccionó una muestra de oyentes que valoraron la acústica de diferentes iglesias mediante la realización de encuestas. El análisis de los datos obtenidos permite relacionar las calificaciones subjetivas de los oyentes con parámetros acústicos objetivos. Como conclusiones de esta investigación, se determinó que para la música de órgano y el canto coral los valores óptimos del tiempo del promediado en frecuencia de número único del tiempo de caída inicial (EDT_{mid}) se encuentran entre 2,1 y 4,2 segundos considerando la sala ocupada.

1.1.2.3. Calidez (BR) y brillo (Br).

La calidez (BR) se define como la relación entre los tiempos de reverberación a bajas frecuencias (125 Hz y 250 Hz) y los tiempos de reverberación a medias frecuencias (500 Hz y 1000 Hz). Se calcula mediante la Ecuación 4:

$$BR = \frac{T_R^{125Hz} + T_R^{250Hz}}{T_R^{500Hz} + T_R^{1000Hz}} \quad (4)$$

El brillo (Br) se define como la relación entre los tiempos de reverberación a altas frecuencias (2000 Hz y 4000 Hz) y los tiempos de reverberación a medias frecuencias (500 Hz y 1000 Hz). Se calcula mediante la Ecuación 5:

$$Br = \frac{T_R^{2000Hz} + T_R^{4000Hz}}{T_R^{500Hz} + T_R^{1000Hz}} \quad (5)$$

La calidez representa la riqueza de los sonidos graves, lo que está relacionado con la suavidad y melosidad acústica del espacio. Un recinto se considera cálido cuando los sonidos graves presentan mayor reverberación que los medios. El brillo representa la riqueza de los sonidos agudos, lo que está relacionado con claridad y riqueza en armónicos del sonido. Un recinto se considera brillante cuando los sonidos agudos tienen una influencia notoria. Para la calidez, se consideran adecuados los intervalos 1,10-1,25 (para $T_{Rmid}=2,2$ s) y 1,10-1,45 (para $T_{Rmid}=1,8$ s) considerando la sala ocupada. Para el brillo, se consideran adecuados valores iguales o superiores a 0,87 considerando la sala ocupada (Beranek, 1962).

1.1.2.4. Fuerza sonora (G).

La fuerza sonora (G) se define como la diferencia entre el nivel sonoro en un punto concreto del recinto y el nivel sonoro a 10 metros de distancia de la misma fuente de emisión sonora en condiciones de campo libre. Se expresa en decibelios y su rango típico es de -2 dB a +10 dB. La fuerza sonora se calcula mediante la Ecuación 6:

$$G = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} = L_{pE} - L_{pE,10} \text{ (dB)} \quad (6)$$

donde $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición y $p_{10}(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida a una distancia de 10 m en campo libre.

En la práctica, la fuerza sonora de un recinto se puede determinar empleando una fuente sonora omnidireccional calibrada a una distancia de 10 m. Si no se puede disponer de una cámara anecoica de 10 m, se puede determinar el nivel de exposición de la presión acústica en un punto situado a 10 m ($L_{pE,10}$) a partir de la medición a una distancia d ($d \geq 3$ m) de la fuente ($L_{pE,d}$) mediante la aplicación de la Ecuación 7:

$$L_{pE,10} = L_{pE,d} + 20 \lg(10/d) \text{ (dB)} \quad (7)$$

Si se dispone de una fuente sonora omnidireccional cuyo nivel de potencia acústica es conocido, se puede calcular la fuerza sonora a partir de la Ecuación 8:

$$G = L_p - L_w + 31 \text{ (dB)} \quad (8)$$

donde L_p es el nivel de presión acústica medido en cada punto de la medición y L_w es el nivel de potencia acústica de la fuente sonora.

El promediado en frecuencia de número único de la fuerza sonora (G_{mid}) se calcula para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en nivel sonoro subjetivo percibido por los oyentes. El valor de G_{mid} se calcula mediante la Ecuación 9:

$$G_{mid} = \frac{G^{500Hz} + G^{1000Hz}}{2} \text{ (dB)} \quad (9)$$

El umbral diferencial (JND) del promediado en frecuencia de número único de la fuerza sonora (G_{mid}) se establece en 1 dB. Variaciones superiores de este parámetro resultarían perceptibles para el oído humano (UNE-EN ISO 3382-1).

Valores de la fuerza sonora positivos indican que el recinto refuerza con sus reflexiones el sonido emitido. En cambio, valores negativos indican que el recinto atenúa el sonido (Beranek, 1962).

1.1.2.5. Claridad musical (C_{80}) y claridad para la palabra (C_{50}).

La claridad musical (C_{80}) se define como la relación existente entre la energía sonora que llega al receptor en los primeros 80 milisegundos y la energía total percibida a partir de los 80 primeros milisegundos. Se calcula mediante la Ecuación 10:

$$C_{80} = 10 \lg \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ (dB)} \quad (10)$$

donde $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición.

El promediado en frecuencia de número único de la claridad musical ($C_{80, mid}$) se calcula para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la claridad del sonido percibida por los oyentes. El valor de $C_{80, mid}$ se calcula mediante la Ecuación 11:

$$C_{80,mid} = \frac{C_{80}^{500Hz} + C_{80}^{1000Hz}}{2} \text{ (dB)} \quad (11)$$

La claridad para la palabra (C_{50}) se define como la relación existente entre la energía sonora que llega al receptor en los primeros 50 milisegundos y la energía total percibida a partir de los 50 primeros milisegundos. Se calcula mediante la Ecuación 12:

$$C_{50} = 10 \lg \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ (dB)} \quad (12)$$

donde $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición.

El promediado en frecuencia de número único de la claridad de la palabra ($C_{50,mid}$) se calcula para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la claridad del sonido percibida por los oyentes. El valor de $C_{50,mid}$ se calcula mediante la Ecuación 13:

$$C_{50,mid} = \frac{C_{50}^{500Hz} + C_{50}^{1000Hz}}{2} \text{ (dB)} \quad (13)$$

La claridad musical y la claridad para la palabra se expresan en decibelios y su rango típico oscila entre -5 dB y 5 dB.

La norma UNE-EN ISO 3382-1 establece el umbral diferencial (JND) para los parámetros $C_{80,mid}$ y $C_{50,mid}$ en 1 dB. No obstante, existen diversos autores que han determinado valores superiores de dicho umbral a partir de estudios experimentales. Höhne et al. (1995) situaron el JND para el parámetro $C_{80,mid}$ en campos sonoros reales alrededor de los 2,5 dB, resultados que fueron confirmados por Witew (2006) mediante la utilización de campos sonoros sintéticos. Bradley et al. (1999) estimaron que para el parámetro $C_{50,mid}$, es necesario aumentar en aproximadamente 3 dB para crear una mejora fácilmente detectable en situaciones cotidianas. Con todo ello, es importante destacar que hoy en día no existe un consenso definitivo aceptado por toda la comunidad científica (San Martín et al., 2009). Teniendo en cuenta las investigaciones analizadas, en este estudio se ha adoptado un valor de JND para los parámetros $C_{80,mid}$ y $C_{50,mid}$ de 2,5 dB.

Los parámetros de claridad evalúan el tiempo requerido para que el oyente perciba la energía sonora. Valores elevados de claridad indican que la energía sonora inmediata es superior a la tardía, por lo que la señal sonora sería muy clara. Los

valores recomendables para la claridad musical dependen del tipo de música. En general, se consideran adecuados valores comprendidos entre -4 dB y 4 dB considerando la sala ocupada. La claridad para la palabra es excelente cuando adopta valores superiores a 7 dB, buena para valores entre 2 dB y 7 dB, aceptable para valores entre 2 dB y -2 dB, pobre para valores entre -2 dB y -7 dB y mala para valores inferiores a -7 dB considerando la sala ocupada (Beranek, 1993).

1.1.2.6. Tiempo central (T_S).

El tiempo central (T_S) se define como el tiempo en el cual los niveles de energía recibida antes y después se igualan. Se expresa en milisegundos y su rango típico oscila entre 60 y 260 ms. El tiempo central se calcula mediante la Ecuación 14:

$$T_S = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \text{ (ms)} \quad (14)$$

donde $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición (UNE-EN ISO 3382-1).

El promediado en frecuencia de número único del tiempo central ($T_{S,mid}$) se calcula para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la claridad del sonido percibida por los oyentes. El valor de $T_{S,mid}$ se calcula mediante la Ecuación 15:

$$T_{S,mid} = \frac{T_S^{500Hz} + T_S^{1000Hz}}{2} \text{ (ms)} \quad (15)$$

El umbral diferencial (JND) promediado en frecuencia de número único del tiempo central ($T_{S,mid}$) se establece en 10 ms. Variaciones superiores de este parámetro resultarían perceptibles para el oído humano (UNE-EN ISO 3382-1).

El tiempo central es un indicador de la nitidez del sonido en el recinto. Valores del tiempo central pequeños indican una mayor claridad del sonido. En cambio, valores superiores del tiempo central indican una menor claridad y una mayor reverberación del sonido (Beranek, 1993).

1.1.2.7. Índice de transmisión del habla (STI).

El índice de transmisión del habla (STI) es un parámetro que se utiliza para medir la inteligibilidad de la palabra en un recinto. Se trata de un parámetro adimensional y su rango oscila entre 0 y 1. Inicialmente, el índice de transmisión del habla se calculaba utilizando señales de ruido especiales moduladas. No obstante,

actualmente se obtiene mediante un postratamiento de la respuesta impulsiva obtenida de la medición acústica.

El índice de transmisión del habla es un indicador de la inteligibilidad de la palabra. Valores próximos a 0 indican una inteligibilidad nula, mientras que valores próximos a 1 indican una inteligibilidad óptima. La inteligibilidad del habla se determina a partir del índice de transmisión del habla (*STI*) según la siguiente escala: inteligibilidad mala ($STI < 0,03$), inteligibilidad pobre ($0,30 \leq STI < 0,45$), inteligibilidad aceptable, ($0,45 \leq STI < 0,60$) inteligibilidad buena ($0,60 \leq STI < 0,75$) e inteligibilidad excelente ($STI \geq 0,75$) (Beranek, 1993).

1.1.2.8. Fracción de energía lateral (*LF*).

La fracción de energía lateral (*LF*) se define como la relación entre la energía que llega lateralmente dentro de los 80 ms iniciales y la energía total procedente de todas las direcciones en ese intervalo de tiempo. Se trata de un parámetro adimensional y su rango típico oscila entre 0,05 y 0,35.

La fracción de energía lateral se calcula mediante la Ecuación 16:

$$LF = \frac{\int_{0,005}^{0,080} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0,080} p^2(t) dt} \quad (16)$$

donde $p_L(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva del recinto mediada con un micrófono bidireccional y $p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición.

El promediado en frecuencia de número único de la fracción de energía lateral (LF_{E4}) se calcula para las bandas de octava de 125 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la amplitud aparente de la fuente sonora percibida por los oyentes. El valor de LF_{E4} se calcula mediante la Ecuación 17:

$$LF_{E4} = \frac{LF^{125Hz} + LF^{250Hz} + LF^{500Hz} + LF^{1000Hz}}{4} \quad (17)$$

El umbral diferencial (*JND*) para el promediado en frecuencia de número único de la fracción de energía lateral (LF_{E4}) se establece en 0,05. Variaciones superiores de este parámetro resultarían perceptibles para el oído humano (UNE-EN ISO 3382-1).

La fracción de energía lateral es un parámetro representativo de la espacialidad de la sala. Valores altos de este parámetro indican una percepción subjetiva de elevada espacialidad. Para salas acústicas en estado de ocupación, es recomendable que el parámetro LF_{E4} adopte valores superiores a 0,19 (Beranek, 1993).

1.1.2.9. Índice de correlación cruzada interaural (IACC).

El índice de correlación cruzada interaural (IACC) se define como la relación entre la energía sonora en la entrada del canal auditivo izquierdo y la energía sonora en la entrada del canal auditivo derecho. Se trata de un parámetro adimensional y su rango oscila entre 0 y 1. Cuando las señales son idénticas en ambos canales auditivos, el índice de correlación cruzada interaural adopta el valor de 1, mientras que si las señales son aleatorias independientes el valor de este parámetro es 0. El índice de correlación cruzada interaural se calcula mediante la Ecuación 18:

$$IACC_{t_1, t_2} = \max. \left| \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}} \right| \text{ para } -1ms < \tau < +1ms \quad (18)$$

donde $p_l(t)$ es la respuesta impulsiva en la entrada del canal auditivo izquierdo y $p_r(t)$ es la respuesta impulsiva en la entrada del canal auditivo derecho.

El índice de correlación cruzada interaural se puede utilizar para determinar la semejanza de la llegada de la señal en los oídos, tanto para reflexiones tempranas ($IACC_E$), donde $t_1 = 0$ s y $t_2 = 0,08$ s, como para el sonido reverberante ($IACC_L$), donde $t_1 = 0,08$ s y $t_2 =$ tiempo superior al tiempo de reverberación del recinto.

El promediado en frecuencia de número único del índice de correlación cruzada interaural para reflexiones tempranas ($IACC_{E3}$) se calcula para las bandas de octava de 500 a 2000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la espacialidad sonora percibida por los oyentes. El valor de $IACC_{E3}$ se calcula mediante la Ecuación 19:

$$IACC_{E3} = \frac{IACC_E^{500Hz} + IACC_E^{1000Hz} + IACC_E^{2000Hz}}{3} \quad (19)$$

El promediado en frecuencia de número único del índice de correlación cruzada interaural para el sonido reverberante ($IACC_{L3}$) se calcula para las bandas de octava de 500 a 2000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la espacialidad sonora percibida por los oyentes. El valor de $IACC_{L3}$ se calcula mediante la Ecuación 20:

$$IACC_{L3} = \frac{IACC_L^{500Hz} + IACC_L^{1000Hz} + IACC_L^{2000Hz}}{3} \quad (20)$$

En la práctica, para determinar el índice de correlación cruzada interaural de un recinto es necesario realizar una medición con una cabeza acústica. Para ello se

puede utilizar tanto una cabeza acústica artificial como una cabeza acústica real con pequeños micrófonos en la entrada de los canales auditivos.

El umbral diferencial (*JND*) para índice de correlación cruzada interaural (*IACC*) se establece en 0,075. Variaciones superiores de este parámetro resultarían perceptibles para el oído humano (UNE-EN ISO 3382-1).

El índice de correlación cruzada interaural para reflexiones tempranas (*IACC_E*) está relacionado con el grado de difusión de la sala y la sensación de envolvimiento del sonido. Cuanto menor es este parámetro, mayor es la variación entre la energía sonora en la entrada de ambos canales auditivos y mayor es la espacialidad sonora del recinto. El índice de correlación cruzada interaural para el sonido reverberante (*IACC_L*) se utiliza en menor medida. Esto es debido a que las diferencias en la percepción sonora baural se manifiestan principalmente en los tiempos iniciales con el sonido directo y las reflexiones tempranas (Beranek, 1993).

En la práctica, para valorar la espacialidad sonora de un recinto se suele utilizar índice de calidad baural ($1 - IACC_E$). Un aumento de esta magnitud implica una mayor disimilitud entre la energía sonora en la entrada de ambos canales auditivos y una mayor sensación de envolvimiento del sonido. Beranek (1993) propone una clasificación de las salas de audición en función del valor del promediado en frecuencia de número único del índice de calidad baural ($1 - IACC_{E3}$): categoría aceptable/buena para $0,41 \leq 1 - IACC_{E3} < 0,55$, categoría muy buena para $0,55 \leq 1 - IACC_{E3} < 0,66$ y categoría excelente para $1 - IACC_{E3} \geq 0,66$.

1.1.3. Predicción de parámetros acústicos en recintos cerrados.

La predicción de parámetros acústicos en recintos cerrados es una tarea que actualmente se realiza principalmente mediante programas informáticos. La acústica virtual proporciona resultados detallados y fiables de los recintos estudiados. Para ello, es necesario disponer un modelo tridimensional calibrado sobre el que poder realizar las simulaciones acústicas. Paralelamente, existe la posibilidad de predecir determinados parámetros acústicos a partir de fórmulas que proporcionan valores de referencia con poco esfuerzo de cálculo, con lo que se puede determinar de forma sencilla el comportamiento acústico general del recinto.

El éxito del tiempo de reverberación (T_R) como medida se debe, no sólo a su relación con la calidad subjetiva percibida por los oyentes, sino también en su adecuación a todo un espacio y, sobre todo, en su previsibilidad a partir de fórmulas sencillas. Para el cálculo del tiempo de reverberación se han establecido numerosas expresiones: ecuación de Sabine (Sabine, 1922), ecuación de Eyring-Norris (Eyring, 1930), ecuación de Millington y Sette (Millington, 1932), ecuación de Fitzroy

(Fitzroy, 1959), ecuación de Kuttruff (Kuttruff, 1979), ecuación de Arnau (Arnau, 1988).

Cuando se trata de parámetros energéticos dependientes de la distancia fuente-receptor, la predicción analítica resulta más compleja. En este ámbito, Barron y Lee (1988) reformularon la teoría clásica de propagación del sonido y propusieron un modelo para predecir la fuerza sonora (G), la claridad musical (C_{80}) y el tiempo central (T_s). Tomando como base esta aportación, diversos autores han introducido variaciones en el modelo para adaptarlo a diferentes casuísticas y aumentar su fiabilidad tomando como referencia los resultados obtenidos en estudios experimentales (Cirillo & Martellotta, 2005; Zamarreño y otros, 2007).

El modelo de Barron establece que la energía acústica total de un recinto está compuesta por tres componentes (el sonido directo, las reflexiones tempranas y las reflexiones tardías) y proporciona las Ecuaciones 21-23 para su cálculo:

$$d(r) = \frac{100}{r^2} \quad (21)$$

$$E_0^{80}(r) = (31200T/V)e^{-0.04r/T}(1 - e^{-1.11/T}) \quad (22)$$

$$E_{80}^{\infty}(r) = (31200T/V)e^{-0.04r/T}e^{-1.11/T} \quad (23)$$

donde $d(r)$ es la energía del sonido directo a una distancia r , $E_{80}^{\infty}(r)$ es la energía correspondiente a las reflexiones tempranas (primeros 80 ms) a una distancia (r), $E_0^{80}(r)$ es la energía correspondiente a las reflexiones tardías (a partir de los primeros 80 ms) a una distancia (r), T es el tiempo de reverberación y V es el volumen del recinto.

A partir de las tres componentes de la energía acústica total de un recinto, se puede determinar el valor de los parámetros energéticos G , C_{80} y T_s (Ecuaciones 24-26):

$$G(r) = 10\log(d(r) + E_0^{80}(r) + E_{80}^{\infty}(r)) \quad (24)$$

$$C_{80}(r) = 10\log\frac{d(r) + E_0^{80}(r)}{E_{80}^{\infty}(r)} \quad (25)$$

$$T_s(r) = \frac{T(E_0^{80}(r) + E_{80}^{\infty}(r))}{13,8(d(r) + E_0^{80}(r) + E_{80}^{\infty}(r))} \quad (26)$$

1.2. Justificación de la investigación.

Los recintos de culto son construcciones patrimoniales de importantes valores culturales, históricos, artísticos y arquitectónicos. Además, presentan una sonoridad característica que debe ser objeto de especial protección. En este sentido, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) ha reconocido el sonido de los recintos de culto como una parte importante de nuestro patrimonio cultural inmaterial, estableciendo como prioridad su preservación (Álvarez Morales, 2016). En este ámbito, la acústica virtual se presenta como una herramienta muy eficaz para el estudio del patrimonio sonoro de los recintos de culto. A través de simulaciones acústicas, es posible analizar en detalle el comportamiento acústico de los diferentes espacios y estudiar la evolución sonora de los templos. Asimismo, la acústica virtual permite predecir y percibir el resultado acústico de cualquier intervención de conservación, rehabilitación o mejora antes de su realización práctica. Con ello, se presenta una nueva variable a tener en cuenta a la hora de afrontar la restauración del patrimonio: la acústica arquitectónica. Por otro lado, la simulación acústica y visual ofrece la posibilidad de realizar turismo virtual por los recintos de culto, fomentando el estudio y disfrute de los valores patrimoniales de los espacios simulados. Con todo ello, en esta investigación se ha aplicado la acústica virtual en el estudio del patrimonio sonoro de la Catedral de Valencia.

El estado actual de la Catedral de Valencia es el resultado de múltiples intervenciones, modificaciones y ampliaciones realizadas a lo largo de su historia. En el interior de la catedral, se recrea una auténtica fusión entre su arquitectura gótica originaria, descubierta tras las repristinaciones realizadas en las últimas décadas, y los restos de la renovación neoclásica llevada a cabo en el siglo XVIII. Asimismo, el Barroco se encuentra magníficamente representado en la decoración del presbiterio y del altar mayor, así como la tendencia artística del Renacimiento en la capilla de la Resurrección y en el retablo del altar mayor. Con todo ello, la Catedral de Valencia constituye un auténtico museo de los más relevantes estilos artísticos y arquitectónicos (Vilaplana Zurita, 1997). En las últimas décadas, con el objetivo de recuperar el aspecto que el templo tuvo siglos atrás, se han llevado a cabo una serie actuaciones en su interior. Las repristinaciones realizadas han generado una nueva configuración espacial y una variación en los revestimientos, lo que influye directamente en el comportamiento acústico del recinto. Diversos autores han estudiado la idoneidad de estas actuaciones desde el punto de vista histórico, artístico o arquitectónico. (Villa Ferrer, 2006; Cortés Meseguer, 2014). No obstante, no se han analizado desde el punto de vista acústico, es decir, cómo han podido afectar a la calidad sonora del templo. Los recintos de culto son espacios donde la acústica debe ser adecuada para sus dos usos fundamentales, la música religiosa y la palabra,

por lo que resulta relevante determinar cómo han influido las intervenciones realizadas en la acústica del templo.

En la Catedral de Valencia, tienen lugar eventos sonoros de gran relevancia, los cuales forman parte de su patrimonio cultural inmaterial. En este sentido, cabe destacar la representación del Canto de la Sibila. Se trata de drama paralitúrgico de origen medieval en el que se fusiona música religiosa y teatro. El Canto de la Sibila se representaba tradicionalmente en recintos de culto durante las fiestas de la Navidad, hasta que fue prohibido en el ámbito religioso tras las reformas litúrgicas surgidas del Concilio de Trento (Gómez, 2007). En el año 2012, se recuperó la representación del Canto de la Sibila en la Catedral de Valencia. La interpretación valenciana tiene influencias de la versión toledana y mallorquina, siendo esta última declarada Patrimonio Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO en el año 2010.

Con todo ello, en esta investigación se ha realizado un estudio acústico del interior de la Catedral de Valencia. A través de simulaciones acústicas, se ha analizado el cambio sonoro producido con las repristinaciones realizadas en las últimas décadas y se ha realizado una propuesta de mejora del acondicionamiento acústico basada en el respeto a los valores patrimoniales del templo, para su óptima adecuación acústica a los distintos eventos que se producen. Asimismo, se ha realizado la simulación acústica y visual del interior del templo, lo que posibilita que cualquier persona desde cualquier lugar pueda disfrutar de su arte, arquitectura y sonoridad.

1.3. Evolución constructiva de la Catedral de Valencia.

La Catedral de Valencia (España), sede principal de la cristiandad valenciana desde el siglo XIII, destaca poderosamente en el foco neurálgico de tres importantes plazas en el centro de la ciudad (Plaza de la Reina, Plaza de la Virgen y Plaza de la Almoina). En el entorno de la catedral encontramos construcción de importantes valores patrimoniales, como son la casa Vestuario, la Basílica de Nuestra Señora de los Desamparados y el Palacio de la Generalitat Valenciana. En la Figura 1.3, se muestra un plano de situación de la Catedral de Valencia.

La Catedral de Valencia ha sufrido múltiples intervenciones, modificaciones y ampliaciones a lo largo de su historia. En la Figura 1.4, se ha representado la evolución constructiva de la catedral desde el primitivo templo gótico del siglo XIII hasta la renovación neoclásica del siglo XVIII. En 1262, comenzaron las obras de la Catedral de Valencia sobre los restos de una antigua mezquita árabe. Bajo la dirección de Arnau Vidal, se levantó el templo originario en estilo gótico. La arquitectura gótica primitiva de la catedral destacaba por su simplicidad de formas y austeridad decorativa. A principios del siglo XIV, se levantó la Puerta de los Apóstoles en estilo gótico francés, siendo este el primer añadido de la estructura

gótica originaria. En 1356, se construyó la Capilla del Santo Cáliz (Aula Capitular), en estilo gótico tardío con influencias del primer Renacimiento. En 1381, se construyó la Torre del Miguelete, un emblemático campanario inspirado en modelos occidentales y catalanes. La Torre del Miguelete y la Capilla del Santo Cáliz permanecieron exentos hasta que, en 1458, se prolongaron las tres naves de la estructura primitiva, quedando estas edificaciones integradas dentro del templo.

En el siglo XVI, la nueva tendencia artística del Renacimiento quedó magníficamente reflejada en el interior del templo en la capilla de la Resurrección y en el retablo del altar mayor. En este mismo estilo, aunque es su etapa manierista, se construyó en el exterior de la catedral la arcada noroccidental (Obra Nova). En el siglo XVII, el Barroco quedó admirablemente representado en la decoración del presbiterio y del altar mayor. También es estilo barroco, se construyó en la antigua capilla de San Pedro y en la monumental portada principal (Vilaplana Zurita, 1997). En el siglo XVIII, con el objetivo de unificar los estilos arquitectónicos del templo y adecuar la obra de estructura gótica al estilo clasicista, se comenzó un proceso de transformación total del interior de la catedral y parte del exterior. En las Figuras 1.5 y 1.6, puede apreciarse la decoración con la que se cubrió la arquitectura gótica originaria siguiendo los cánones estéticos imperantes en la época. La renovación neoclásica puede considerarse como el fin de la evolución constructiva de la catedral, tras el cual tuvo lugar un periodo de paz arquitectónica, en el que únicamente se llevaron a cabo pequeñas obras de mantenimiento (Cortés Meseguer, 2014).



Figura 1.3. Plano de situación de la Catedral de Valencia

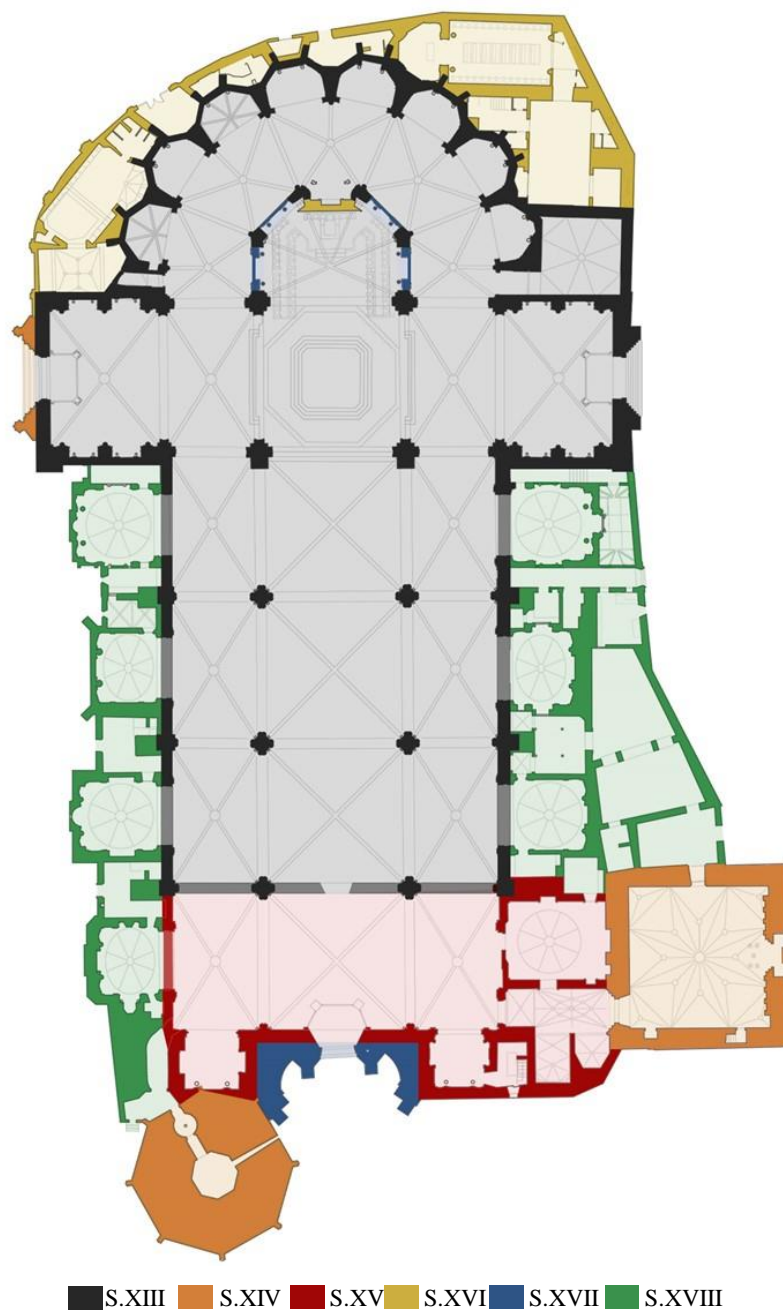


Figura 1.4. Evolución constructiva de la Catedral del Valencia.



Figura 1.5. Interior de la Catedral de Valencia. Fotografía tomada desde el transepto hacia la nave del Evangelio, 1917 (Archivo Mas E1-1157, Institut Amatller d'Art Hispànic).



Figura 1.6. Interior de la Catedral de Valencia. Fotografía tomada desde la nave de la Epístola hacia el crucero, 1917 (Archivo Mas E1-1971, Institut Amatller d'Art Hispànic).

Tras la Guerra Civil (1936-1939), se llevaron a cabo una serie de intervenciones en el interior de la catedral con el fin de paliar los destrozos ocasionados y dotarla de una mayor funcionalidad. En 1940, de la mano de Traver, se eliminaron el coro y los órganos, dejando diáfano el cuerpo central del templo. En la Figura 1.7, se muestra una imagen del coro y los órganos antes de su retirada. Esta intervención provocó la pérdida del revestimiento neoclásico en el tercer tramo de la nave central, como puede observarse en la Figura 1.8. Es este momento, se plantearon dos opciones de intervención: revestir los elementos dañados en estilo neoclásico o dejar vista la arquitectura gótica originaria. En 1944, con la intervención realizada por Alejandro Ferrant, se reconstruyeron la Sacristía y la Antesacristía. Esta intervención marcaría el criterio de descubrimiento de la arquitectura gótica originaria (Cortés Meseguer, 2014).

Tras un periodo de dudas y polémica, en 1972 comenzaron las obras para recuperar la arquitectura gótica primitiva en el interior de la catedral. Bajo la dirección de Fernando Chueca, se retiró la mayor parte del estuco neoclásico que había revestido el templo desde la renovación del siglo XVIII, permaneciendo en este estado hasta nuestros días (Nuñez Sanmartín, 2017). En la Figura 1.9, se muestra el estado actual del interior del templo, donde puede apreciarse la arquitectura gótica primitiva de la nave central.

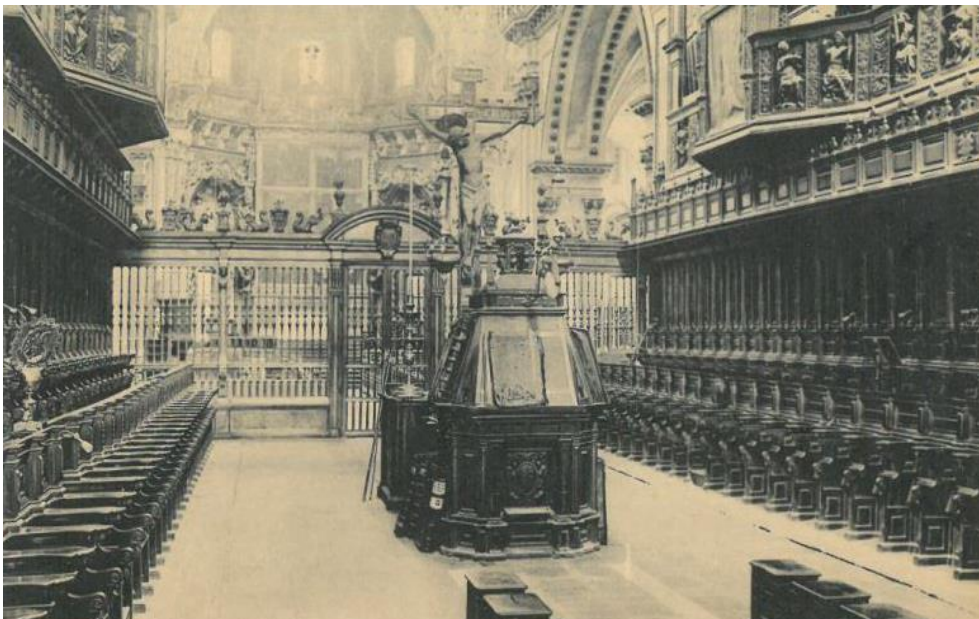


Figura 1.7. Interior de la Catedral de Valencia. Fotografía tomada desde el coro hacia el presbiterio, 1910-1930. (Colección de postales, Archivo de la Catedral de Valencia).



Figura 1.8. Interior de la Catedral de Valencia después de la intervención de Vicente Traver Tomás, 1955 (Archivo Gudiol 36419, Institut Amatller d'Art Hispànic).



Figura 1.9. Interior de la Catedral de Valencia en la actualidad.

En 1999, se inició en el interior de la Catedral un proceso de conservación y limpieza. En el año 2004, durante las labores de mantenimiento realizadas en el presbiterio, se descubrieron unas pinturas murales renacentistas de gran valor artístico e histórico realizadas sobre la bóveda gótica originaria (Nuñez Sanmartín, 2017). Estos frescos, realizados por los pintores renacentistas Francisco Pagano y Pablo de San Leocadio en el siglo XV, habían quedado ocultos tras la construcción de la bóveda barroca del ábside en el siglo XVIII (Company, 2006). En las Figuras 1.10 y 1.11, puede observarse la bóveda barroca del ábside antes de su retirada. En el proyecto de intervención, se tomó la determinación de retirar únicamente aquellos elementos necesarios para la restauración de los frescos renacentistas que fueran susceptibles de volver a montarse. Así, se mantuvo la decoración barroca en los nervios, en la clave, en las ventanas y en el antepecho sobre la cornisa, puesto que resultó inviable su retirada garantizando su integridad (Villa Ferrer, 2006). En la Figura 1.12, se muestra el estado actual de la bóveda gótica originaria decorada con los frescos renacentistas.



Figura 1.10. Bóveda barroca del ábside construida en el S. XVIII antes se su retirada (Salvador Villa Ferrer, arquitecto de la Catedral de Valencia).



Figura 1.11. Interior de la Catedral de Valencia. Fotografía tomada desde el coro hacia el presbiterio, 1917 (Archivo Mas C-16500, Institut Amatller d'Art Hispànic).



Figura 1.12. Estado actual del ábside y de los frescos renacentistas.

Las actuaciones realizadas en el interior de la Catedral abren el gran debate sobre cómo se debe abordar la restauración del patrimonio arquitectónico. En este sentido, Vila Ferrer (2006), arquitecto de la Catedral de Valencia, afirma que la actuación retirada de la cúpula barroca *“no desvirtúa los valores artísticos de la Catedral”* y permite *“la pervivencia de los elementos originales, con lo que, si así se decidiera posteriormente, sería factible su reconstrucción”*. En contraposición, encontramos al autor Cortés Meseguer (2014), quien afirma que las actuaciones realizadas *“distorsionan considerablemente la lectura del lenguaje arquitectónico”* y manifiesta que *“se deben respetar las aportaciones de distintas épocas que hayan enriquecido sus valores originales”*.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivos generales.

- Aplicar la acústica virtual en el estudio del patrimonio sonoro de la Catedral de Valencia.
- Evaluar los cambios acústicos producidos tras la reoprstinaciones realizadas en las últimas décadas.
- Realizar una propuesta de mejora del acondicionamiento acústico del templo para los usos específicos de la música religiosa y la palabra.
- Realizar una puesta en valor del patrimonio artístico, arquitectónico y acústico de la Catedral de Valencia a través de la simulación acústica y visual.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Analizar la evolución constructiva de la Catedral de Valencia.
- Estudiar el comportamiento acústico del interior de la Catedral de Valencia a partir de la medición acústica realizada en el interior del templo.
- Realizar y calibrar los modelos acústicos de la Catedral de Valencia, en la actualidad y antes de las reoprstinaciones realizadas en las últimas décadas (1972).
- Determinar el comportamiento acústico óptimo de la Catedral de Valencia para sus usos fundamentales: la música religiosa y la palabra.
- Evaluar la influencia de la presencia de público en la acústica del templo.
- Realizar y texturizar el modelo visual de la Catedral de Valencia en la actualidad.

- Auralizar el sonido de la Catedral de Valencia para el canto coral y la música de órgano.
- Realizar recorridos virtuales por el interior de la Catedral de Valencia y difundir los resultados a través de la página web oficial del Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Toma de datos.

2.1.1. Toma de datos geométricos.

La información sobre la geometría del recinto se ha obtenido a partir de su planimetría, complementando y verificando la información con mediciones *in situ* realizadas con un láser modelo *CESVA CS310*. En la Figura 2.1, se muestra la planta y sección longitudinal incluidas en el Plan Director de la Catedral de Valencia (2000)¹. Estos planos se corresponden al estado actual, los cuales se realizaron tomando como base los planos realizados por Moya y Pons Sorolla para el proyecto de restauración del año 1978. No están actualizados los espacios a los que no se pudo tener acceso, como es el caso de la Capilla de San Pedro.

Para determinar el estado del templo antes de las intervenciones realizadas en las últimas décadas, se ha tomado como base la restitución gráfica de la Catedral de Valencia antes de las repristinaciones de 1972 realizada por Núñez Sanmartín (2017). En las Figuras 2.2 y 2.3, se muestra una sección longitudinal y una sección transversal del estado de la Catedral antes de la repristinación de 1972, fecha en la que fue eliminado la mayor parte del revoco neoclásico del s. XVIII.

¹ Planos facilitados por Salvador Vila Ferrer, arquitecto de la Catedral de Valencia.

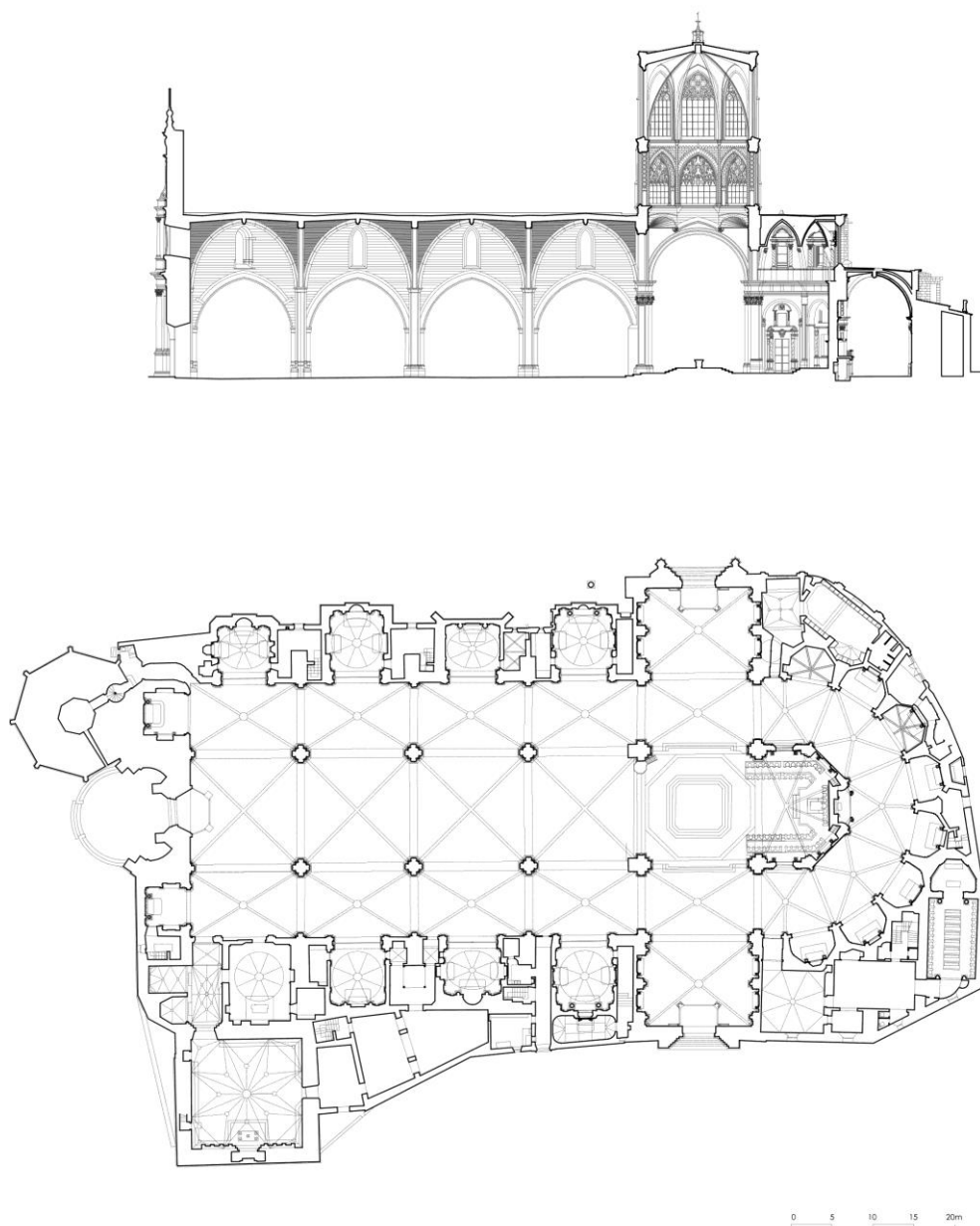


Figura 2.1. Planta y sección longitudinal por el eje de la Catedral (Plan Director de la Catedral de Valencia, 2000).

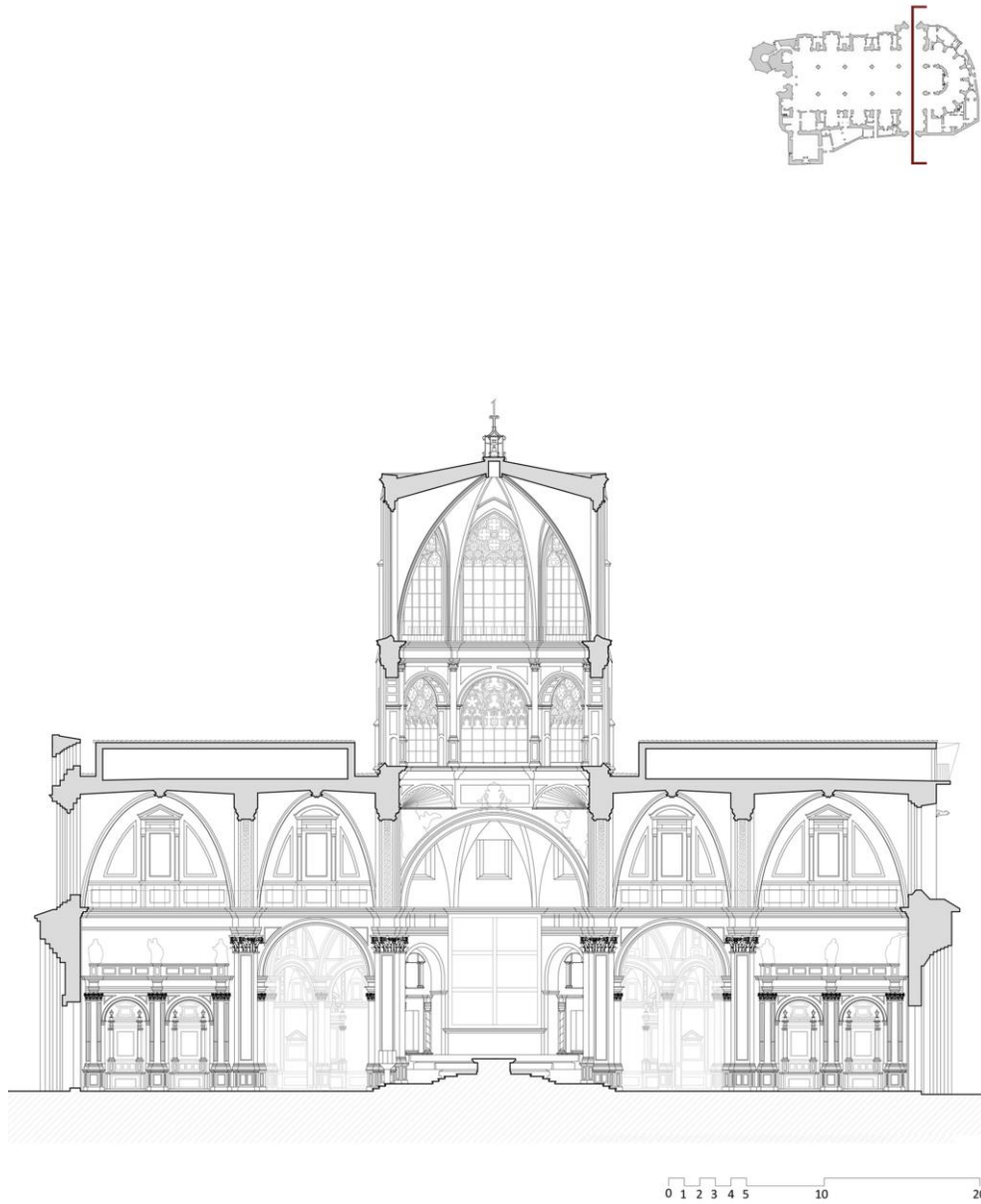


Figura 2.2. Sección longitudinal. Restitución gráfica de la Catedral de Valencia antes de las reprintsiones de 1972 (Nuñez Sanmartín, 2017).



Figura 2.3. Sección transversal. Restitución gráfica de la Catedral de Valencia antes de las reprintsiones de 1972 (Nuñez Sanmartín, 2017).

2.1.2. Toma de datos acústicos.

Esta investigación parte de la medición acústica del interior de la Catedral de Valencia realizada por el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG. La metodología seguida se basa en los requerimientos de la norma UNE-EN ISO-3382-1. Las medidas se realizaron durante la noche con el recinto cerrado al público, con el objetivo de minimizar el ruido de fondo y evitar posibles interferencias que alteraran los resultados. En todo caso, el nivel de fuente acústica se situó 45 dB por encima del nivel de ruido de fondo para cada banda de frecuencias. Con ello, se garantiza que el ruido de fondo no tiene influencia en los resultados obtenidos. En la Figura 2.4, se muestra una fotografía tomada durante el proceso de medición acústica.

En la medición, se incrementaron notablemente el número mínimo de puntos que recomienda la norma, con lo que se dispone de una amplia información sobre el comportamiento acústico del recinto. En concreto, se establecieron 3 puntos de emisión sonora en las posiciones habituales del orador y 47 puntos de medida en posiciones representativas de la zona de los oyentes. Las fuentes se ubicaron en el altar mayor (fuente A), en el coro (fuente B) y en el púlpito (fuente C), mientras que los receptores se situaron en la nave central y en los cruceros. En la Figura 2.5, se muestra la distribución en planta de las fuentes de emisión sonora y los receptores.



Figura 2.4. Medición acústica de la Catedral de Valencia realizada por el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG.

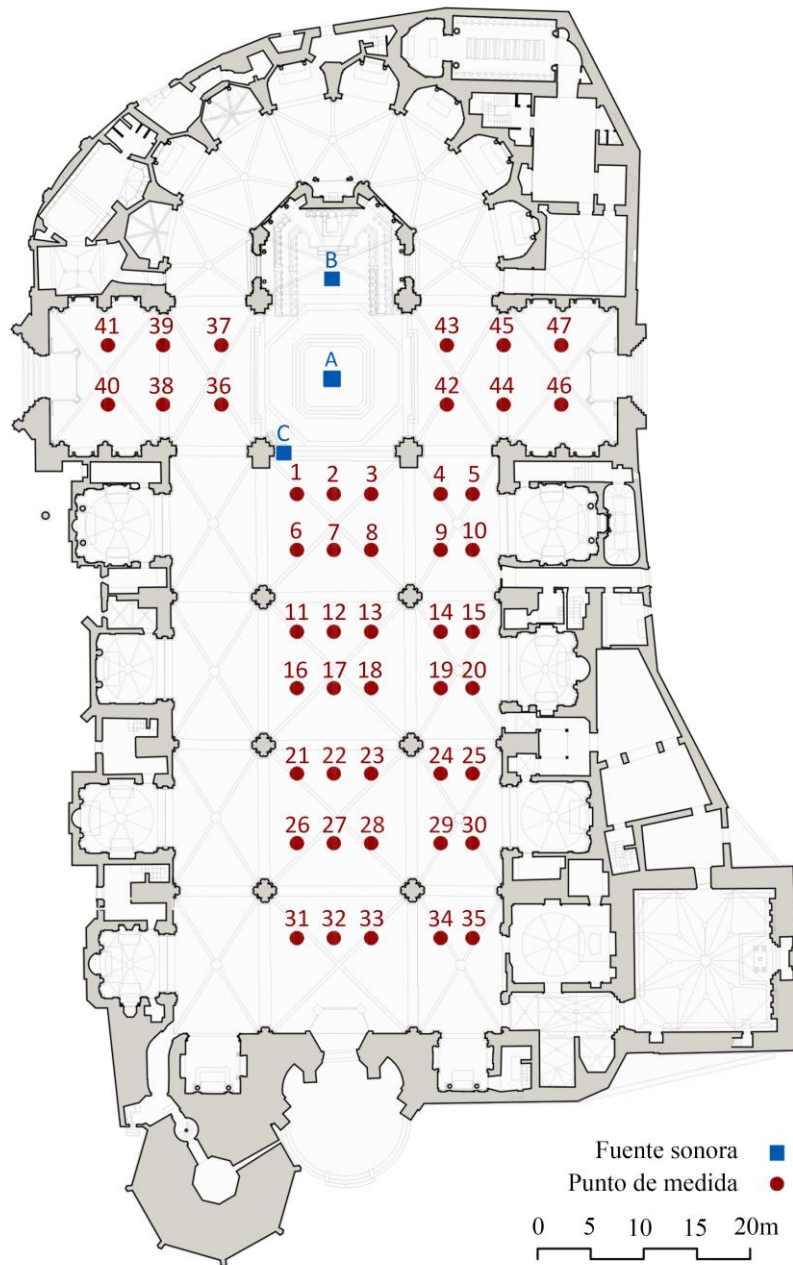


Figura 2.5. Ubicación de los receptores (1-47) y las fuentes de emisión sonora (A, B y C) en la medición acústica de la Catedral de Valencia.

2.1.2.1. Equipo de medida.

Para la medición de los parámetros acústicos en la Catedral de Valencia, se ha empleado un equipo de emisión sonora compuesto por una fuente dodecaédrica omnidireccional modelo *DO12* y un amplificador modelo *M-1000*. Para el registro de la emisión sonora, se han utilizado tres equipos de medida diferentes en función de los parámetros acústicos a determinar. Para los parámetros acústicos monoaurales (T_{30} , EDT , G , C_{80} , C_{50} , T_S y STI), se han utilizado micrófonos omnidireccionales modelo *GRAS 40AK*, con sus correspondientes fuentes de alimentación modelo *GRAS 12AA* y preamplificadores modelo *GRAS 26AK*. Para los parámetros acústicos espaciales (LF), se han empleado micrófonos multipatrón modelo *AT4050/CM5* y una fuente de alimentación modelo *Phantom II 12V/48V*. Para los parámetros acústicos biaurales ($IACC$), se ha utilizado una cabeza acústica modelo *HMS III.0*, con su correspondiente fuente de alimentación. El registro y grabación de la señal percibida, así como la determinación de los parámetros acústicos del recinto, se ha realizado con el programa informático *WinMLS* (Montell et al., 2012). En la Figura 2.6, se muestra el esquema de conexiones del equipo de medición acústica utilizado (Díaz et al., 2021).

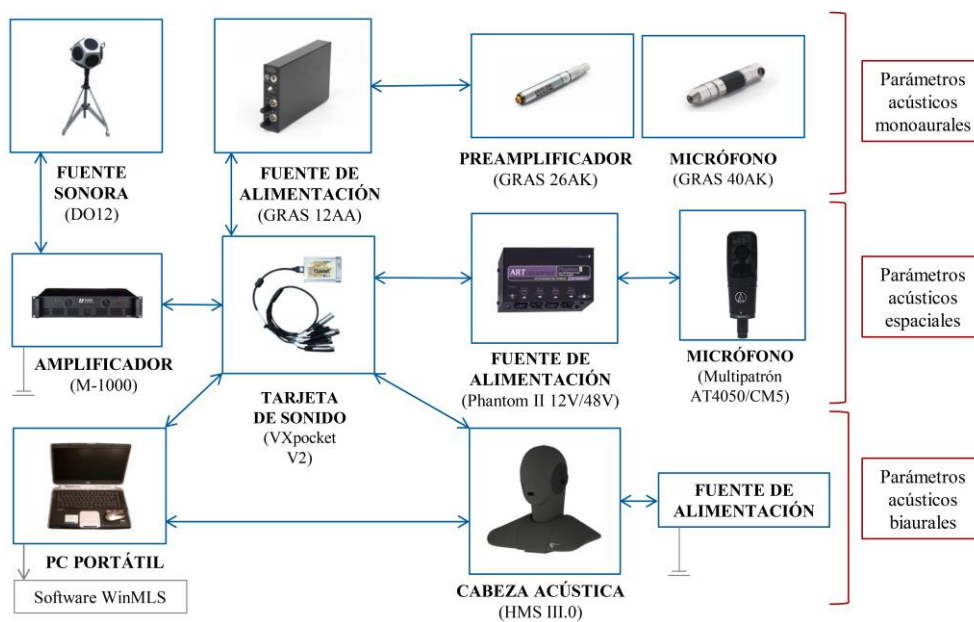


Figura 2.6. Esquema de conexiones del equipamiento utilizado en la medición acústica de la Catedral de Valencia.

2.2. Simulación acústica.

2.2.1. Simulación acústica de la Catedral de Valencia en la actualidad.

2.2.1.1. Construcción del modelo acústico.

Tomando como base los planos disponibles, cuyos datos han sido completados y verificados con mediciones *in situ*, se ha construido el modelo acústico virtual del interior de la Catedral de Valencia en la actualidad. Para ello, se ha utilizado una combinación de los programas informáticos *AutoCad* y *SketchUp*.

Los recintos de cultos son espacios patrimoniales que presentan una geometría compleja con gran cantidad de detalles. La creación de un modelo que represente fielmente su geometría provocaría dificultades en el procesado de las simulaciones acústicas. Por ello, resulta necesario simplificar las formas complejas y reducir el nivel de detalle. Estas simplificaciones se compensarán posteriormente durante la calibración del modelo acústico mediante la aplicación de los correspondientes coeficientes de difusión.

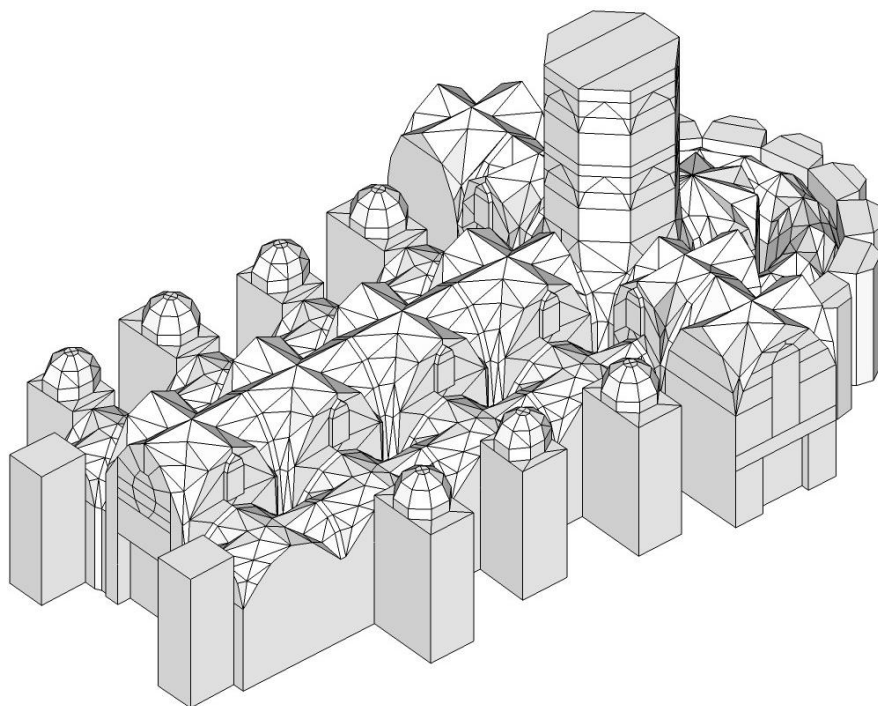


Figura 2.7. Modelo acústico de la Catedral de Valencia.

Debido a los requerimientos de los programas informáticos de simulación acústica, el modelo acústico simplificado se ha creado con superficies planas de 3 o 4 vértices orientadas hacia el interior del recinto. Durante el proceso de construcción del modelo acústico, se ha comprobado la exactitud de las uniones entre caras, con la finalidad de evitar errores en las simulaciones acústicas. El resultado final es un modelo virtual en 3D formado por 3.265 superficies que genera un volumen de 55.925 m³ (Figura 2.7).

En la elaboración del modelo acústico de la Catedral de Valencia, se han tomado en consideración estudios sobre el grado de simplificación adecuado para que no interfiera con la fiabilidad de los resultados (Lacatis et al., 2011; Giménez et al., 2011; Vorländer, 2011; Savioja & Svensson, 2015). Como criterio general, se han eliminado todos los elementos y detalles decorativos demasiado pequeños y con escasa influencia en la acústica del recinto. Asimismo, se han simplificado las formas complejas como los arcos y las superficies curvas de las bóvedas. En la Figura 2.8 se muestra el grado de simplificación del modelo acústico en comparación con el modelo real.

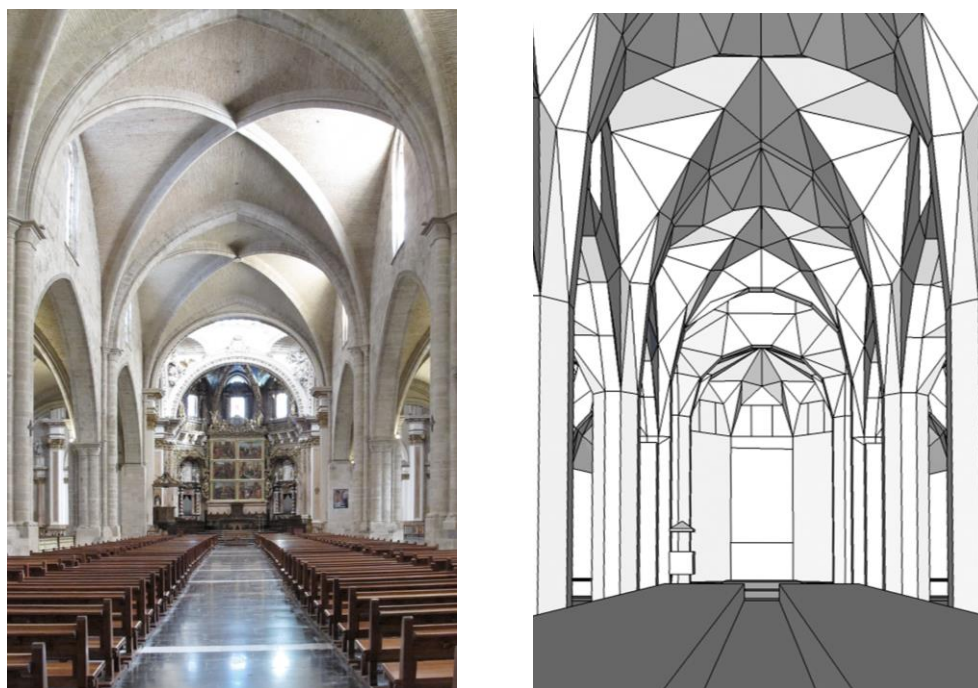


Figura 2.8. Comparativa entre el modelo real y el modelo acústico simplificado. Vista desde la nave central hacia el presbiterio.

2.2.1.2. Calibración del modelo acústico.

El modelo acústico virtual de la Catedral de Valencia se ha exportado al programa informático *Odeon* para realizar su calibración acústica. Con el objetivo de facilitar el proceso de calibración acústica, las superficies del modelo se han agrupado en capas teniendo en cuenta los materiales reales, según se muestra en las Figuras 2.9 y 2.10.

El proceso de calibrado consiste en asignar unas características acústicas determinadas a cada una de las superficies del modelo, con el objetivo de lograr que el modelo virtual tenga un comportamiento acústico similar al recinto real estudiado. En concreto, se determinan los coeficientes de absorción y difusión de cada una de las superficies del modelo acústico. Para establecer los coeficientes de absorción de cada material, se han tomado como referencia los valores obtenidos mediante ensayos normalizados (Bork, 2005; Vörländer, 2008; Cox & D'Antonio, 2009; Martellotta F., 2009), realizando las adaptaciones necesarias durante el proceso de calibración acústica. Los coeficientes de difusión se han determinado teniendo en cuenta el grado de detalle o rugosidad del elemento real. Para ello, se han tomado en consideración estudios sobre el tratamiento del coeficiente de difusión en simulaciones acústicas (Cerdá et al., 2011).

Para la validación del modelo acústico se han analizado, para las tres posiciones de la fuente sonora, las variaciones entre la simulación y la medición en relación con el umbral diferencial (*JND*) de cada parámetro acústico. El *JND* es una magnitud que establece el límite para cada parámetro acústico a partir del cual las diferencias comienzan a ser perceptibles por el oído humano. Los valores de *JND* de cada parámetro acústico utilizado en esta investigación se han obtenido de la norma UNE-EN ISO 3382-1 y de estudios experimentales (Höhne & Stroth, 1995; Witew, 2006).

En la calibración del modelo acústico de la Catedral de Valencia se han analizado los resultados obtenidos para el tiempo de reverberación (T_{30}), el tiempo de caída inicial (*EDT*), la fuerza sonora (*G*), el tiempo central (T_S), la claridad musical (C_{80}), la claridad para la palabra (C_{50}) y la fracción de energía lateral (*LF*).

2.2.2. Simulación acústica de la Catedral de Valencia con audiencia.

A partir del modelo acústico calibrado de la Catedral de Valencia, se ha simulado la presencia de público en el recinto. Para ello, se ha cambiado el material asignado a los asientos (bancos de madera sin audiencia) por un material que tiene en cuenta el incremento de la absorción acústica debido a la presencia de público (bancos de madera con audiencia). Los coeficientes de absorción acústica de estos materiales se han determinado a partir de los valores obtenidos mediante ensayos normalizados (Vörländer, 2008).

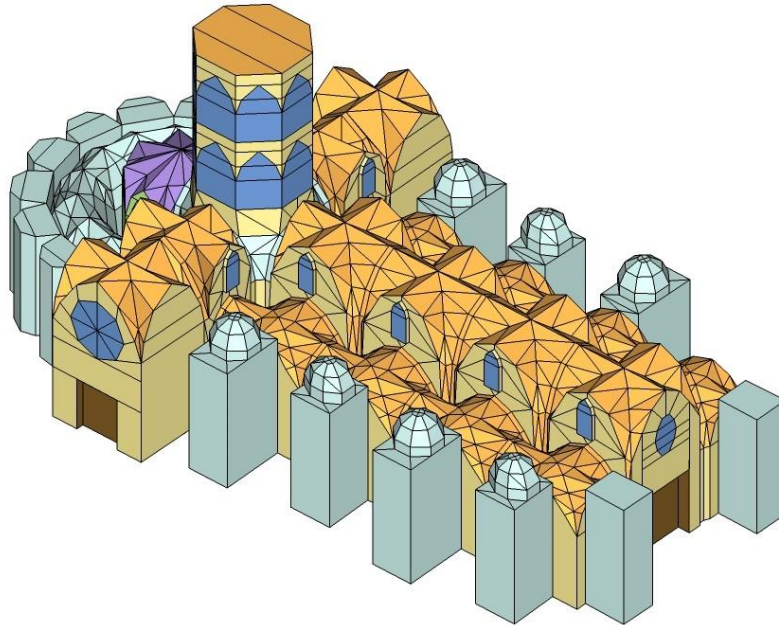


Figura 2.9. Vista general del modelo acústico calibrado de la Catedral de Valencia.

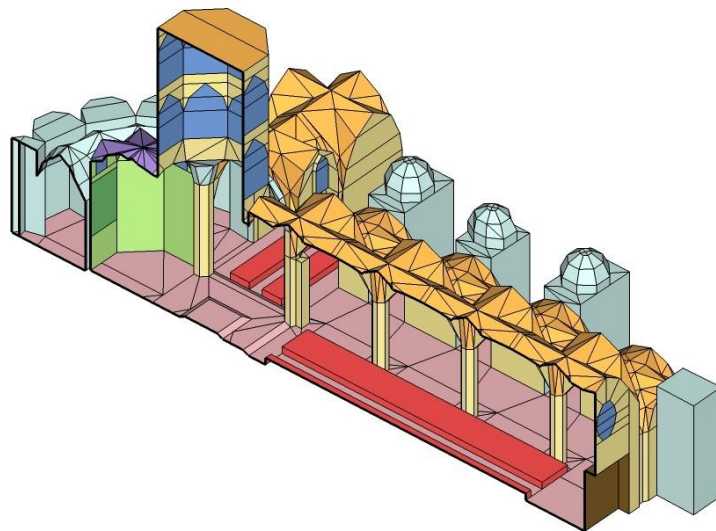


Figura 2.10. Vista seccionada del modelo acústico calibrado de la Catedral de Valencia.

2.2.3. Simulación acústica de la Catedral de Valencia en 1972.

A partir del modelo acústico calibrado de la Catedral de Valencia en la actualidad, se han realizado las modificaciones necesarias para representar la sonoridad del interior del templo en 1972, antes de las reпрistinaciones llevadas a cabo en las últimas décadas. En estas intervenciones, se retiró la mayor parte del estuco neoclásico que había revestido el interior del templo desde la renovación del siglo XVIII, con el objetivo de recuperar la arquitectura gótica primitiva. Además, se retiró la bóveda barroca del ábside, quedando al descubierto la bóveda gótica originaria decorada con pinturas murales renacentistas. Estos cambios generan una nueva configuración espacial y una variación en las características de los revestimientos, lo que influye directamente en el comportamiento acústico del recinto.

Para generar un modelo virtual que represente la acústica del templo en 1972, se ha modificado la geometría de la bóveda del ábside y se han modificado las características acústicas de los revestimientos en la nave central y en las naves laterales. En las Figuras 2.11 y 2.12, se muestran los modelos acústicos de la Catedral de Valencia en la actualidad y en 1972.

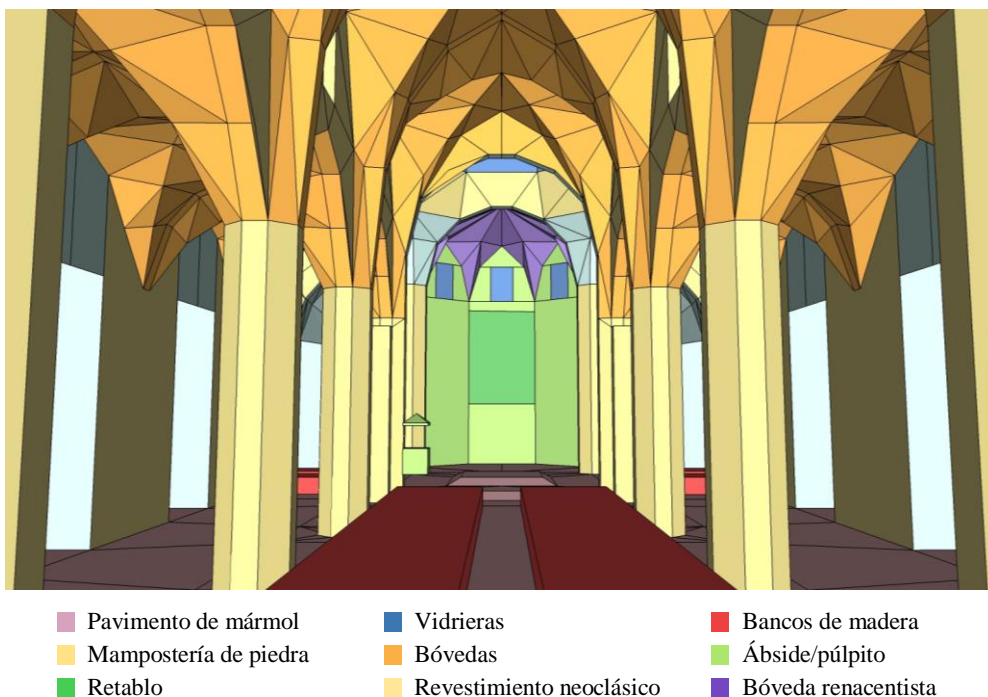


Figura 2.11. Modelo acústico de la Catedral de Valencia en la actualidad. Vista desde la nave central hacia el presbiterio.

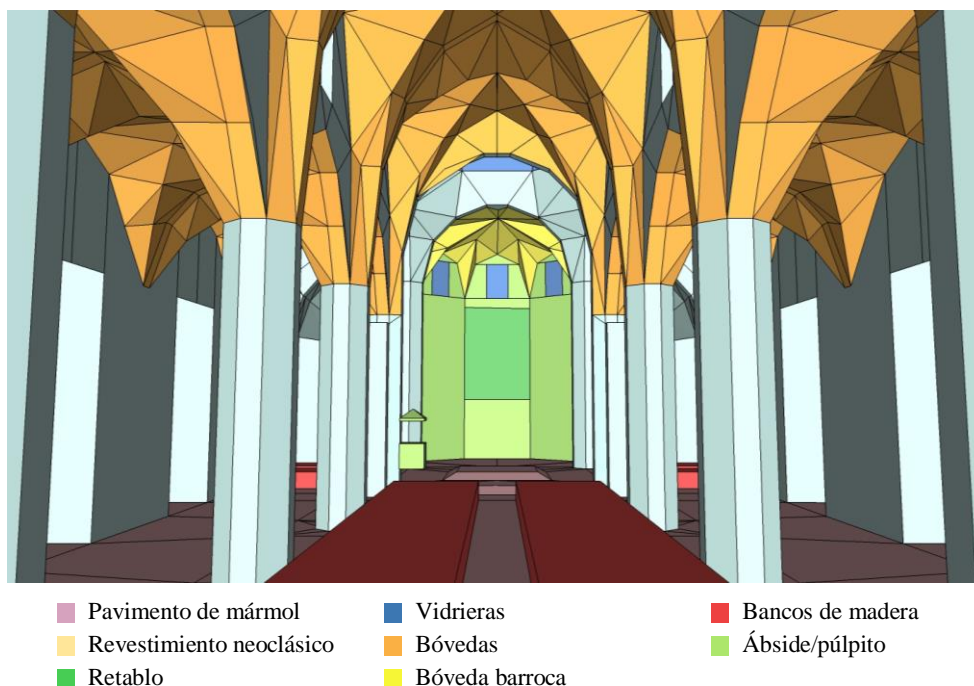


Figura 2.12. Modelo acústico de la Catedral de Valencia en 1972. Vista desde la nave central hacia el presbiterio.

2.3. Mejora del acondicionamiento acústico.

A partir del modelo acústico calibrado del estado actual de la Catedral, es posible predecir el resultado acústico de cualquier posible intervención de mejora antes de su realización práctica.

Una vez determinado el tiempo de reverberación óptimo de la Catedral teniendo en cuenta su volumen, se ha realizado una propuesta de mejora del acondicionamiento acústico del interior del templo para sus dos usos fundamentales, la música religiosa y la palabra. A través de simulaciones acústicas, se han analizado las variaciones acústicas producidas en el templo con la propuesta de mejora.

Al tratarse de una construcción declarada Bien de Interés Cultural (BIC), la intervención debe respetar su grado de protección, por lo que no es posible alterar su configuración espacial ni sus actuales revestimientos. Teniendo en cuenta esta limitación, se ha propuesto una mejora del acondicionamiento acústico mediante la incorporación de elementos textiles ornamentales reversibles ubicados estratégicamente desde el punto de vista arquitectónico y acústico (Díaz et al., 2021).

2.4. Auralización.

Kleiner et al. (1993) definieron el término de auralización como “*el proceso de presentación audible, por modelado físico o matemático, del campo sonoro de una fuente en el espacio, de manera que se pueda modelar la experiencia de escucha binaural en una posición dada en el espacio modelado*”. Se trata de un proceso que permite representar el sonido real de un entorno a través de simulaciones acústicas realizadas con programas informáticos específicos.

El programa informático *Odeon* permite obtener el sonido auralizado en cualquier punto de un modelo acústico calibrado a través de simulaciones acústicas. Para ello, es necesario establecer la ubicación de la fuente de emisión sonora y de los receptores en los que se calculará el sonido auralizado. Además, se debe introducir una señal anecoica sobre la que se realizará la auralización. Una señal anecoica es un tipo de señal que carece por completo de reverberación, es decir, se compone exclusivamente por sonido directo. Para obtener una señal anecoica, es necesario realizar una grabación en una cámara anecoica, las cuales están específicamente diseñadas para absorber las reflexiones producidas por ondas acústicas evitando la reverberación del sonido.

En esta investigación, se ha realizado la auralización del sonido de la Catedral de Valencia para canto coral y música de órgano. Para la auralización del canto coral, se ha ubicado la fuente de emisión sonora en el altar mayor y se ha empleado una grabación anecoica del canto coral *Alleluia* realizada por la corporación *Wegner* (*Freiheit*, 2010). Para la auralización de la música de órgano, se ha ubicado la fuente de emisión sonora en la posición real del órgano y se ha empleado una grabación anecoica de una pieza musical tocada por órgano que incorpora el programa informático *Odeon*. Las fuentes de emisión sonora del coro y del órgano se han equiparado con una fuente omnidireccional, la cual se caracteriza por emitir con la misma intensidad en todas las direcciones. Para ello, se ha empleado la fuente omnidireccional que proporciona el programa informático *Odeon*.

2.5. Simulación visual.

La simulación visual es un proceso que consiste en recrear el aspecto real de un entorno a través de programas informáticos específicos. Una vez creado el modelo visual, es posible renderizar imágenes y videos realistas desde cualquier punto del modelo.

Para realizar la simulación visual del interior de la Catedral de Valencia, se ha construido un modelo virtual con el programa informático *AutoCad*. Este modelo tiene un mayor nivel de detalle que el utilizado para la simulación acústica, puesto

que se pretende conseguir un alto grado de realismo. En la Figura 2.13, se muestra el modelo visual de la Catedral de Valencia.

El modelo visual de la Catedral de Valencia se ha exportado al programa informático *3dsMax* para realizar su texturización. El proceso de texturización consiste en asignar unas imágenes determinadas a cada una de las superficies del modelo según los materiales reales. Para facilitar el proceso de texturización, las superficies del modelo visual se han agrupado en diferentes capas. En las Figuras 2.14 y 2.15, se muestran vistas interiores del modelo visual con la distribución de capas.

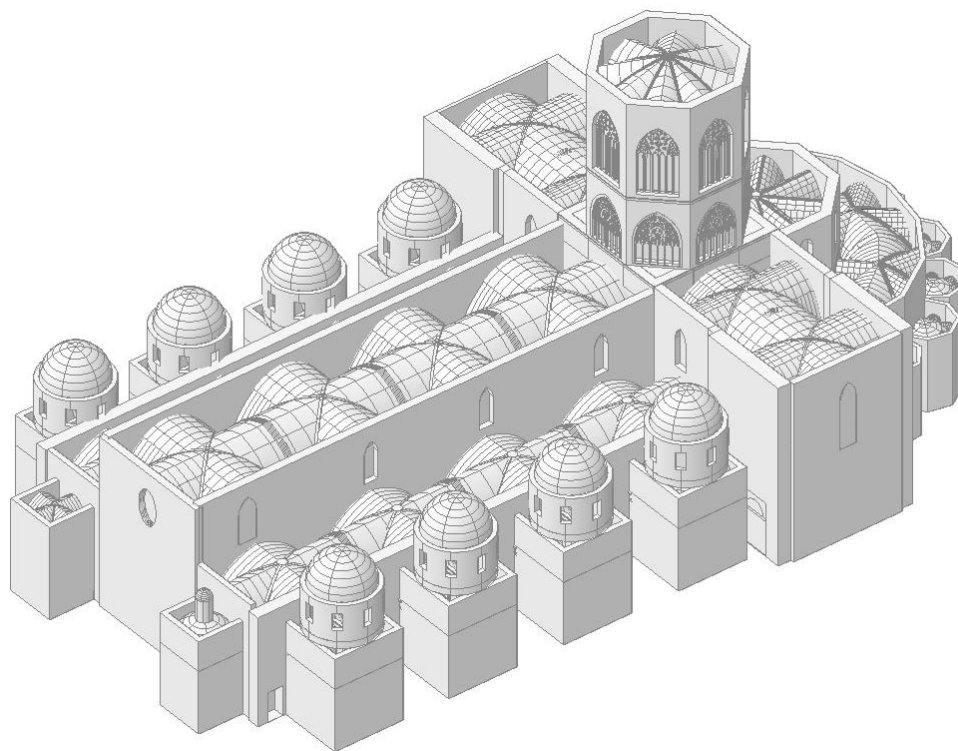


Figura 2.13. Modelo visual de la Catedral de Valencia.

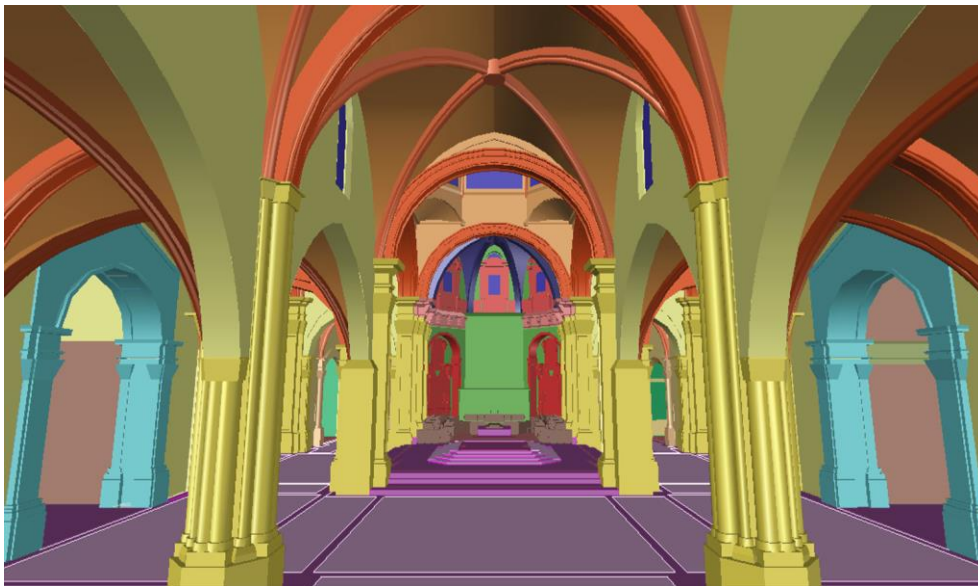


Figura 2.14. Modelo visual de la Catedral de Valencia con la distribución en capas. Vista desde la nave central hacia el presbiterio.

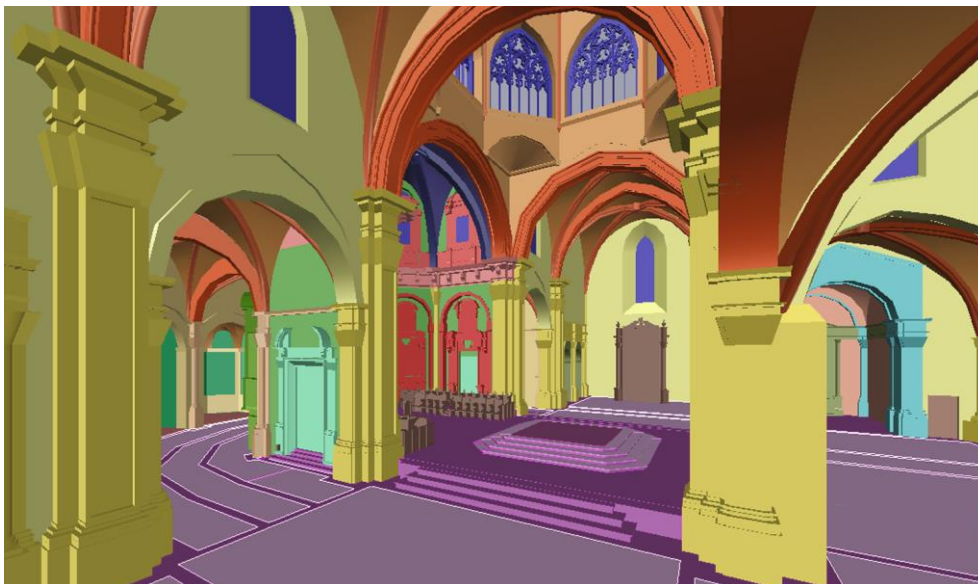


Figura 2.15. Modelo visual de la Catedral de Valencia con la distribución en capas. Vista desde el altar mayor hacia la Puerta de los Apóstoles.

A partir de fotografías reales tomadas del interior de la Catedral de Valencia, se ha generado una amplia biblioteca de texturas que se han empleado en la simulación visual, con lo que se obtiene un elevado grado de realismo. En la Figura 2.16, se muestran ejemplos de las texturas utilizadas en la simulación visual. Una vez aplicadas las texturas a cada uno de las superficies del modelo, se ha incorporado una iluminación adecuada para obtener una representación realista del interior del templo.

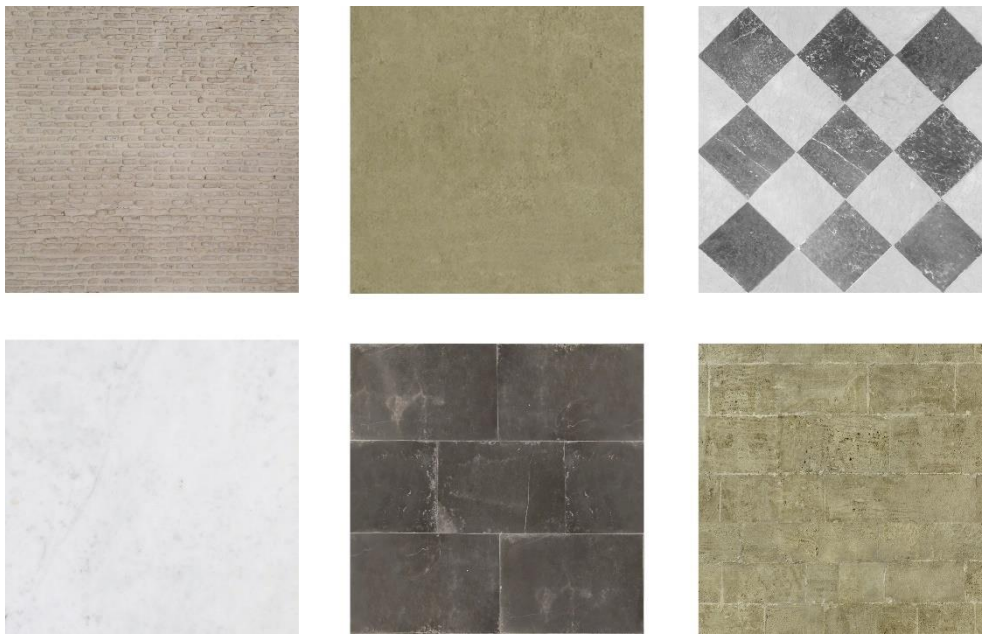


Figura 2.16. Ejemplos de texturas utilizadas en la elaboración de modelo visual de la Catedral de Valencia.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Determinación y análisis de parámetros acústicos objetivos.

A partir de la medición acústica realizada en el interior de la Catedral de Valencia, se han determinado los parámetros acústicos objetivos y se han analizado los resultados obtenidos. En concreto, se han estudiado los siguientes parámetros de calidad acústica incluidos en la norma UNE-EN ISO 3382-1:

- Parámetros de reverberación: de reverberación calculado a partir de los valores de decrecimiento entre 5 dB y 35 dB (T_{30}), tiempo de caída inicial (EDT), calidez (BR) y brillo (Br).
- Parámetros de energía: fuerza sonora (G), claridad musical (C_{80}), claridad para la palabra (C_{50}) y tiempo central (T_S).
- Parámetros de espacialidad: fracción de energía lateral (LF), índice de calidad biaural ($I-IACC_E$).
- Parámetros de inteligibilidad: índice de transmisión del habla (STI).

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros acústicos analizados.

3.1.1. Parámetros de reverberación (T_{30} , EDT, BR y Br).

3.1.1.1. Tiempo de reverberación (T_{30}).

En la Figura 3.1 se muestra el promedio en frecuencias del tiempo de reverberación (T_{30}) para las tres posiciones de la fuente estudiadas. Los resultados obtenidos con la fuente A (altar mayor) y la fuente B (coro) son próximos, siendo ligeramente superior el tiempo de reverberación con la fuente B (coro). Con la fuente C (púlpito), se produce una ligera disminución del tiempo de reverberación a bajas frecuencias respecto de los valores obtenidos con la fuente A (altar mayor) y la fuente B (coro).

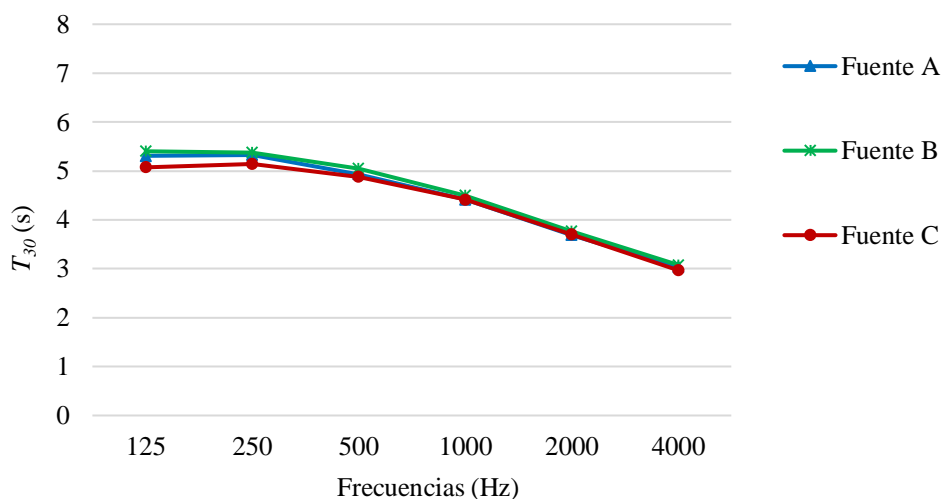
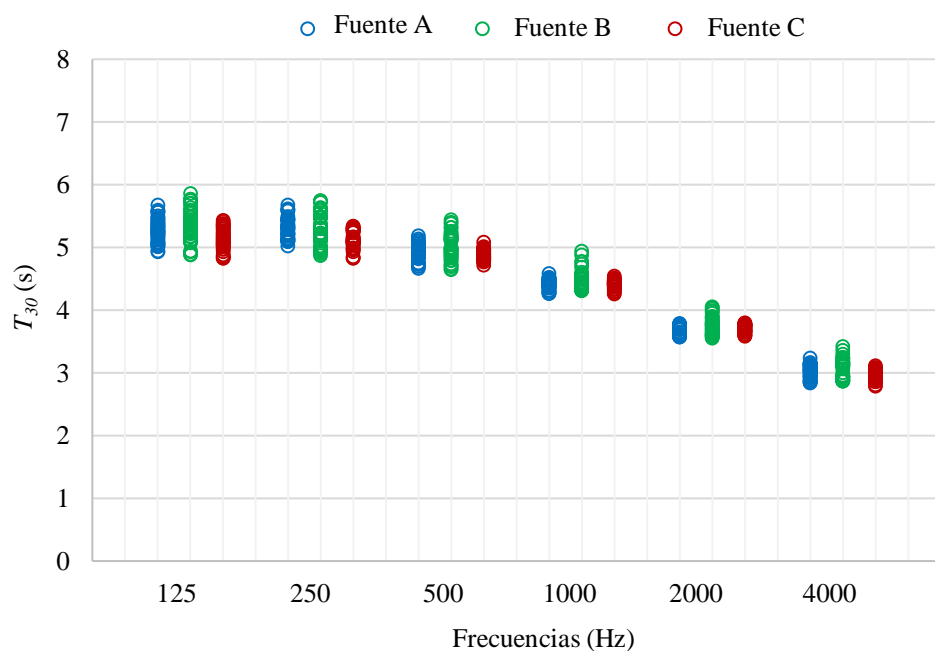


Figura 3.1. Promedio del tiempo de reverberación (T_{30}) según la ubicación de la fuente sonora.

En la Tabla 3.1 se indica el promedio, la desviación típica, los valores máximo y mínimo y el coeficiente de variación de los resultados obtenidos para el tiempo de reverberación (T_{30}). En la Figura 3.2 se muestra la dispersión del tiempo de reverberación en función de la ubicación del receptor para las tres posiciones de la fuente estudiadas. El análisis de los datos indica que se trata de un parámetro acústico con un elevado grado de estabilidad. La medición con la fuente B (coro) es la que presenta una mayor dispersión de los resultados en función de la ubicación del receptor, alcanzado en bajas frecuencias un coeficiente de variación del 5% (JND de T_{30}), mientras que la medición con la fuente C (púlpito) es la que presenta una mayor estabilidad.

Tabla 3.1. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo de reverberación (T_{30}).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} (s) Fuente A (altar mayor)	Promedio	5,28	5,31	4,93	4,41	3,69	3,03
	Des. típica	0,19	0,17	0,12	0,08	0,07	0,11
	Máximo	5,68	5,68	5,19	4,59	3,79	3,24
	Mínimo	4,93	5,03	4,67	4,27	3,58	2,84
	Coef. variación	4%	3%	2%	2%	2%	4%
T_{30} (s) Fuente B (coro)	Promedio	5,34	5,29	5,01	4,48	3,76	3,07
	Des. típica	0,27	0,25	0,22	0,16	0,14	0,16
	Máximo	5,86	5,75	5,44	4,94	4,06	3,42
	Mínimo	4,84	4,87	4,65	4,31	3,56	2,87
	Coef. variación	5%	5%	4%	4%	4%	5%
T_{30} (s) Fuente C (púlpito)	Promedio	5,14	5,12	4,88	4,41	3,70	2,97
	Des. típica	0,17	0,14	0,08	0,06	0,06	0,08
	Máximo	5,43	5,34	5,09	4,55	3,80	3,12
	Mínimo	4,83	4,83	4,72	4,26	3,59	2,79
	Coef. variación	3%	3%	2%	1%	2%	3%

Figura 3.2. Dispersión del tiempo de reverberación (T_{30}) en función de la ubicación del receptor para las tres posiciones de la fuente sonora.

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único del tiempo de reverberación ($T_{30,mid}$) para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la reverberación percibida por los oyentes recinto. En la Tabla 3.2, se indica el promedio del parámetro $T_{30,mid}$. Los resultados obtenidos muestran que se trata de un recinto con una alta reverberación percibida por los oyentes.

Tabla 3.2. Promedio del parámetro $T_{30,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A (altar mayor)	B (coro)	C (púlpito)
$T_{30,mid}$	4,67	4,74	4,65

En las Figuras 3.3-3.5, se ha representado la correlación entre el parámetro $T_{30,mid}$ y la distancia fuente-receptor. Para las tres posiciones de la fuente, se observa una baja correlación positiva (coeficientes de correlación entre 0,37 y 0,71). Con el aumento de la distancia fuente-receptor se produce un leve aumento del parámetro $T_{30,mid}$. El comportamiento en las diferentes zonas analizadas es similar (nave central, nave lateral y transeptos).

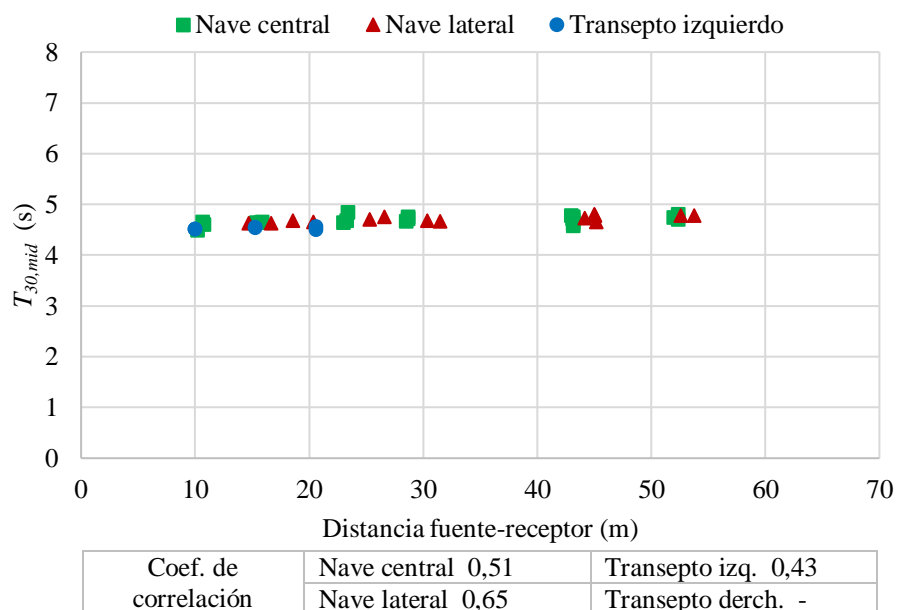


Figura 3.3. Correlación entre el tiempo de reverberación ($T_{30,mid}$) y la distancia fuente-receptor para la fuente A (altar mayor).

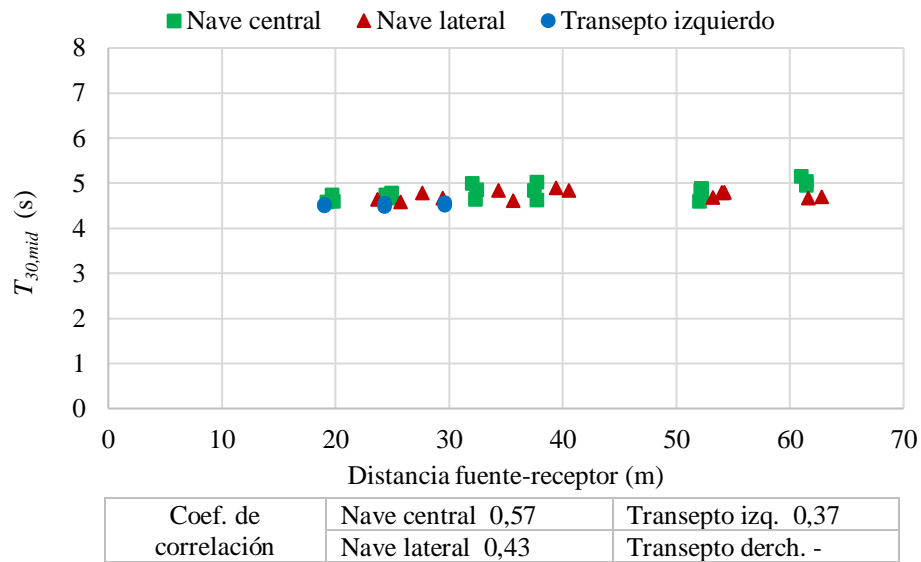


Figura 3.4. Correlación entre el tiempo de reverberación ($T_{30,mid}$) y la distancia fuente-receptor para la fuente B (coro).

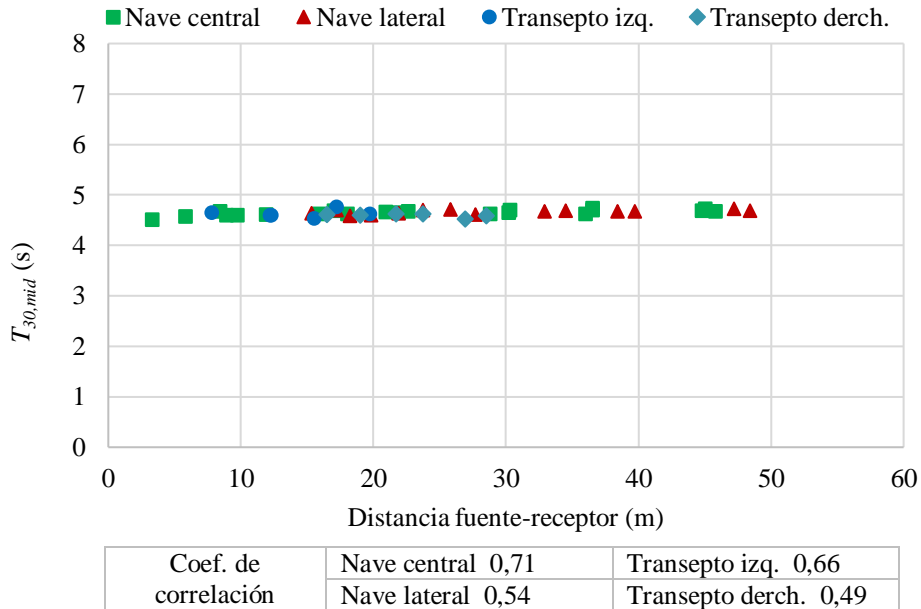


Figura 3.5. Correlación entre el tiempo de reverberación ($T_{30,mid}$) y la distancia fuente-receptor para la fuente C (púlpito).

3.1.1.2. Tiempo de caída inicial (*EDT*).

En la Figura 3.6, se muestra el promedio en frecuencias del tiempo de caída inicial (*EDT*) para las tres posiciones de la fuente estudiadas. Los resultados obtenidos con la fuente A (altar mayor) y la fuente B (coro) son próximos, siendo ligeramente superior el tiempo de caída inicial con la fuente B (coro). Con la fuente C (púlpito), se produce una disminución del tiempo de caída inicial a bajas frecuencias respecto de los valores obtenidos con la fuente A (altar mayor) y la fuente B (coro). Los resultados obtenidos para el tiempo de caída inicial (*EDT*) son próximos a los obtenidos para el tiempo de reverberación (T_{30}). Esto indica que el recinto presenta una difusión homogénea del sonido (Alves Santos, 2014).

En la Tabla 3.3, se indica el promedio, la desviación típica, los valores máximo y mínimo y el coeficiente de variación de los resultados obtenidos para tiempo de caída inicial (*EDT*). En la Figura 3.7, se muestra la dispersión del tiempo de reverberación en función de la ubicación del receptor para las tres posiciones de la fuente sonora. El análisis de los datos indica que se trata de un parámetro acústico con un elevado grado de estabilidad, siendo la variación ligeramente superior a la obtenida para el tiempo de reverberación (T_{30}). La medición con la fuente B (coro) es la que presenta una mayor dispersión de los resultados en función de la ubicación del receptor, presentado en determinadas frecuencias un coeficiente de variación $> 5\%$ (*JND* de T_{30}), Las mediciones con la fuente A (altar mayor) y la fuente C (púlpito) presentan una variación similar.

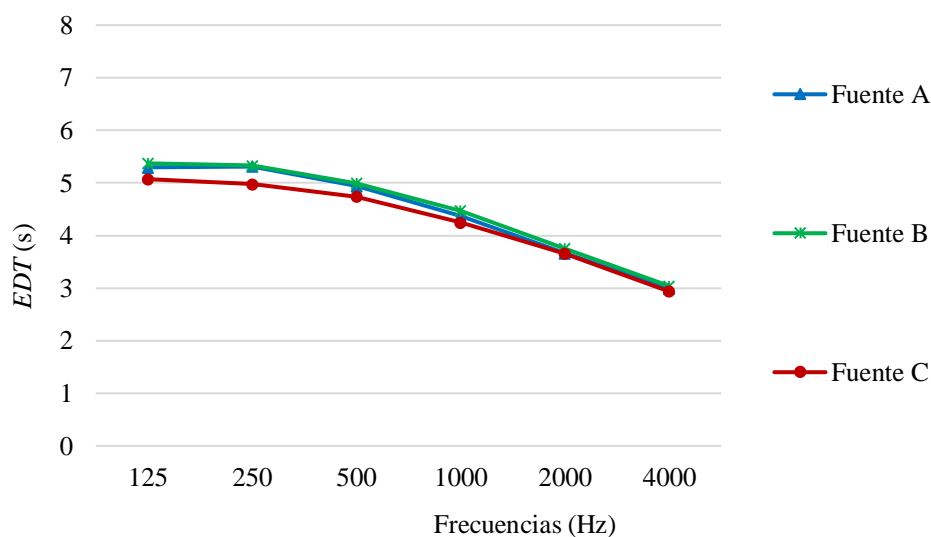
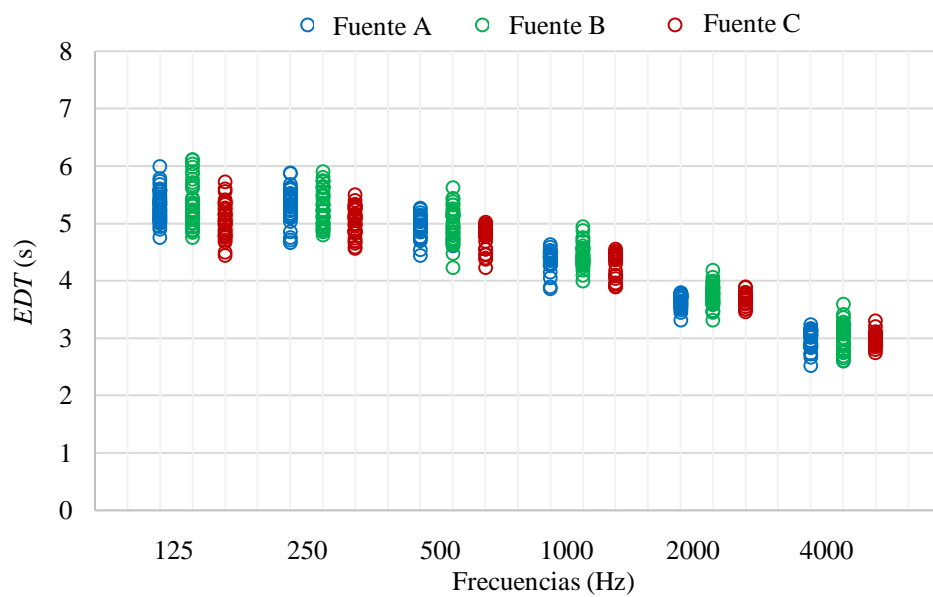


Figura 3.6. Promedio del tiempo de caída inicial (*EDT*) según la ubicación de la fuente sonora.

Tabla 3.3. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo de caída inicial (*EDT*).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<i>EDT</i> (s) Fuente A (altar mayor)	Promedio	5,30	5,29	4,91	4,38	3,67	3,00
	Des. típica	0,26	0,27	0,16	0,14	0,10	0,16
	Máximo	5,99	5,88	5,27	4,63	3,79	3,24
	Mínimo	4,75	4,67	4,44	3,90	3,32	2,67
	Coef. variación	5%	5%	3%	3%	3%	5%
<i>EDT</i> (s) Fuente B (coro)	Promedio	5,32	5,27	5,00	4,47	3,76	3,04
	Des. típica	0,36	0,34	0,31	0,24	0,18	0,22
	Máximo	5,39	6,34	5,70	5,32	4,19	3,59
	Mínimo	4,75	4,80	4,23	4,00	3,48	2,66
	Coef. variación	7%	6%	6%	5%	5%	7%
<i>EDT</i> (s) Fuente C (púlpito)	Promedio	5,05	5,03	4,77	4,30	3,68	2,85
	Des. típica	0,24	0,23	0,12	0,11	0,10	0,10
	Máximo	5,72	5,50	5,02	4,55	3,89	3,30
	Mínimo	4,44	4,57	4,38	3,90	3,46	2,75
	Coef. variación	5%	5%	3%	3%	3%	4%

Figura 3.7. Dispersión del tiempo de caída inicial (*EDT*) en función de la ubicación del receptor.

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único del tiempo de caída inicial (EDT_{mid}) para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la reverberación percibida por los oyentes recinto. En la Tabla 3.4, se indica el promedio del parámetro EDT_{mid} . Los resultados obtenidos muestran que se trata de un recinto con una alta reverberación percibida por los oyentes.

Tabla 3.4. Promedio del parámetro EDT_{mid} según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A (altar mayor)	B (coro)	C (púlpito)
EDT_{mid}	4,54	4,66	4,53

En las Figuras 3.8-3.10, se ha representado la correlación entre el parámetro EDT_{mid} y la distancia fuente-receptor. Para las tres posiciones de la fuente, se observa una baja correlación positiva (coeficientes de correlación entre 0,31 y 0,73). Con el aumento de la distancia fuente-receptor se produce un leve aumento del parámetro EDT_{mid} . Se observa un comportamiento similar en las diferentes zonas analizadas (nave central, nave lateral y transeptos).

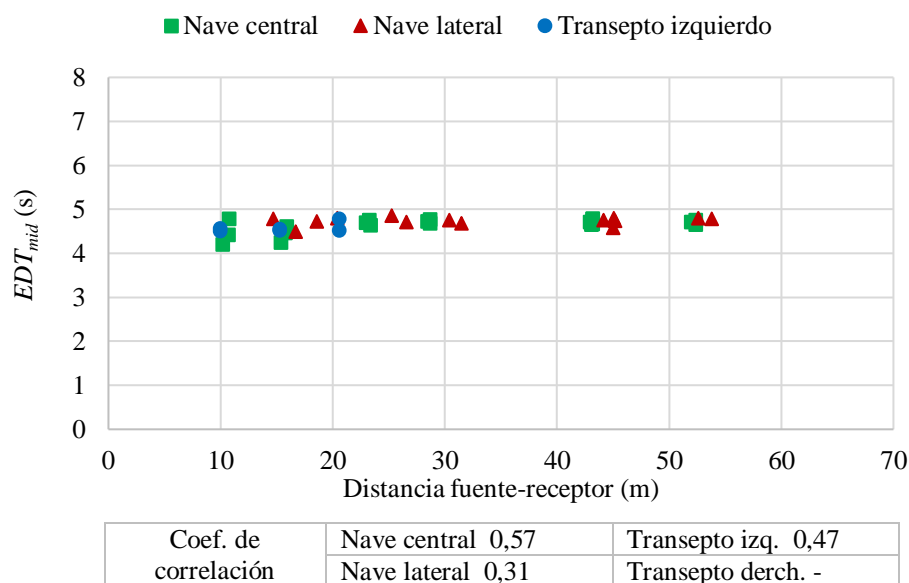


Figura 3.8. Correlación entre el tiempo de caída inicial (EDT_{mid}) y la distancia fuente-receptor para la fuente A (altar mayor).

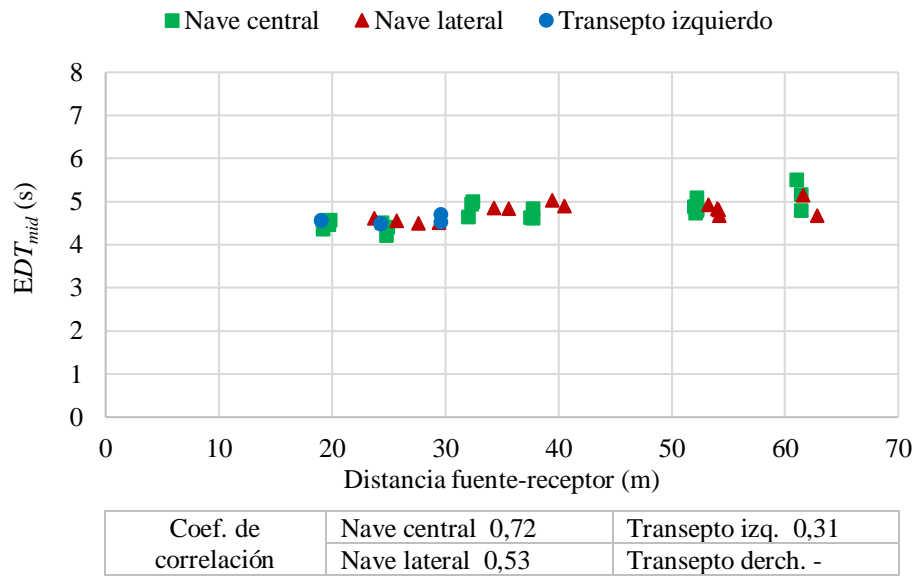


Figura 3.9. Correlación entre el tiempo de caída inicial (EDT_{mid}) y la distancia fuente-receptor para la fuente B (coro).

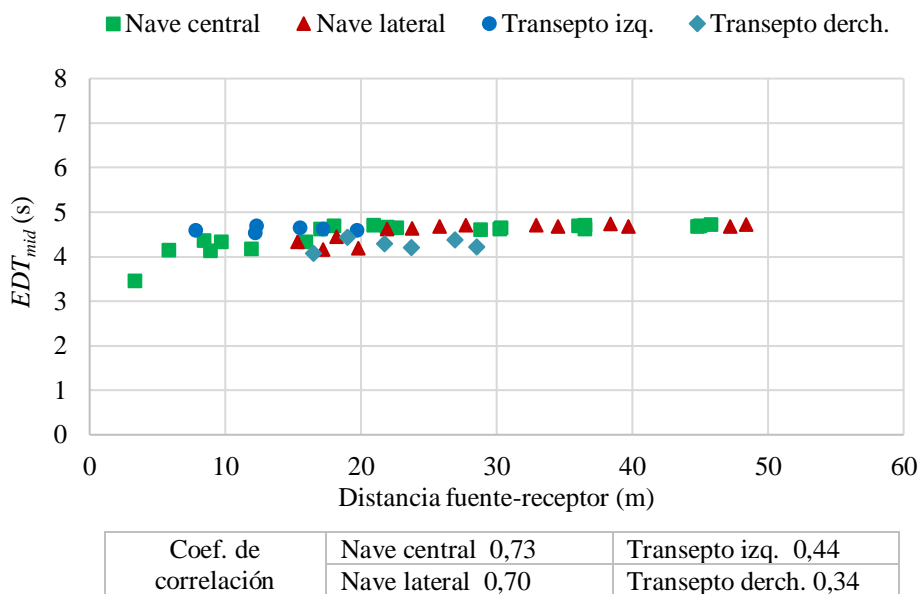


Figura 3.10. Correlación entre el tiempo de caída inicial (EDT_{mid}) y la distancia fuente-receptor para la fuente C (pulpito).

3.1.1.3. Calidez (BR) y brillo (Br).

Se ha determinado el valor promedio de la calidez (BR) para cada una de las ubicaciones de la fuente sonora mediante la aplicación de la Ecuación 4:

$$BR = \frac{T_R^{125Hz} + T_R^{250Hz}}{T_R^{500Hz} + T_R^{1000Hz}} \quad (2)$$

Se ha determinado el valor promedio del brillo (Br) para cada una de las ubicaciones de la fuente sonora mediante la aplicación de la Ecuación 5:

$$Br = \frac{T_R^{2000Hz} + T_R^{4000Hz}}{T_R^{500Hz} + T_R^{1000Hz}} \quad (3)$$

En la Tabla 3.5, se indican los resultados promedio obtenidos de la calidez (BR) y el brillo (Br) para para cada una de las ubicaciones de la fuente sonora. La calidez presenta resultados próximos para las tres ubicaciones de la fuente, mientras que los resultados del brillo son idénticos.

Según los resultados obtenidos, los sonidos graves presentan mayor reverberación que los medios, lo que indica que el espacio es acústicamente cálido. La riqueza de los sonidos graves está relacionada con la suavidad y melosidad acústica del espacio.

Tabla 3.5. Resultados obtenidos para la calidez (BR) y el brillo (Br) según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora		A (altar mayor)	B (coro)	C (púlpito)
Calidez (BR)	Promedio	1,13	1,12	1,10
	Des. típica	0,02	0,05	0,03
	Máximo	1,19	1,23	1,15
	Mínimo	1,09	0,98	1,05
Brillo (Br)	Promedio	0,72	0,72	0,72
	Des. típica	0,01	0,02	0,01
	Máximo	0,75	0,79	0,75
	Mínimo	0,70	0,69	0,69

3.1.2. Parámetros de energía (G , C_{80} , C_{50} y T_S).

3.1.2.1. Fuerza sonora (G).

En la Figura 3.11, se muestra la variación del promedio energético de la fuerza sonora (G) para las tres ubicaciones de la fuente sonora. Para la fuente A (altar mayor) y B (coro) no se observan variaciones significativas en la fuerza sonora. Para la fuente C, se observa un ligero aumento de la fuerza sonora, derivado de la influencia del uso del púlpito.

En la Tabla 3.6, se indica el promedio energético, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para la fuerza sonora (G). En la Figura 3.12, se muestra la dispersión de la fuerza sonora en función de la ubicación del receptor para las tres posiciones de la fuente sonora. El análisis de los datos indica que se trata de un parámetro acústico que presenta variaciones significativas en función de la ubicación del receptor para las tres ubicaciones de la fuente.

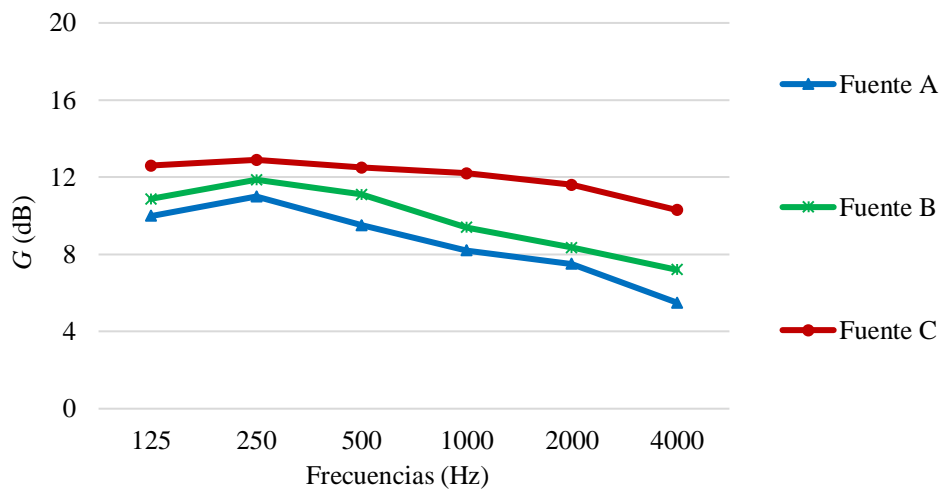


Figura 3.11. Promedio energético de la fuerza sonora (G) según la ubicación de la fuente.

Tabla 3.6. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la fuerza sonora (G).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
G (dB) Fuente A (altar mayor)	Promedio energético	10,00	11,00	9,52	8,20	7,50	5,50
	Des. típica	2,31	2,52	4,14	3,68	2,99	1,68
	Máximo	14,60	15,50	16,50	14,40	19,00	10,00
	Mínimo	3,80	3,40	2,00	1,00	2,75	2,10
G (dB) Fuente B (coro)	Promedio energético	10,87	11,87	11,11	9,39	8,35	7,20
	Des. típica	9,61	2,60	2,85	2,42	3,67	4,22
	Máximo	69,00	19,50	15,90	13,70	16,10	16,60
	Mínimo	5,40	8,00	5,60	3,50	0,70	-0,10
G (dB) Fuente C (púlpito)	Promedio energético	12,60	12,90	12,50	12,20	11,60	10,30
	Des. típica	2,33	2,79	2,46	2,89	3,63	3,01
	Máximo	16,00	17,80	13,00	12,00	13,70	13,10
	Mínimo	4,90	4,00	3,00	1,20	0,20	0,00

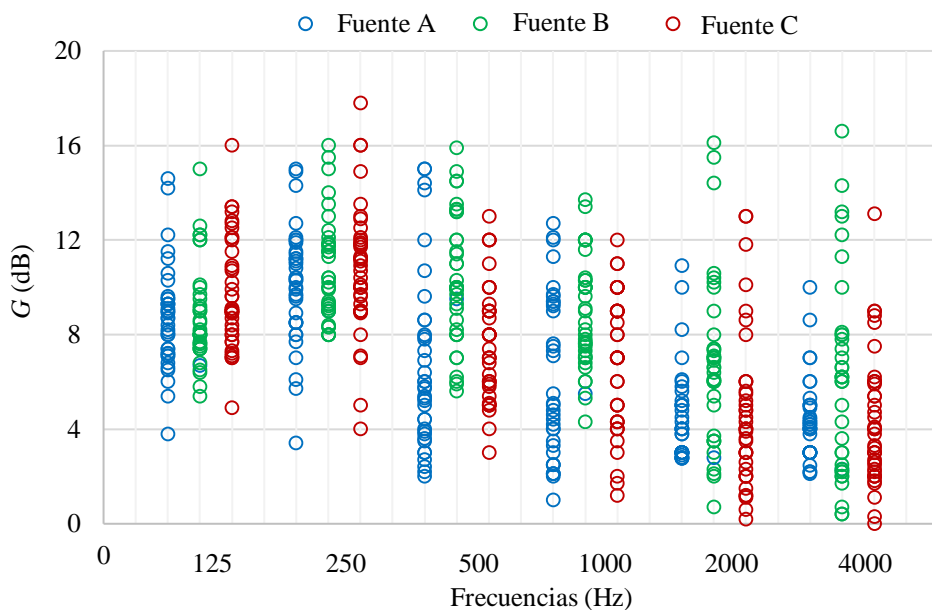


Figura 3.12. Dispersión de la fuerza sonora (G) en función de la ubicación del receptor.

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único de la fuerza sonora (G_{mid}) para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en el nivel sonoro subjetivo. En la Tabla 3.7, se indica el promedio del parámetro G_{mid} . Los resultados obtenidos muestran un alto nivel sonoro, lo que indica que se trata de un recinto que refuerza con sus reflexiones el sonido emitido.

En las Figuras 3.13-3.15, se ha representado la correlación entre el parámetro G_{mid} y la distancia fuente-receptor. Para las tres posiciones de la fuente, se observa una alta correlación negativa (coeficientes de correlación entre -0,72 y -0,94). Con el aumento de la distancia fuente-receptor se produce una notable disminución de la fuerza sonora percibida por los oyentes. No se observan diferencias significativas en el comportamiento de la fuerza sonora para las diferentes zonas del recinto analizadas.

Tabla 3.7. Promedio del parámetro G_{mid} según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A (altar mayor)	B (coro)	C (púlpito)
G_{mid} (dB)	8,86	10,25	12,35

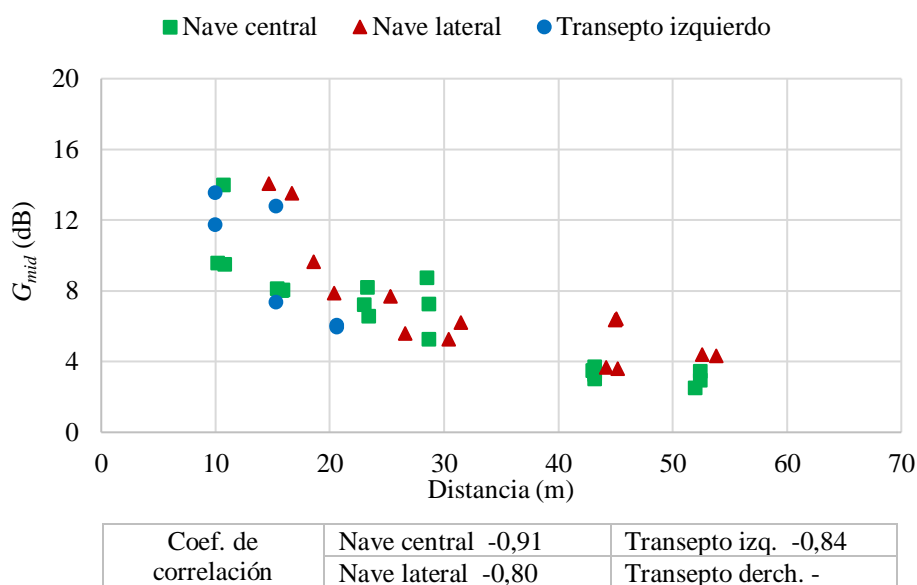


Figura 3.13. Correlación entre la fuerza sonora (G) y la distancia fuente-receptor (fuente A, altar mayor).

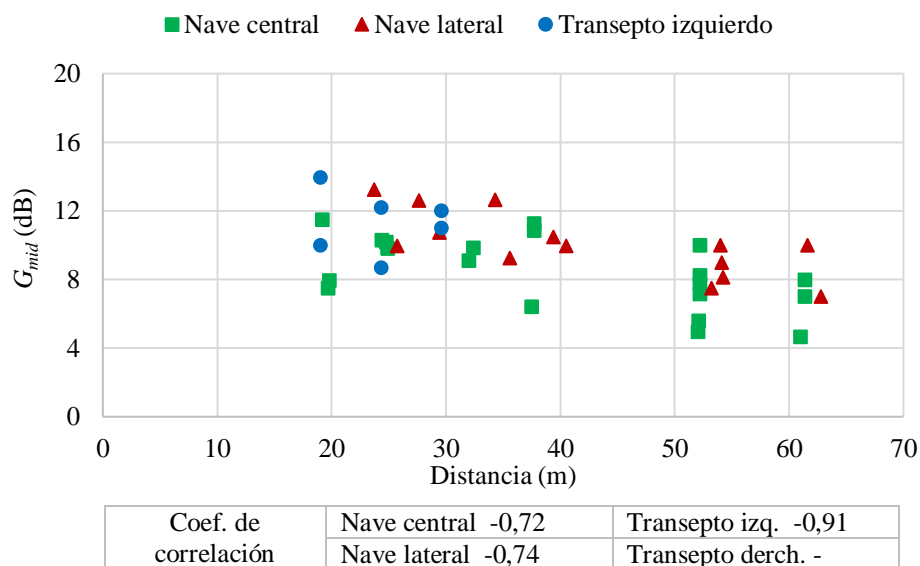


Figura 3.14. Correlación entre la fuerza sonora (G) y la distancia fuente-receptor (fuente B, coro).

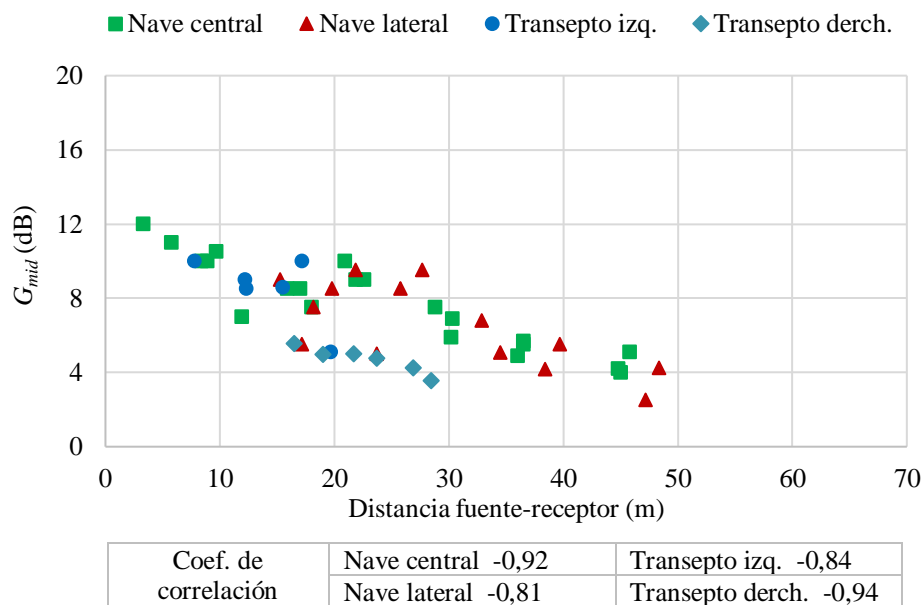


Figura 3.15. Correlación entre la fuerza sonora (G) y la distancia fuente-receptor (fuente C, púlpito).

En la Figura 3.16, se ha representado el modelo de Barron en comparación con los resultados experimentales obtenidos para el promediado en frecuencia de número único de la fuerza sonora (G_{mid}). En la Tabla 3.8, se indica el promedio del error absoluto y el JND entre el modelo de Barron y los resultados obtenidos experimentalmente para G_{mid} . Los resultados muestran variaciones significativas entre los resultados teóricos y experimentales. La mayor aproximación se observa para los resultados obtenidos en la fuente C (púlpito), lugar donde se obtienen valores para distancias próximas entre la fuente y los receptores. Los resultados con mayor grado de disimilitud se obtienen en la fuente B (coro), donde se muestran valores elevados de G_{mid} en comparación con las otras fuentes estudiadas y con el modelo de Barron.

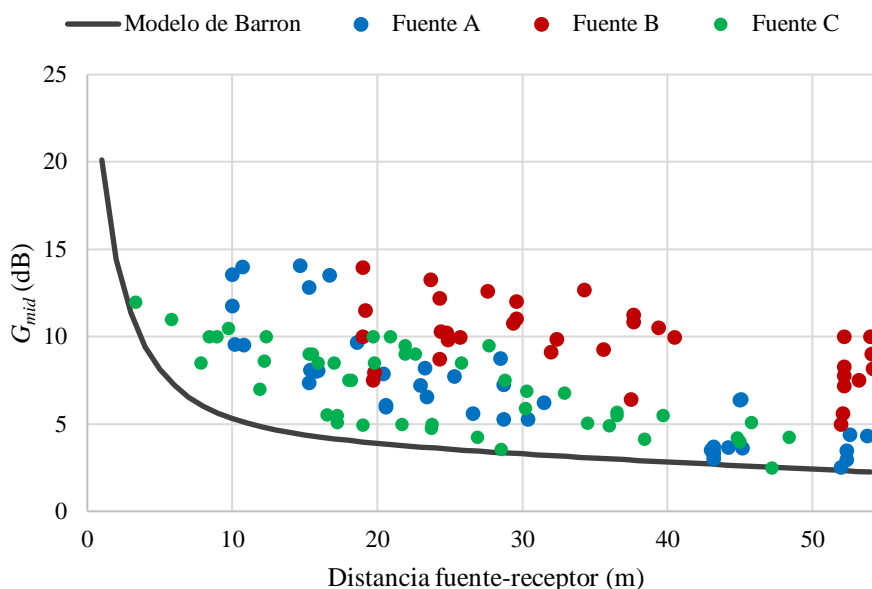


Figura 3.16. Comparativa del modelo de Barron con los resultados obtenidos experimentalmente para G_{mid} .

Tabla 3.8. Promedio del error absoluto y JND entre el modelo de Barron y los resultados obtenidos experimentalmente para G_{mid}

A (altar mayor)		B (coro)		C (púlpito)	
Promedio error abs. (dB)	JND	Promedio error abs. (dB)	JND	Promedio error abs. (dB)	JND
3,45	3,45	6,32	6,32	3,11	3,11

3.1.2.2. Claridad musical (C_{80}).

En la Figura 3.17, se muestra la variación del promedio energético de la claridad musical (C_{80}) para las tres posiciones de la fuente sonora. Se observa una variación significativa de este parámetro en función de la ubicación de la fuente. Los valores más altos de claridad musical se observan para la fuente C (púlpito) seguida por la fuente A (altar mayor), mientras que los valores más bajos se observan para la fuente C (coro).

En la Tabla 3.9, se indica el promedio, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para la claridad musical (C_{80}). En la Figura 3.18, se muestra la dispersión de la claridad musical en función de la ubicación del receptor para las tres posiciones de la fuente sonora. El análisis de los datos indica que se trata de un parámetro acústico que presenta variaciones significativas en función de la ubicación del receptor para las tres ubicaciones de la fuente.

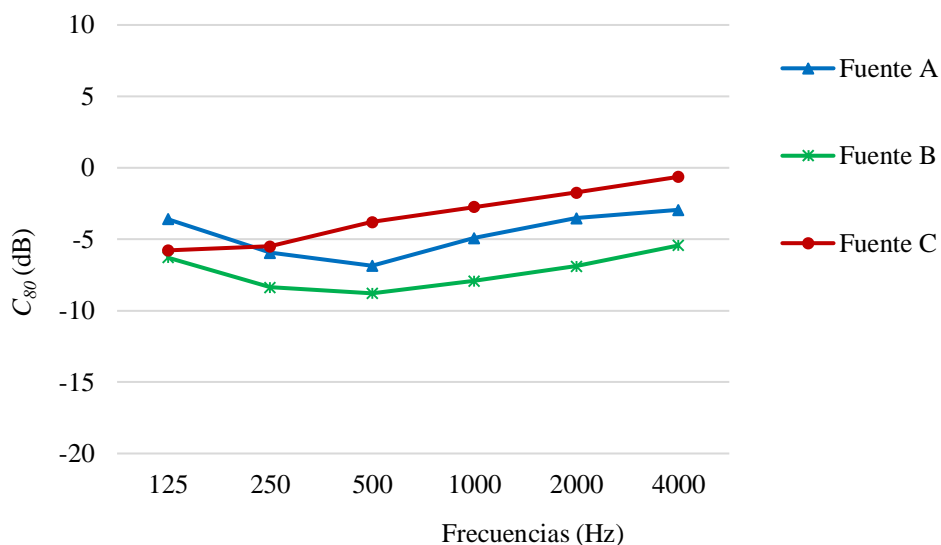
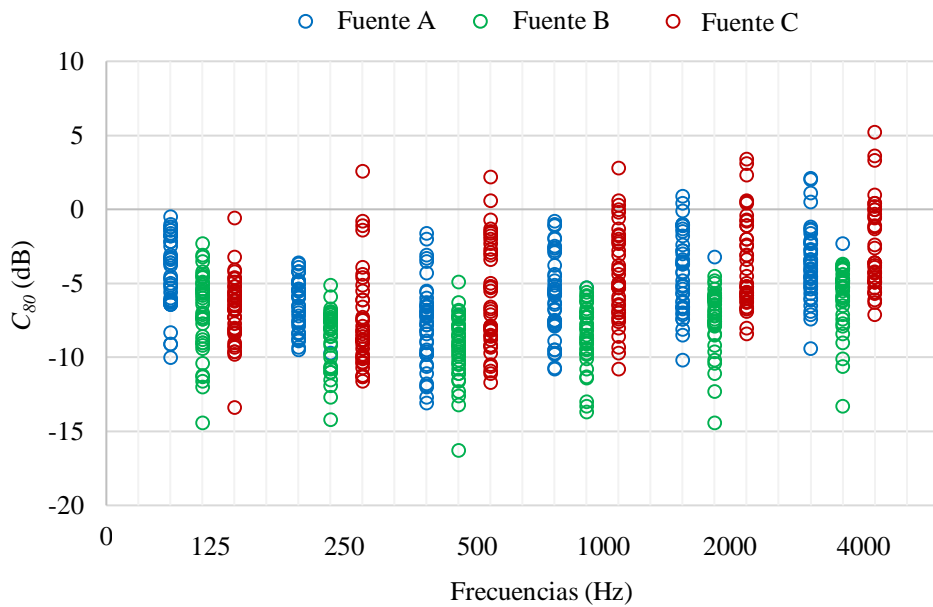


Figura 3.17. Promedio energético de la claridad musical (C_{80}) según la ubicación de la fuente sonora.

Tabla 3.9. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la claridad musical (C_{80}).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
C_{80} (dB) Fuente A (altar mayor)	Promedio energético	-3,60	-5,96	-6,86	-4,93	-3,53	-2,94
	Des. típica	2,43	1,63	2,70	2,71	2,64	2,48
	Máximo	-0,50	-3,70	-1,60	-0,80	0,40	2,10
	Mínimo	-10,00	-9,50	-13,10	-10,80	-10,20	-9,40
C_{80} (dB) Fuente B (coro)	Promedio energético	-6,29	-8,37	-8,79	-7,92	-6,88	-5,44
	Des. típica	2,73	1,99	2,16	2,15	2,12	2,13
	Máximo	-7,09	-5,10	-4,90	-5,30	-4,50	-3,70
	Mínimo	-14,40	-14,20	-16,30	-13,70	-14,40	-13,3
C_{80} (dB) Fuente C (púlpito)	Promedio energético	-5,78	-5,51	-3,80	-2,75	-1,74	-0,63
	Des. típica	2,26	3,21	3,58	3,14	3,07	2,94
	Máximo	-0,60	-0,80	0,60	0,60	3,40	5,20
	Mínimo	-13,40	-11,60	-11,70	-10,80	-8,40	-7,10

Figura 3.18. Dispersión de la claridad musical (C_{80}) en función de la ubicación del receptor.

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único de la claridad musical ($C_{80,mid}$) para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la claridad del sonido percibida por los oyentes. Los resultados muestran que se trata de un recinto con baja claridad musical (Tabla 3.10). En las Figuras 3.19-3.21, se ha representado la correlación entre el parámetro $C_{80,mid}$ y la distancia fuente-receptor. Para las tres posiciones de la fuente, se observa una alta correlación negativa (coeficientes de correlación entre -0,77 y -0,98). Con el aumento de la distancia fuente-receptor se produce una notable disminución del parámetro $C_{80,mid}$. Para la fuente A (altar mayor), se observa un comportamiento similar en las diferentes zonas estudiadas. Para la fuente B, se observa un comportamiento similar en la nave principal y la nave lateral, mientras que en transepto izquierdo se produce una mayor disminución de $C_{80,mid}$ en función de la distancia fuente-receptor. En la fuente C, se observa un comportamiento similar en la nave principal, la nave lateral y el transepto derecho, mientras que en el transepto izquierdo se produce una mayor disminución de $C_{80,mid}$ en función de la distancia fuente-receptor. El diferente comportamiento acústico en ambos transeptos se deriva de la posición asimétrica de la fuente C.

Tabla 3.10. Promedio del parámetro $C_{80,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A (altar mayor)	B (coro)	C (púlpito)
$C_{80,mid}$ (dB)	-5,89	-8,35	-3,28

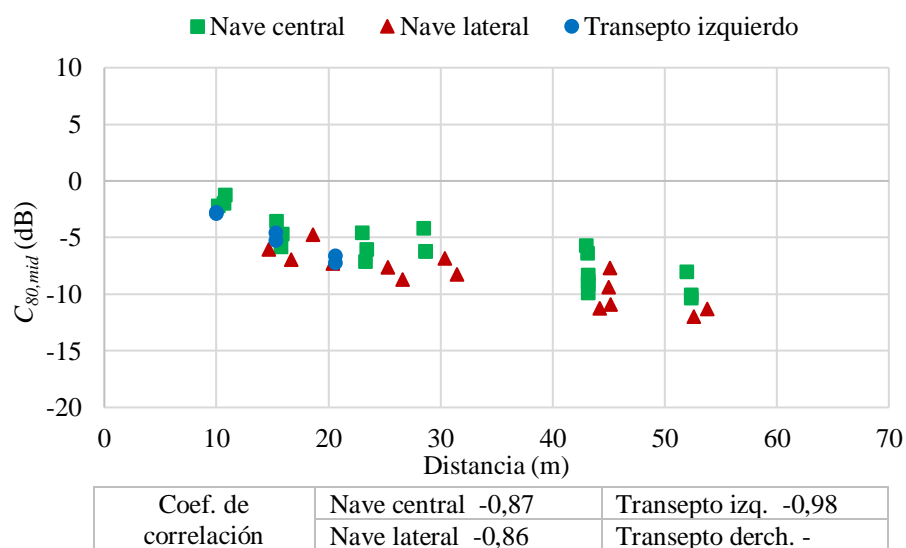


Figura 3.19. Correlación entre la claridad musical (C_{80}) y la distancia fuente-receptor (fuente A, altar mayor).

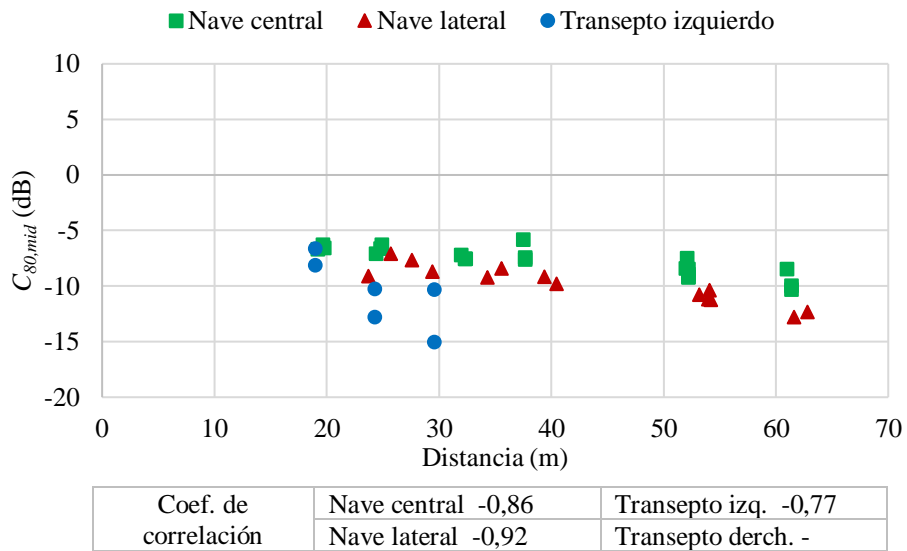


Figura 3.20. Correlación entre la claridad musical (C_{80}) y la distancia fuente-receptor (fuente B, coro).

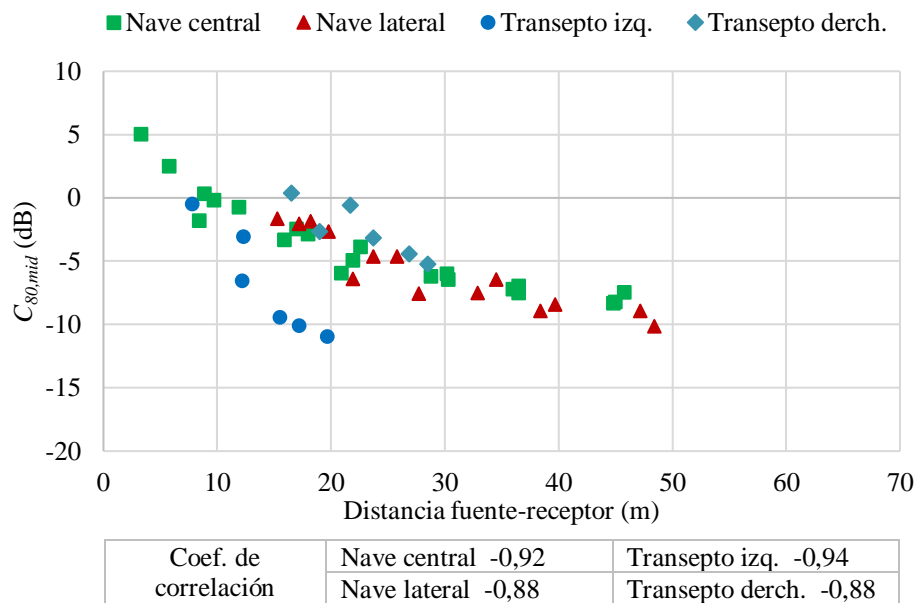


Figura 3.21. Correlación entre la claridad musical (C_{80}) y la distancia fuente-receptor (fuente C, púlpito).

En la Figura 3.21, se ha representado el modelo de Barron en comparación con los resultados experimentales obtenidos para el promediado en frecuencia de número único de la claridad musical ($C_{80,mid}$). En la Tabla 3.11, se indica el promedio del error absoluto y el JND entre el modelo de Barron y los resultados obtenidos experimentalmente para $C_{80,mid}$. Los resultados obtenidos experimentalmente muestran una ligera aproximación al modelo teórico. Para la fuente C (pulpito), el error promedio el modelo de Barron describe bien, en términos de JND , el comportamiento del parámetro $C_{80,mid}$. Para la fuente A (altar) y B (coro), se produce una mayor disimilitud, aunque los valores de JND entre los resultados teóricos y experimentales son próximos a la unidad.

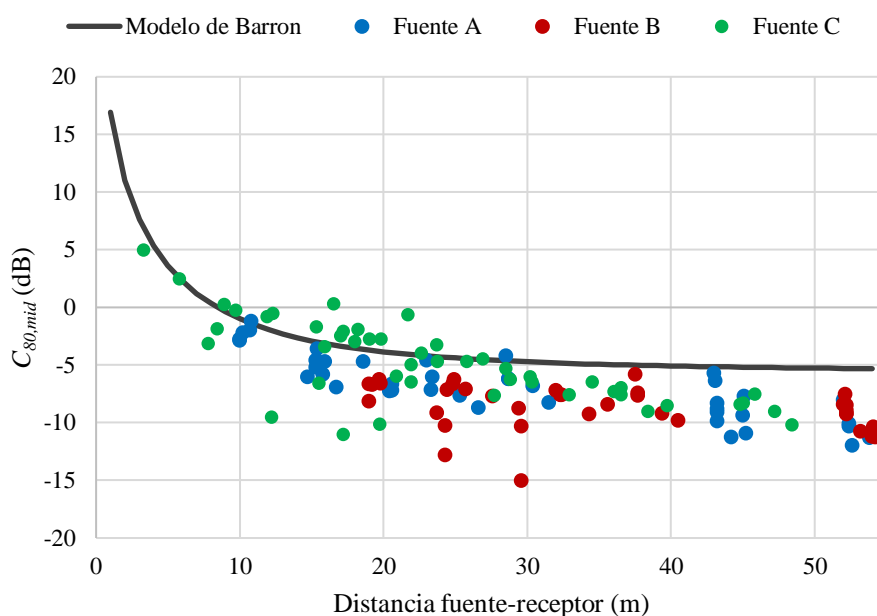


Figura 3.22. Comparativa del modelo de Barron con los resultados obtenidos experimentalmente para $C_{80,mid}$.

Tabla 3.11. Promedio del error absoluto y JND entre el modelo de Barron y los resultados obtenidos experimentalmente para $C_{80,mid}$.

A (altar mayor)		B (coro)		C (pulpito)	
Promedio error abs. (dB)	JND	Promedio error abs. (dB)	JND	Promedio error abs. (dB)	JND
2,77	1,11	3,98	1,59	2,19	0,87

3.1.2.3. Claridad para la palabra (C_{50}).

En la Figura 3.23, se muestra la variación del promedio energético de la claridad para la palabra (C_{50}) para las tres posiciones de la fuente sonora. Se observa una variación significativa de este parámetro en función de la ubicación de la fuente. Los valores más altos de claridad para la palabra se observan para la fuente C (púlpito) seguida por la fuente A (altar mayor), mientras que los valores más bajos se observan para la fuente B (coro).

En la Tabla 3.12, se indica el promedio, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para la claridad para la palabra (C_{50}). En la Figura 3.24, se muestra la dispersión de la claridad para la palabra en función de la ubicación del receptor para las tres posiciones de la fuente sonora. El análisis de los datos indica que se trata de un parámetro acústico que presenta variaciones significativas en función de la ubicación del receptor para las tres ubicaciones de la fuente.

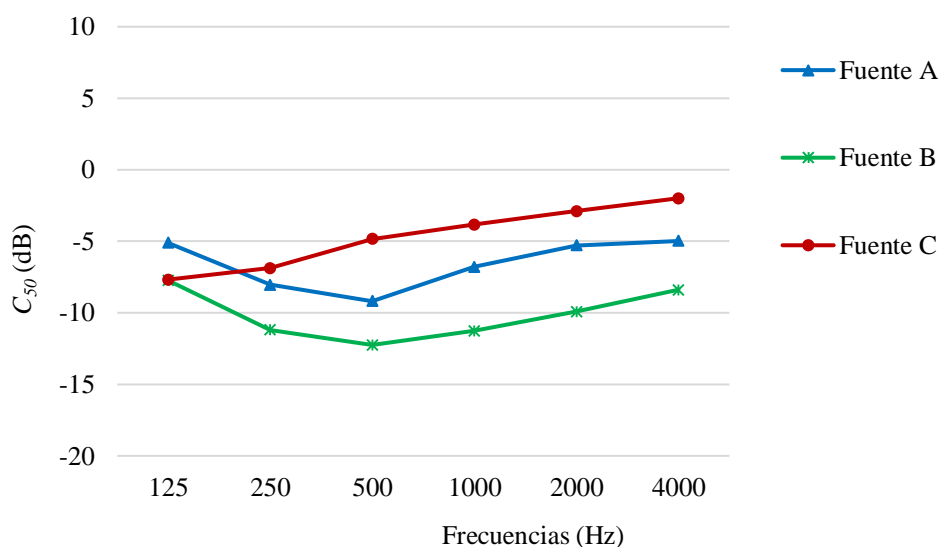


Figura 3.23. Promedio energético de la claridad para la palabra (C_{50}) según la ubicación de la fuente sonora.

Tabla 3.12. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la claridad para la palabra (C_{50}).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
C_{50} (dB) Fuente A (altar mayor)	Promedio energético	-5,12	-8,03	-9,19	-6,78	-5,29	-4,98
	Des. típica	2,48	1,91	3,33	3,34	3,02	2,93
	Máximo	-2,00	-5,60	-3,60	-2,20	-0,60	1,10
	Mínimo	-11,10	-13,00	-16,20	-14,80	-13,20	-13,5
C_{50} (dB) Fuente B (coro)	Promedio energético	-7,74	-11,20	-12,25	-11,27	-9,92	-8,39
	Des. típica	3,40	2,64	2,72	2,76	2,98	3,17
	Máximo	-8,91	-6,70	-9,60	-8,30	-7,60	-6,00
	Mínimo	-15,70	-17,00	-18,30	-18,10	-17,50	16,10
C_{50} (dB) Fuente C (púlpito)	Promedio energético	-7,67	-6,88	-4,84	-3,83	-2,89	-1,99
	Des. típica	2,46	4,51	4,63	3,88	3,86	3,80
	Máximo	-1,40	-1,30	0,30	-0,10	2,70	4,30
	Mínimo	-14,40	-16,10	-15,60	-15,40	-13,00	-11,9

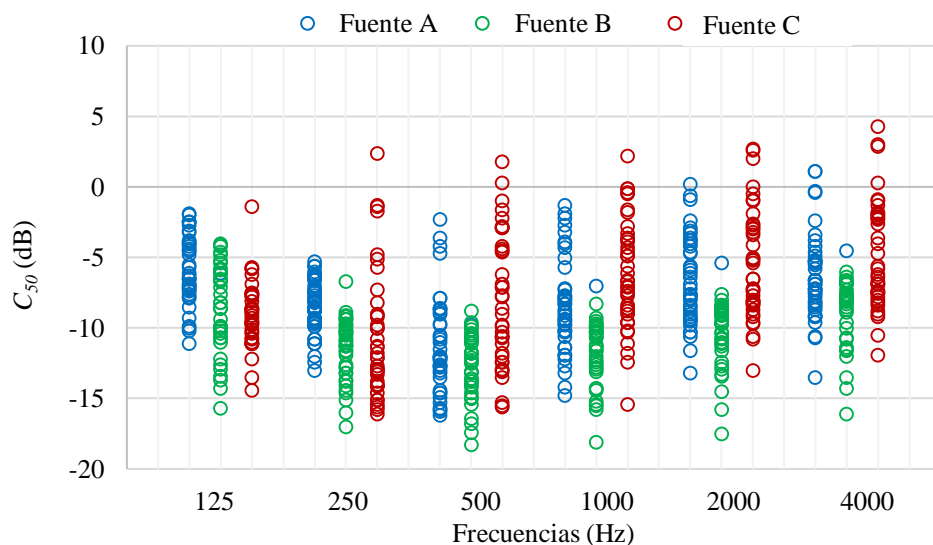


Figura 3.24. Dispersión de la claridad para la palabra (C_{50}) en función de la ubicación del receptor.

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único de la claridad para la palabra ($C_{50,mid}$) para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la claridad del sonido percibida por los oyentes. En la Tabla 3.13, se indica el promedio del parámetro $C_{50,mid}$. Los resultados obtenidos muestran que se trata de un recinto con baja claridad de la palabra percibida por los oyentes. En las Figuras 3.25-3.27, se ha representado la correlación entre el parámetro $C_{50,mid}$ y la distancia fuente-receptor. Para las tres posiciones de la fuente, se observa una alta correlación negativa (coeficientes de correlación entre -0,77 y -0,99). Con el aumento de la distancia fuente-receptor se produce una notable disminución de $C_{50,mid}$. Para la fuente A, se observa un comportamiento similar en las diferentes zonas estudiadas. Para la fuente B, se observa un comportamiento similar en la nave principal y la nave lateral, mientras que en transepto izquierdo se produce una mayor disminución de $C_{50,mid}$ en función de la distancia fuente-receptor. Para la fuente C, se observa un comportamiento similar en la nave principal, la nave lateral y el transepto derecho, mientras que en el transepto izquierdo se produce una mayor disminución de $C_{50,mid}$ en función de la distancia fuente-receptor. El diferente comportamiento acústico en ambos transeptos se deriva de la posición asimétrica de la fuente C.

Tabla 3.13. Promedio del parámetro $C_{50,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A (altar mayor)	B (coro)	C (púlpito)
$C_{50,mid}$	-7,98	-11,76	-4,34

■ Nave central ▲ Nave lateral ● Transepto izquierdo

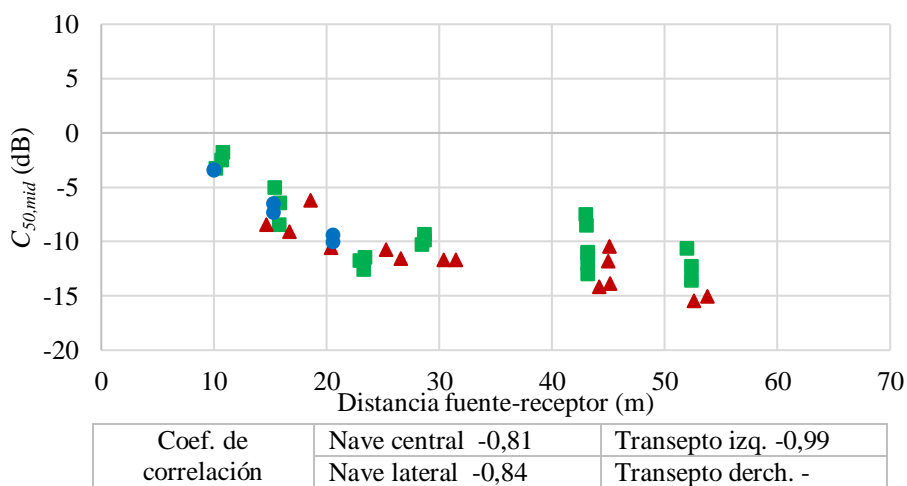


Figura 3.25. Correlación entre la claridad para la palabra (C_{50}) y la distancia fuente-receptor (fuente A, altar mayor).

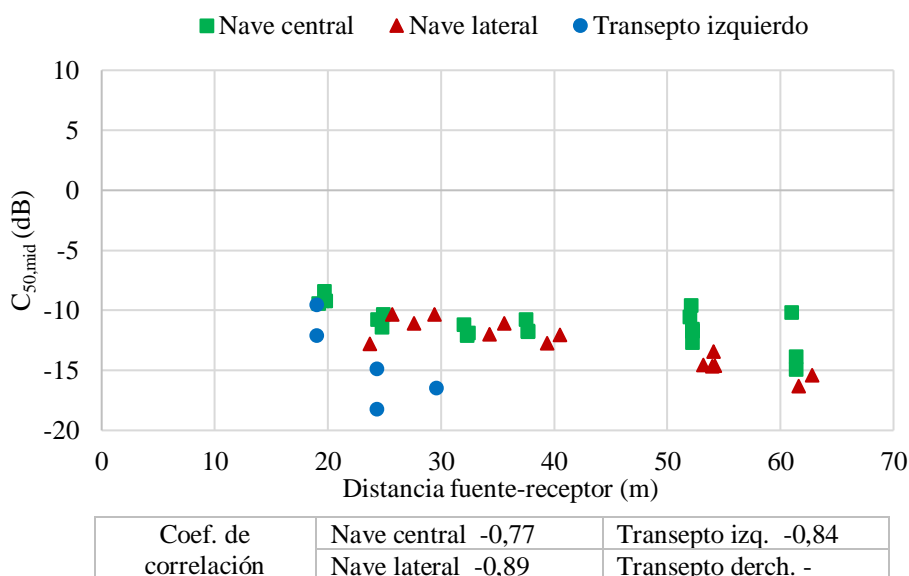


Figura 3.26. Correlación entre la claridad para la palabra (C_{50}) y la distancia fuente-receptor (fuente B, coro).

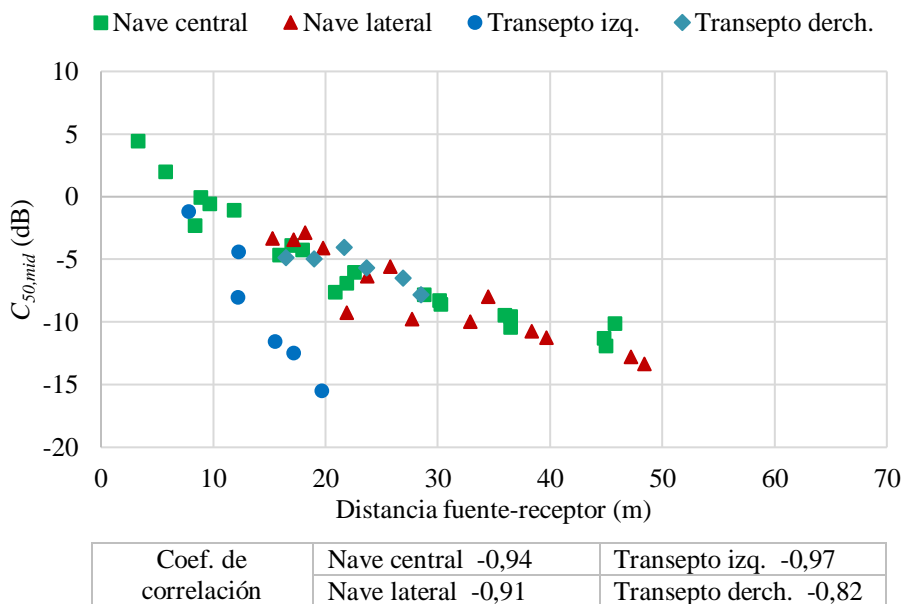


Figura 3.27. Correlación entre la claridad para la palabra (C_{50}) y la distancia fuente-receptor (fuente C, púlpito).

3.1.2.4. Tiempo central (T_S).

En la Figura 3.28, se muestra la variación del promedio del tiempo central (T_S) para las tres posiciones de la fuente sonora. Se observa una variación significativa de este parámetro en función de la ubicación de la fuente. Los valores más bajos del tiempo central se observan para la fuente C (púlpito) seguida por la fuente A (altar mayor), mientras que los valores más altos se observan para la fuente C (coro).

En la Tabla 3.14, se indica el promedio, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para el tiempo central (T_S). En la Figura 3.29, se muestra la dispersión del tiempo central en función de la ubicación del receptor para las tres posiciones de la fuente sonora. El análisis de los datos indica que se trata de un parámetro acústico que presenta variaciones significativas en función de la ubicación del receptor para las tres ubicaciones de la fuente.

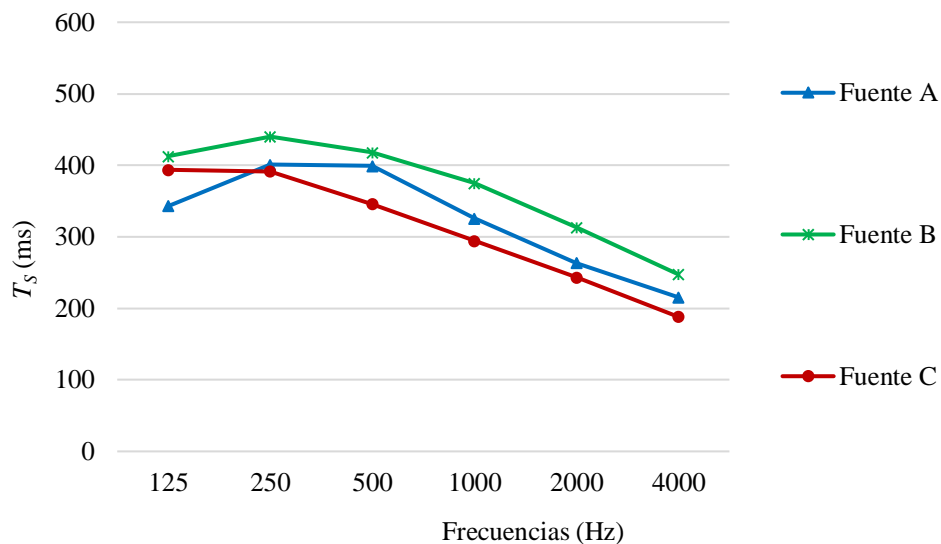


Figura 3.28. Promedio del tiempo central (T_S) según la ubicación de la fuente sonora.

Tabla 3.14. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo central (T_S).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
T_S (ms) Fuente A (altar mayor)	Promedio	323,32	381,10	378,95	305,85	243,49	195,44
	Des. típica	76,07	65,75	72,46	70,72	59,58	48,84
	Máximo	514,00	541,00	541,00	442,00	386,00	305,00
	Mínimo	231,00	298,00	283,00	215,00	159,00	117,00
T_S (ms) Fuente B (coro)	Promedio	352,39	380,12	358,10	314,98	253,15	187,49
	Des. típica	65,56	59,84	54,31	48,33	38,02	33,23
	Máximo	414,43	570,00	529,00	465,00	388,00	317,00
	Mínimo	305,00	349,00	337,00	290,00	253,15	187,49
T_S (ms) Fuente C (púlpito)	Promedio	353,71	351,59	305,63	254,37	203,20	148,15
	Des. típica	67,71	88,60	93,63	80,91	68,97	60,05
	Máximo	521,00	547,00	465,00	400,00	326,00	265,00
	Mínimo	268,00	223,00	182,00	176,00	105,00	68,00

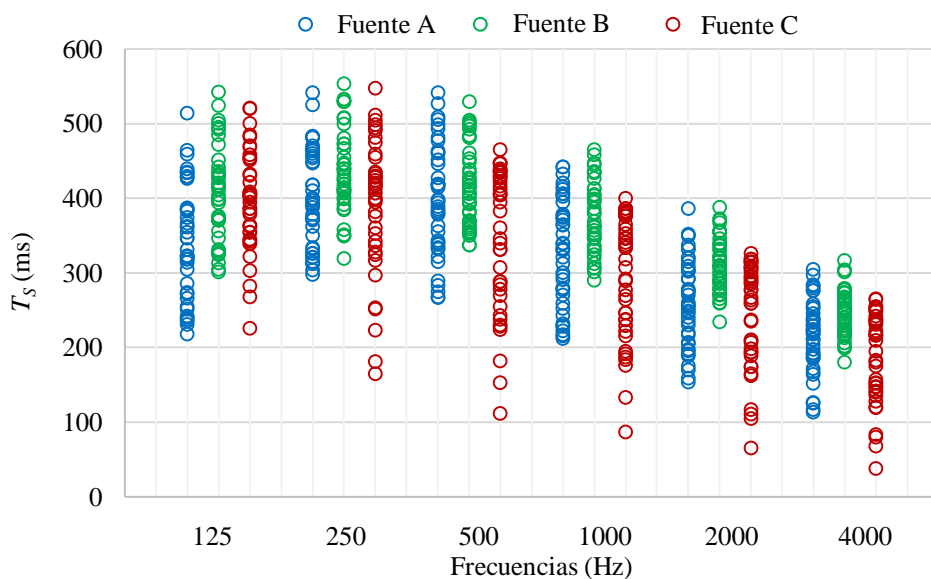


Figura 3.29. Dispersión del tiempo central (T_S) en función de la ubicación del receptor.

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único del tiempo central ($T_{S,mid}$) para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la claridad del sonido percibida por los oyentes. En la Tabla 3.15, se indica el promedio del parámetro $T_{S,mid}$. Los resultados obtenidos muestran que se trata de un recinto con una baja claridad del sonido percibida por los oyentes.

En las Figuras 3.30-3.32, se ha representado la correlación entre el parámetro $T_{S,mid}$ y la distancia fuente-receptor. Para las tres posiciones de la fuente, se observa una alta correlación positiva (coeficientes de correlación entre 0,78 y 0,96). Con el aumento de la distancia fuente-receptor se produce un notable aumento de $T_{S,mid}$, es decir, disminuye la nitidez del sonido percibida por los oyentes. En las fuentes A y B, se observa un comportamiento similar en la nave principal, la nave lateral y el transepto. En la fuente C, se muestran variaciones según la zona analizada, mostrándose un mayor aumento $T_{S,mid}$ en función de la distancia fuente-receptor en el transepto izquierdo. El diferente comportamiento acústico en ambos transeptos se deriva de la posición asimétrica de la fuente C.

Tabla 3.15. Promedio del parámetro $T_{S,mid}$ para las tres ubicaciones de la fuente sonora.

Fuente sonora	A (altar mayor)	B (coro)	C (púlpito)
$T_{S,mid}$ (ms)	342,40	396,54	279,98

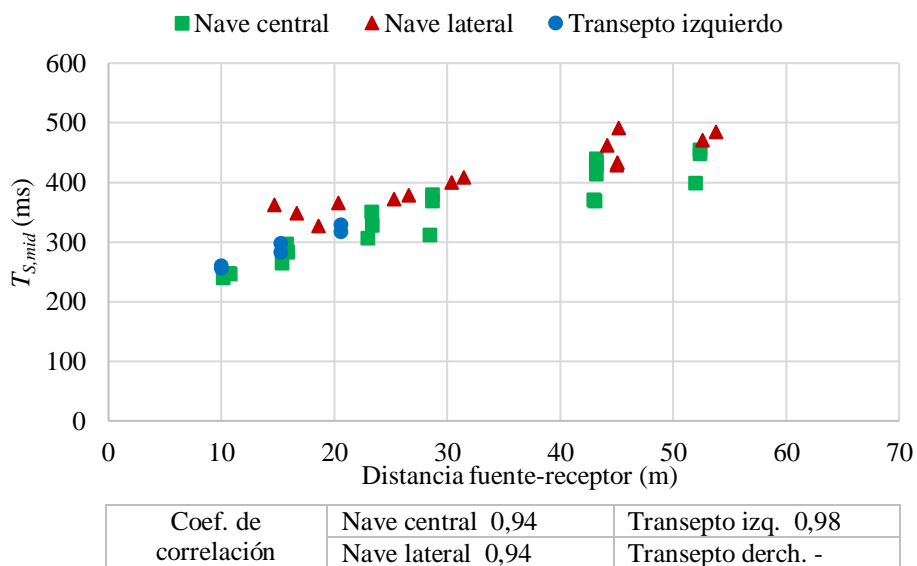


Figura 3.30. Correlación entre el tiempo central (T_S) y la distancia fuente-receptor (fuente A, altar mayor).

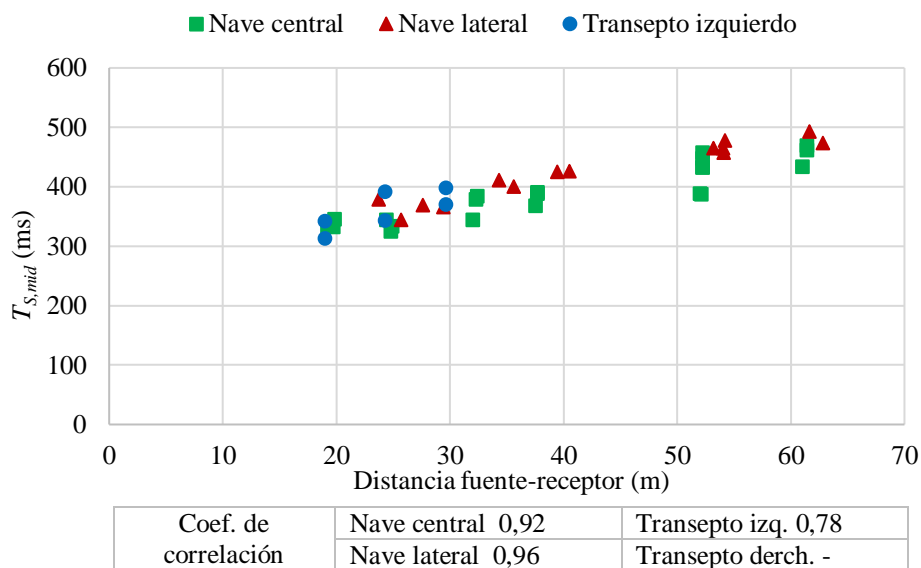


Figura 3.31. Correlación entre el tiempo central (T_s) y la distancia fuente-receptor (fuente B, coro).

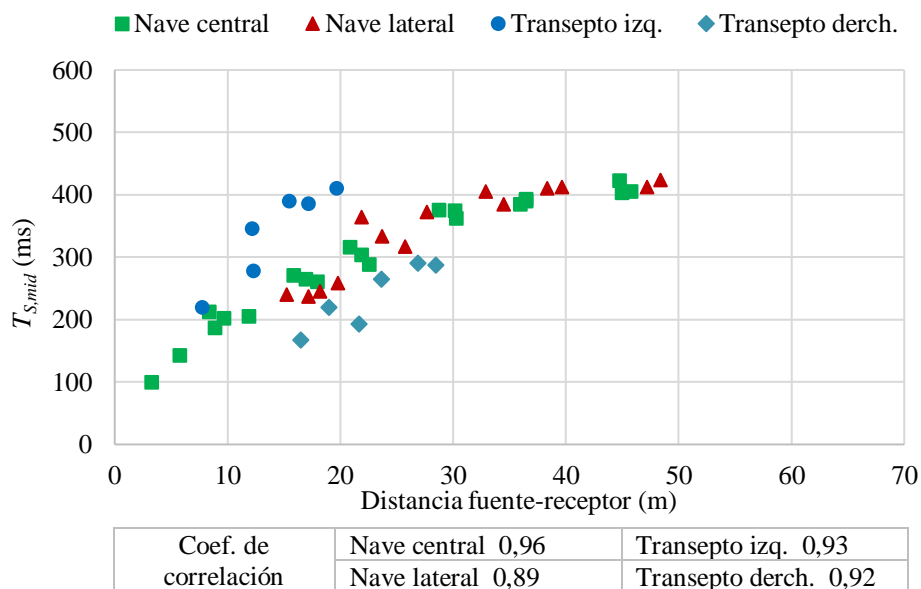


Figura 3.32. Correlación entre el tiempo central (T_s) y la distancia fuente-receptor (fuente C, púlpito).

En la Figura 3.33, se ha representado el modelo de Barron en comparación con los resultados experimentales obtenidos para el promediado en frecuencia de número único del tiempo central ($T_{S,mid}$). En la Tabla 3.18, se indica el promedio del error absoluto y el JND entre el modelo de Barron y los resultados obtenidos experimentalmente para $T_{S,mid}$. Los resultados muestran variaciones significativas entre los resultados teóricos y experimentales. Los mejores resultados se obtienen para la fuente A (altar) y C (púlpito), mientras que para la fuente B (coro) se aprecia una mayor disimilitud. A partir de los 30 m de distancia fuente-receptor, los valores experimentales en las tres posiciones de la fuente estudiadas parecen converger, pero se alejan del modelo teórico.

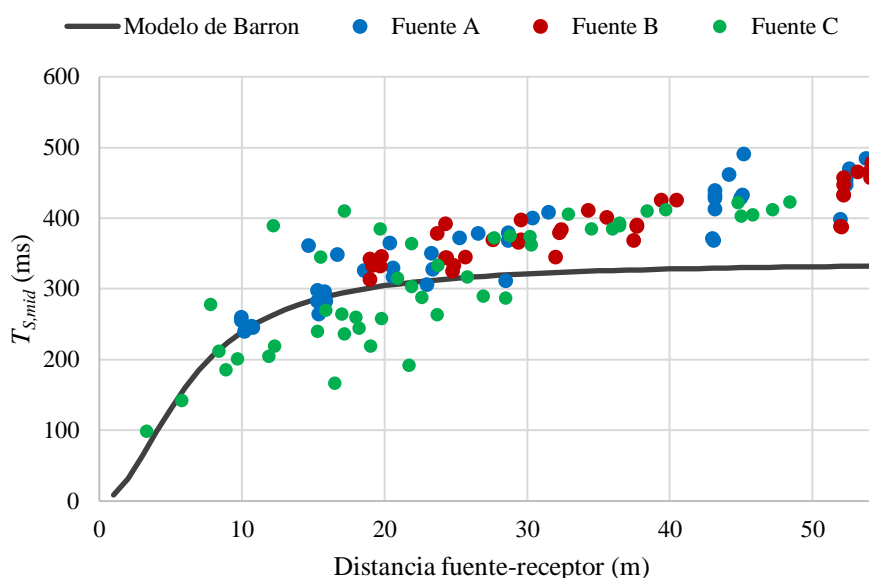


Figura 3.33. Comparativa del modelo de Barron con los resultados obtenidos experimentalmente para $T_{S,mid}$.

Tabla 3.16. Promedio del error absoluto y JND entre el modelo de Barron y los resultados obtenidos experimentalmente para $T_{S,mid}$.

A (altar mayor)		B (coro)		C (púlpito)	
Promedio error abs. (ms)	JND	Promedio error abs. (ms)	JND	Promedio error abs. (ms)	JND
58,58	5,86	70,32	7,03	55,97	5,60

3.1.3. Parámetros de espacialidad (LF y $1-IACC_E$).

3.1.3.1. Fracción de energía lateral (LF).

En la Figura 3.34, se muestra la variación del promedio de la fracción de energía lateral (LF) para las tres ubicaciones de la fuente sonora. No se observan variaciones significativas de este parámetro según la ubicación de fuente.

En la Tabla 3.17 se indica el promedio, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para la fracción de energía lateral (LF). En la Figura 3.35, se muestra la dispersión de la fracción de energía lateral en función de la ubicación del receptor para las tres posiciones de la fuente sonora. El análisis de los datos indica que se trata de un parámetro acústico que presenta variaciones significativas en función de la ubicación del receptor para las tres ubicaciones de la fuente.

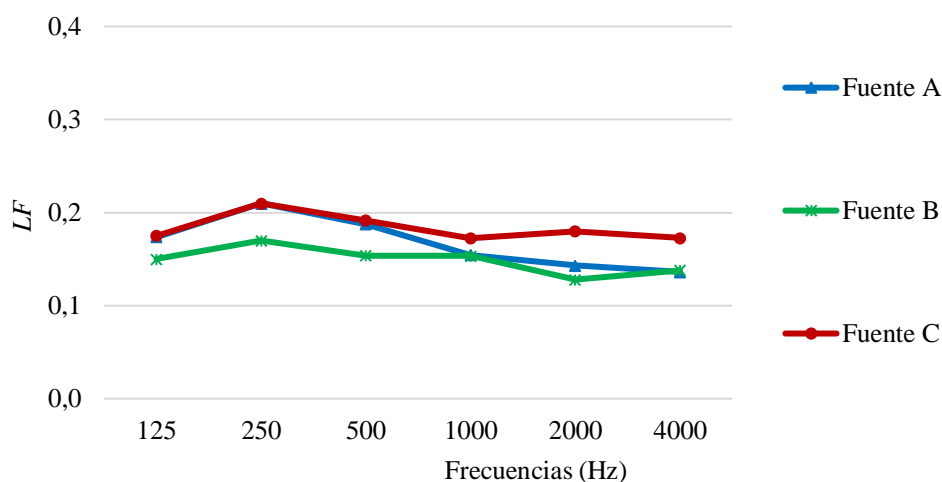
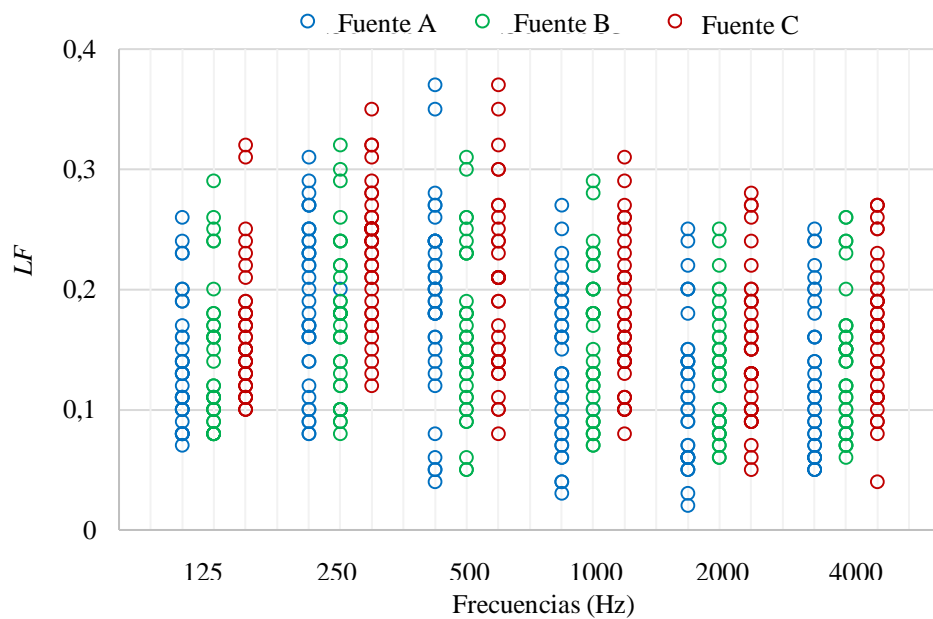


Figura 3.34. Promedio de la fracción de energía lateral (LF) según la ubicación de la fuente.

Tabla 3.17. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la fracción de energía lateral (LF).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
LF Fuente A (altar mayor)	Promedio	0,142	0,210	0,188	0,154	0,143	0,136
	Des. típica	0,05	0,07	0,08	0,07	0,06	0,06
	Máximo	0,27	0,31	0,38	0,32	0,25	0,25
	Mínimo	0,07	0,08	0,04	0,03	0,02	0,05
LF Fuente B (coro)	Promedio	0,150	0,170	0,154	0,153	0,128	0,138
	Des. típica	0,06	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05
	Máximo	0,29	0,32	0,31	0,29	0,25	0,26
	Mínimo	0,08	0,08	0,05	0,07	0,06	0,06
LF Fuente C (púlpito)	Promedio	0,18	0,21	0,19	0,17	0,18	0,17
	Des. típica	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06
	Máximo	0,32	0,35	0,37	0,31	0,28	0,27
	Mínimo	0,10	0,12	0,08	0,06	0,05	0,04

Figura 3.35. Dispersión de la fracción de energía lateral (LF) en función de la ubicación del receptor.

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único de la fracción de energía lateral (LF_{E4}) para las bandas de octava de 125 a 1000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en el ancho aparente de la fuente. En la Tabla 3.18, el promedio del parámetro LF_{E4} . Para la fuente C (púlpito), el valor de LF_{E4} alcanza el valor mínimo recomendable de 0,19 (Carrión Isbert, 1998). Para las fuentes A (altar mayor) y B (coro), el valor de LF_{E4} resulta ligeramente inferior al valor mínimo recomendable.

En las Figuras 3.36-3.38, se ha representado la correlación entre la distancia fuente-receptor y el promediado en frecuencia de número único para las bandas de octava de 125 a 1000 Hz de la fracción de energía lateral (LF_{E4}). No existe correlación significativa entre ambos parámetros (coeficientes de correlación entre -0,24 y 0,19). En general, en la nave lateral los valores del parámetro LF_{E4} son superiores respecto al resto de zonas analizadas, lo que implica una mayor sensación de espacialidad del sonido.

Tabla 3.18. Promedio del parámetro LF_{E4} según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A (altar mayor)	B (coro)	C (púlpito)
LF_{E4}	0,18	0,16	0,19

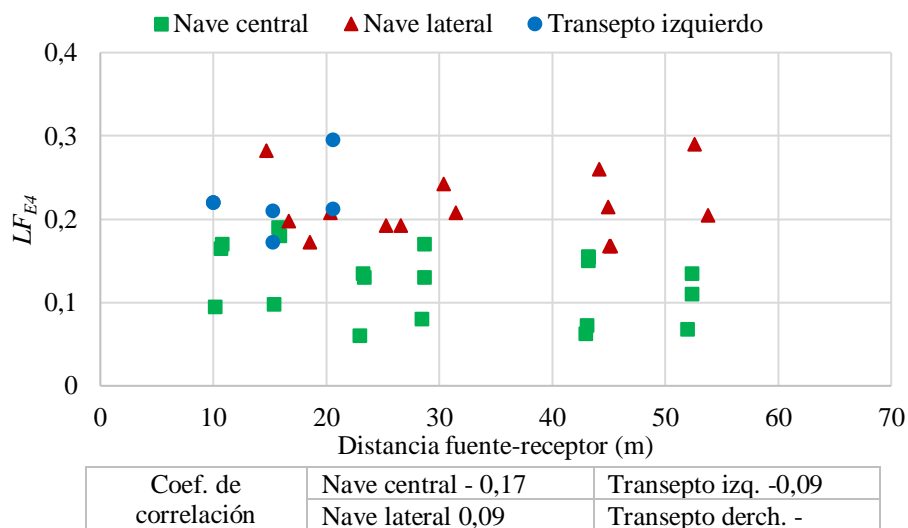


Figura 3.36. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el promediado en frecuencia de número único de la fracción de energía lateral (LF_{E4}) para la fuente A (altar mayor).

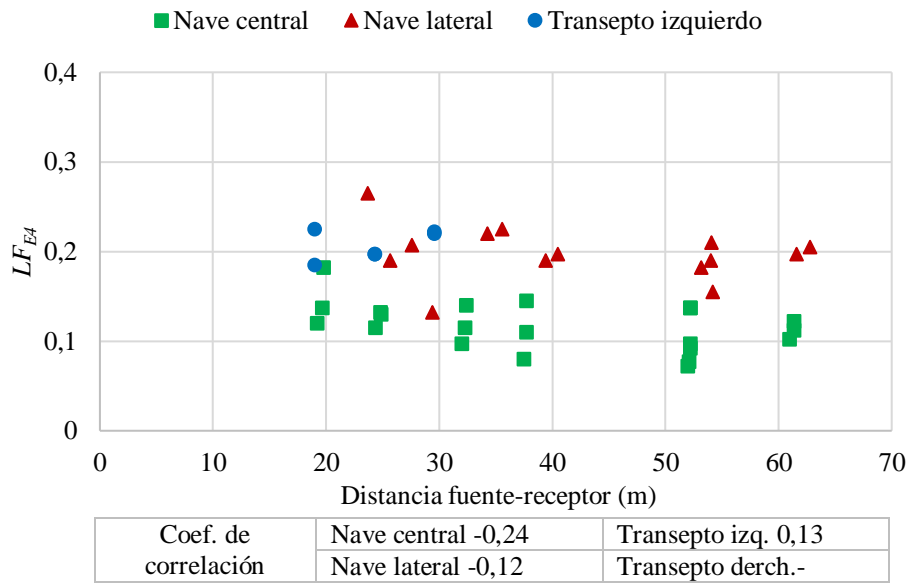


Figura 3.37. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el parámetro LF_{E4} para la fuente B (coro).

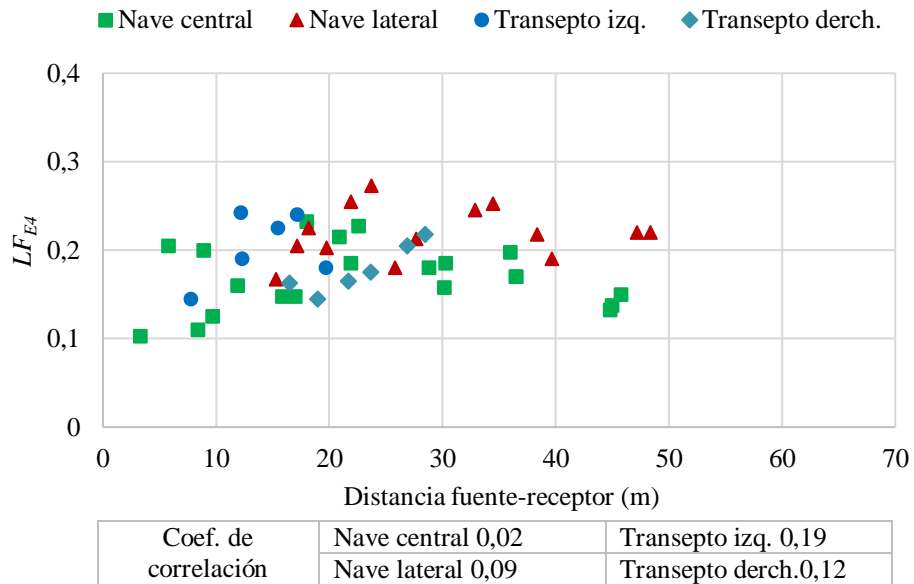


Figura 3.38. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el promediado en frecuencia de número único de la fracción de energía lateral (LF_{E4}) para la fuente C (pulpito).

3.1.3.2. Índice de calidad binaural ($I-IACC_E$).

En la Figura 3.39, se muestra la variación del índice de calidad binaural ($I-IACC_E$) para las tres ubicaciones de la fuente sonora. A bajas y medias frecuencias, no se observan variaciones significativas según la ubicación de fuente, mientras que a altas frecuencias se observa una ligera variación. Para las tres posiciones de la fuente, se observa un notable incremento del parámetro $I-IACC_E$ con el aumento de la frecuencia, es decir, la espacialidad del sonido es mayor cuanto mayor es la frecuencia.

En la Tabla 3.19, se indica el promedio, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para el parámetro $I-IACC_E$. En la Figura 3.40, se muestra la dispersión de la magnitud $I-IACC_E$ en función de la ubicación del receptor para las tres posiciones de la fuente sonora. El análisis de los datos indica que se trata de un parámetro acústico que presenta importantes variaciones en función de la ubicación del receptor, especialmente a medias y altas frecuencias.

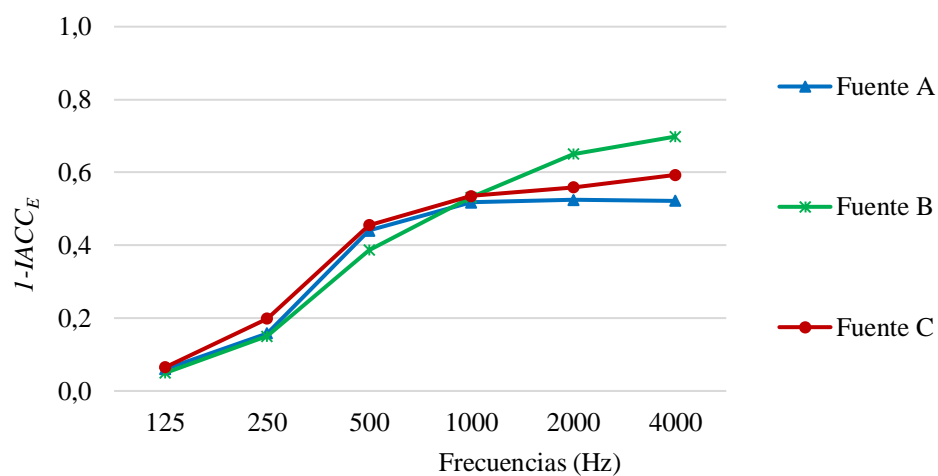
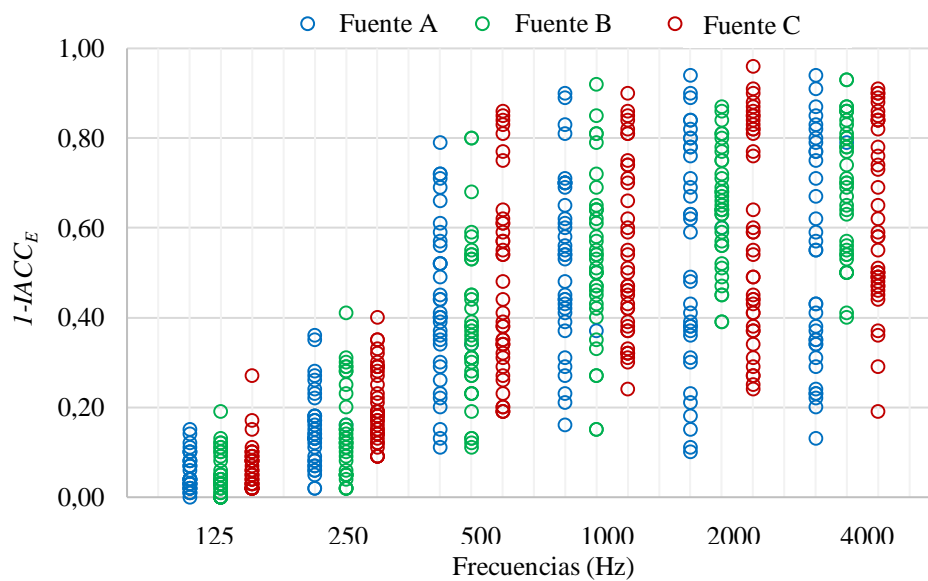


Figura 3.39. Promedio del índice de calidad binaural ($I-IACC_E$) según la ubicación de la fuente sonora.

Tabla 3.19. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el parámetro $1-IACC_E$.

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
$1-IACC_E$ Fuente A (altar mayor)	Promedio	0,06	0,16	0,44	0,52	0,52	0,52
	Des. típica	0,05	0,10	0,20	0,20	0,26	0,25
	Máximo	0,30	0,50	0,79	0,90	0,94	0,94
	Mínimo	0,01	0,02	0,15	0,16	0,11	0,13
$1-IACC_E$ Fuente B (coro)	Promedio	0,05	0,15	0,39	0,53	0,65	0,70
	Des. típica	0,05	0,10	0,19	0,19	0,15	0,16
	Máximo	0,19	0,41	0,80	0,92	0,94	0,95
	Mínimo	0,00	0,02	0,05	0,15	0,33	0,37
$1-IACC_E$ Fuente C (púlpito)	Promedio	0,06	0,20	0,46	0,53	0,56	0,59
	Des. típica	0,07	0,20	0,46	0,54	0,56	0,59
	Máximo	0,07	0,20	0,46	0,54	0,57	0,60
	Mínimo	0,06	0,20	0,47	0,54	0,57	0,60

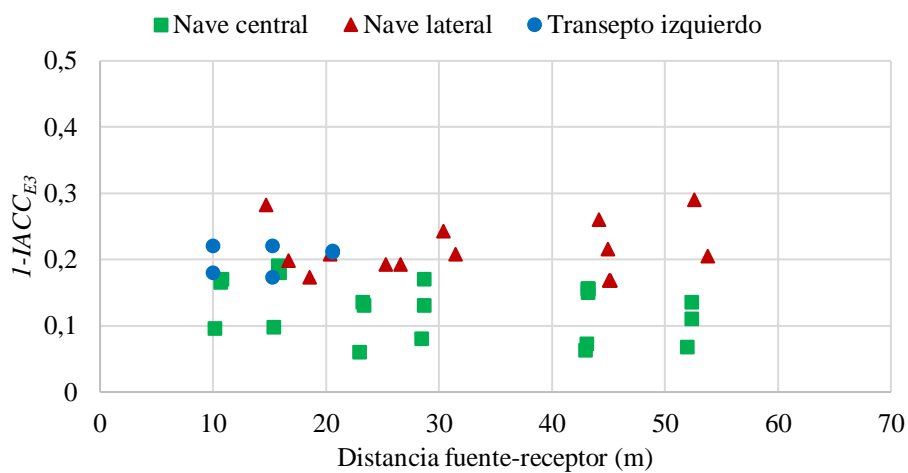
Figura 3.40. Dispersión del índice de calidad baural ($1-IACC_E$) en función de la ubicación del receptor.

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único del índice de calidad biaural ($I-IACC_{E3}$) para bandas de octava de 500 a 2000 Hz, debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la espacialidad sonora percibida por los oyentes. En la Tabla 3.20, se indican los resultados promedio de dicha magnitud para las tres ubicaciones de la fuente sonora. Según los resultados obtenidos, el recinto presenta una elevada espacialidad del sonido.

En las Figuras 3.41-3.43, se ha representado la correlación entre el parámetro $I-IACC_{E3}$ y la distancia fuente-receptor. No existe correlación significativa entre ambos parámetros (coeficientes de correlación entre -0,33 y 0,25). En general, en la nave lateral los valores de la magnitud $I-IACC_{E3}$ son superiores respecto al resto de zonas analizadas, lo que implica una mayor sensación de espacialidad del sonido.

Tabla 3.20. Promedio del índice de calidad biaural ($I-IACC_E$) para las tres ubicaciones de la fuente sonora.

Fuente sonora	A (altar mayor)	B (coro)	C (púlpito)
$I-IACC_{E3}$	0,49	0,52	0,52



Coef. de correlación	Nave central -0,26	Transepto izq. 0,17
	Nave lateral -0,33	Transepto derch. -

Figura 3.41. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el índice de calidad biaural ($I-IACC_E$) para la fuente A (altar mayor).

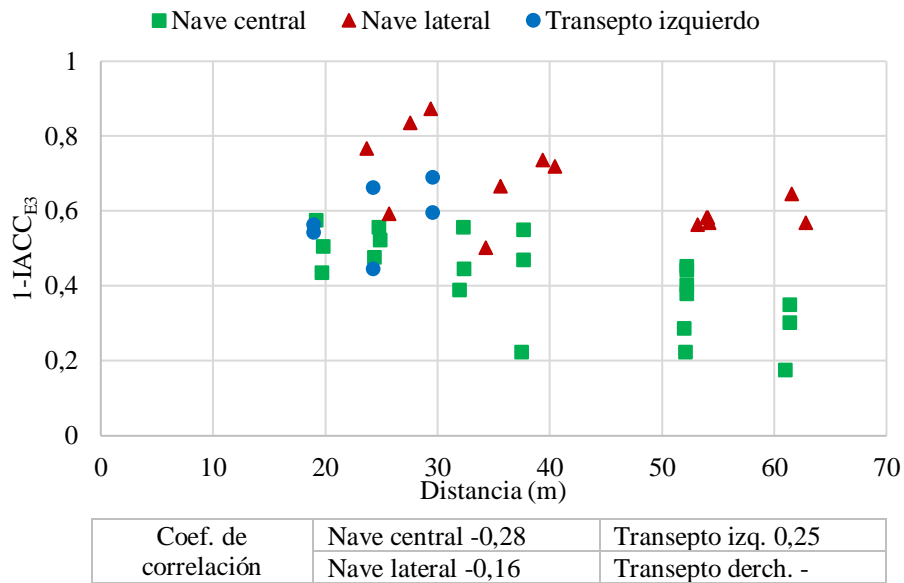


Figura 3.42. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el índice de calidad biaural ($1 - IACC_E$) para la fuente C (púlpito).

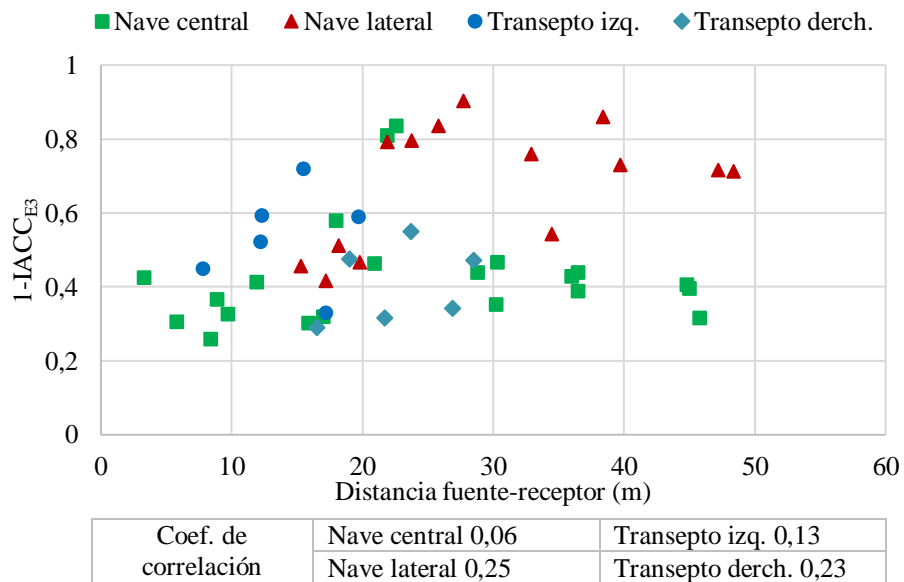


Figura 3.43. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el índice de calidad biaural ($1 - IACC_E$) para la fuente C (púlpito)

3.1.3. Parámetros de inteligibilidad (STI)

3.1.4.1. Índice de transmisión del habla (STI).

En la Tabla 3.21, se indica el promedio del índice de transmisión del habla (*STI*) para las tres ubicaciones de la fuente sonora. Los resultados obtenidos indican una inteligibilidad de la palabra pobre ($0,30 \leq STI < 0,45$) en el recinto estudiado. Los peores valores de inteligibilidad se observan con la fuente B (coro), mientras que los mejores con la fuente C (púlpito).

Tabla 3.21. Promedio de parámetro *STI* para las tres ubicaciones de la fuente sonora.

Fuente sonora	A (altar mayor)	B (coro)	C (púlpito)
<i>STI</i>	0,34	0,30	0,37

En las Figuras 3.44-3.46, se ha representado la correlación entre la distancia fuente-receptor y el parámetro *STI*. Para las tres posiciones de la fuente, se observa una alta correlación negativa (coeficientes de correlación entre -0,81 y -0,98). Con el aumento de la distancia fuente-receptor disminuye la inteligibilidad del habla. Para las fuentes A (altar mayor) y B (coro), se observan valores superiores del parámetro *STI* en la nave central y en el transepto. En cambio, en la fuente C (púlpito) se observa un comportamiento similar en las distintas zonas analizadas.

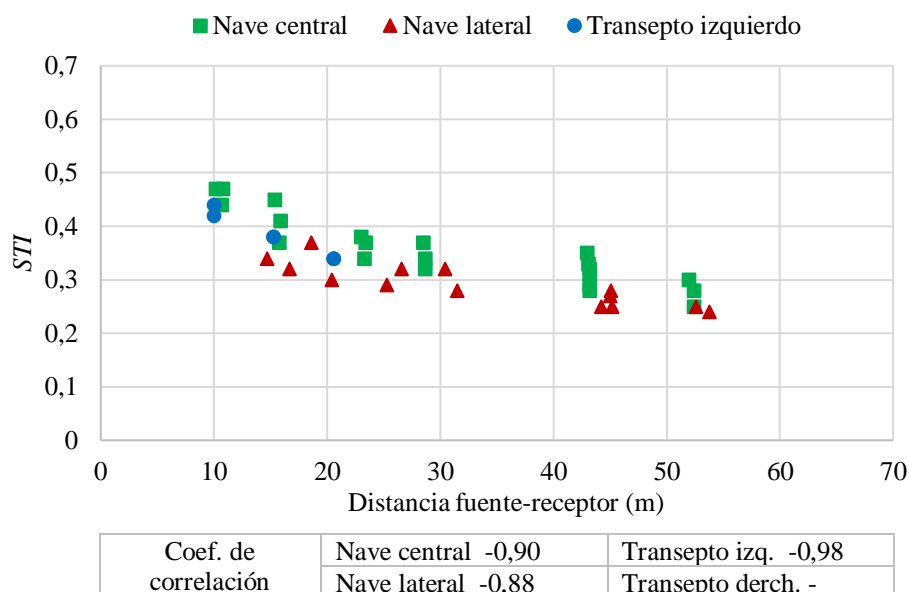


Figura 3.44. Correlación entre la distancia fuente-receptor y del índice de transmisión del habla (*STI*) para la fuente A (altar mayor).

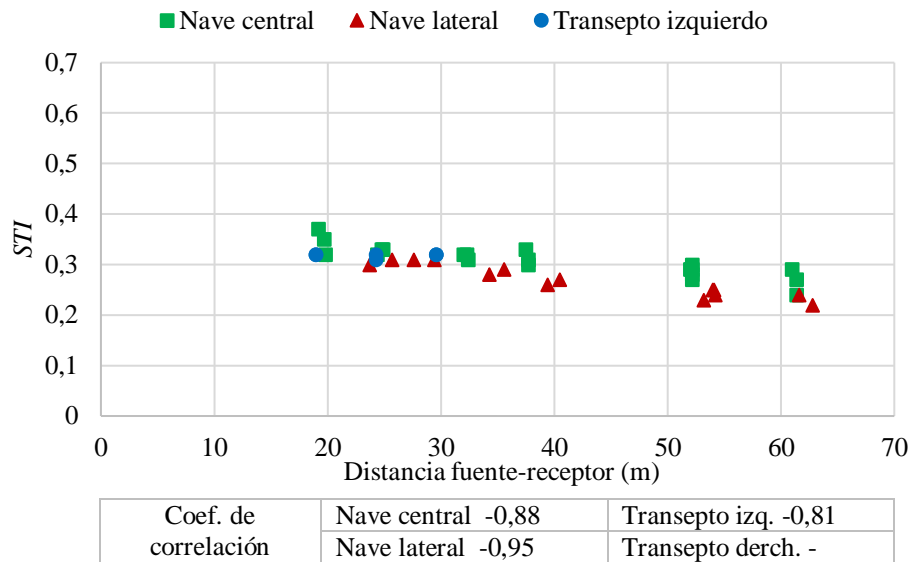


Figura 3.45. Correlación entre la distancia fuente-receptor y del índice de transmisión del habla (*STI*) para la fuente B (coro).

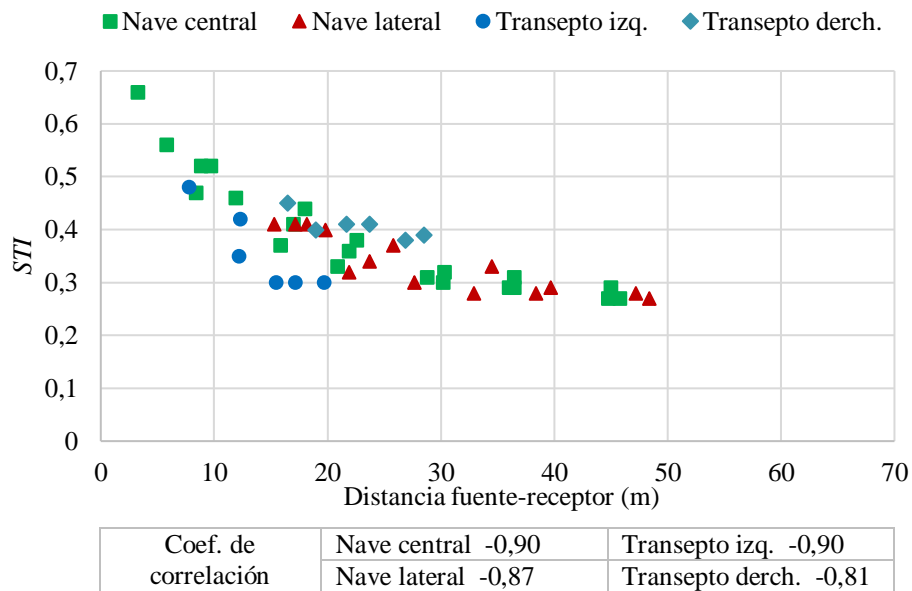


Figura 3.46. Correlación entre la distancia fuente-receptor y del índice de transmisión del habla (*STI*) para la fuente C (púlpito).

3.2. Determinación del tiempo de reverberación óptimo (T_{OP}).

El tiempo de reverberación óptimo (T_{OP}) para la Catedral de Valencia, considerando la sala ocupada, se ha determinado a partir de la Ecuación 1,

$$T_{OP} = k \cdot u \cdot i \cdot V^{1/3} \quad (1)$$

donde k es un coeficiente dependiente de la frecuencia, u es un coeficiente dependiente del uso del local, i es un coeficiente que tiene en cuenta la existencia o no de apoyo electroacústico y V es el volumen del recinto (Sendra et al., 1997).

En la Tabla 3.22 se indica el tiempo de reverberación óptimo para la Catedral de Valencia por frecuencias, calculado para la música religiosa ($T_{OP,m}$) y la palabra ($T_{OP,p}$), considerando un volumen de 55.925m^3 y un uso sin apoyo electroacústico. En la Figura 3.48, se muestra una comparativa entre el tiempo de reverberación óptimo y los resultados obtenidos en la medición acústica.

Tabla 3.22. Tiempo de reverberación óptimo para la música religiosa y la palabra.

F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
k	1,30	1,15	1,10	0,90	0,90	0,90
u_m	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
u_p	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
i	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$V(\text{m}^3)$	55.925	55.925	55.925	55.925	55.925	55.925
$T_{OP,m}(\text{s})$	4,97	4,40	3,82	3,44	3,44	3,44
$T_{OP,p}(\text{s})$	3,73	3,30	2,87	2,58	2,58	2,58

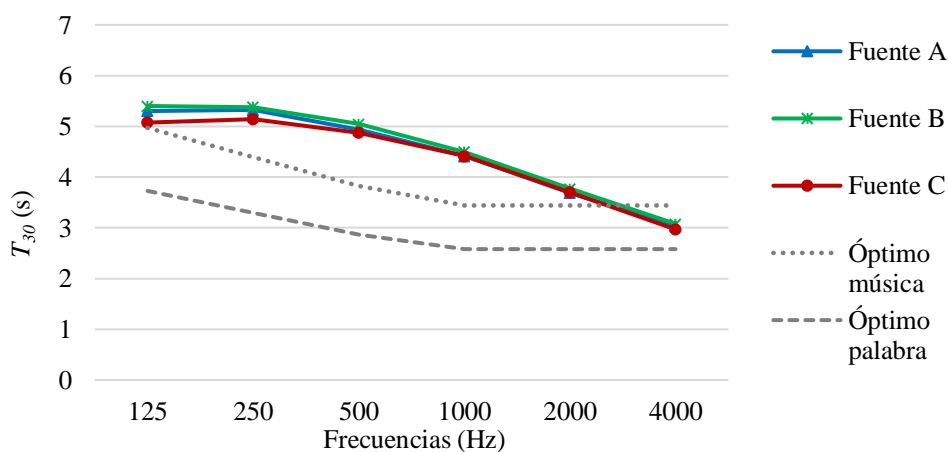


Figura 3.47. Comparativa del tiempo de reverberación medido y óptimo (Sendra et al., 1997).

3.3. Calibración del modelo acústico con *Odeon*.

En la Tabla 3.23, se indican los coeficientes de absorción aplicados en el proceso de calibración a cada una de las capas según los materiales reales. Para determinar los coeficientes de absorción se ha partido de los resultados obtenidos en ensayos experimentales normalizados (Bork, 2005; Vörländer, 2008; Cox & D'Antonio, 2009; Martellotta F. , 2009), realizando las adaptaciones necesarias durante el proceso de calibración acústica.

Tabla 3.23. Coeficientes de absorción por frecuencias de los materiales utilizados en la simulación acústica con *Odeon*.

Revestimientos	Coeficientes de absorción por frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Mampostería de piedra ¹	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Pavimento de mármol ²	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Estuco ²	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05
Puerta de madera ²	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Bancos de madera sin audiencia ²	0,05	0,08	0,10	0,12	0,12	0,12
Bancos de madera con audiencia ²	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87
Vidrieras ³	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04
Retablo ⁴	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Bóvedas ⁵	0,32	0,30	0,30	0,30	0,27	0,10
Promedio ábside ⁵	0,27	0,27	0,25	0,25	0,17	0,16

¹ Bork (2005).

² Vörländer (2008).

³ Cox and D'Antonio (2009).

⁴ Martellotta (2009).

⁵ Ajustado durante el proceso de calibración.

En la Tabla 3.24, se indican los coeficientes de dispersión aplicados en el proceso de calibración a cada una de las capas según los materiales reales. Se han establecido tres niveles según la rugosidad de los materiales y el grado de detalle de la decoración. Los valores de los coeficientes de dispersión se han ajustado durante el proceso de calibración acústica.

Tabla 3.24. Coeficientes de dispersión utilizados en la simulación acústica con *Odeon*.

Material	Dispersión
Rugosidad baja / nivel de detalle bajo ¹	0,10
Rugosidad media / nivel de detalle medio ¹	0,25
Rugosidad alta / nivel de detalle alto ¹	0,50

¹ Ajustado durante el proceso de calibración.

Para la calibración del modelo acústico se ha analizado el umbral diferencial del tiempo de reverberación (T_{30}), el tiempo de caída inicial (EDT), la fuerza sonora (G), la claridad musical (C_{80}), la claridad para la palabra (C_{50}), el tiempo central (T_s) y el índice de fracción de energía lateral (LF). En la Tabla 3.25, se indican los valores de JND tomados en consideración para los distintos parámetros acústicos analizados.

Tabla 3.25. Valores de JND empleados para las distintas magnitudes acústicas.

Cualidad subjetiva	Parámetro acústico	Promediado en frecuencia de número único ²	Umbral Diferencial, JND
Reverberación percibida	Tiempo de reverberación, (T_{30}) ¹	500 a 1000	Rel. 5% ³
	Tiempo de caída inicial, (EDT)	500 a 1000	Rel. 5% ³
Nivel sonoro subjetivo	Fuerza sonora (G)	500 a 1000	1 dB ³
Claridad del sonido percibida	Claridad musical (C_{80})	500 a 1000	2,5 dB ⁴
	Claridad para la palabra (C_{50})	500 a 1000	2,5 dB ⁴
	Tiempo central (T_s)	500 a 1000	10 ms ³
Amplitud aparente de la fuente	Fracción de energía lateral (LF)	125 a 1000	0,05 ³

¹ Parámetro utilizado para la calibración del modelo acústico.

² Media aritmética para bandas de octava.

³ UNE-EN ISO 3382-1.

⁴ R. Höhne y G. Stroth (1995).

En la Tabla 3.26, se indican los valores de *JND* de la simulación acústica con *Odeon*, calculados a partir de los valores promedio con la fuente A (altar mayor). Para el tiempo de reverberación, (T_{30}) y el tiempo de caída inicial (*EDT*), el error relativo entre la medición y la simulación no supera el 5% (número de *JND* < 1). Con ello, queda garantizado que las diferencias en la reverberación percibida no son perceptibles para el oído humano. Para la fuerza sonora, *G*, el número de *JND* resulta ligeramente superior a la unidad, con lo que se puede estimar que existe una pequeña variación del nivel sonoro subjetivo entre la simulación y el edificio real. Para la claridad musical, C_{80} , la claridad de la voz, C_{50} , y el tiempo central, T_s , los números de *JND* son inferiores a la unidad. Con ello, se puede estimar que la diferencia de la claridad del sonido percibida entre la simulación y el edificio real no es perceptible para el oído humano. Para la fracción de energía lateral (*LF*) el número de *JND* es inferior a la unidad, con lo que se puede determinar que la diferencia del ancho aparente de la fuente entre la simulación y el edificio real no es perceptible para el oído humano.

Tabla 3.26. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *Odeon* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente A (altar mayor).

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición	Promedio simulación	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	4,67 ³	4,72 ³	0,04	0,92	0,18
<i>EDT</i> (s)	Rel. 5% ¹	4,54 ³	4,60 ³	0,06	1,43	0,29
<i>G</i> (dB)	1 dB ¹	9,07 ³	10,35 ³	1,28	14,11	1,28
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	-5,89 ³	-4,65 ³	1,24	21,05	0,50
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	-7,98 ³	-7,38 ³	0,60	7,52	0,24
T_s (ms)	10 ms ¹	342,40 ³	351,26 ³	8,85	2,58	0,89
<i>LF</i>	0,05 ¹	0,177 ⁴	0,183 ⁴	0,006	3,39	0,11

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

⁴ Promediado en frecuencias de 125 a 1000 Hz.

En la Tabla 3.27, se indican los valores de *JND* de la simulación acústica con *Odeon*, calculados a partir de los valores promedio con la fuente B (coro). Para el tiempo de reverberación, (T_{30}) y el tiempo de caída inicial (*EDT*), el error relativo entre la medición y la simulación no supera el 5% (número de *JND* < 1). Con ello, queda garantizado que las diferencias en la reverberación percibida no son

perceptibles para el oído humano. Para la fuerza sonora, G , el número de JND resulta inferior a la unidad, con lo que se puede determinar que la variación del nivel sonoro subjetivo entre la simulación y el edificio real no es perceptible para el oído humano. Para la claridad musical, C_{80} y el tiempo central, T_s , los números de JND son inferiores a la unidad, mientras que para la claridad de la voz, C_{50} , es ligeramente superior a la unidad. Con ello, se puede estimar que la diferencia de la claridad del sonido percibida entre la simulación y el edificio real es mínima. Para la fracción de energía lateral (LF) el número de JND es inferior a la unidad, con lo que se puede determinar que la diferencia del ancho aparente de la fuente entre la simulación y el edificio real no es perceptible para el oído humano.

Tabla 3.27. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con *Odeon* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente B (coro)

Parámetro acústico	Umbral diferencial JND	Promedio medición	Promedio simulación	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de JND
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	4,74 ³	4,78 ³	0,03	0,64	0,13
EDT (s)	Rel. 5% ¹	4,66 ³	4,49 ³	0,17	3,76	0,75
G (dB)	1 dB ¹	10,25 ³	9,70 ³	0,55	5,37	0,55
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	-8,35 ³	-6,80 ³	1,55	18,56	0,62
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	-11,76 ³	-8,79 ³	2,96	25,17	1,19
T_s (ms)	10 ms ¹	396,54 ³	387,50 ³	9,04	2,28	0,90
LF	0,05 ¹	0,157 ⁴	0,166 ⁴	0,009	5,73	0,18

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

⁴ Promediado en frecuencias de 125 a 1000 Hz.

En la Tabla 3.28, se indican los valores de JND de la simulación acústica con *Odeon*, calculados a partir de los valores promedio con la fuente C (púlpito). Para el tiempo de reverberación, (T_{30}) y el tiempo de caída inicial (EDT), el error relativo entre la medición y la simulación no supera el 5% (número de $JND < 1$). Con ello, queda garantizado que las diferencias en la reverberación percibida no son perceptibles para el oído humano. Para la fuerza sonora, G , el número de JND resulta inferior a la unidad, con lo que se puede determinar que la variación del nivel sonoro subjetivo entre la simulación y el edificio real no es perceptible para el oído humano. Para la claridad musical, C_{80} , la claridad de la voz, C_{50} , y el tiempo central, T_s , los

números de JND son inferiores a la unidad. Con ello, se puede estimar que la diferencia de la claridad del sonido percibida entre la simulación y el edificio real no es perceptible para el oído humano. Para la fracción de energía lateral (LF) el número de JND es inferior a la unidad, con lo que se puede determinar que la diferencia del ancho aparente de la fuente entre la simulación y el edificio real no es perceptible para el oído humano

Tabla 3.28. Umbrales Diferenciales, JND, del modelo acústico para la fuente C (púlpito).

Parámetro acústico	Umbral diferencial JND	Promedio medición	Promedio simulación	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de JND
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	4,65 ³	4,66 ³	0,01	0,30	0,06
EDT (s)	Rel. 5% ¹	4,53 ³	4,38 ³	0,15	3,32	0,66
G (dB)	1 dB ¹	12,35 ³	12,05 ³	0,3	2,43	0,3
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	-3,28 ³	-3,20 ³	0,08	2,44	0,03
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	-4,34 ³	-4,00 ³	0,34	7,83	0,14
T_S (ms)	10 ms ¹	279,98 ³	271,08 ³	8,91	3,18	0,89
LF	0,05 ¹	0,187 ⁴	0,211 ⁴	0,023	12,30	0,46

En la Figura 3.48, se muestra una comparativa entre la medición acústica y la simulación acústica para las tres ubicaciones de la fuente sonora (A, B y C). Se han analizado los valores promedio obtenidos para el tiempo de reverberación (T_{30}), el tiempo de caída inicial (EDT), la claridad musical (C_{80}), la claridad para la palabra (C_{50}), el tiempo central (T_S), la fuerza sonora (G) y el índice de fracción de energía lateral (LF). Se observa un alto grado de similitud entre la medición y la simulación acústica para las tres posiciones de la fuente sonora. Con todo lo expuesto, se puede determinar que el modelo acústico tiene un comportamiento acústico similar al recinto real estudiado, resultado adecuada la calibración realizada.

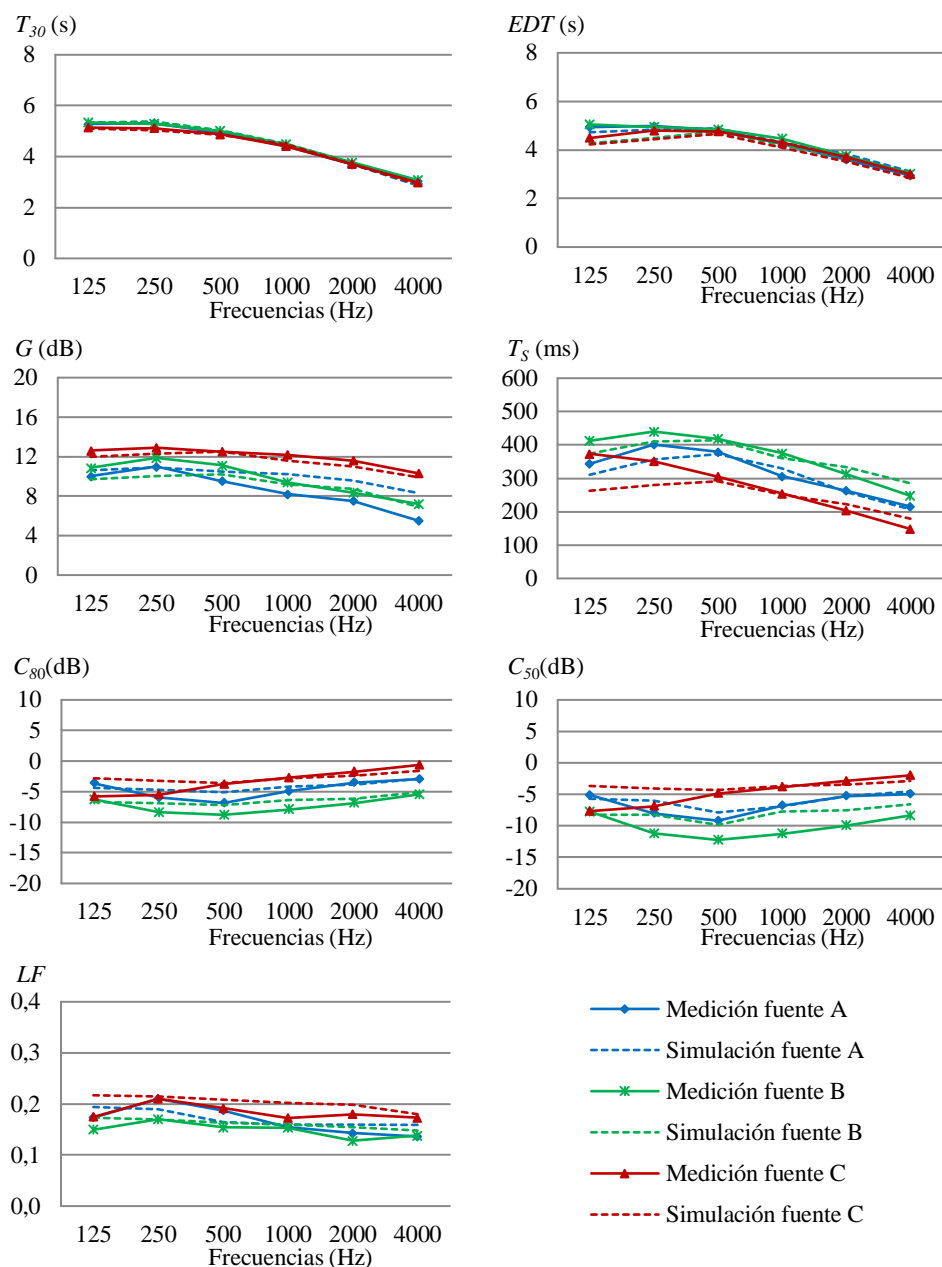


Figura 3.48. Comparativa entre la medición acústica y la simulación acústica para las tres ubicaciones de la fuente sonora (A, B y C)

3.4. Influencia de la presencia de audiencia en la acústica del recinto.

A través de simulaciones acústicas, se ha analizado la influencia de la audiencia en la acústica del templo. Para ello, se ha incorporado al modelo la absorción acústica de los bancos de madera con audiencia, tomando como referencia los resultados obtenidos en ensayos experimentales normalizados (Vörländer, 2008). En la Tabla 3.29, se indican los coeficientes de absorción por frecuencias aplicados a los bancos de madera con y sin audiencia en la simulación acústica. Se observa un aumento significativo de los coeficientes de absorción en el supuesto de sala ocupada, fundamentalmente a medias y altas frecuencias.

Tabla 3.29. Coeficientes de absorción por frecuencias aplicados a los bancos de madera con y sin audiencia en la simulación acústica con *Odeon*.

Revestimientos	Coeficientes de absorción por frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Bancos de madera sin audiencia ¹	0,05	0,08	0,10	0,12	0,12	0,12
Bancos de madera con audiencia ¹	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87

¹ Vörländer (2008).

En la Figura 3.49, se muestran los resultados obtenidos de los parámetros T_{30} , EDT , G , C_{80} , C_{50} , T_s y LF para las tres posiciones de la fuente sonora. Se observa que con la presencia de audiencia los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) y el tiempo de caída inicial (EDT) disminuyen, debido al aumento de la absorción acústica que genera la presencia de público. Con la disminución del tiempo de reverberación del recinto, se produce una ligera disminución de la fuerza sonora (G), estando dentro del rango típico para salas de audición. Los valores obtenidos para la claridad musical (C_{80}), la claridad de la voz (C_{50}) y el tiempo central (T_s) muestran una mejora en la claridad del sonido percibida con la presencia de público. Los cambios producidos en la fracción de energía lateral (LF) derivados de la presencia de audiencia no son significativos, resultado similar el ancho aparente de la fuente percibido por los oyentes.

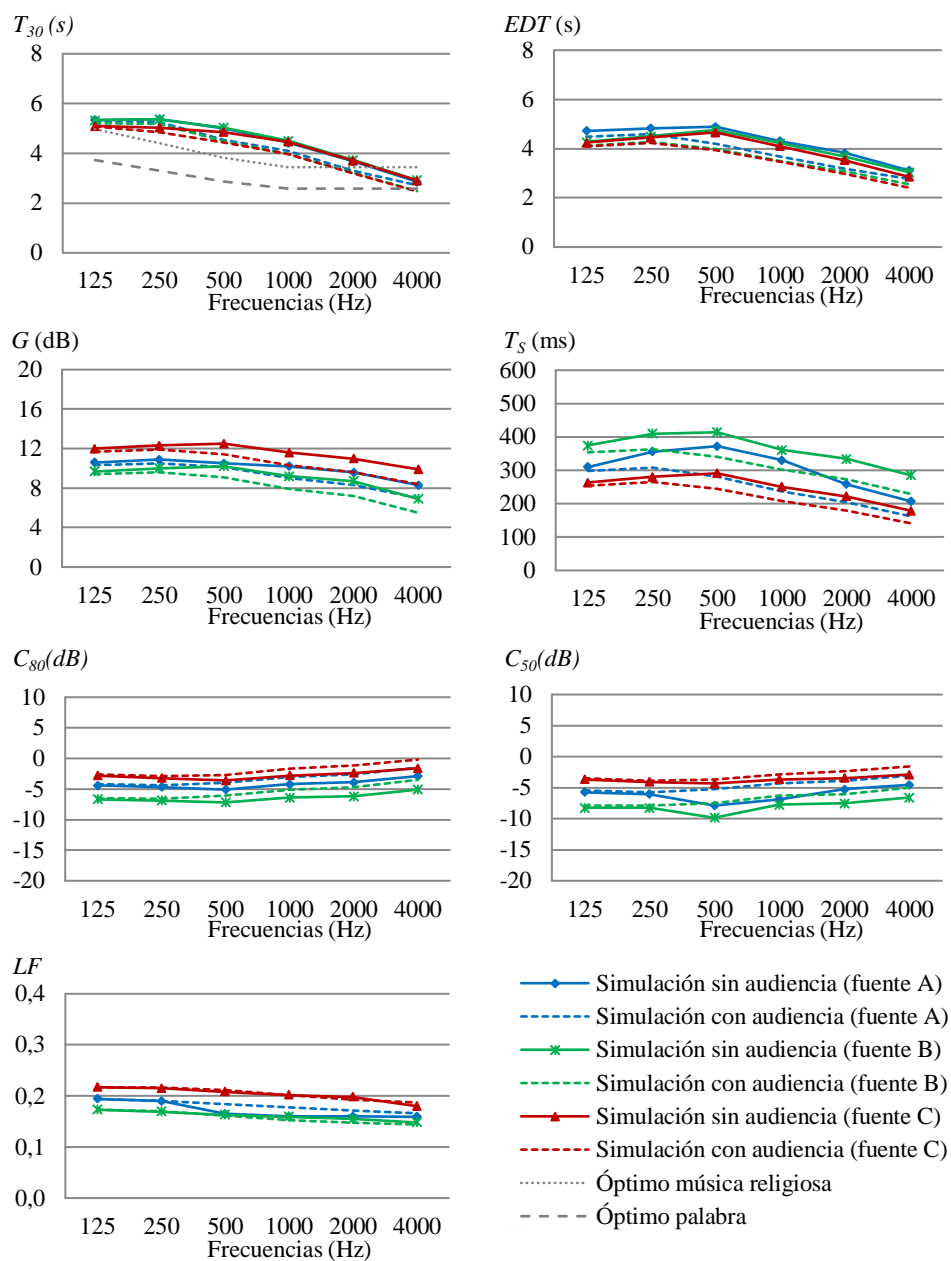


Figura 3.49. Comparativa del comportamiento acústico de la Catedral de Valencia con y sin audiencia para las tres posiciones de la fuente sonora (A, B y C)

3.5. Comparativa del comportamiento acústico (actualidad-1972).

A través de simulaciones acústicas, se ha realizado una comparativa entre el comportamiento acústico del templo en la actualidad y en 1972. En la Figura 3.50, se muestran los resultados obtenidos de los parámetros T_{30} , EDT , G , C_{80} , C_{50} , T_s y LF para las tres posiciones de la fuente sonora considerando la sala ocupada. Se observa que con las repristinaciones realizadas los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) y el tiempo de caída inicial (EDT) han disminuido, debido a que los revestimientos góticos presentan una mayor absorción acústica que los neoclásicos. El tiempo de reverberación se aproxima en mayor medida a los valores óptimos para la música religiosa y la palabra. Con la disminución del tiempo de reverberación del recinto, se produce una ligera disminución de la fuerza sonora (G), estando dentro del rango típico para salas de audición. Los valores obtenidos para la claridad musical (C_{80}) la claridad de la voz (C_{50}) y el tiempo central (T_s) muestran una mejora en la claridad del sonido percibida. Los cambios producidos en la fracción de energía lateral (LF) no son significativos, resultado similar el ancho aparente de la fuente percibido por los oyentes.

En la Tabla 3.30, se muestra una comparativa entre el parámetro STI y la clasificación de la inteligibilidad del habla en la actualidad y en 1972, considerando la sala ocupada. El análisis de los resultados muestra que se ha producido una mejora en la inteligibilidad del habla con las actuaciones realizadas derivada de una disminución del tiempo de reverberación del recinto. Con todo ello, sin tener en cuenta componentes históricos, artísticos o arquitectónicos, desde el punto de vista acústico las actuaciones realizadas resultan favorables.

Tabla 3.30. Comparativa del parámetro STI y la inteligibilidad del habla (actualidad-1972).

Fuente		Actualidad		1972	
		STI	Inteligibilidad	STI	Inteligibilidad
A (altar mayor)	Mínimo	0,27	Mala	0,25	Mala
	Máximo	0,56	Aceptable	0,54	Aceptable
	Promedio	0,41	Pobre	0,38	Pobre
B (coro)	Mínimo	0,27	Mala	0,24	Mala
	Máximo	0,48	Aceptable	0,44	Pobre
	Promedio	0,36	Pobre	0,34	Pobre
C (púlpito)	Mínimo	0,31	Pobre	0,28	Mala
	Máximo	0,85	Excelente	0,82	Excelente
	Promedio	0,46	Aceptable	0,44	Pobre

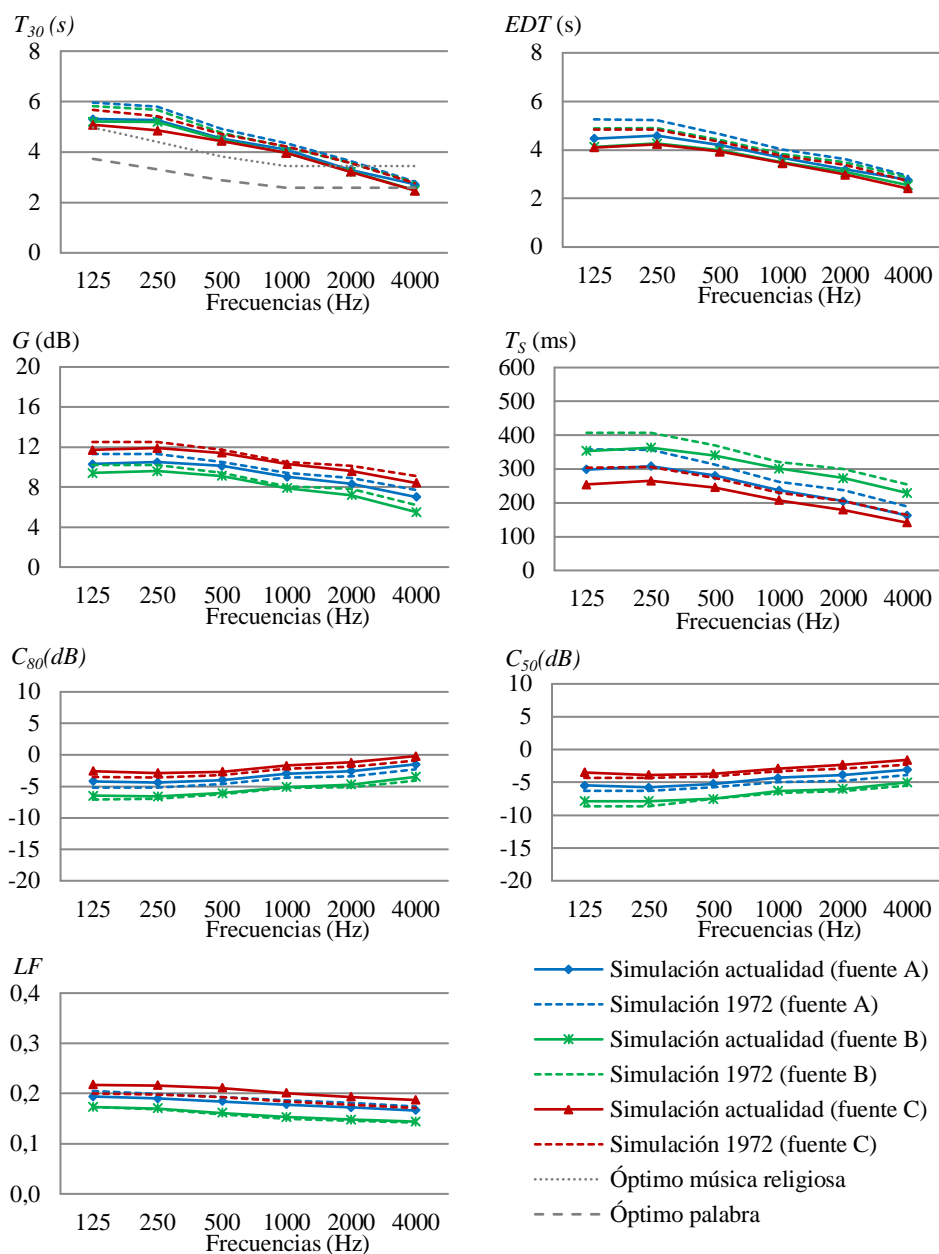


Figura 3.50. Comparativa del comportamiento acústico de la Catedral de Valencia (actualidad -1972) para las tres posiciones de la fuente sonora (A, B y C).

3.6. Propuesta de mejora del acondicionamiento acústico.

A partir del estudio del comportamiento acústico de la Catedral de Valencia, se ha realizado una propuesta de mejora acústica. Al tratarse de un edificio patrimonial protegido, la propuesta de mejora está limitada y no es posible alterar los actuales revestimientos ni la configuración espacial del recinto. Teniendo en cuenta estos condicionantes, el objetivo de la propuesta de mejora del acondicionamiento acústico se ha centrado en aumentar la absorción acústica del recinto con el objetivo obtener un tiempo de reverberación a frecuencias de 500 a 1000 Hz ($T_{30,mid}$) próximo a los valores óptimos para la música religiosa y la palabra.

Tomando como base el respeto a los actuales valores artísticos y arquitectónicos del templo, la propuesta de mejora del acondicionamiento acústico se ha limitado a la incorporación de elementos textiles ornamentales reversibles con alto grado de absorción acústica. A partir de simulaciones acústicas, se ha realizado un diseño de la ubicación óptima de los elementos textiles. En la Tabla 3.31, se muestran los coeficientes de absorción por frecuencias de los revestimientos reversibles propuestos.

Tabla 3.31. Coeficientes de absorción por frecuencias de los textiles incorporados en las propuestas de mejora acústica.

Revestimientos	Coeficientes de absorción por frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Alfombra/ moqueta ¹	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54
Textiles suspendidos ¹	0,05	0,12	0,35	0,45	0,38	0,36

¹ Vörländer (2008).

En la propuesta de mejora para la música religiosa, se ha optado por incorporar moqueta sobre el pavimento de mármol del altar mayor, elemento con una gran influencia en la acústica del templo por su proximidad a la fuente de emisión sonora. Asimismo, se ha propuesto la instalación de elementos textiles decorativos suspendidos a lo largo de la nave central. En la propuesta de mejora para la palabra, además de lo indicado, se propone la incorporación de alfombras a lo largo de la nave central y las naves laterales. En las Figuras 51 y 52, se muestra la propuesta de distribución en planta y alzado de los elementos textiles para los usos específicos de música religiosa (mejora A) y la palabra (mejora B).

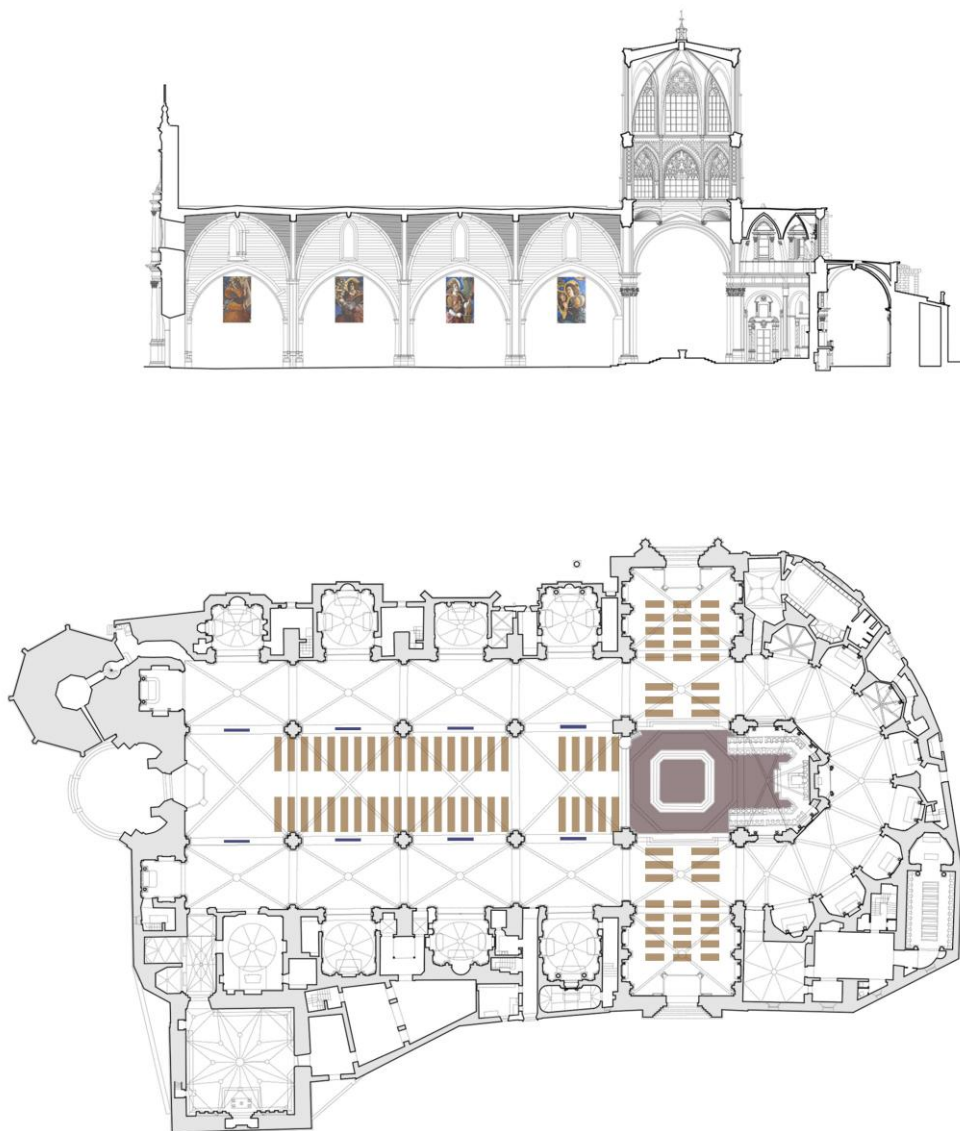


Figura 3.51. Ubicación en planta y alzado de los elementos textiles decorativos en la mejora del acondicionamiento acústico para la música religiosa (mejora A).

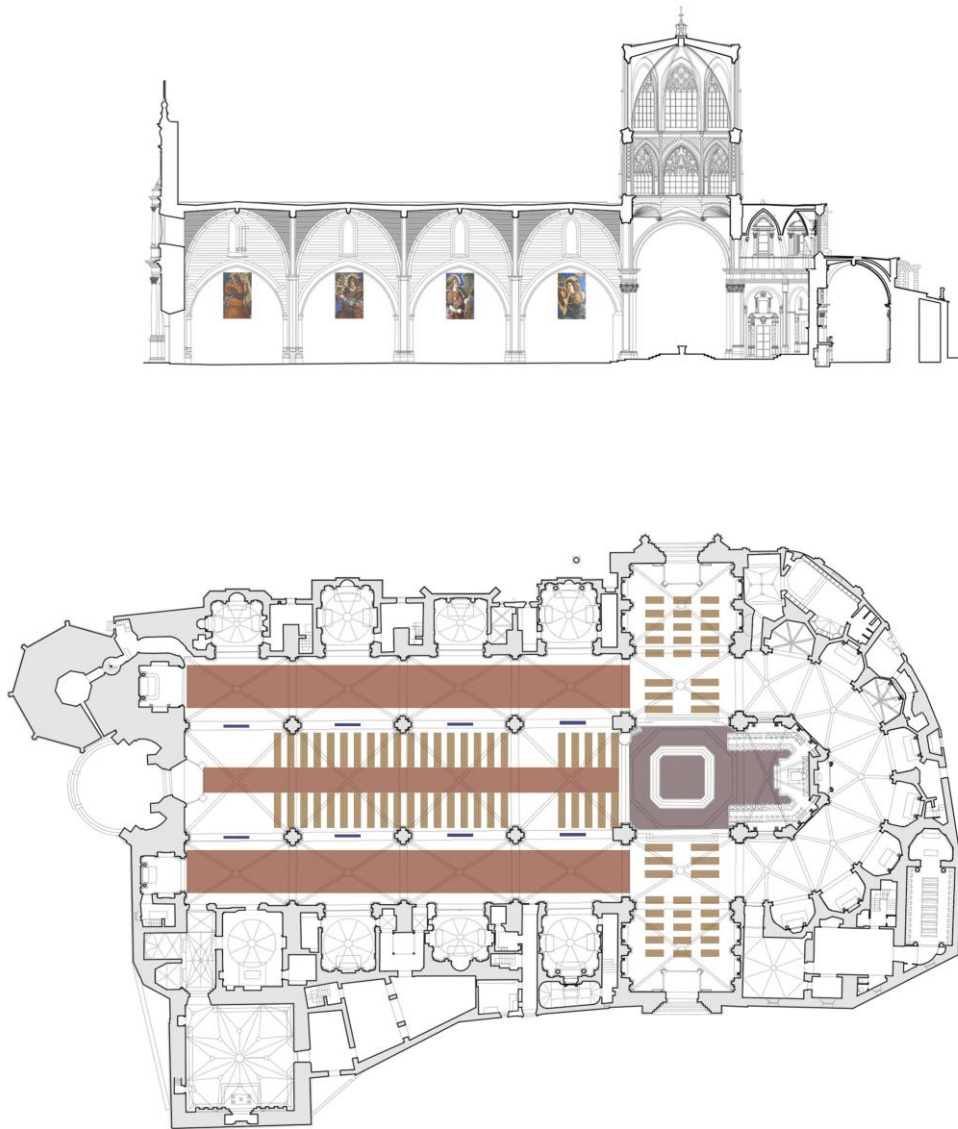


Figura 3.52. Ubicación en planta y alzado de los elementos textiles decorativos en la mejora del acondicionamiento acústico para la palabra (mejora B).

A través de simulaciones acústicas realizadas con el programa informático Odeon, se ha determinado el resultado acústico de las mejoras propuestas para las tres posiciones de la fuente sonora considerando la sala ocupada. En la Tabla 3.32, se indican los resultados del parámetro *STI* y la clasificación de la inteligibilidad del habla. En las Figuras 3.53-3.55, se muestran los resultados obtenidos para los parámetros T_{30} , *EDT*, *G*, C_{80} , C_{50} , T_S y *LF*. En las Figuras 3.56-3.62 se han representados mapas de variación de los diferentes parámetros acústicos analizados.

Con las propuestas de mejora acústica, los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) y el tiempo de caída inicial (*EDT*) disminuyen notablemente, resultando $T_{30, mid}$ próximo a los valores óptimos para la música religiosa y la palabra. En los mapas de variación se muestra la elevada estabilidad de los parámetros de reverberación. Para el parámetro *EDT* se evidencia una mayor variabilidad y una mayor influencia del sonido directo en posiciones cercanas a la fuente en comparación con los resultados obtenidos para el parámetro T_{30} . Con la disminución de la reverberación del recinto, se produce una disminución de la fuerza sonora (*G*), estando dentro del rango típico para salas de audición. Los valores obtenidos para la claridad musical (C_{80}) la claridad de la voz (C_{50}) y el tiempo central (T_S) muestran una clara mejora de la claridad del sonido percibida. Los mapas de variación muestran la elevada variabilidad de los parámetros energéticos en función de la ubicación de la fuente y los receptores. Con la propuesta de mejora acústica, los cambios producidos en la fracción de energía lateral (*LF*) no son significativos, resultado similar el ancho aparente de la fuente percibido por los oyentes. El análisis de los resultados indica que ambas propuestas de mejora resultan notablemente favorables para la inteligibilidad del habla. Los mejores resultados del parámetro *STI* se observan con la mejora del acondicionamiento acústico para la palabra (mejora B) para la posición de la fuente C (púlpito).

Tabla 3.32. Comparativa de la inteligibilidad del habla con y sin mejora acústica.

Fuente		Sin mejora		Mejora A		Mejora B	
		STI	Inteligibilidad	STI	Inteligibilidad	STI	Inteligibilidad
A (altar mayor)	Mín.	0,27	Mala	0,31	Pobre	0,35	Pobre
	Máx.	0,56	Aceptable	0,64	Buena	0,70	Buena
	Prom.	0,41	Pobre	0,55	Aceptable	0,61	Buena
B (coro)	Mín.	0,27	Mala	0,29	Mala	0,34	Pobre
	Máx.	0,48	Aceptable	0,53	Aceptable	0,55	Aceptable
	Prom.	0,36	Pobre	0,41	Pobre	0,49	Aceptable
C (púlpito)	Mín.	0,31	Pobre	0,35	Pobre	0,4	Pobre
	Máx.	0,85	Excelente	0,88	Excelente	0,93	Excelente
	Prom.	0,46	Aceptable	0,62	Buena	0,65	Buena

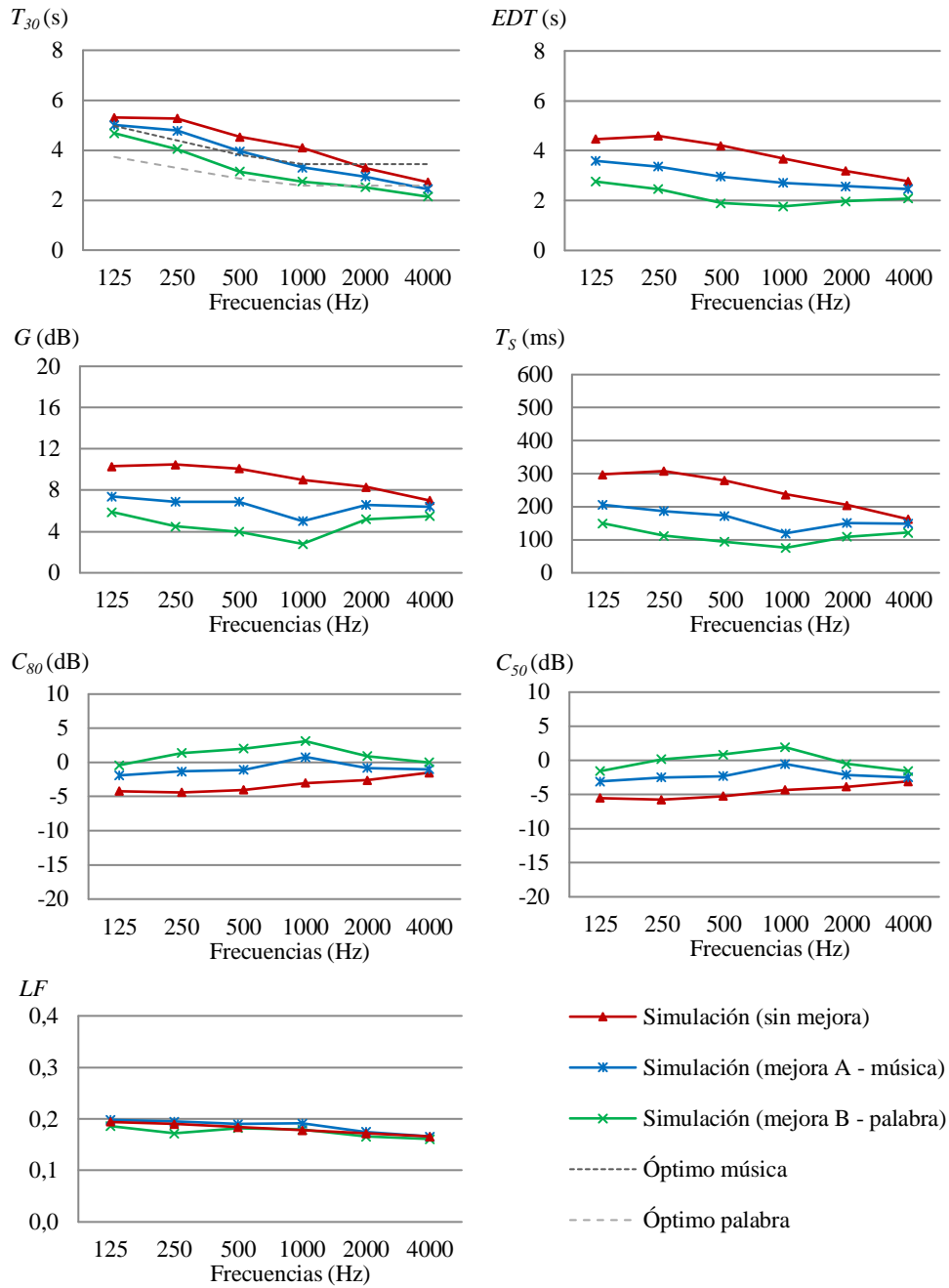


Figura 3.53. Análisis de la mejora acústica para la música religiosa y la palabra (fuente A, altar mayor).

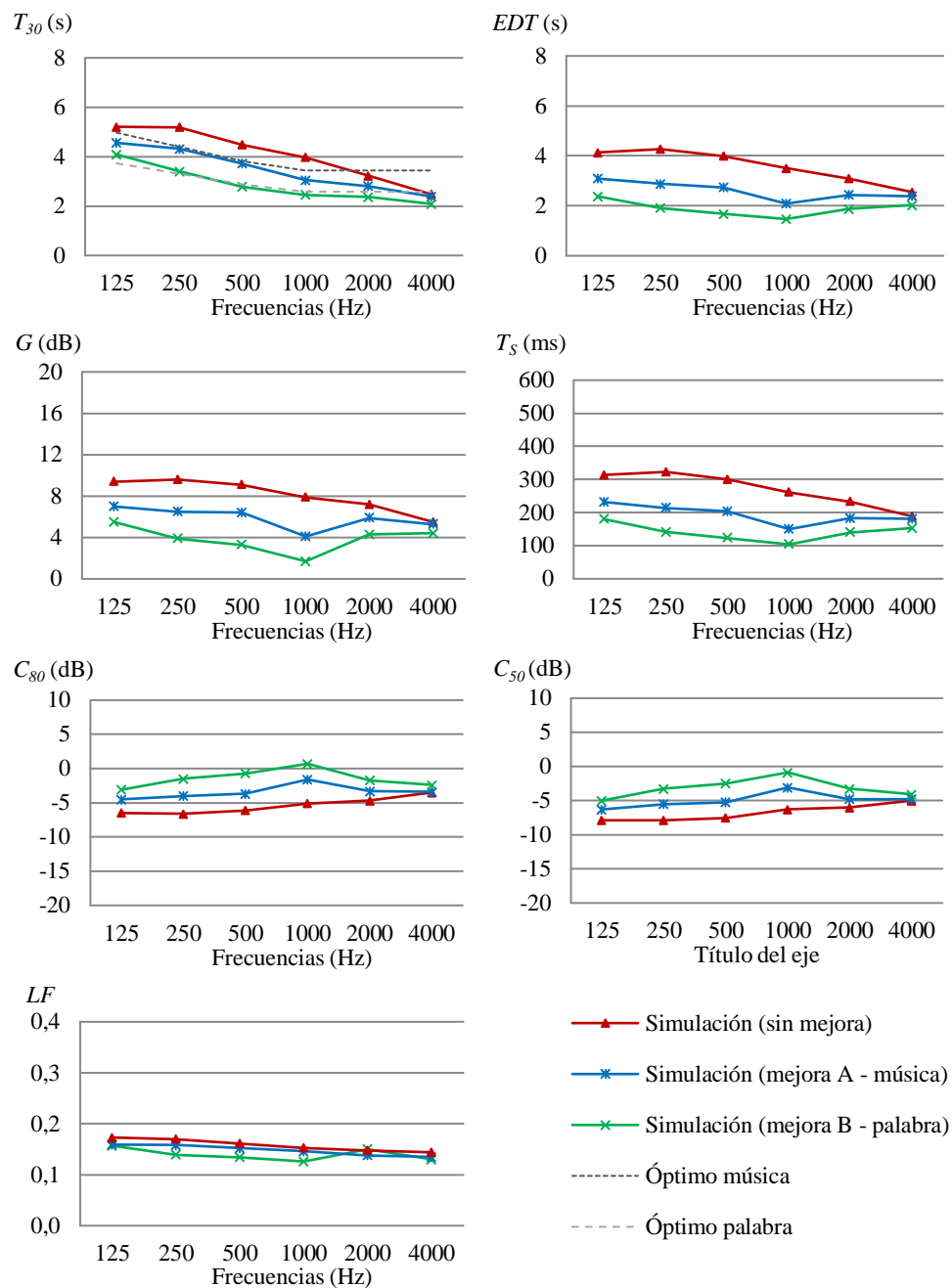


Figura 3.54. Análisis de la mejora acústica para la música religiosa y la palabra (fuente B, coro).

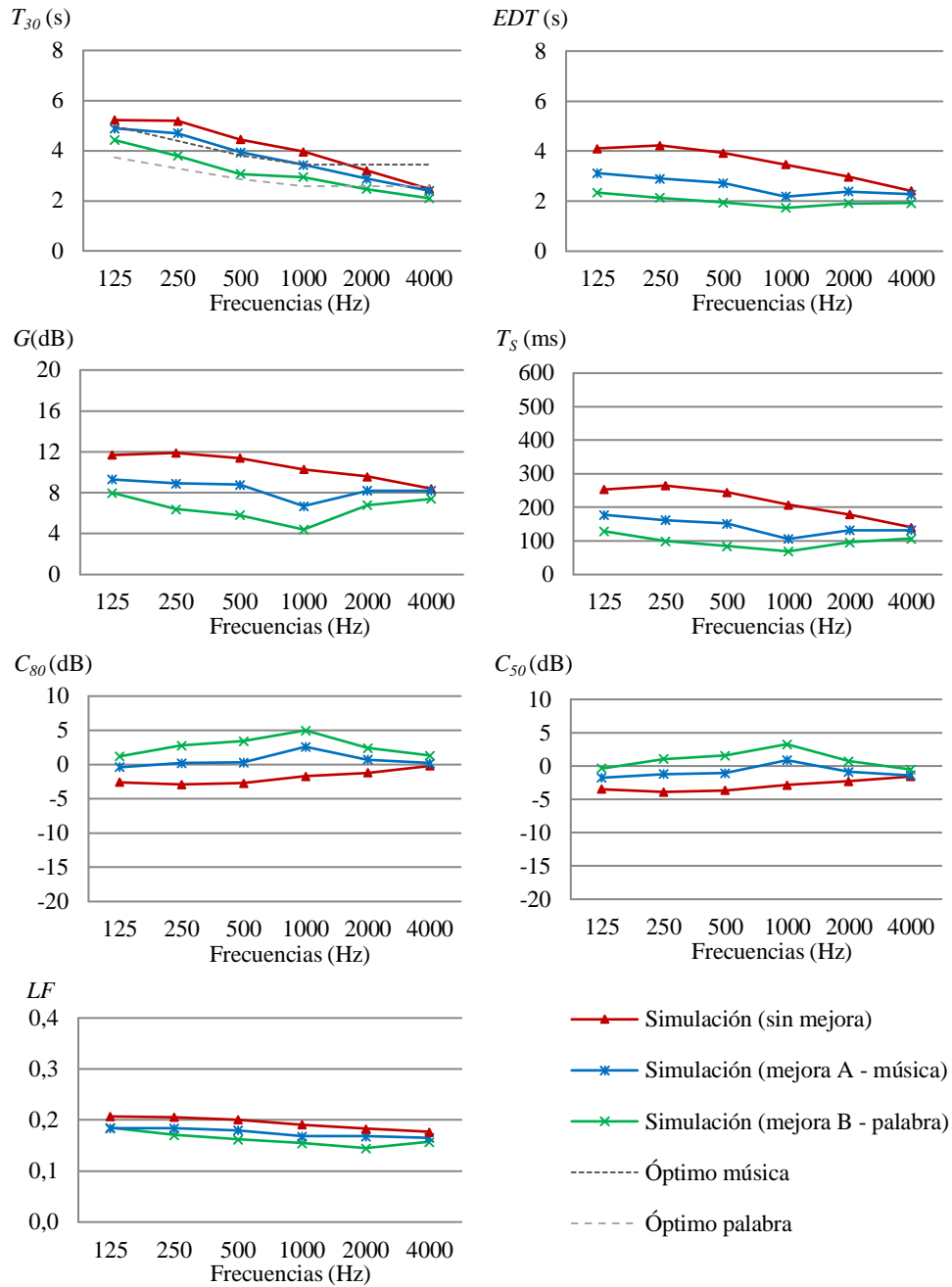


Figura 3.55. Análisis de la mejora acústica para la música religiosa y la palabra (fuente C, púlpito).

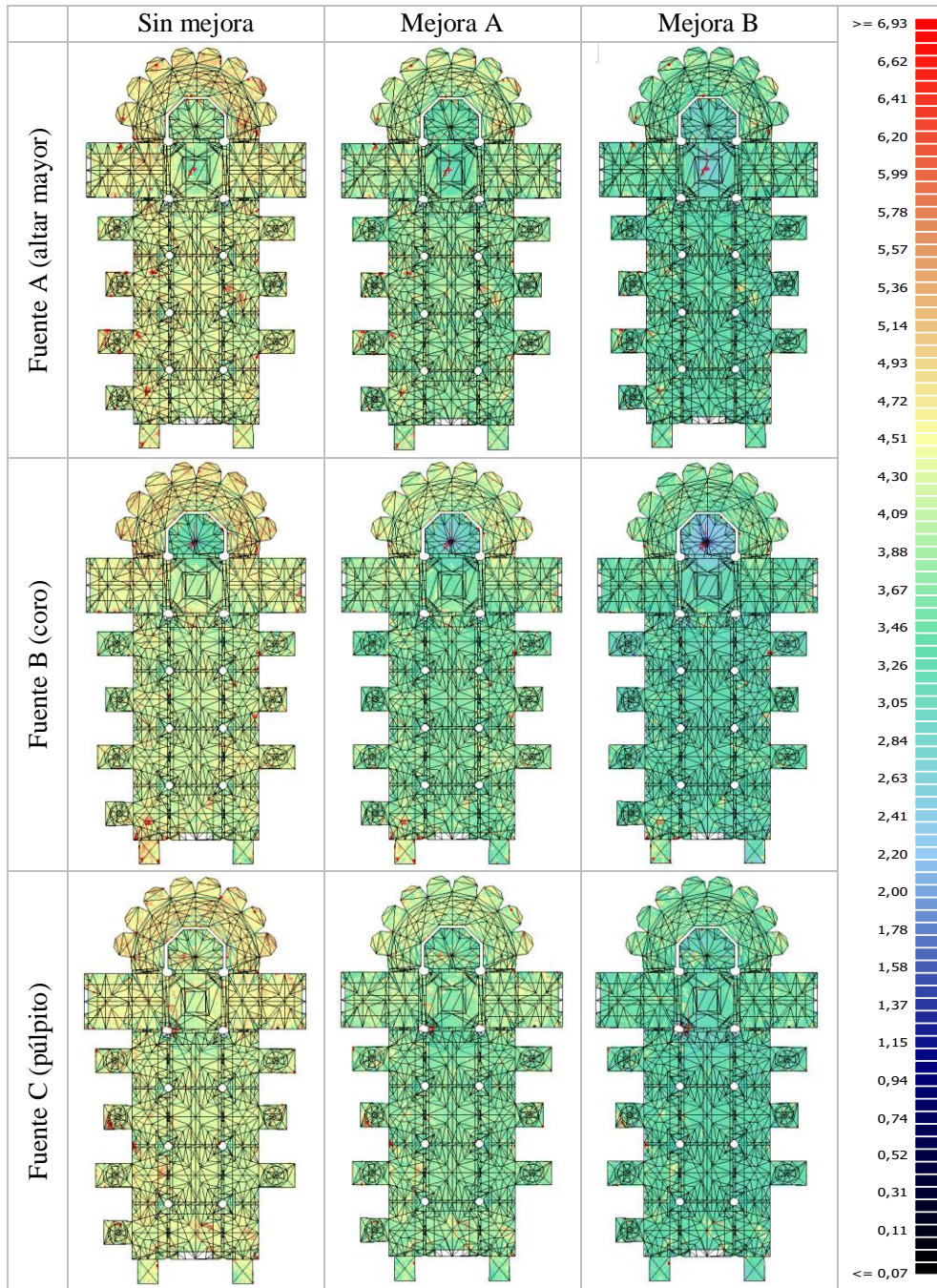


Figura 3.56. Mapas de variación del parámetro T_{30} (s) (1000 Hz, sala ocupada).

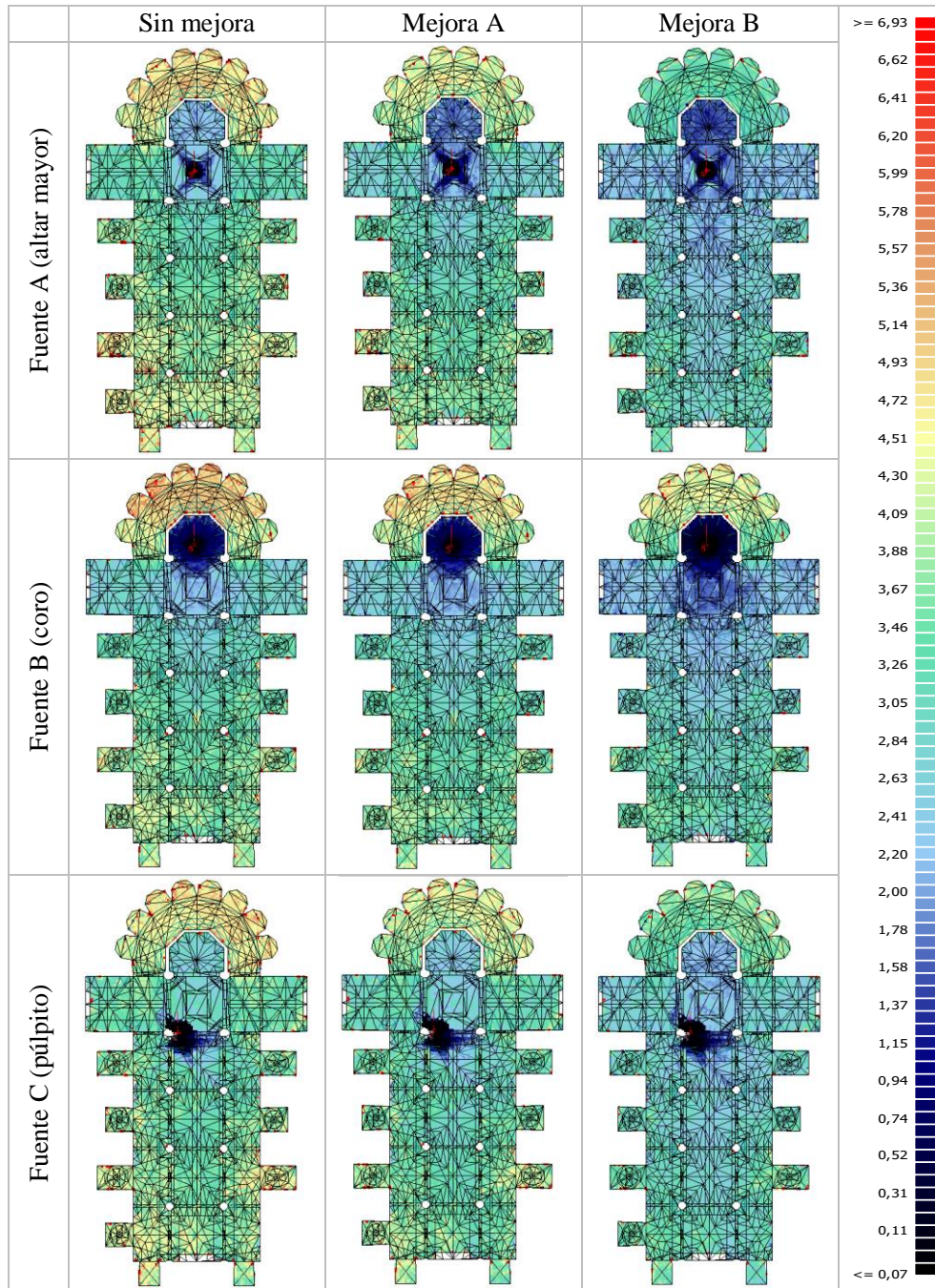


Figura 3.57. Mapas de variación del parámetro *EDT* (s) (1000 Hz, sala ocupada).

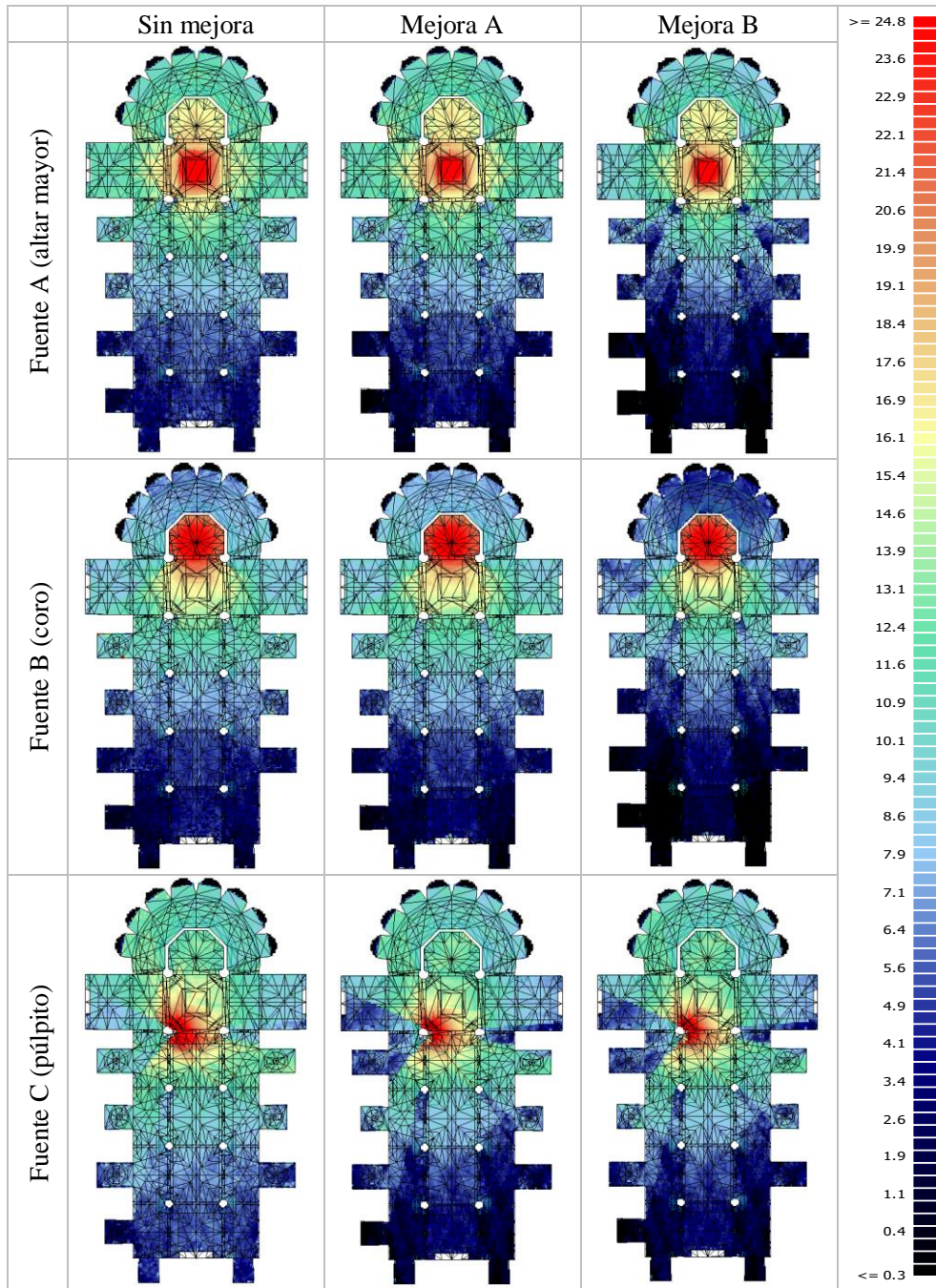


Figura 3.58. Mapas de variación del parámetro G (dB) (1000 Hz, sala ocupada).

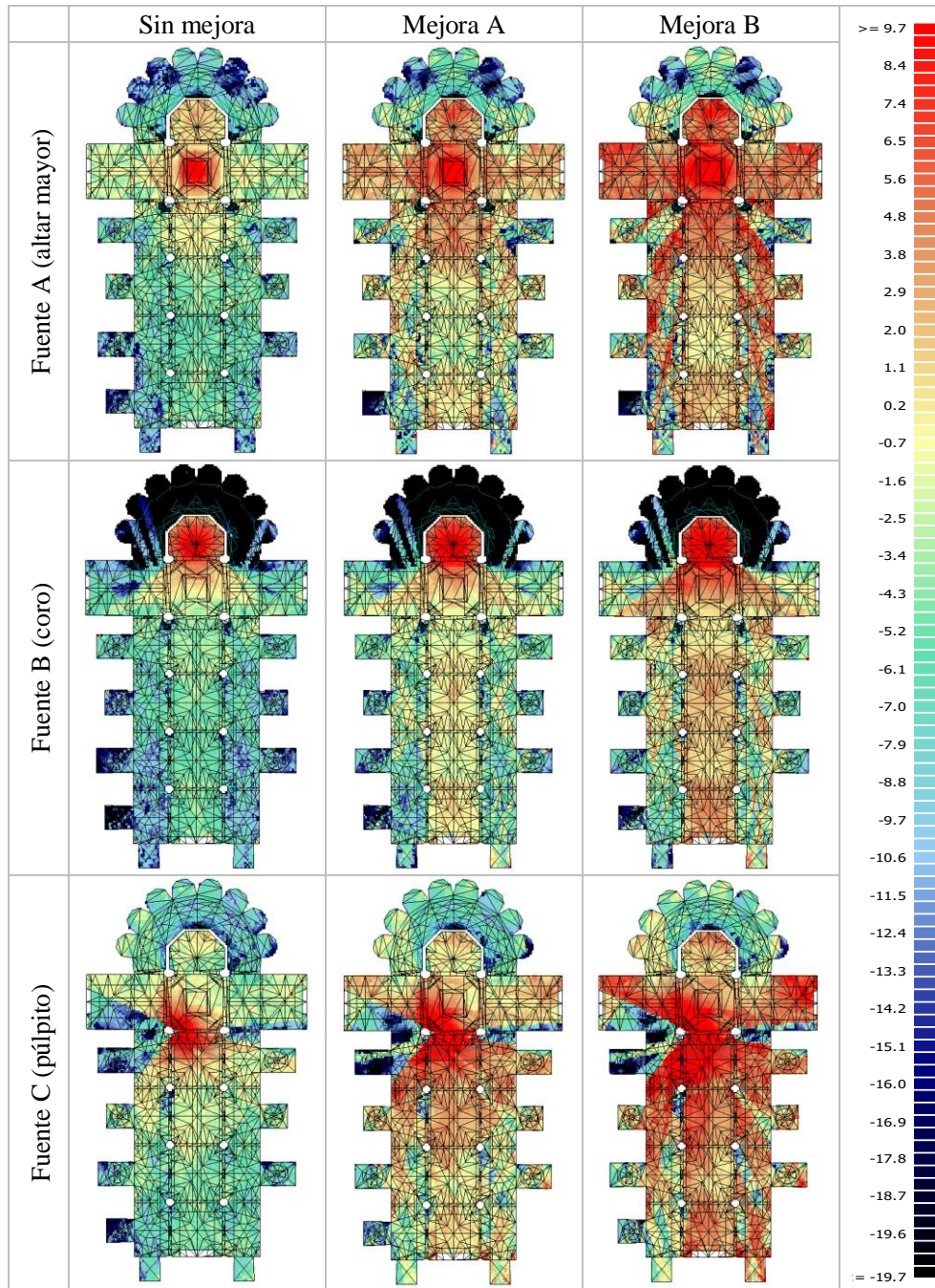


Figura 3.59. Mapas de variación del parámetro C_{80} (dB) (1000 Hz, sala ocupada).

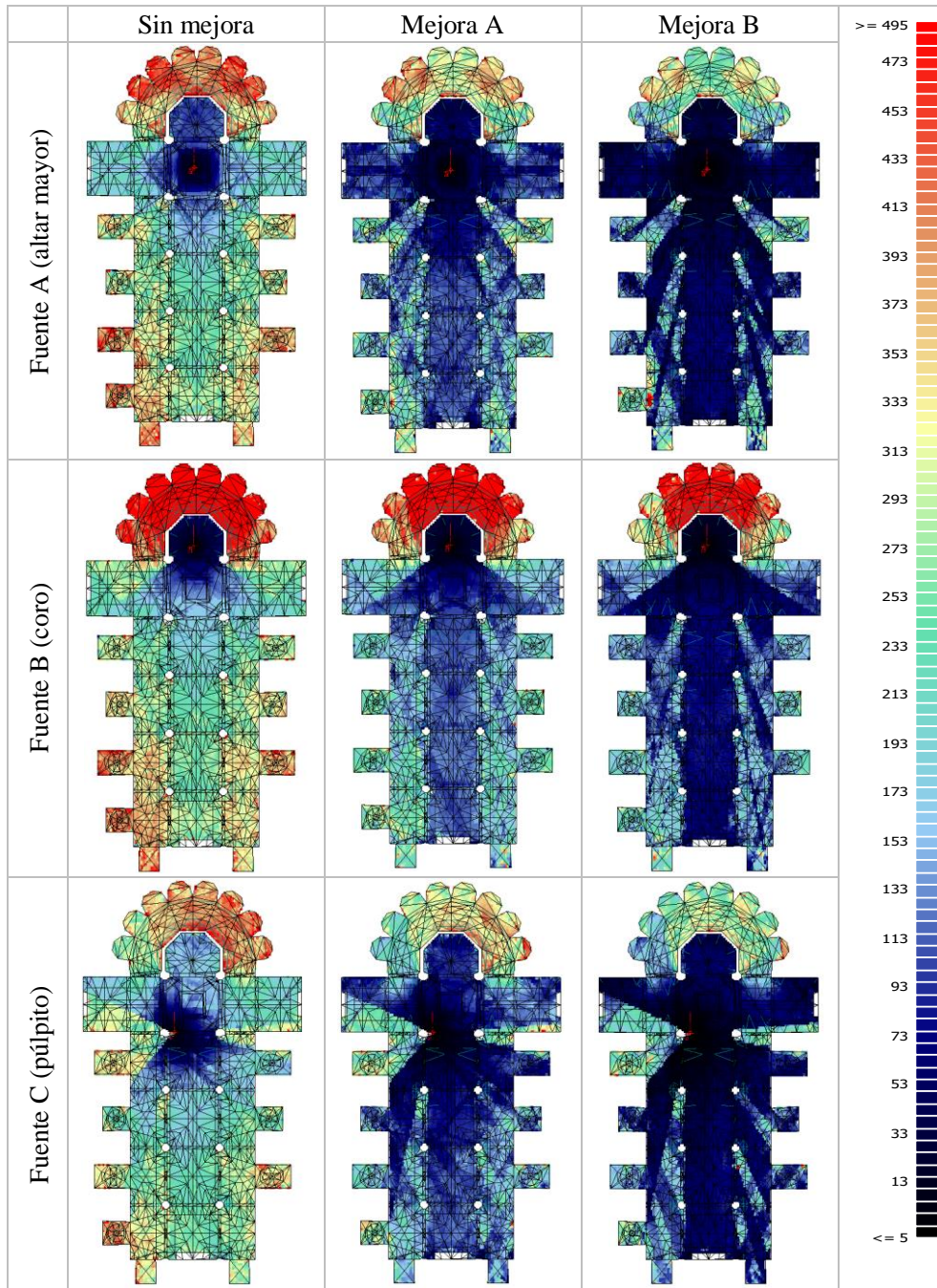


Figura 3.60. Mapas de variación del parámetro T_s (ms) (1000 Hz, sala ocupada).

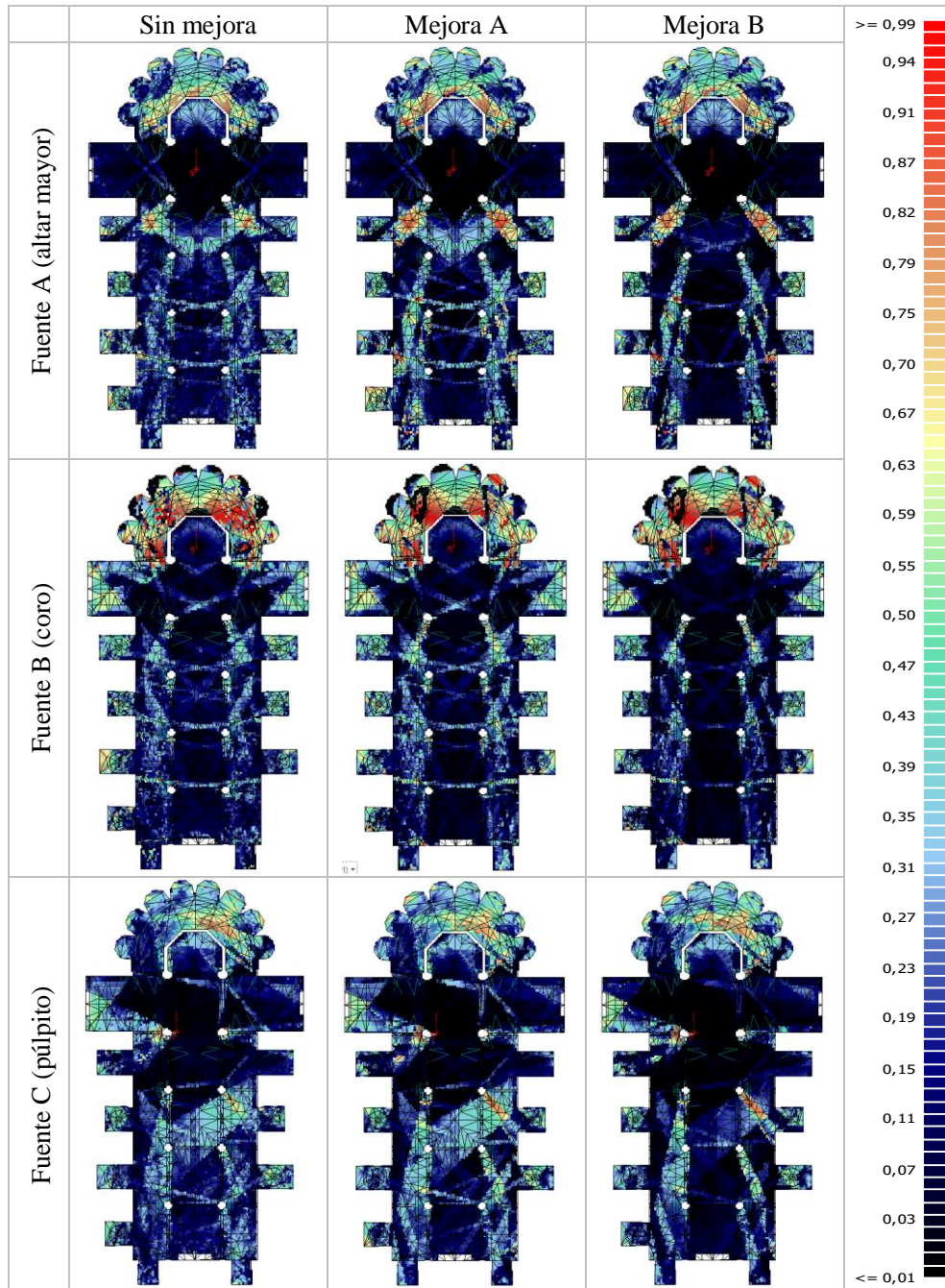


Figura 3.61. Mapas de variación del parámetro LF (1000 Hz, sala ocupada).

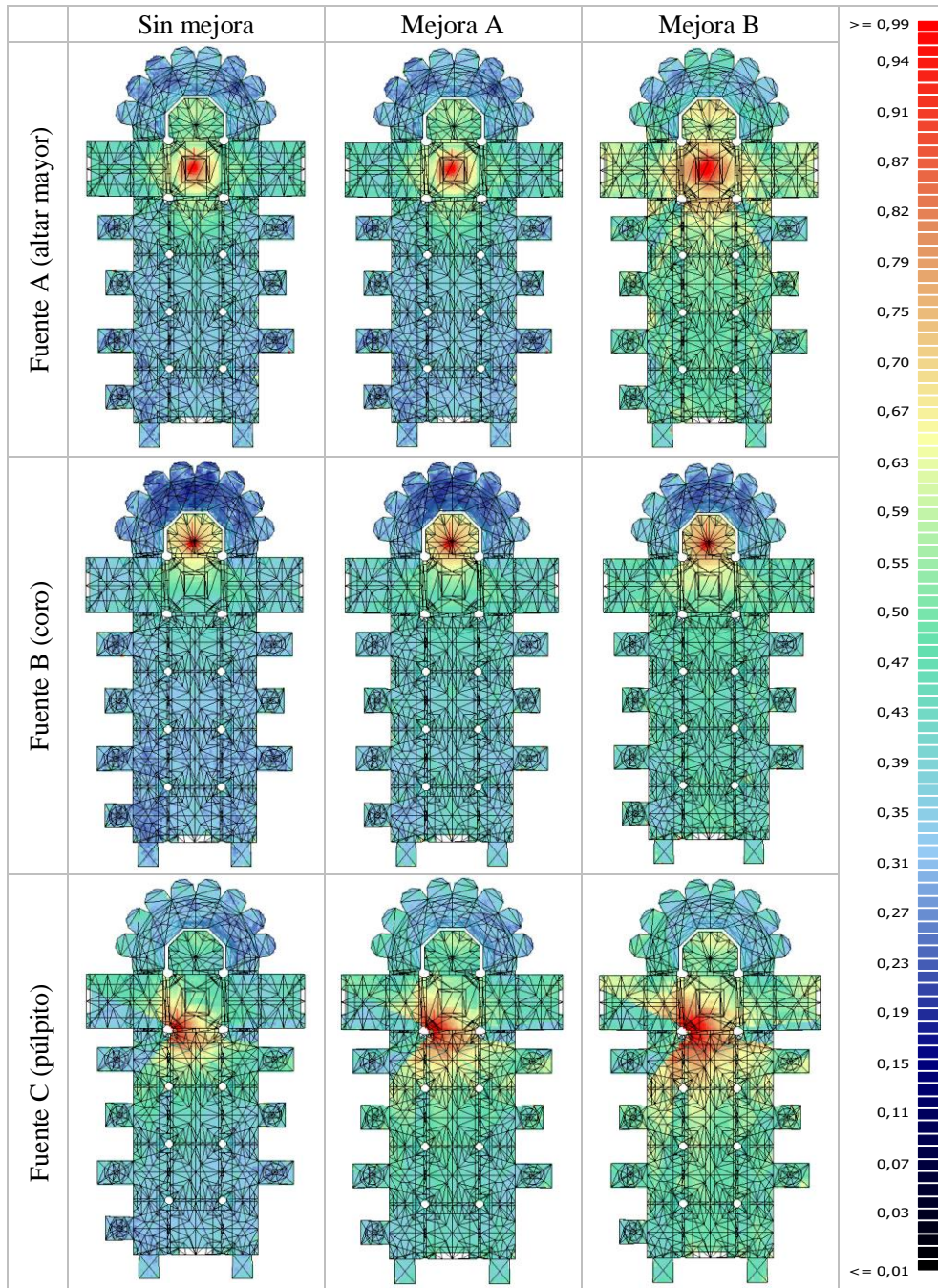


Figura 3.62. Mapas de variación del parámetro *STI* (sala ocupada).

3.7. Auralización del sonido de la Catedral de Valencia.

A través de simulaciones acústicas realizadas con el programa informático *Odeon*, se ha obtenido la auralización del sonido de la Catedral de Valencia para el canto coral y la música de órgano. Para ello, se ha establecido un recorrido virtual por la nave central de la catedral, formado por 20 puntos separados temporalmente 5 segundos en los que se ha calculado el sonido auralizado a partir de una señal anecoica. En la Figura 3.63. se muestra la distribución en planta de los puntos del recorrido virtual. Los resultados obtenidos en los 20 puntos, se han tratado en un programa informático de edición de sonido, incorporando una separación temporal de 5 segundos entre cada punto, con lo que se ha obtenido como resultado el sonido auralizado en tiempo real del recorrido virtual propuesto.

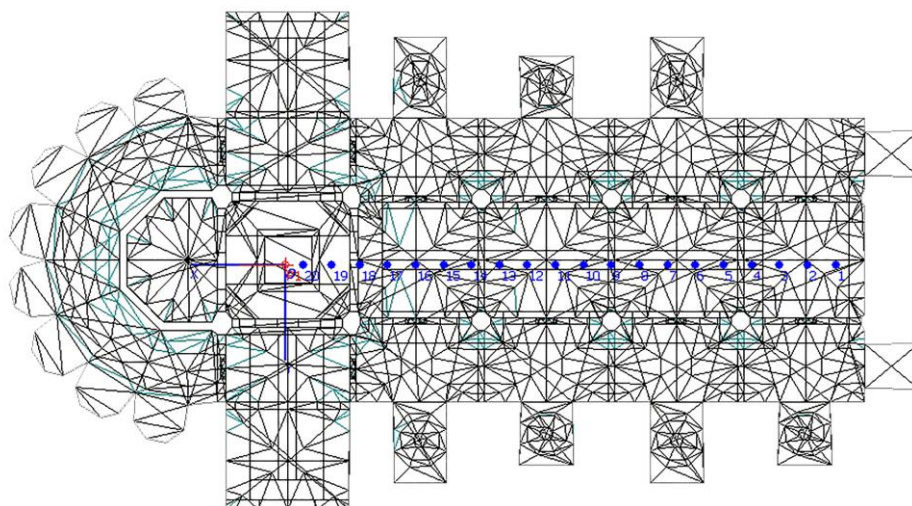


Figura 3.63. Distribución en planta de los puntos del recorrido virtual.

3.8. Renderizado de la simulación visual.

Como resultado de la simulación visual, se ha obtenido un modelo en 3D del interior de la Catedral de Valencia en su estado actual. A través del renderizado del modelo visual a lo largo del recorrido virtual propuesto, se ha obtenido un video realista del interior del templo. En las Figuras 3.64-3.67, se muestra el resultado del renderizado del modelo visual del interior de la Catedral de Valencia.



Figura 3.64. Simulación visual. Vista desde la nave central hacia el altar.



Figura 3.65. Simulación visual. Vista del transepto desde el altar hacia la Puerta de los Apóstoles.



Figura 3.66. Simulación visual. Vista desde el altar hacia el ábside.



Figura 3.67. Simulación visual. Vista desde la nave central hacia las capillas laterales.

3.9. Recorrido virtual.

Mediante la fusión de la simulación acústica y la simulación visual con un programa informático de edición de video y sonido, se obtiene la simulación completa del recinto estudiado. Se trata de un recorrido virtual preestablecido que ofrece al espectador una experiencia completa en la que puede ver y oír lo mismo que si se realizara una visita presencial.

Con el objetivo de difundir los resultados de la investigación realizada, las simulaciones realizadas en la Catedral de Valencia (canto coral y música órgano) se han publicado en la página web oficial del Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG (Figura 3.68). Gracias a ello, cualquier persona desde cualquier lugar puede realizar una visita virtual por el interior de la Catedral de Valencia, lo que contribuye a preservar y difundir su patrimonio artístico, arquitectónico y sonoro.

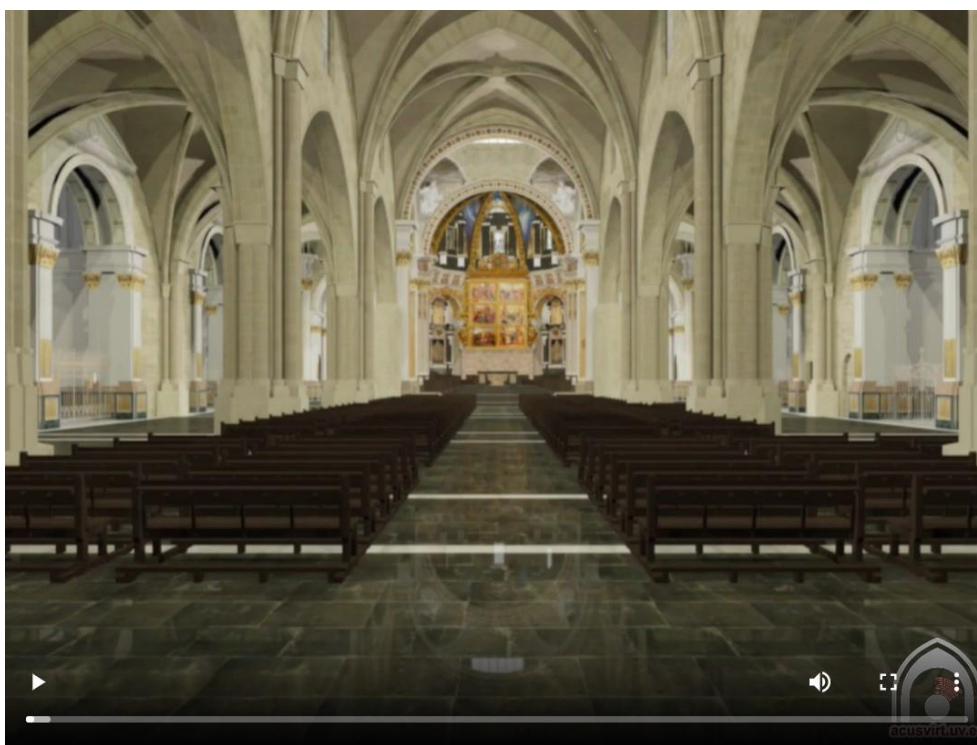


Figura 3.68. Simulación acústica y visual de la Catedral de Valencia. Disponible en: https://intranet.upv.es/pls/soalu/sic_miweb2.MicroWeb?p_ver=NORMAL&P_IDWEB=851367&P_VISTA=&p_modo=&P_IDIOMA=C&p_id=1152374&p_verids=

Capítulo 4

Conclusiones y discusión

4.1. Discusión de los resultados.

A partir de los datos obtenidos de la medición acústica, se ha realizado un estudio del comportamiento acústico del templo. En concreto, se han analizado los siguientes parámetros acústicos: tiempo de reverberación (T_{30}), tiempo de caída inicial (EDT), calidez (BR), brillo (Br), fuerza sonora (G), claridad musical (C_{80}), claridad para la palabra (C_{50}), tiempo central (T_S), índice de transmisión del habla (STI), fracción de energía lateral (LF) y el índice de calidad biaural ($I-IACC_E$).

En el recinto de culto estudiado, se observa que los parámetros de reverberación (T_{30} , EDT , BR y Br) presentan un elevado grado de estabilidad, no presentando variaciones significativas en función de la ubicación de la fuente y los receptores. Asimismo, presentan el mismo comportamiento en las diferentes zonas del templo analizadas. En contraposición, los parámetros de energía (G , C_{80} , C_{50} , T_S), los parámetros de inteligibilidad (STI) y los parámetros de espacialidad (LF , $IACC_E$) presentan una mayor variabilidad. Estos resultados están en la línea de los obtenidos en estudios realizados en recintos de características similares (Pedrero et al., 2014; Álvarez Morales, 2016; Alonso Carrillo, 2016; Balestra, 2021).

Tomando como base los datos obtenidos en la medición acústica, se ha generado un modelo virtual simplificado del interior de la Catedral de Valencia. Para la calibración del modelo, se han asignado unas características acústicas determinadas a cada una de las superficies del modelo tomado como referencia valores obtenidos

mediante ensayos normalizados (Bork, 2005; Vörländer, 2008; Cox & D'Antonio, 2009; Martellotta F., 2009). Los resultados obtenidos muestran que el modelo virtual representa adecuadamente el comportamiento acústico del interior del recinto. Con ello, se puede determinar que la simplificación geométrica del modelo acústico es adecuada, lo que está en consonancia con la investigación realizada por Giménez et al. (2011).

La metodología propuesta permite realizar mejoras en el acondicionamiento acústico de recintos de culto, conociendo de antemano el resultado de la intervención a través de simulaciones acústicas. Las propuestas de intervención están limitadas al grado de protección de los recintos de culto, debiendo ser en todo caso de carácter reversible. En el caso concreto de la Catedral de Valencia, se ha propuesto la mejora del acondicionamiento acústico del templo para sus dos usos fundamentales, la música religiosa y la palabra. Teniendo en cuenta las limitaciones de la intervención derivadas del grado de protección del edificio, se ha propuesto la incorporación de elementos textiles decorativos reversibles con un alto grado de absorción acústica.

A través de simulaciones acústicas, se ha calculado el resultado de la propuesta de intervención y se ha analizado la variación de los parámetros acústicos T_{30} , EDT , G , C_{80} , C_{50} , T_S , LF y STI . Los resultados obtenidos resultan favorables para la acústica del recinto para sus dos usos fundamentales, la música religiosa y la palabra. Con incorporación de elementos textiles con un alto grado de absorción acústica, se produce una disminución notable de los parámetros de reverberación T_{30} y EDT . El tiempo de reverberación a frecuencias de 500 a 1000 Hz ($T_{30,mid}$) resulta próximo a los valores óptimos para la música religiosa y la palabra. Con la disminución del tiempo de reverberación del recinto, se produce una disminución de la fuerza sonora (G), estando dentro del rango típico para salas de audición. Asimismo, se produce una disminución del parámetro T_S y un aumento de los parámetros C_{80} y C_{50} , lo que implica una clara mejora en la claridad del sonido percibida por los oyentes. Las variaciones producidas en la fracción de energía lateral (LF) con ambas propuestas de mejoras no son significativas, resultado similar el ancho aparente de la fuente percibido por los oyentes. Estos resultados son acordes con los obtenidos en estudios similares (Carmona et al., 2009; Romero et al., 2010; Bueno et al., 2012; Iannace et al., 2019).

4.2.Utilidad de la investigación.

La acústica virtual se presenta como una herramienta muy eficaz para el estudio del patrimonio sonoro de los recintos de culto. Asimismo, tiene importantes aplicaciones en el ámbito de la restauración del patrimonio arquitectónico, siendo de especial relevancia en el caso de los recintos de culto debido a la importancia de su patrimonio sonoro. A través de simulaciones acústicas, se puede analizar cómo han

influido las modificaciones y restauraciones realizadas a lo largo del tiempo en el comportamiento acústico de los templos. Además, la acústica virtual permite conocer de antemano el resultado acústico de cualquier propuesta de intervención antes de su realización práctica, garantizando que no afecte negativamente a la sonoridad de los templos. Con ello, se presenta una nueva variable a la hora de afrontar la restauración del patrimonio: la acústica arquitectónica.

Como resultado final de la investigación realizada, se ha obtenido la simulación acústica y visual del interior de la Catedral de Valencia. Gracias a ello cualquier persona, desde cualquier lugar y en cualquier momento, puede disfrutar de su arquitectura, arte y sonoridad, ofreciendo la posibilidad de hacer turismo virtual por el interior del templo. Asimismo, la simulación acústica y visual garantiza la preservación de los actuales valores artísticos, arquitectónicos y sonoros de la Catedral. Con ello, si en un futuro el templo sufriera alteraciones de cualquier índole, se dispondría de un compendio detallado de información visual y sonora de su estado actual, lo que garantizaría su conservación y permitiría su disfrute y estudio por parte de futuras generaciones (Díaz Rubio & Giménez Pérez, 2021).

4.3. Líneas futuras de investigación.

Se proponen las siguientes líneas futuras de investigación:

- Realizar la simulación acústica y visual de las diferentes etapas constructivas de la Catedral de Valencia. Difundir los resultados obtenidos y valorar la apreciación subjetiva de los oyentes ante los cambios visuales y acústicos producidos. Para ello, se propone la realización de encuestas a través de una plataforma digital.
- Estudiar el comportamiento acústico del recinto con las posiciones actuales del coro y el órgano en comparación con sus ubicaciones antes de la intervención de Traver en 1940.
- Validar la propuesta de mejora del acondicionamiento acústico de la Catedral de Valencia para la música religiosa y la palabra. Para ello, se propone realizar la simulación acústica y visual del interior del templo teniendo en cuenta los cambios propuestos y valorar la apreciación subjetiva de los oyentes mediante la realización de encuestas a través de una plataforma digital. Hasta el momento, se ha realizado la auralización del sonido de la Catedral de Valencia con las mejoras propuestas para el canto coral y la música de órgano.

- Auralizar el sonido de la Catedral de Valencia para la palabra a partir de la señal anecoica de un sermón. Realizar la simulación acústica y visual para la palabra y difundir los resultados.
- Estudiar el patrimonio sonoro del Canto de la Sibila de la Catedral de Valencia. Realizar la simulación acústica y visual de dicho evento patrimonial y difundir los resultados.
- Investigar sobre la generación de modelos acústicos y visuales interactivos, en los cuales el espectador pueda moverse libremente escuchando y observando lo mismo que si realizara una visita presencial. Actualmente, se está trabajando en el desarrollo de modelos acústicos y visuales interactivos mediante el programa informático *Unity*.
- Aplicar la acústica virtual en el estudio de otros edificios de interés patrimonial. Desde el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG se está realizando una labor de estudio y difusión del patrimonio sonoro de diferentes entornos a través de su página web oficial. https://intranet.upv.es/pls/soalu/SIC_MIWSERS2.microwebservicio?p_entidad=ACUSVIRT&p_idioma=C

Parte II
Acústica del
Tribunal de la Aguas

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes.

1.1.1. Acústica virtual en entornos abiertos de interés patrimonial.

La acústica virtual ha demostrado ser una herramienta muy eficaz para el estudio del comportamiento acústico de recintos cerrados. Su aplicación en el estudio acústico de entornos abiertos requiere adaptar la forma de trabajo y establecer protocolos de actuación específicos. En este sentido, diferentes autores han estudiado la aplicabilidad de las herramientas utilizadas habitualmente para el estudio acústico de recintos cerrados en el estudio de paisajes sonoros de interés patrimonial:

Lubman (2008) realizó un estudio acústico arqueológico del entorno del templo de Kukulkán en Chichén Itzá (México). En esta investigación, se presenta un modelo acústico que reproduce fielmente el comportamiento acústico del entorno estudiado. A partir del modelo acústico generado se plantea la posibilidad de auralizar los ecos producidos en las escaleras del templo para cualquier estímulo sonoro, ya sean aplausos, voces o instrumentos étnicos.

Fazenda et al. (2011) reconstruyeron el campo sonoro del monumento megalítico Stonehenge (Wiltshire, Inglaterra), formado por anillos concéntricos de piedra de varios tamaños. Debido al estado en ruinas del monumento, se realizó una medición acústica en una réplica de tamaño real ubicada en Maryhill (Estados Unidos). Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que aunque el campo acústico

actual en el monumento de Stonehenge revela algunos reflejos especulares débiles y una reverberación acústica débil, su forma original generaba un campo acústico mucho más interesante con propiedades de difusión significativas y una reverberación notable. Debido a su forma circular y al gran número de superficies envolventes, el monumento presenta en su estado originario un campo acústico inusual para un espacio al aire libre.

Azevedo et al. (2013) recrearon el paisaje sonoro del entorno del Sermón de John Donne de 1622. Se trata de un evento que tuvo lugar en *St Paul's Cross*, una cruz de predicación y púlpito al aire libre que se encontraba en los terrenos de la antigua Catedral de *St. Paul* de Londres (Inglaterra) antes del incendio de 1666. Crear un campo sonoro completo, inmersivo y creíble para *St Paul's Cross* requirió expandir el repertorio técnico utilizado en el proceso de auralización. Los resultados obtenidos muestran que el nivel de sonido y la reverberación percibida son superiores a los que se encontrarían en un espacio completamente abierto. La estructura monumental de la Catedral de *St. Paul* habría proporcionado una cantidad elevada de energía reflejada para soportar el habla no amplificadas en *St Paul's Cross*. A través de simulaciones acústicas, se analizó la variación de la inteligibilidad del habla en diferentes posiciones de los oyentes.

Álvarez et al. (2014-2018) estudiaron las características acústicas de los teatros romanos de Itálica en Sevilla (España), Regina Turdorum en Badajoz (España), Cádiz (España) y Palmyra (Siria). Se trata de entornos escénicos semiabiertos de un gran valor patrimonial donde la transmisión del sonido es un factor preferente. En estos estudios se analiza el proceso de creación, ajuste y validación de modelos virtuales que representen el campo acústico de los entornos abiertos de los teatros romanos. Para ello, se plantea la posibilidad de obtener un modelo virtual cerrado mediante la incorporación de superficies de máxima absorción acústica que representen el campo libre, obteniéndose resultados favorables en las simulaciones acústicas realizadas (Álvarez-Corbacho et al., 2014; Álvarez-Corbacho et al., 2015; Álvarez-Corbacho et al., 2017; Álvarez-Corbacho et al., 2018).

Berardi et al. (2016) realizaron una reconstrucción acústica del teatro romano Odeón (Pompeya, Italia). Mediante el empleo de la acústica virtual, lograron recrear las diferentes etapas acústicas del teatro teniendo en cuenta las modificaciones sufridas a lo largo de su historia. Asimismo, a través de simulaciones acústicas, se analizaron las representaciones más adecuadas en el teatro actual. Los resultados obtenidos en esta investigación muestran la posibilidad de aplicar la acústica virtual en la restauración de entornos abiertos de interés patrimonial.

Sukaj et al. (2021) llevaron a cabo un estudio acústico del teatro romano de Benevento (Italia), el cual fue reconstruido en la primera mitad del siglo XX tras su destrucción en una invasión bárbara. Hoy en día, el teatro es una atracción cultural

donde se celebran numerosas representaciones artísticas. La medición acústica se realizó siguiendo los requerimientos de la norma ISO 3382-2. Se colocó una fuente omnidireccional en el cuerpo escénico y en la orquesta, mientras que los micrófonos se ubicaron a lo largo de tres direcciones en el espacio reservado para los espectadores. Los resultados muestran una reverberación baja debido a la ausencia de superficies reflectantes. Con esto, el teatro resulta adecuado para representaciones en las que predomina la prosa, pero no para aquellas en las que predomina la música lírica o sinfónica. Los autores del estudio plantean la posibilidad mejorar la acústica del teatro mediante la instalación de estructuras temporales de alta densidad con características reflectantes para aumentar la reverberación del sonido.

Bevilacqua et al. (2022) estudiaron el comportamiento acústico del anfiteatro de Santa Maria Capua Vetere (Italia). En esta investigación, se realizó una extensa campaña de medidas acústicas y arquitectónicas del anfiteatro. A partir de los datos obtenidos en la medición, se construyó un modelo acústico virtual. Para garantizar su compatibilidad con los programas informáticos de simulación acústica, el modelo fue cerrado con una caja virtual a la que se le aplicó una absorción acústica máxima (coeficiente de absorción 1). Con la adaptación realizada, se obtuvieron unos resultados favorables en la calibración del modelo acústico.

1.1.2. Evaluación de la calidad acústica de paisajes sonoros.

Para la evaluación de la calidad acústica de entornos abiertos, es habitual emplear tanto parámetros objetivos de calidad acústica² como parámetros psicoacústicos. La psicoacústica es una disciplina que estudia la percepción subjetiva de los oyentes ante las características físicas concretas de un estímulo sonoro. Debido a su carácter subjetivo, se trata de una disciplina fundamentalmente empírica que se basa en el análisis estadístico de los resultados obtenidos mediante encuestas (Echarte Merino, 2010).

En el ámbito de la psicoacústica, la norma ISO 12913-1 define paisaje sonoro como “el entorno acústico tal y como lo percibe, experimenta o entiende una persona o grupo de personas en un determinado contexto”. El concepto de paisaje sonoro tiene, por tanto, un componente subjetivo relacionado con la percepción del oyente. En este ámbito, encontramos diversos autores que han propuesto metodologías para la evaluación de la calidad acústica de paisajes sonoros:

Hermida Cadena (2019) desarrolló un modelo de evaluación de paisajes sonoros teniendo en cuenta aspectos espaciales, temporales, subjetivos y de contexto. Los

² Parámetros objetivos de calidad acústica explicados en el punto 1.1.2 de la parte 1 de esta tesis.

resultados de esta investigación evidenciaron correlaciones entre parámetros acústicos objetivos y parámetros psicoacústicos.

Axelsson et al. (2012) desarrollaron el Protocolo Sueco de Calidad del Paisaje Sonoro, mediante al cual se puede determinar la percepción subjetiva de los oyentes y la calidad acústica del paisaje sonoro. Cañ et al. (2013) ampliaron la contribución anterior, que más tarde se convirtió en la base del modelo bidimensional de evaluación de paisajes sonoros en la norma ISO 12913-3. Este modelo establece dos componentes principales de la percepción subjetiva de un paisaje sonoro: el agrado (*pleasantness*) y el dinamismo (*eventfulness*). Para el cálculo de estas variables, la norma ISO 12913-3 establece las Ecuaciones 27 y 28:

$$P = [(p - a) + \cos 45^\circ(ca - ch) + \cos 45^\circ(v - m)] \quad (27)$$

$$E = [(e - u) + \cos 45^\circ(ch - ca) + \cos 45^\circ(v - m)] \quad (28)$$

donde P es agrado (*pleasantness*), E es dinamismo (*eventfulness*) y el resto de variables se corresponden con los siguientes parámetros psicoacústicos:

- p : agradable (*pleasant*).
- a : desagradable (*annoying*).
- e : dinámico/con actividad (*eventfull*).
- u : estático/sin actividad (*unevenfull*).
- ca : calmado (*calm*).
- ch : caótico (*chaotic*).
- v : vibrante (*vibrant*).
- m : monótono (*monotonous*).

Moreno Iglesias (2021) desarrolló un sistema para la evaluación de paisajes sonoros *in situ*. En esta investigación, se diseñó un cuestionario para evaluar la percepción subjetiva del ambiente sonoro basado en el modelo bidimensional en la norma ISO 12913-3. Asimismo, se programó un sistema de cálculo de parámetros psicoacústicos a través de la plataforma de programación *Matlab*.

1.2. Justificación de la investigación.

Esta investigación aporta información sobre la aplicabilidad de las herramientas y procedimientos utilizados habitualmente en la acústica de salas para el estudio del comportamiento acústico de entornos patrimoniales abiertos. La simulación acústica

de este tipo de entornos permite conocer de antemano el resultado acústico de cualquier propuesta de intervención antes de su realización práctica, garantizando que no afecte negativamente al paisaje sonoro.

En concreto, se ha aplicado la acústica virtual en el estudio del patrimonio sonoro del Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia. Las sesiones del Tribunal tienen lugar, cada jueves, bajo la gótica Puerta de los Apóstoles de la Catedral de Valencia. Se trata de un entorno singular de gran valor patrimonial donde la transmisión de la palabra es un factor preferente. En esta investigación, se ha realizado una medición acústica del entorno del Tribunal de las Aguas y se han analizado los datos obtenidos. Las reflexiones derivadas de la geometría y proximidad de la Puerta de los Apóstoles generan una acústica característica que difiere de los resultados que cabrían esperarse en un entorno abierto.

Como resultado final de la investigación, se ha obtenido la simulación acústica y visual del entorno del Tribunal de las Aguas. Con el objetivo de lograr un alto grado de realismo en la simulación acústica, se ha realizado una grabación en cámara anecoica de una sesión del Tribunal de las Aguas. A partir de esta grabación, se ha obtenido la señal anecoica empleada en la auralización del sonido del Tribunal de las Aguas y se ha caracterizado la fuente habla propia del alguacil. La simulación acústica y visual permite que cualquier persona, desde cualquier lugar y en cualquier momento, puede disfrutar de una sesión virtual del Tribunal de las Aguas, ofreciendo la posibilidad de realizar turismo a distancia. Asimismo, si en el futuro el paisaje sonoro sufriera alteraciones de cualquier tipo, se dispondría de un compendio detallado de información visual y sonora sobre su estado actual, lo que garantizaría su conservación y permitiría su estudio y disfrute por parte de futuras generaciones. A partir de la simulación de acústica y visual del entorno del Tribunal de las Aguas, se han obtenido los parámetros psicoacústicos del paisaje sonoro mediante la realización de encuestas a través de una plataforma digital.

1.3. Historia del Tribunal de las Aguas.

El Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia es la más antigua institución de justicia existente en Europa. Si bien no existen pruebas certeras sobre sus orígenes, diversos autores coinciden en que se trata de una herencia del sistema de gestión de las aguas de regadío de época islámica (Mascarell Navarro, 1997; Fairén Guillén, 2003; Plaza Penadés, 2007; Bucy y otros, 2013). Desde la conquista del reino de Valencia por el rey Jaime I hasta la actualidad, el Tribunal de las Aguas ha funcionado de forma ininterrumpida. Durante este periodo de tiempo, los mandatarios tuvieron que intervenir en diversas ocasiones para que se respetaran las competencias del Tribunal de las Aguas, ordenando a la justicia civil de Valencia y a jueces que no se inmiscuyeran en los pleitos de regantes de las acequias de la vega.

En la actualidad, la función jurisdiccional del Tribunal de las Aguas viene recogida en los siguientes textos normativos: la Constitución Española de 1978, el Estatuto de Autonomía de la Comunidad Valenciana de 1982 y la Ley Orgánica del Poder Judicial de 1982 (Mascarell Navarro, 1997).

El Tribunal de las Aguas está compuesto por ocho síndicos que representan las ocho acequias de la huerta valenciana (Mislata, Na Rovella, Favara, Quart, Benacher-Faitanar, Mestalla, Rascanya y Tormos). Los síndicos son elegidos por cada acequia de forma democrática y de acuerdo con sus propias ordenanzas. Con carácter general, para poder ser elegido síndico se debe ostentar la condición de labrador y propietario directo de los terrenos regados por la acequia correspondiente, quedando excluidos arrendatarios y otros poseedores indirectos. De entre los síndicos se elige al presidente y vicepresidente del Tribunal de las Aguas. Además, durante las sesiones se cuenta con la colaboración de personal no jurisdiccional como son el secretario y el alguacil (Plaza Penadés, 2007). En la Figura 1.1, se muestra una obra pictórica realizada por Bernardo Ferrándiz en 1865 en la que se representa una sesión del Tribunal de las Aguas en 1808. En la Figura 1.2, se muestra un grabado del Tribunal de las Aguas realizado por Gustave Doré en 1978.



Figura 1.1. Obra "Tribunal de las Aguas de Valencia, 1808" realizada por Bernardo Ferrándiz en 1865 (MUMA Museu Municipal d'Alzira)



Figura 1.2. Grabado "Le tribunal des eaux, a Valence" realizado por Gustave Doré en 1978 (Archivo del Tribunal de las Aguas de Valencia)

En 2006, el Tribunal de las Aguas fue declarado Bien de Interés Cultural Inmaterial, inscribiéndose dicha declaración en la Sección 1.^a del Inventario General del Patrimonio Cultural Valenciano. Como medida de protección, se estableció que el Gobierno Valenciano debe velar por la conservación de los valores tradicionales del Tribunal de las Aguas mediante el estudio de esta manifestación cultural y la documentación de los testimonios disponibles para asegurar su pervivencia (Decreto 73/2006). En 2009, el Tribunal de las Aguas fue incluido en la Lista Representativa del Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

En las Figuras 1.3 y 1.4, se muestran dos imágenes de una sesión del Tribunal de las Aguas, la primera tomada durante el periodo comprendido entre 1930 y 1950, y la segunda tomada en la actualidad.



Figura 1.3. Sesión del Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia (1930-1950)
(Colección de postales, Archivo de la Catedral de Valencia).

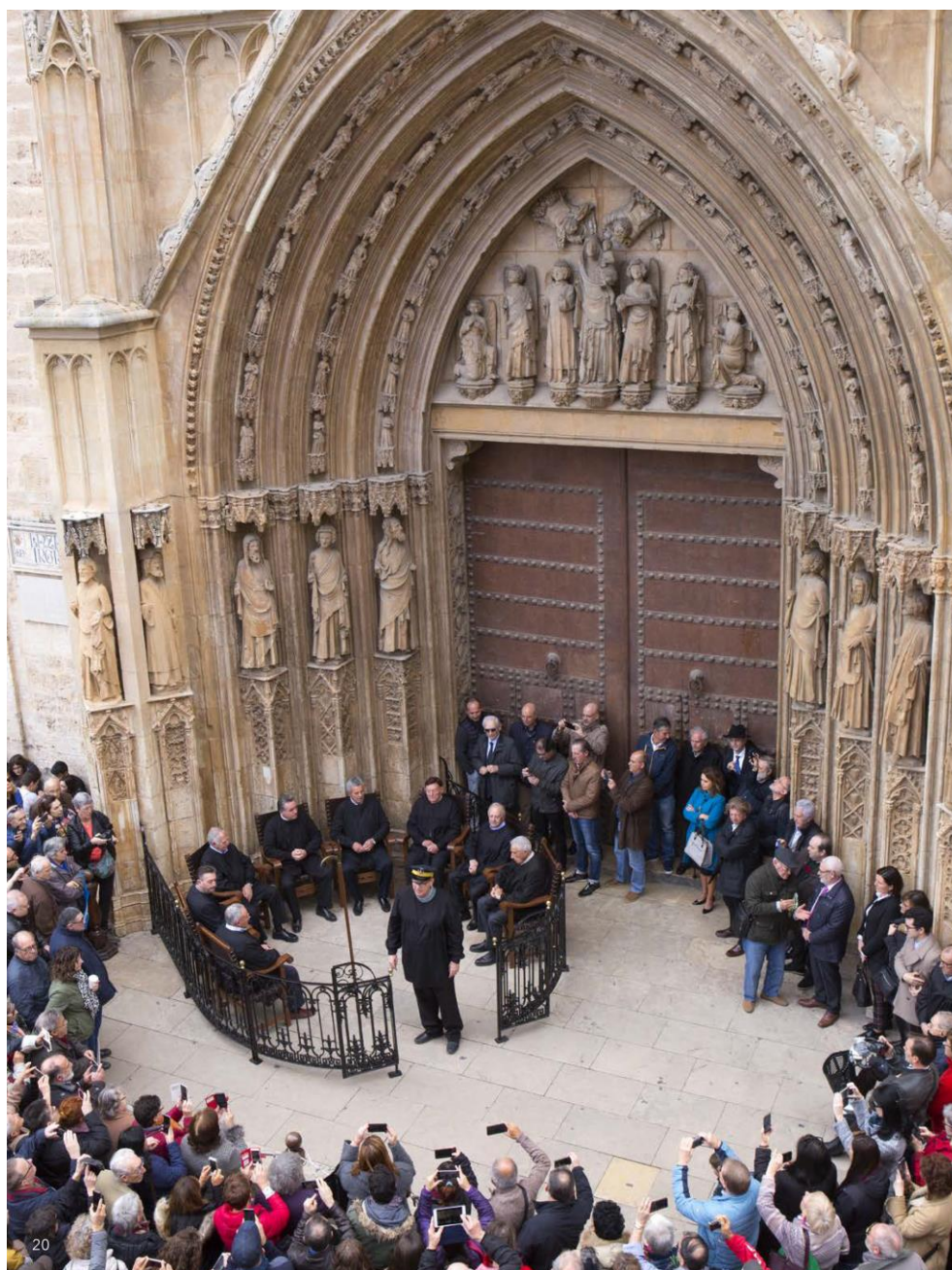


Figura 1.4. Sesión del Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia en la actualidad (Archivo del Tribunal de las Aguas de Valencia).

1.4. Entorno del Tribunal de las Aguas.

El Tribunal de las Aguas se ubica en la monumental plaza de la Virgen de la ciudad de Valencia (España). En este entorno encontramos construcción de importantes valores patrimoniales, como son la Catedral de Valencia, la casa Vestuario, la Basílica de Nuestra Señora de los Desamparados y el Palacio de la Generalitat Valenciana. En la Figura 1.5, se muestra un plano de situación del entorno del Tribunal de las Aguas.



Figura 1.5. Plano de situación del entorno del Tribunal de las Aguas.

Las sesiones del Tribunal de las Aguas se desarrollan, cada jueves, bajo la gótica Puerta de los Apóstoles de la Catedral de Valencia. Construida a principios del siglo XIV por Nicolás de Ancona, la Puerta de los Apóstoles fue el primer añadido a la estructura primitiva de la Catedral de Valencia, cuyas obras comenzaron en 1262 bajo la dirección de Arnau Vidal. De estilo gótico e inspirada en los modelos franceses, la Puerta de los Apóstoles representa una sucesión de esculturas cubiertas por doseles que personifican a los apóstoles. En el tímpano se reproduce la figura de la Virgen rodeada por ángeles y en las arquivoltas se muestran cuarenta y ocho relieves que representan a vírgenes, ángeles y bienaventurados. Coronando la puerta se erige un rosetón de coloridas vidrieras que muestra el trazado de la estrella de David. El conjunto de la puerta destaca por su elaborada y minuciosa decoración, siendo una excelente muestra del gótico tardío del Siglo de Oro Valenciano (Nuñez Sanmartín, 2017).

Desde su construcción, la Puerta de los Apóstoles ha sufrido varias intervenciones con el objetivo de paliar las patologías debidas principalmente a las humedades y a los problemas derivados del anidamiento de palomas. En 1957, el arquitecto Alejandro Ferrant dirigió las obras para la sustitución de la tracería del rosetón debido a que presentaba un elevado grado de descomposición. En 1976, los arquitectos Alejandro Ferrant y Joan Segura de Lago iniciaron una importante intervención de renovación sobre la arquitectura de la Puerta de los Apóstoles. En esta intervención, se decidió retirar las esculturas de los apóstoles para evitar su progresiva degradación (Chapapría, 1993).

Entre 1991 y 1992, se realizaron una serie de intervenciones orientadas a la conservación y puesta en valor de la Puerta de los Apóstoles. En este momento, se planteó la posibilidad de volver a colocar las esculturas de los apóstoles para lograr unidad con el resto de piezas originales. No obstante, debido al grave riesgo de degradación al que se iban a someter los originales, se optó por colocar en su lugar unas réplicas y mantener los originales custodiados en el Museo de la Catedral (Chapapría, 1993). En la Figura 1.6, se muestra una comparativa de la Puerta de los Apóstoles antes de las últimas intervenciones (1991-1992) y en la actualidad.

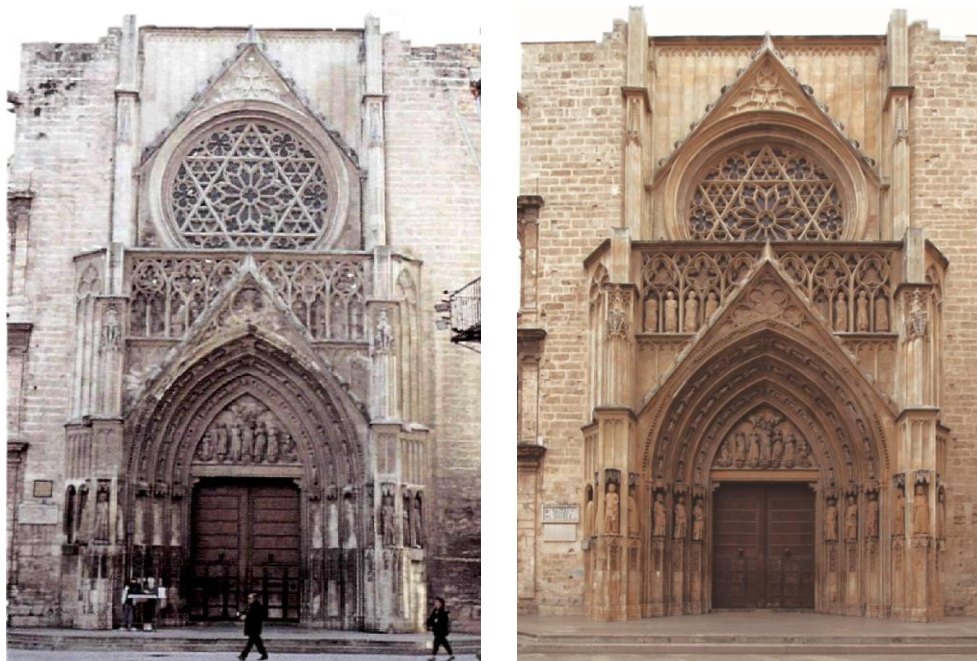


Figura 1.6. Puerta de los Apóstoles antes de las intervenciones realizadas entre 1991 y 1992 (Julián Esteban Chapapría) y en la actualidad.

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivos generales.

- Aplicar la acústica virtual en el estudio del patrimonio sonoro del Tribunal de las Aguas.
- Realizar una puesta en valor del patrimonio artístico, arquitectónico y acústico del entorno del Tribunal de las Aguas a través de la simulación acústica y visual.
- Caracterizar el paisaje sonoro del entorno del Tribunal de las Aguas.

1.5.2. Objetivos específicos.

- Analizar la evolución histórica del Tribunal de las Aguas y estudiar el entorno en el que tienen lugar las sesiones.
- Estudiar el comportamiento acústico del entorno del Tribunal de las Aguas a partir de la medición acústica realizada.
- Construir y calibrar el modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas.
- Evaluar la influencia de la presencia de público en la acústica del entorno.
- Realizar una grabación en cámara anecoica de una sesión del Tribunal de las Aguas y caracterizar la fuente habla del alguacil.
- Auralizar el sonido de una sesión del Tribunal de las Aguas.
- Realizar y texturizar el modelo visual del entorno del Tribunal de las Aguas.
- Realizar recorridos virtuales por el interior de la Catedral de Valencia y difundir los resultados a través de la página web oficial del Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG.
- Determinar los parámetros psicoacústicos del entorno del Tribunal de las Aguas mediante la realización de una encuesta a través de una plataforma digital.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Toma de datos.

2.1.1. Toma de datos geométricos.

Debido a la complejidad del entorno, la toma de datos geométricos de la Puerta de los Apóstoles se ha realizado mediante la técnica de escaneado en 3D. Se trata de un procedimiento que permite obtener una nube de puntos tridimensional de un espacio determinado. Los resultados obtenidos con el escaneo en 3D han sido completados y verificados con mediciones *in situ* con un láser de medición. En la medición del entorno del Tribunal de las Aguas, se ha empleado un escáner 3D modelo *FARO Focus 3D* y un láser de medición modelo *CESVA CS310*.

En total, se han realizado un total de 8 escaneos, los cuales han sido tratados y unidos mediante el programa informático *Scene*. El resultado final es una nube de puntos del entorno que se ha exportado al software *AutoCad* para el levantamiento de los modelos virtuales. El resto de medidas necesarias de la plaza de la Virgen y de la calle del Miguelete, se han obtenido a partir de los planos y ortofotos existentes (Díaz et al., 2020). En las Figuras 2.1 y 2.2, se muestra la nube de puntos obtenida a partir del escaneado en 3D del entorno del Tribunal de las Aguas.

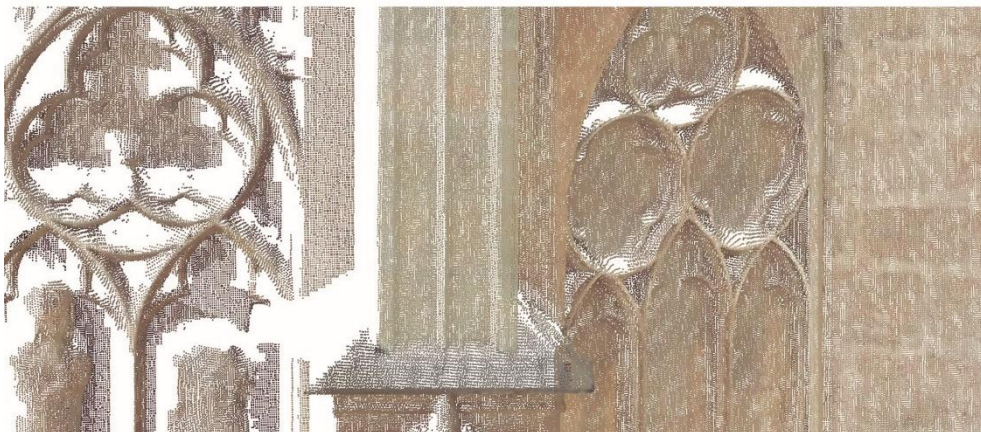
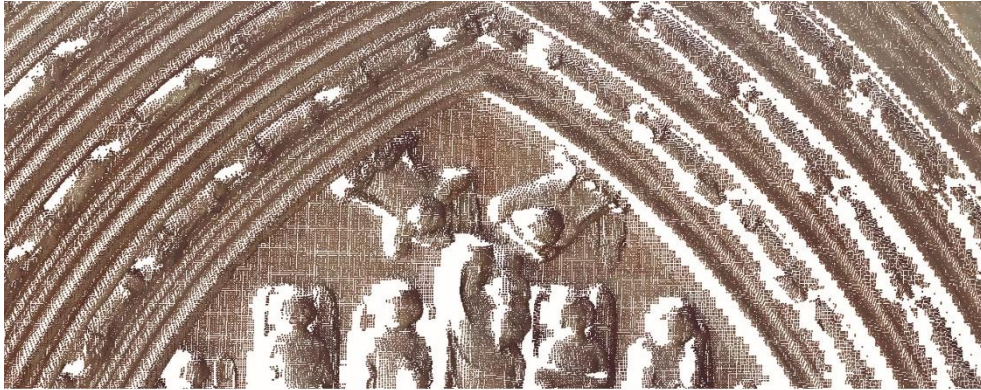


Figura 2.1. Detalles de la nube de puntos de la Puerta de los Apóstoles de la Catedral de Valencia.

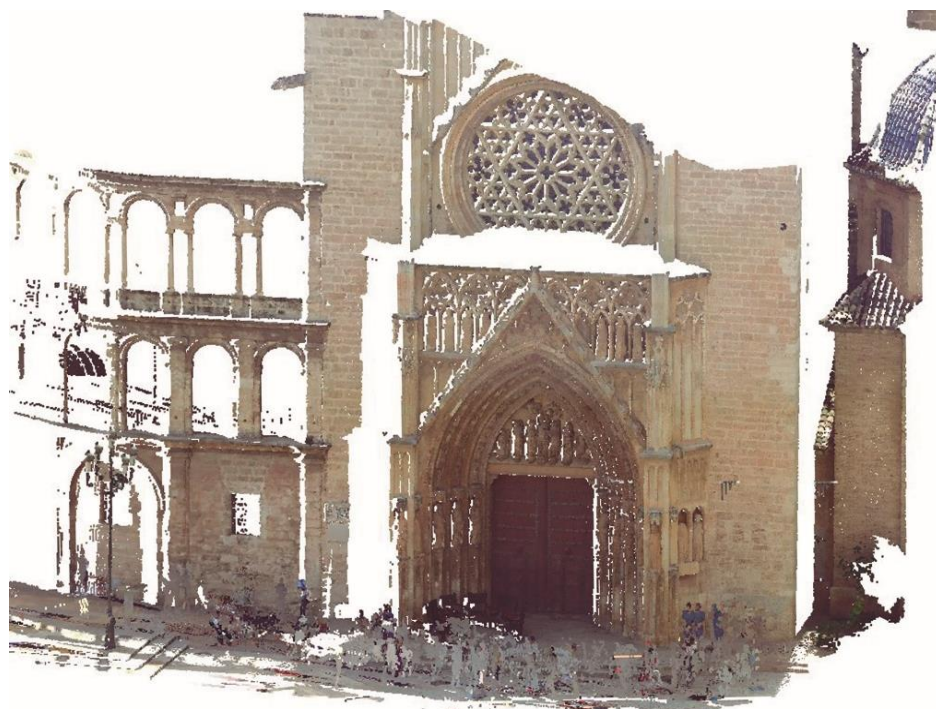


Figura 2.2. Nube de puntos del escaneado en 3D del entorno del Tribunal de las Aguas.

2.1.2. Toma de datos acústicos.

Esta investigación parte de la medición acústica del entorno del Tribunal de las Aguas realizada por el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG. La metodología seguida se basa en los requerimientos establecidos en las normas UNE-EN ISO-3382-1:2010 e ISO 12913-2:2018. Las medidas se realizaron a primera hora de la mañana con escaso tránsito de viandantes, con el objetivo de minimizar el ruido de fondo y evitar posibles interferencias que alteraran los resultados. En todo caso, el nivel de fuente acústica se situó 45 dB por encima del nivel de ruido de fondo para cada banda de frecuencias. Con ello, se garantiza que el ruido de fondo no tiene influencia en los resultados obtenidos.

En total, se establecieron 9 posiciones de la fuente, correspondientes con la ubicación del aljibe (fuente A) y la ubicación de cada uno de los asientos de los miembros del Tribunal de las Aguas (fuentes B-I); y 6 posiciones de los receptores en ubicaciones habituales de los oyentes, 2 en el interior de la Puerta de los Apóstoles y 4 orientados hacia la Plaza de la Virgen (Díaz et al., 2020). En la Figura 2.3, se muestra un plano del entorno del Tribunal de las Aguas donde se indica la ubicación de las fuentes sonoras (A-I) y los puntos de medida (1-6).

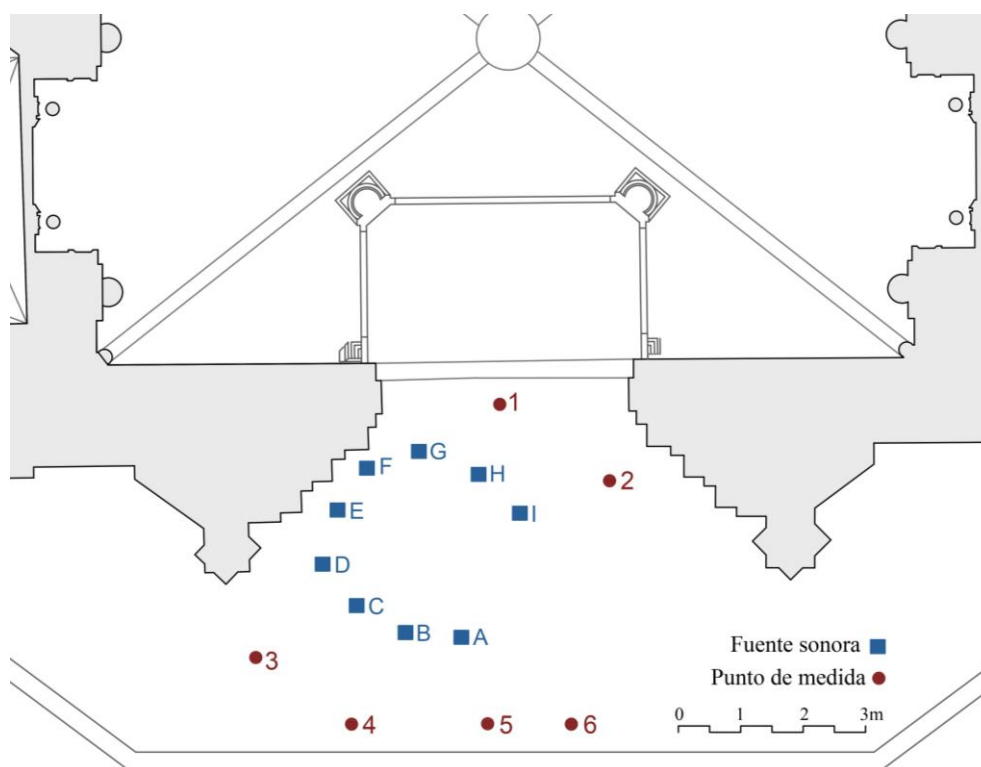


Figura 2.3 Ubicación de las fuentes sonoras (A-I) y los puntos de medida (1-6) en la medición acústica del entorno del Tribunal de las Aguas.

Para la medición acústica de la Catedral de Valencia, se ha empleado un equipo de emisión sonora compuesto por una fuente dodecaédrica omnidireccional modelo *DO12* y un amplificador modelo *M-1000*. Para el registro de la emisión sonora, se han utilizado micrófonos omnidireccionales modelo *Behringer B5*. Además, se ha empleado una tarjeta de sonido multicanal de ocho canales modelo *Presonus AudioBox 1818 VSL*, de los cuales uno fue usado para emitir la señal acústica y seis para registrar dicha señal. El registro y grabación de la señal percibida, así como la determinación de los parámetros acústicos del recinto, se ha realizado con el programa informático *WinMLS*.

En la Figura 2.4, se muestra una fotografía tomada durante la medición acústica del entorno del Tribunal de las Aguas. En la Figura 2.5 se muestra el esquema de conexiones de equipo de medición acústica utilizado.



Figura 2.4. Medición acústica del Tribunal de las Aguas realizada por el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG.

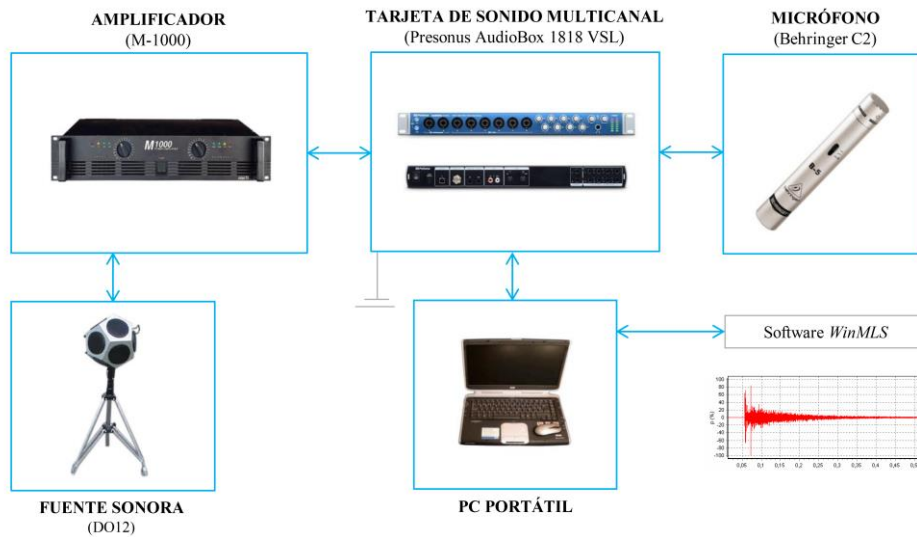


Figura 2.5. Esquema de conexiones del equipo de medición acústica.

2.2. Simulación acústica.

2.2.1. Levantamiento del modelo acústico.

Para la simulación acústica se ha empleado un modelo simplificado del entorno del Tribunal de las Aguas, que incluye la Puerta de los Apóstoles, la plaza de la Virgen y la calle del Miguelete. A partir de los escaneos en 3D y la planimetría existente, se ha levantado una estructura alámbrica del entorno utilizando AutoCad, software que permite trabajar cómodamente tanto con planos como con la nube de puntos generada. Este modelo alámbrico se ha exportado al software Sketchup, donde se han generado las superficies del modelo correctamente orientadas y distribuidas por capas según los materiales reales.

Para poder trabajar posteriormente con los programas acústicos *CATT-Acoustic* y *Odeon*, se ha cerrado el modelo con superficies que representan el campo abierto, a las cuales se les ha aplicado material 100% absorbente en el proceso de simulación acústica. El resultado final es un modelo simplificado compuesto por 516 superficies y con un volumen de 150.865 m³ (Díaz et al., 2020). En la Figura 2.6, se muestra una vista general del modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas.

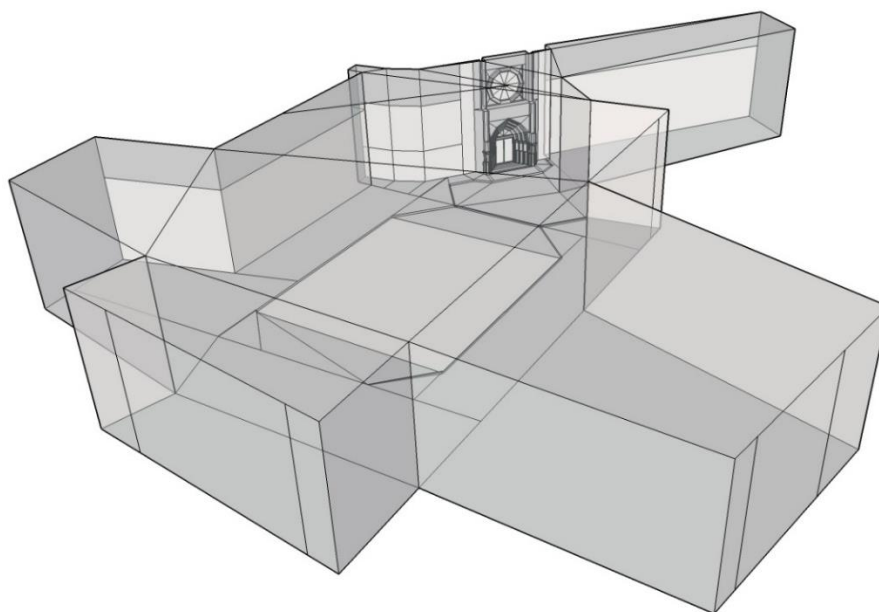


Figura 2.6. Modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas.

En la elaboración del modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas, se han tomado en consideración estudios sobre el grado de simplificación adecuado para que no interfiera con la fiabilidad de los resultados (Lacatis et al., 2011; Giménez et al., 2011; Vorländer, 2011; Savioja & Svensson, 2015). Como criterio general, se han eliminado todos los elementos y detalles decorativos demasiado pequeños y con escasa influencia en la acústica del recinto. En la Figura 2.7, se muestra el grado de simplificación del modelo acústico en comparación con el modelo real.

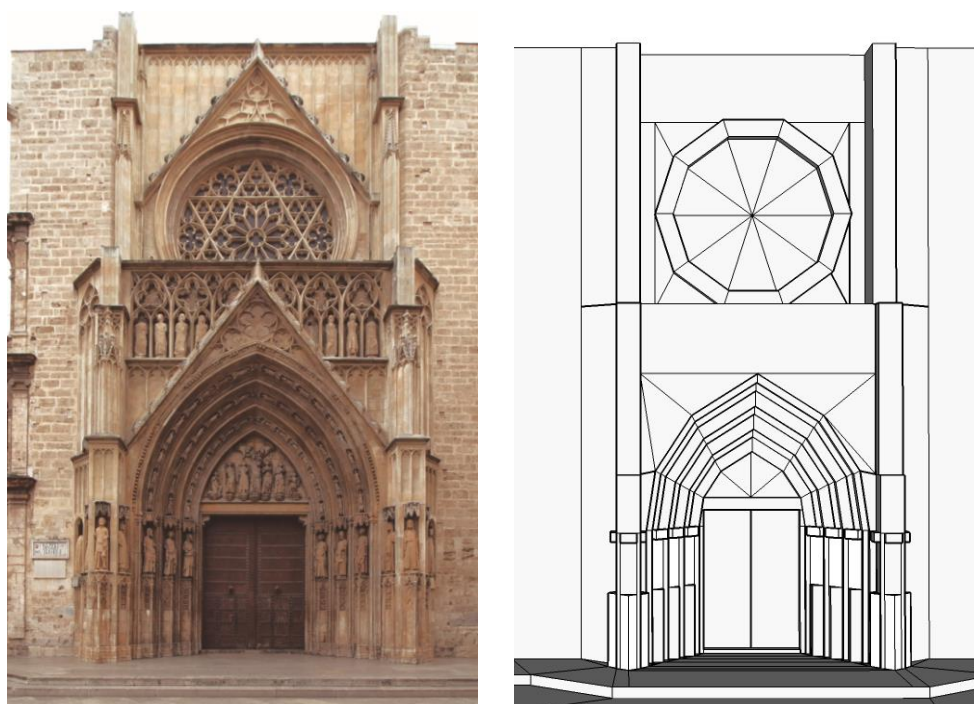


Figura 2.7. Comparativa entre el modelo real y el modelo acústico simplificado.

2.2.2. Calibración del modelo acústico.

El modelo acústico de la Catedral de Valencia se ha exportado al programa informático *Odeon* para realizar su calibración acústica. Con el objetivo de facilitar el proceso de calibración acústica, las superficies del modelo se han agrupado en capas teniendo en cuenta los materiales reales, según se muestra en las Figuras 2.8 y 2.9.

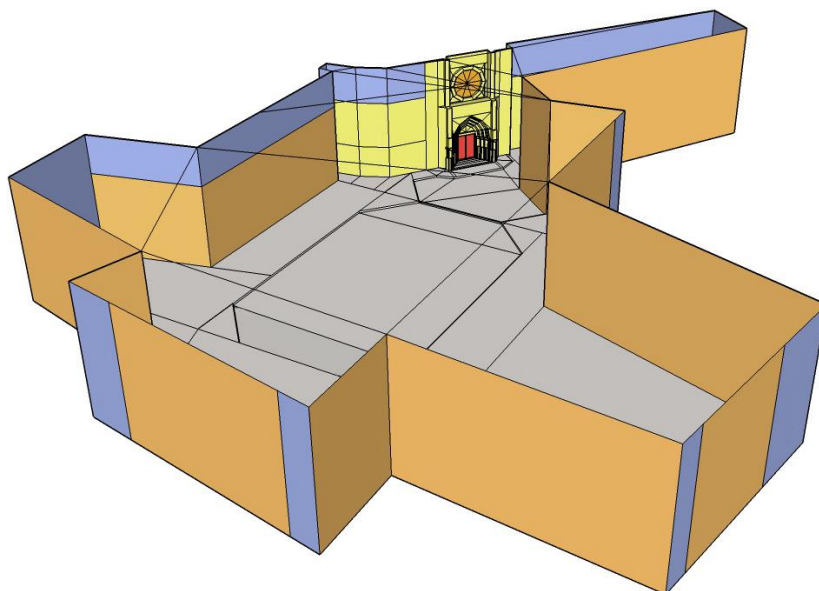


Figura 2.8. Modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas con la distribución de capas. Vista general.



Figura 2.9. Modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas con la distribución de capas. Vista detalle de la Puerta de los Apóstoles.

El proceso de calibrado consiste en asignar unas características acústicas determinadas a cada una de las superficies del modelo, con el objetivo de lograr que el modelo virtual tenga un comportamiento acústico similar al recinto real estudiado. En concreto, se determinan los coeficientes de absorción y difusión de cada una de las superficies del modelo acústico. Para establecer los coeficientes de absorción de cada material, se han tomado como referencia los valores obtenidos mediante ensayos normalizados (Vörländer, 2008), realizando las adaptaciones necesarias durante el proceso de calibración acústica. Los coeficientes de difusión se han determinado teniendo en cuenta el grado de detalle o rugosidad del elemento real. Para ello, se han tomado en consideración estudios sobre el tratamiento del coeficiente de difusión en simulaciones acústicas (Cerdá et al., 2011).

Para la validación del modelo acústico se han analizado, para las nueve posiciones de la fuente sonora, las variaciones entre la simulación y la medición en relación con el umbral diferencial (*JND*) de cada parámetro acústico. El *JND* es una magnitud que establece el límite para cada parámetro acústico a partir del cual las diferencias comienzan a ser perceptibles por el oído humano. Los valores de *JND* de cada parámetro acústico utilizado en esta investigación se han obtenido de la norma UNE-EN ISO 3382-1 y de estudios experimentales (Höhne & Stroth, 1995; Witew, 2006).

En la calibración del modelo acústico de la Catedral de Valencia se han analizado los resultados obtenidos para el tiempo de reverberación (T_{30}), el tiempo de caída inicial (*EDT*), la fuerza sonora (*G*), la claridad musical (C_{80}), la claridad de la voz (C_{50}) y el tiempo central (T_5).

2.2.3. Simulación de la presencia de público.

Una vez obtenido el modelo acústico calibrado, se puede analizar la acústica del entorno frente a diferentes variables. A través de simulaciones acústicas, se ha analizado la influencia de la audiencia en la acústica en el paisaje sonoro del Tribunal de las Aguas. Para ello, se han construido unos volúmenes simplificados que representan a la audiencia. Estos volúmenes se han incorporado al modelo acústico en la ubicación habitual de los oyentes y de los miembros del Tribunal de las Aguas.

En la Figura 2.10 se muestra una vista del modelo acústico del Tribunal de las Aguas con los volúmenes que representan a la audiencia.

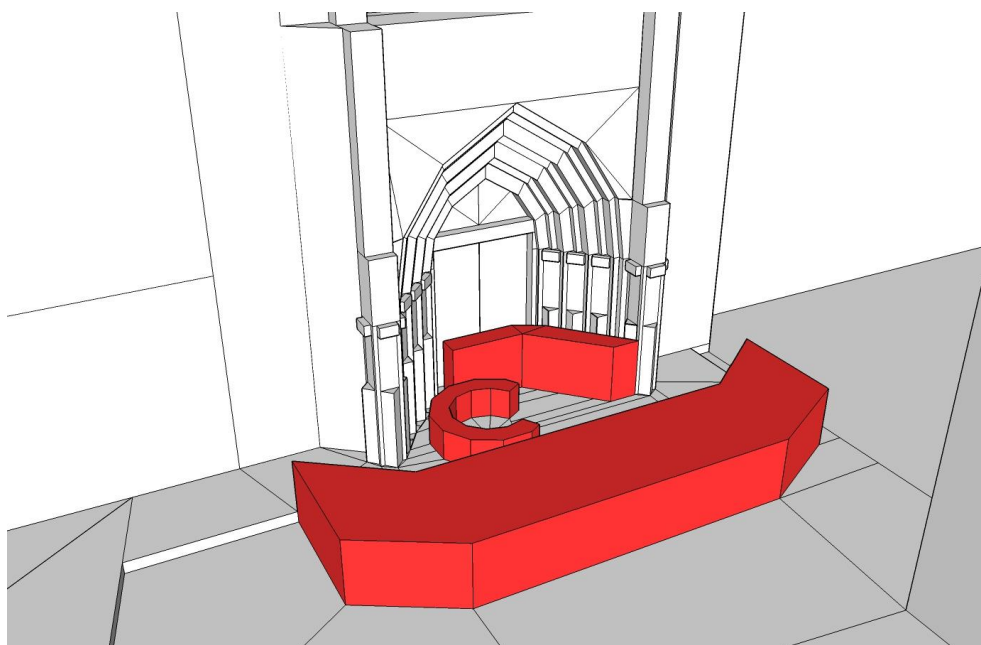


Figura 2.10. Modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas con audiencia.

2.3. Auralización.

Kleiner et al. (1993) definieron el término de auralización como “*el proceso de presentación audible, por modelado físico o matemático, del campo sonoro de una fuente en el espacio, de manera que se pueda modelar la experiencia de escucha binaural en una posición dada en el espacio modelado*”. Se trata de un proceso que permite representar el sonido real de un entorno a través de simulaciones acústicas realizadas con programas informáticos específicos.

El programa informático *Odeon* permite obtener el sonido auralizado en cualquier punto de un modelo acústico calibrado a través de simulaciones acústicas. Para ello, es necesario establecer la ubicación de la fuente de emisión sonora y de los receptores en los que se calculará el sonido auralizado. Además, se debe introducir una señal anecoica sobre la que se realizará la auralización. Una señal anecoica es un tipo de señal que carece por completo de reverberación, es decir, se compone exclusivamente por sonido directo. Para obtener una señal anecoica, es necesario realizar una grabación en una cámara anecoica, las cuales están específicamente diseñadas para absorber las reflexiones producidas por ondas acústicas evitando la reverberación del sonido.

En esta investigación, se ha realizado la auralización del paisaje sonoro del Tribunal de las Aguas. Con el objetivo de lograr un alto grado de realismo en la auralización del sonido, se ha realizado una grabación en cámara anecoica de una sesión del Tribunal de las Aguas, a partir de la cual se ha obtenido la señal anecoica y la directividad de la fuente. En la Figura 2.11, se muestra una fotografía tomada durante la medición realizada en cámara anecoica.

Para obtener la directividad de una fuente de sonido, es necesario realizar la grabación simultánea desde múltiples direcciones a la misma distancia respecto de la fuente en un entorno anecoico (Pollow, 2015). Debido al número de micrófonos disponibles, se realizaron un total de cuatro mediciones en cinco planos diferentes, formando una esfera con centro la fuente de emisión sonora, es decir, la boca del alguacil. En todas las mediciones se mantuvo un micrófono en la misma ubicación para poder ajustar posteriormente las posibles variaciones en la potencia de emisión sonora. En las Figuras 2.12-2.14, se muestra el esquema empleado durante la medición. A partir de esta grabación, se ha obtenido la señal anecoica y se ha caracterizado la fuente habla propia del alguacil.

Para lograr un mayor nivel de realismo, se ha incorporado en la simulación acústica el sonido auralizado del agua de la fuente, el murmullo del público y el sonido de las campanas., a partir de la señal anecoica disponible en la base de datos del Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG.

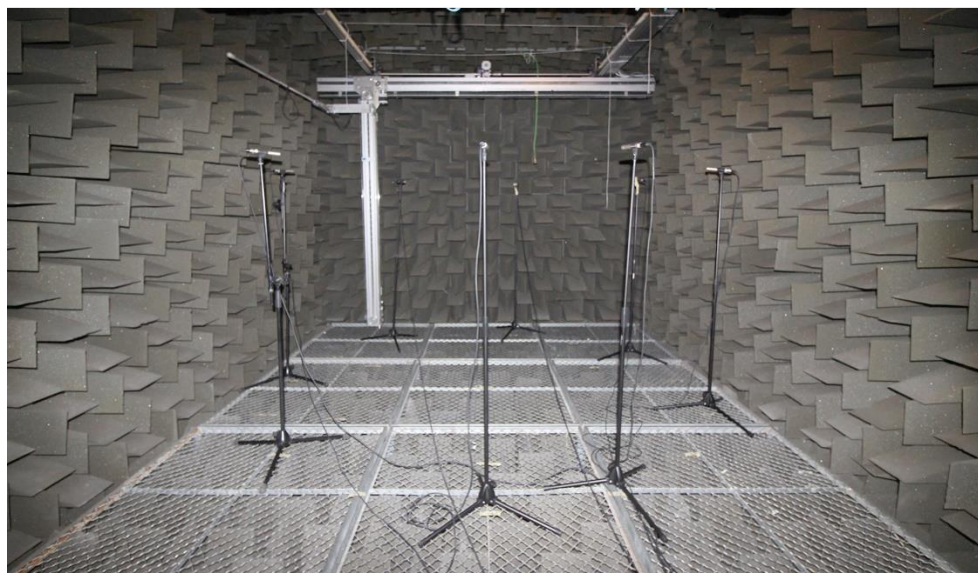


Figura 2.11. Fotografía tomada durante la grabación en cámara anecoica de una sesión del Tribunal de las Aguas.

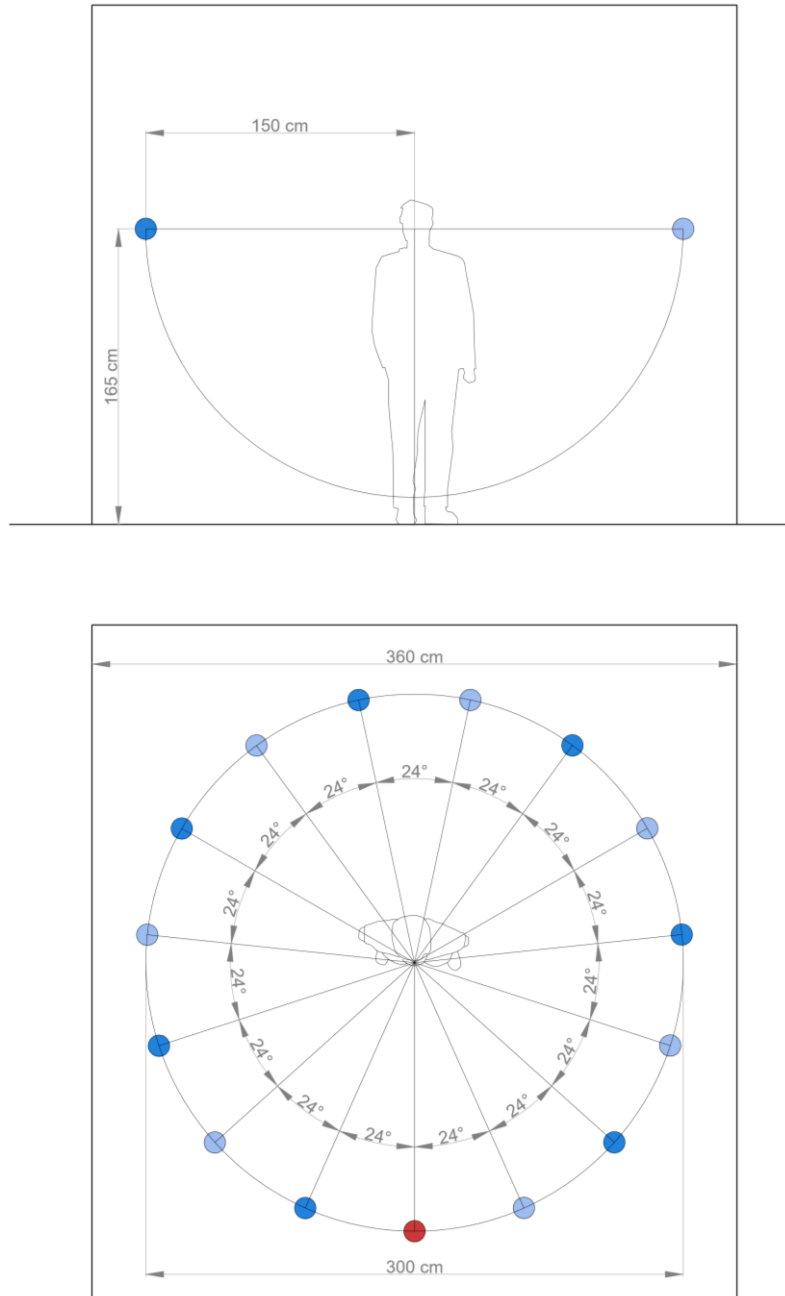


Figura 2.12. Ubicación de los micrófonos durante la medición para la caracterización acústica de la fuente (mediciones 1 y 2).

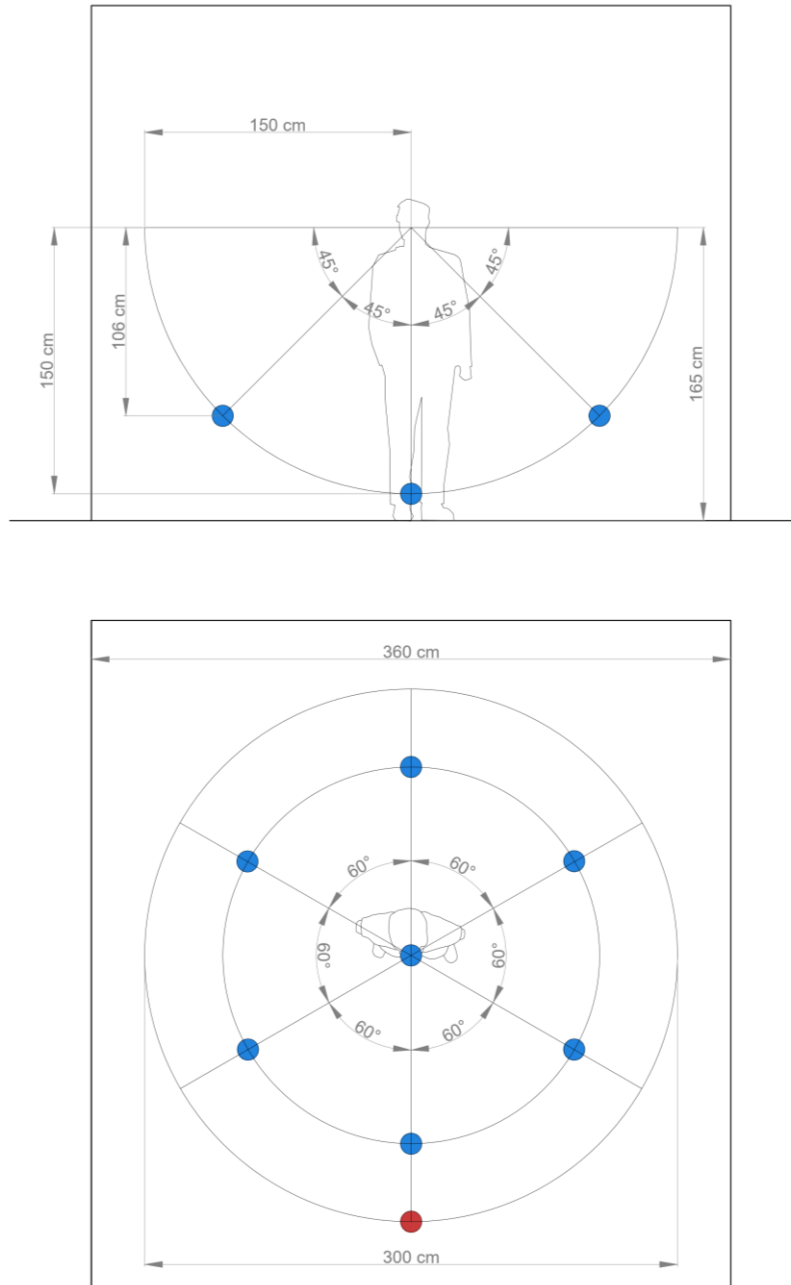


Figura 2.13. Ubicación de los micrófonos durante la medición para la caracterización acústica de la fuente (medición 3).

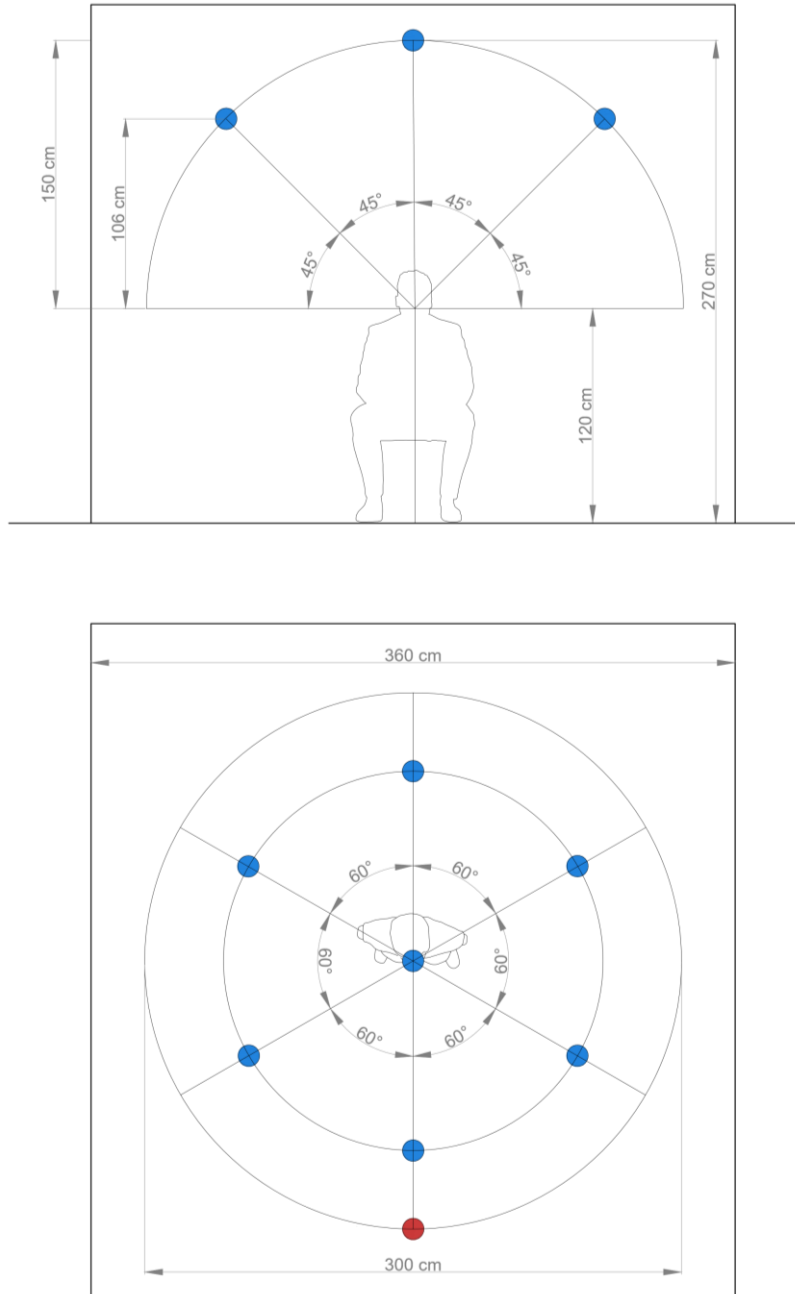


Figura 2.14. Ubicación de los micrófonos durante la medición para la caracterización acústica de la fuente (medición 4).

2.4. Simulación visual.

La simulación visual es un proceso que consiste en recrear el aspecto real de un entorno a través de programas informáticos específicos. Una vez creado el modelo visual, es posible renderizar imágenes y videos realistas desde cualquier punto del modelo.

Para realizar la simulación visual del entorno del Tribunal de las Aguas, se ha construido un modelo virtual en 3D con el programa informático *AutoCad*. Este modelo tiene un mayor nivel de detalle que el utilizado para la simulación acústica, puesto que se pretende conseguir un alto grado de realismo. En la Figura 2.15, se muestra el modelo visual del entorno del Tribunal de las Aguas.

El modelo visual del entorno del Tribunal de las Aguas se ha exportado al programa informático *3dsMax* para realizar su texturización. El proceso de texturización consiste en asignar unas imágenes determinadas a cada una de las superficies del modelo según los materiales reales. Para facilitar el proceso de texturización, las superficies del modelo visual se han agrupado en diferentes capas. En la Figura 2.16, se muestran vistas de detalle con la distribución en capas realizada.



Figura 2.15. Modelo visual del entorno del Tribunal de la Aguas.

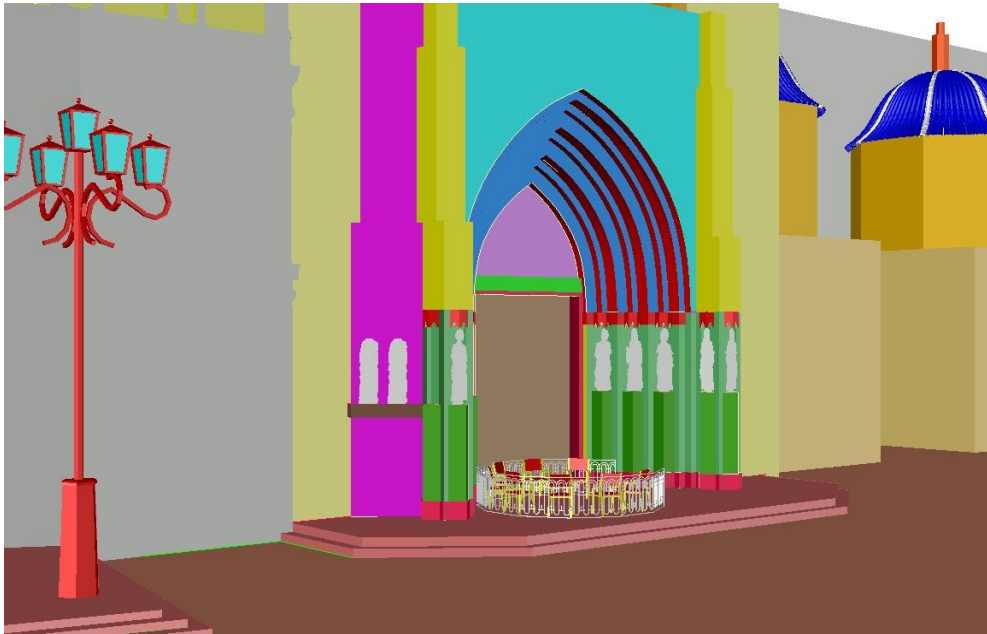


Figura 2.16. Modelo visual del entorno del Tribunal de las Aguas con la distribución en capas.

A partir de fotografías reales tomadas del interior de la Catedral de Valencia, se ha generado una amplia biblioteca de texturas que se han empleado en la simulación visual, con lo que se obtiene un elevado grado de realismo. En la Figura 2.17, se muestran ejemplos de las texturas utilizadas. Una vez aplicadas las texturas a cada uno de las superficies del modelo, se ha incorporado una iluminación adecuada para obtener una representación realista del templo.

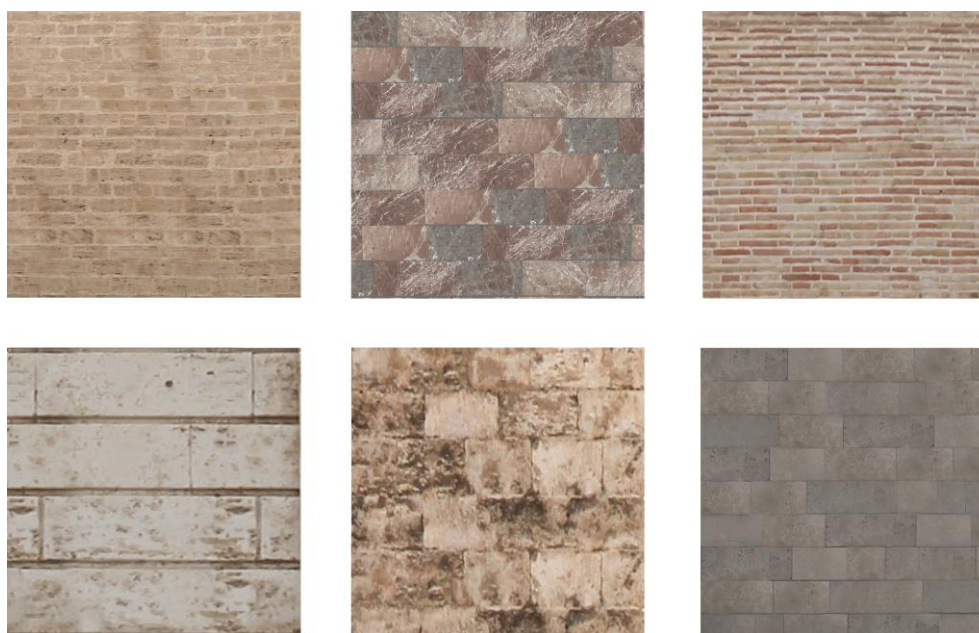


Figura 2.17. Ejemplos de texturas empleadas en la elaboración del modelo visual del Tribunal de las Aguas.

2.5. Evaluación del paisaje sonoro del Tribunal de la Aguas.

Para la evaluación del paisaje sonoro del Tribunal de las Aguas, se ha empleado el modelo bidimensional establecido en la norma ISO 12913-3. Empleando la simulación visual y sonora del Tribunal de las Aguas, se ha lanzado una encuesta con el objetivo de evaluar la calidad acústica del paisaje sonoro a partir de la percepción acústica subjetiva de los oyentes. La encuesta analiza ocho parámetros psicocústicos (agradable, desagradable, dinámico/con actividad, estático/sin actividad, caótico, calmado, vibrante y monótono) a través de una escala likert del 1 al 5, donde 1 es totalmente en desacuerdo y 5 es totalmente de acuerdo. Antes de

iniciar el formulario, se recomienda el uso de auriculares para garantizar una escucha adecuada.

A partir de los datos obtenidos en la encuesta, se han determinado las dos componentes principales de la percepción subjetiva de un paisaje sonoro: agrado (*pleasantness*) y dinamismo (*eventfulness*). Estas componentes oscilan en el rango ± 1 . El resultado obtenido se ha representado en la gráfica del modelo bidimensional para la evaluación de paisajes sonoros (Figura 2.18).

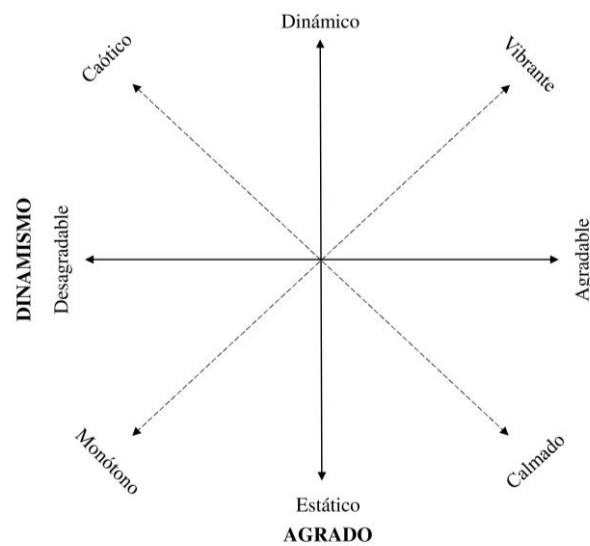


Figura 2.18. Modelo bidimensional para la evaluación de paisajes sonoros (ISO 12913-3).

Capítulo 3

Resultados

3.1. Determinación y análisis de parámetros acústicos objetivos.

A partir de la medición acústica realizada en el entorno del Tribunal de las Aguas, se han determinado los parámetros acústicos objetivos y se han analizado los resultados obtenidos. En concreto, se han estudiado los siguientes parámetros de calidad acústica incluidos en la norma UNE-EN ISO 3382-1:

- Parámetros de reverberación: de reverberación calculado a partir de los valores de decrecimiento entre 5 dB y 35 dB (T_{30}) y tiempo de caída inicial (EDT).
- Parámetros de energía: fuerza sonora (G), claridad musical (C_{80}), claridad para la palabra (C_{50}) y tiempo central (T_S).
- Parámetros de inteligibilidad: índice de transmisión del habla (STI).

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros acústicos analizados.

3.1.1. Parámetros de reverberación (T_{30} y EDT).

3.1.1.1. Tiempo de reverberación (T_{30}).

En la Figura 3.1, se muestra la variación del promedio del tiempo de reverberación (T_{30}) en función de la ubicación de la fuente sonora (A-I). En la Figura 3.2, se muestra la variación del promedio del tiempo de reverberación (T_{30}) en función de la ubicación del punto de medida (1-6). En la Tabla 3.1 se indica el promedio, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para el tiempo de reverberación (T_{30}). Los resultados muestran una elevada dispersión fundamentalmente a bajas y medias frecuencias, mientras que a altas frecuencias se observa una convergencia de los resultados.

Tabla 3.1. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo de reverberación (T_{30}).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} (s)	Promedio	2,06	1,98	1,73	1,64	1,52	1,03
	Des. típica	1,43	1,16	0,77	0,60	0,45	0,19
	Coef. variación	69%	59%	45%	37%	30%	18%
	Máximo	5,36	4,94	3,33	3,12	2,41	1,66
	Mínimo	0,25	0,35	0,67	0,88	0,51	0,77

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único del tiempo de reverberación para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz ($T_{30,mid}$), debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la reverberación percibida por los oyentes recinto (UNE-EN ISO 3382-1). En la Tabla 3.2, se indica el promedio del parámetro $T_{30,mid}$. Los resultados obtenidos muestran una reverberación superior a la que cabría esperar en un entorno abierto, debido a las reflexiones producidas en la minuciosa decoración de la Puerta de los Apóstoles.

Tabla 3.2. Promedio del parámetro $T_{30,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$T_{30,mid}$ (s)	1,07	2,07	2,11	1,16	1,41	1,68	1,44	2,01	1,31

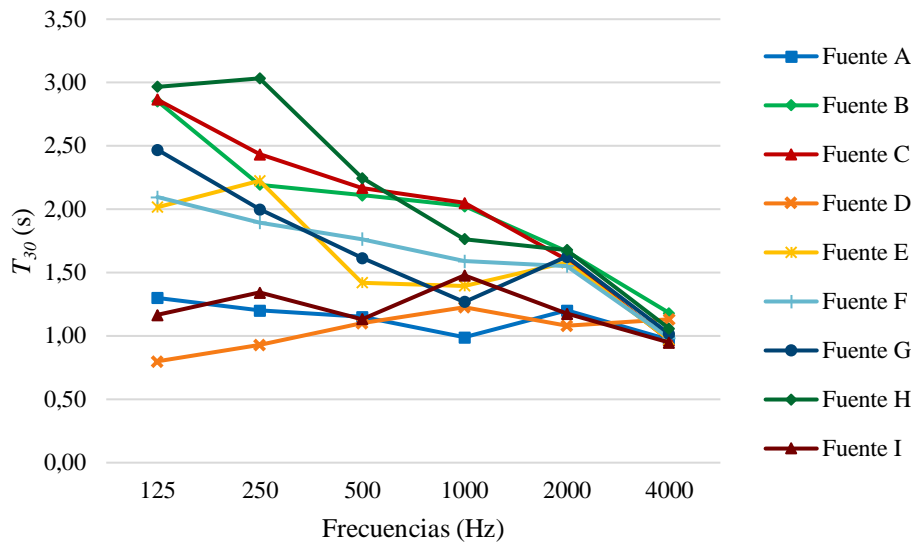


Figura 3.1. Promedio del tiempo de reverberación (T_{30}) en función la ubicación de la fuente sonora.

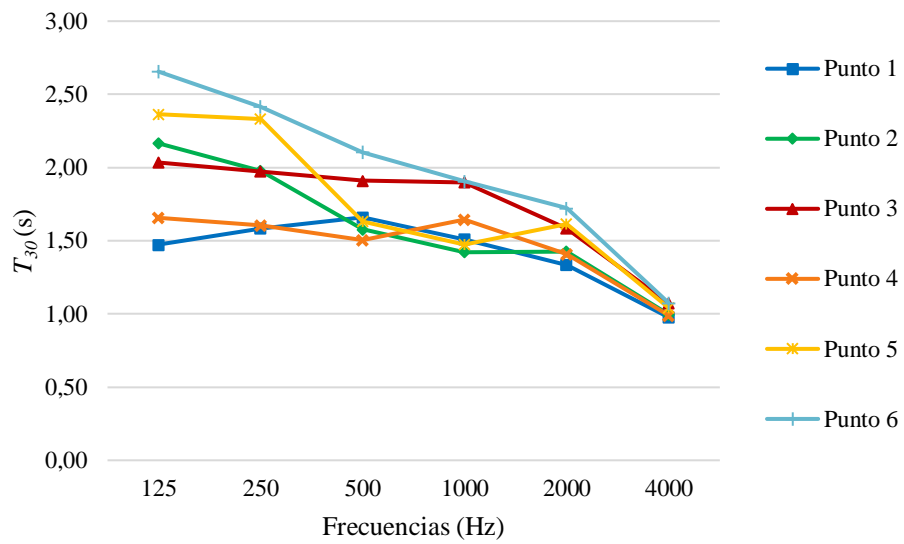


Figura 3.2. Promedio del tiempo de reverberación (T_{30}) en función de la ubicación del punto de medida.

3.1.1.2. Tiempo de caída inicial (*EDT*).

En la Figura 3.3, se muestra la variación del promedio del tiempo de caída inicial (*EDT*) en función de la ubicación de la fuente sonora (A-I). En la Figura 3.4, se muestra la variación del promedio del tiempo de caída inicial (*EDT*) en función de la ubicación del punto de medida (1-6). En la Tabla 3.3 se indica el promedio, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para el tiempo de caída inicial (*EDT*). Se observa una elevada dispersión de los resultados, aunque inferior que en el caso del tiempo de reverberación (T_{30}).

Tabla 3.3. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo de caída inicial (*EDT*).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<i>EDT</i> (s)	Promedio	0,27	0,27	0,23	0,25	0,24	0,23
	Des. típica	0,11	0,12	0,10	0,10	0,09	0,08
	Coef. variación	41%	44%	43%	40%	38%	35%
	Máximo	0,51	0,52	0,50	0,43	0,40	0,35
	Mínimo	0,09	0,06	0,02	0,02	0,02	0,01

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único del tiempo de caída inicial para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz (EDT_{mid}), debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la reverberación percibida por los oyentes recinto (UNE-EN ISO 3382-1). En la Tabla 3.4, se indica el promedio del parámetro EDT_{mid} . Las diferencias notables entre los resultados obtenidos para T_{30} y EDT indican que en el entorno estudiado se produce una difusión no homogénea del sonido.

Tabla 3.4. Promedio del parámetro $T_{30,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A	B	C	D	E	F	G	H	I
EDT_{mid} (s)	0,16	0,22	0,23	0,20	0,28	0,28	0,25	0,28	0,24

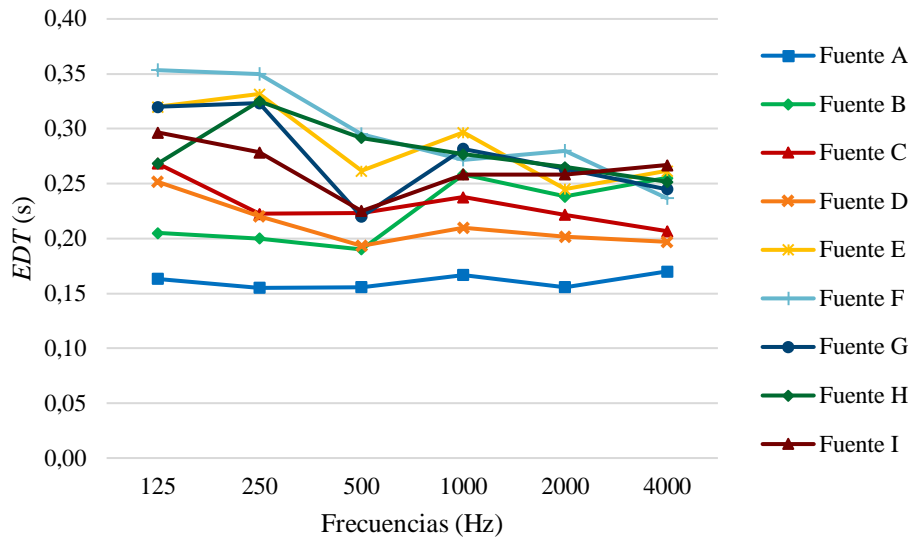


Figura 3.3. Promedio del tiempo de caída inicial (*EDT*) en función de la ubicación de la fuente sonora.

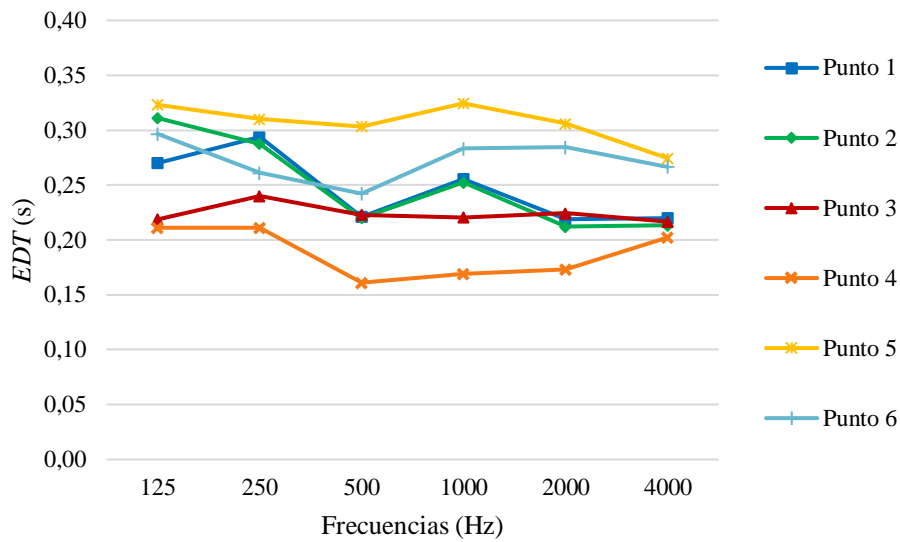


Figura 3.4. Promedio del tiempo de caída inicial (*EDT*) en función de la ubicación del punto de medida.

3.1.2. Parámetros de energía (G , C_{80} , C_{50} y T_s)

3.1.2.1. Fuerza sonora (G).

En la Figura 3.5, se muestra la variación del promedio de la fuerza sonora (G) en función de la ubicación de la fuente sonora (A-I). En la Figura 3.6, se muestra la variación del promedio de la fuerza sonora (G) en función de la ubicación del punto de medida (1-6). En la Tabla 3.5 se indica el promedio, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para la fuerza sonora (G). Se observa una moderada dispersión de los resultados en función de la ubicación de la fuente sonora y los receptores.

Tabla 3.5. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la fuerza sonora (G).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
G (dB)	Promedio	14,81	14,83	14,64	14,45	14,33	14,25
	Des. típica	1,90	1,86	1,96	1,89	1,78	1,69
	Máximo	17,34	17,37	17,26	17,02	16,91	16,79
	Mínimo	10,72	10,86	10,25	10,28	10,33	10,42

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único de la fuerza sonora para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz (G_{mid}), debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la reverberación percibida por los oyentes recinto (UNE-EN ISO 3382-1). En la Tabla 3.6, se indica el promedio del parámetro G_{mid} . Se observan unos valores de la fuerza sonora elevados, es decir, el entorno refuerza con sus reflexiones el sonido emitido. El mayor resultado del parámetro G_{mid} se observa en la fuente A (alguacil), la cual tiene un mayor protagonismo en las sesiones del Tribunal de las Aguas.

Tabla 3.6. Promedio del parámetro G_{mid} según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A	B	C	D	E	F	G	H	I
G_{mid} (dB)	15,9	10,3	14,3	14,6	14,9	14,7	15,2	15,5	15,5

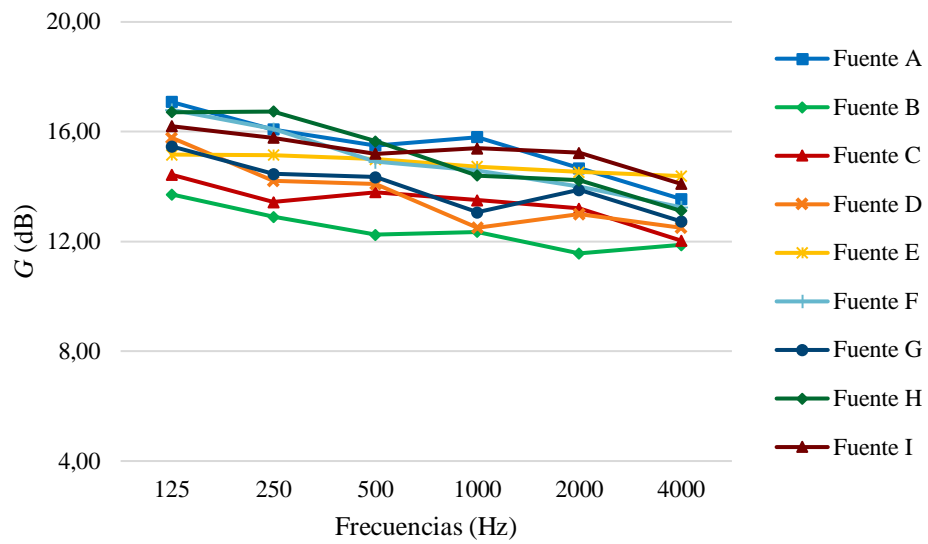


Figura 3.5. Promedio de la fuerza sonora (G) en función de la ubicación de la fuente sonora.

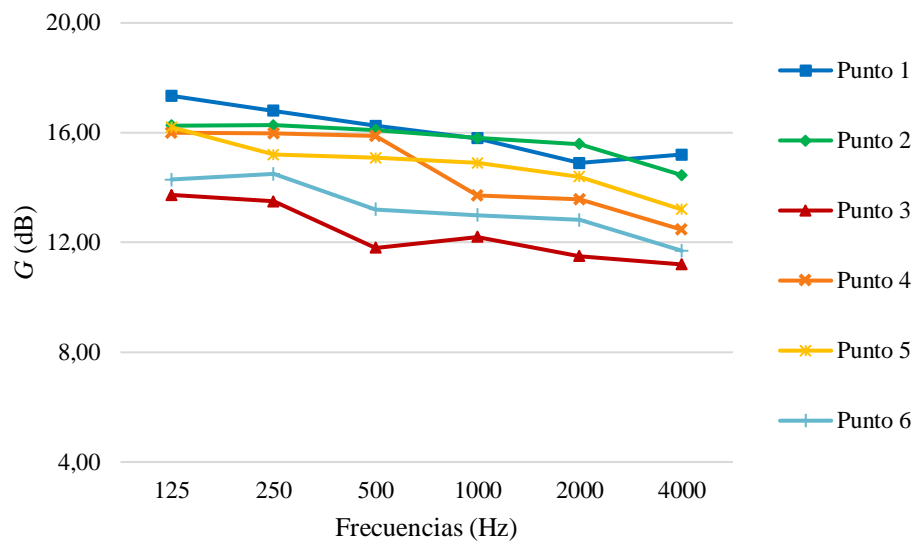


Figura 3.6. Promedio de la fuerza sonora (G) en función de la ubicación del punto de medida.

3.1.2.2. Claridad musical (C_{80}) y claridad para la palabra (C_{50}).

En la Figura 3.7, se muestra la variación del promedio de la claridad musical (C_{80}) en función de la ubicación de la fuente sonora (A-I). En la Figura 3.8, se muestra la variación del promedio de la claridad musical (C_{80}) en función de la ubicación del punto de medida (1-6). En la Tabla 3.7 se indica el promedio, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para la claridad musical (C_{80}). Los resultados muestran una elevada uniformidad, sin presentar cambios significativos en función del de la ubicación de la fuente sonora y los receptores.

Tabla 3.7. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo de la claridad musical (C_{80}).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
C_{80} (dB)	Promedio	14,47	14,76	16,36	15,88	16,03	16,74
	Des. típica	3,78	3,27	3,81	2,26	2,61	2,60
	Máximo	27,90	22,30	36,60	22,70	23,50	24,50
	Mínimo	6,10	9,20	12,90	12,70	12,00	13,00

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único de la claridad musical para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz ($C_{80,mid}$), debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la reverberación percibida por los oyentes recinto (UNE-EN ISO 3382-1). En la Tabla 3.8, se indica el promedio del parámetro $C_{80,mid}$. Los resultados obtenidos muestran que se trata de un entorno con una excelente claridad del sonido percibida por los oyentes. El valor óptimo del parámetro $C_{80,mid}$ se observa en la fuente A (alguacil), la cual tiene un mayor protagonismo en las sesiones del Tribunal de las Aguas.

Tabla 3.8. Promedio del parámetro $C_{80,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$C_{80,mid}$ (dB)	17,2	16,9	15,8	16,5	15,5	15,1	15,9	16,6	15,7

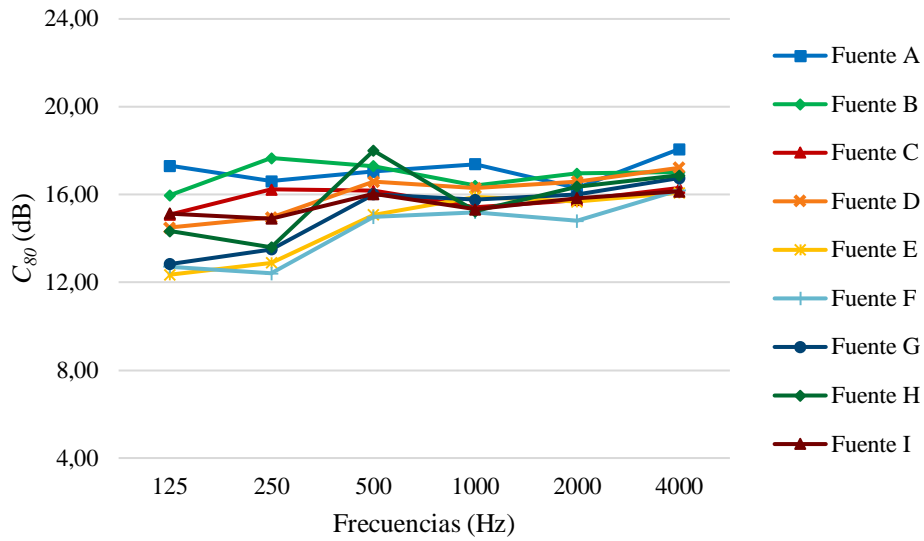


Figura 3.7. Promedio de la claridad musical (C_{80}) en función de la ubicación de la fuente sonora.

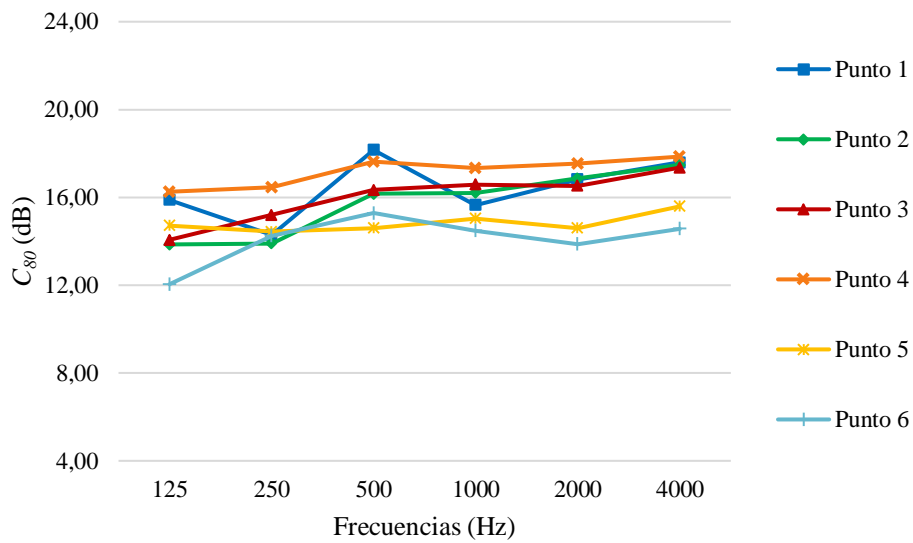


Figura 3.8. Promedio de la claridad musical (C_{80}) en función de la ubicación del punto de medida.

En la Figura 3.9, se muestra la variación del promedio de la claridad para la palabra (C_{50}) en función de la ubicación de la fuente sonora (A-I). En la Figura 3.10, se muestra la variación del promedio de la claridad para la palabra (C_{50}) en función de la ubicación del punto de medida (1-6). En la Tabla 3.9 se indica el promedio, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para la claridad para la palabra (C_{50}). Los resultados muestran una elevada uniformidad, sin presentar cambios significativos en función de la ubicación de la fuente sonora y los receptores.

Tabla 3.9. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la claridad para la palabra (C_{50}).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
C_{50} (dB)	Promedio	11,15	11,32	12,32	11,90	12,55	12,88
	Des. típica	3,84	3,53	2,52	2,15	2,41	2,39
	Máximo	23,00	20,00	18,60	18,50	19,50	20,10
	Mínimo	0,30	3,90	8,30	8,50	8,70	9,20

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único de la claridad para la palabra para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz ($C_{50,mid}$), debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la reverberación percibida por los oyentes recinto (UNE-EN ISO 3382-1). En la Tabla 3.10, se indica el promedio del parámetro $C_{50,mid}$. Los resultados obtenidos muestran que se trata de un entorno con una excelente claridad del sonido percibida por los oyentes. El valor óptimo del parámetro $C_{50,mid}$ se observa en la fuente A (alguacil), la cual tiene un mayor protagonismo en las sesiones del Tribunal de las Aguas.

Tabla 3.10. Promedio del parámetro $C_{50,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$C_{50,mid}$ (dB)	13,4	13,0	12,1	12,5	11,5	11,3	12,0	11,4	11,9

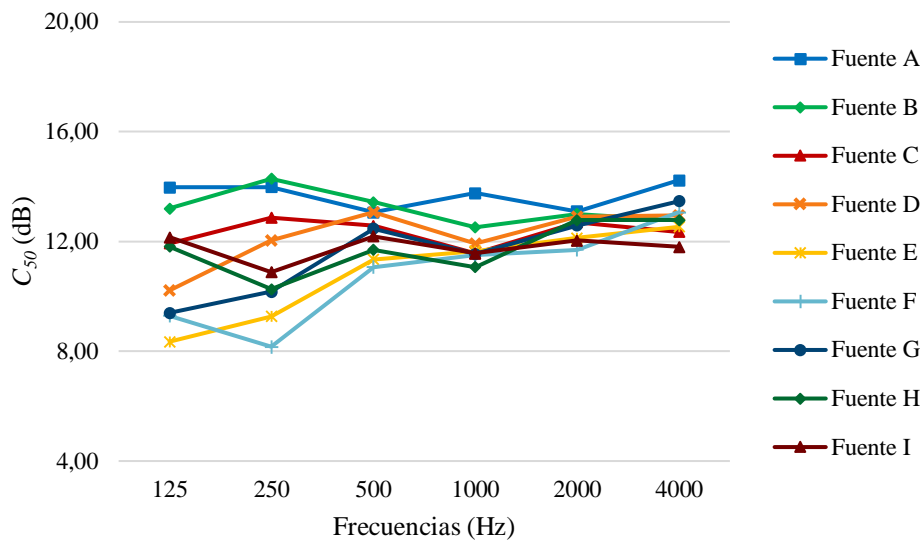


Figura 3.9. Promedio de la claridad para la palabra (C_{50}) en función de la ubicación de la fuente sonora.

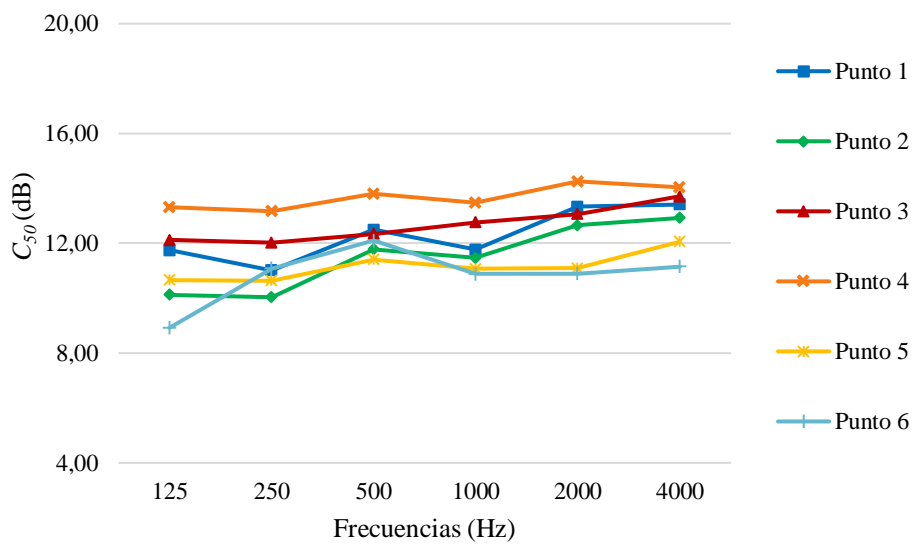


Figura 3.10. Promedio de la claridad para la palabra (C_{50}) en función de la ubicación del punto de medida.

3.1.2.3. Tiempo central (T_S).

En la Figura 3.11, se muestra la variación del promedio del tiempo central (T_S) en función de la ubicación de la fuente sonora (A-I). En la Figura 3.12, se muestra la variación del promedio del tiempo central (T_S) en función de la ubicación del punto de medida (1-6). En la Tabla 3.11 se indica el promedio, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los resultados obtenidos para el tiempo central (T_S). Los resultados muestran una elevada uniformidad, sin presentar cambios significativos en función del de la ubicación de la fuente sonora y los receptores.

Tabla 3.11. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo central (T_S).

F(Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
T_S (ms)	Promedio	32,56	23,52	18,00	16,35	15,98	15,04
	Des. típica	13,42	10,42	9,07	5,35	6,47	5,73
	Máximo	87,00	52,00	65,00	27,00	29,00	25,00
	Mínimo	9,00	7,00	7,00	4,00	3,00	3,00

Para valorar los resultados obtenidos, se ha empleado el promediado en frecuencia de número único del tiempo central para las bandas de octava de 500 a 1000 Hz ($T_{S,mid}$), debido a la mayor influencia de estas frecuencias en la reverberación percibida por los oyentes recinto (UNE-EN ISO 3382-1). En la Tabla 3.12, se indica el promedio del parámetro $T_{S,mid}$. Los resultados obtenidos muestran que se trata de un entorno con una excelente claridad del sonido percibida por los oyentes. El valor óptimo del parámetro $T_{S,mid}$ se observa en la fuente A (alguacil), la cual tiene un mayor protagonismo en las sesiones del Tribunal de las Aguas.

Tabla 3.12. Promedio del parámetro $T_{S,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.

Fuente sonora	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$T_{S,mid}$ (ms)	13,7	14,9	16,5	19,9	18,9	17,3	17,9	18,1	17,4

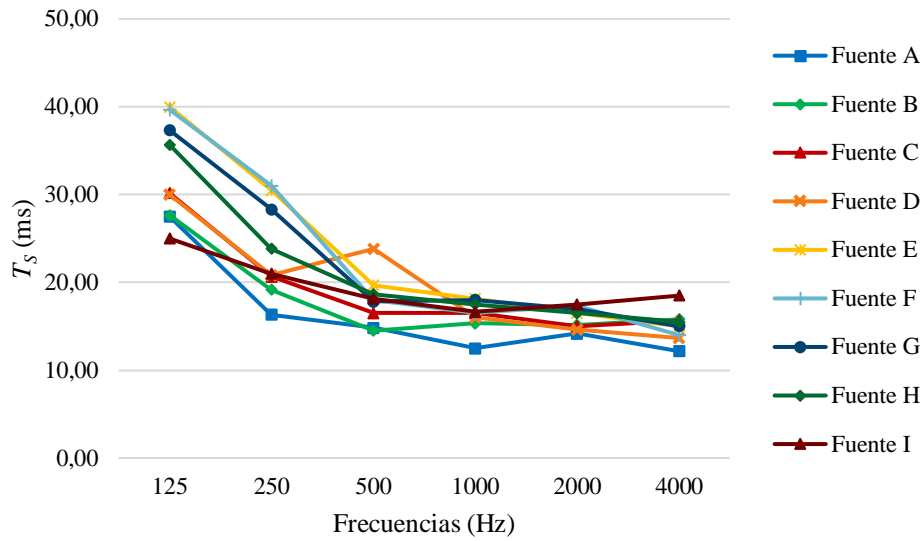


Figura 3.11. Promedio del tiempo central (T_s) en función de la ubicación de la fuente sonora.

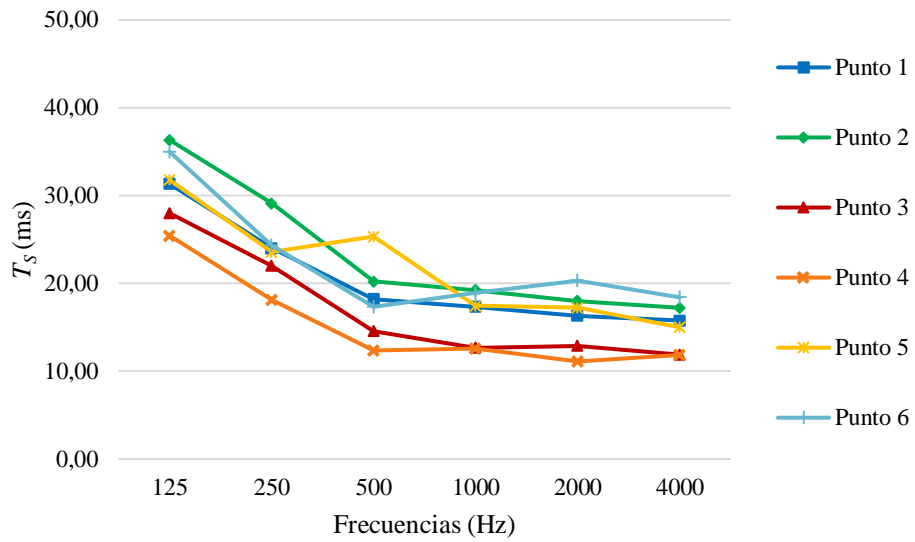


Figura 3.12. Promedio del tiempo central (T_s) en función de la ubicación del punto de medida.

3.1.3. Parámetros de inteligibilidad (STI)

3.1.3.1. Índice de transmisión del habla (STI).

En la Tabla 3.13, se indica el promedio del índice de transmisión del habla (STI) para las nueve ubicaciones de la fuente sonora. Los resultados obtenidos indican una inteligibilidad de la palabra excelente ($STI \geq 0,75$) en el entorno estudiado. El mejor resultado del parámetro STI se observa en la fuente A (alguacil), la cual tiene un mayor protagonismo en las sesiones del Tribunal de las Aguas.

Tabla 3.13. Promedio del índice de transmisión del habla (STI) para las diferentes ubicaciones de la fuente sonora (A-I)

Fuente sonora	A	B	C	D	E	F	G	H	I
STI	0,90	0,86	0,87	0,87	0,85	0,85	0,85	0,85	0,86

3.2. Calibración del modelo acústico con Odeon y CATT-Acoustic.

En la Tabla 3.14, se indican los coeficientes de absorción aplicados en el proceso de calibración a cada una de las capas según los materiales reales. Para determinar los coeficientes de absorción se ha partido de los resultados obtenidos en ensayos experimentales normalizados (Bork, 2005; Vörländer, 2008; Cox & D'Antonio, 2009; Martellotta F. , 2009), realizando las adaptaciones necesarias durante el proceso de calibración acústica.

Tabla 3.14. Coeficientes de absorción por frecuencias para los materiales utilizados en las simulaciones acústicas con Odeon y CATT-Acoustic.

Revestimientos	Coeficientes de absorción por frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Suelo de mármol ¹	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Pared de piedra caliza ₁	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Puerta de madera sólida ¹	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Promedio superficie dura ²	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05
Campo libre	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

¹ Vörländer (2008).

² Ajustado durante el proceso de calibración.

En la Tabla 3.15, se indican los coeficientes de dispersión aplicados en el proceso de calibración a cada una de las capas según los materiales reales. Se han establecido tres niveles según la rugosidad de los materiales y el grado de detalle de la decoración. Los valores de los coeficientes de dispersión se han ajustado durante el proceso de calibración acústica.

Tabla 3.15. Coeficientes de dispersión utilizados en la simulación acústica con *Odeon* y *CATT-Acoustic..*

Material	Dispersión
Rugosidad baja / nivel de detalle bajo ¹	0,10
Rugosidad media / nivel de detalle medio ¹	0,25
Rugosidad alta / nivel de detalle alto ¹	0,50

¹ Ajustado durante el proceso de calibración.

Para la calibración del modelo acústico se ha analizado el umbral diferencial (*JND*) del tiempo de reverberación (T_{30}), el tiempo de caída inicial (*EDT*), la fuerza sonora (*G*), la claridad musical (C_{80}), la claridad para la palabra (C_{50}) y el tiempo central (T_s). En la Tabla 3.16, se indican los valores de *JND* tomados en consideración para los distintos parámetros acústicos analizados.

Tabla 3.16. Valores de *JND* empleados para las distintas magnitudes acústicas.

Cualidad subjetiva	Parámetro acústico	Promediado en frecuencia de número único ²	Umbral Diferencial, <i>JND</i>
Reverberación percibida	Tiempo de reverberación, (T_{30})	500 a 1000	Rel. 5% ³
	Tiempo de caída inicial, (<i>EDT</i>)	500 a 1000	Rel. 5% ³
Nivel sonoro subjetivo	Fuerza sonora (<i>G</i>)	500 a 1000	1 dB ³
Claridad del sonido percibida	Claridad musical (C_{80}) ¹	500 a 1000	2,5 dB ⁴
	Claridad para la palabra (C_{50}) ¹	500 a 1000	2,5 dB ⁴
	Tiempo central (T_s)	500 a 1000	10 ms ³

¹ Parámetros utilizados para la calibración del modelo acústico.

² Media aritmética para bandas de octava.

³ UNE-EN ISO 3382-1.

⁴ R. Höhne y G. Stroth (1995).

En las Tablas 3.17-3.25, se indican los valores de *JND* obtenidos entre la medición y la simulación acústica con *Odeon* para cada una de las ubicaciones de la fuente de emisión sonora (A-I). Para el tiempo de reverberación (T_{30}) el error relativo entre la medición y la simulación no supera el 5% (número de *JND* < 1) en ninguna de las ubicaciones de la fuente sonora. Para el tiempo de caída inicial (*EDT*), el error relativo entre la medición y la simulación únicamente supera el 5% en la fuente C, siendo el valor de *JND* próximo a la unidad. Con ello, queda garantizado que las diferencias en la reverberación percibida son mínimas. Para la fuerza sonora, *G*, el número de *JND* resulta ligeramente superior a la unidad únicamente en las fuentes A y F, con lo que se puede estimar que la variación del nivel sonoro subjetivo entre la simulación y el entorno real es mínima. Para la claridad musical, C_{80} , la claridad de la voz, C_{50} , y el tiempo central, T_s , los números de *JND* son inferiores a la unidad en todas las ubicaciones de la fuente sonora. Con ello, se puede estimar que la diferencia de la claridad del sonido percibida entre la simulación y el entorno real no es perceptible para el oído humano.

Tabla 3.17. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *Odeon* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente A (alguacil)

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	2,13	2,18	0,05	2,23	0,45
<i>EDT</i> (s)	Rel. 5% ¹	0,16	0,16	0,00	0,78	0,16
<i>G</i> (dB)	1 dB ¹	15,88	16,90	1,03	6,49	1,03
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	17,22	19,31	2,09	12,14	0,84
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	12,86	14,09	1,23	9,56	0,49
T_s (ms)	10 ms ¹	13,67	10,08	3,58	26,19	0,36

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.18. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *Odeon* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente B.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	2,07	2,04	0,03	1,53	0,31
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,22	0,22	0,00	1,86	0,37
G (dB)	1 dB ¹	10,30	10,45	0,15	1,46	0,15
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	16,85	18,83	1,98	11,75	0,79
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,64	12,71	1,07	9,19	0,43
T_S (ms)	10 ms ¹	14,92	10,92	4,00	26,81	0,40

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.19. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *Odeon* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente C.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	2,11	2,15	0,04	1,86	0,37
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,23	0,22	0,01	5,82	1,16
G (dB)	1 dB ¹	14,34	14,87	0,53	3,70	0,53
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	15,79	17,13	1,33	8,42	0,53
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	12,15	11,76	0,39	3,21	0,15
T_S (ms)	10 ms ¹	16,50	13,00	3,50	21,21	0,35

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.20. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *Odeon* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente D.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	1,08	1,09	0,01	0,54	0,11
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,20	0,21	0,00	2,07	0,41
G (dB)	1 dB ¹	14,55	13,59	0,96	6,60	0,96
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	16,45	17,28	0,83	5,05	0,33
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,35	11,23	0,11	0,97	0,04
T_S (ms)	10 ms ¹	19,92	14,67	5,25	26,36	0,53

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.21. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *Odeon* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente E.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	1,41	1,45	0,04	2,96	0,59
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,28	0,27	0,01	3,28	0,66
G (dB)	1 dB ¹	14,87	15,07	0,20	1,34	0,20
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	15,49	16,11	0,62	4,00	0,25
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,23	12,08	0,85	7,57	0,34
T_S (ms)	10 ms ¹	18,92	15,58	3,33	17,60	0,33

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.22. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *Odeon* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente F.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	1,68	1,62	0,06	3,53	0,71
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,28	0,27	0,01	4,71	0,94
G (dB)	1 dB ¹	14,74	16,02	1,28	8,68	1,28
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	15,09	16,50	1,41	9,34	0,56
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,64	11,95	0,31	2,66	0,12
T_S (ms)	10 ms ¹	17,25	15,67	1,58	9,16	0,16

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.23. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *Odeon* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente G.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	1,44	1,46	0,02	1,51	0,30
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,25	0,25	0,00	0,33	0,07
G (dB)	1 dB ¹	15,21	15,19	0,02	0,13	0,02
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	15,89	16,54	0,65	4,09	0,26
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,23	11,64	0,41	3,65	0,16
T_S (ms)	10 ms ¹	17,92	17,08	0,83	4,63	0,08

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.24. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *Odeon* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente H.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	2,01	2,09	0,09	4,36	0,87
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,28	0,29	0,01	2,05	0,41
G (dB)	1 dB ¹	15,53	16,32	0,80	5,15	0,80
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	16,62	16,98	0,36	2,17	0,14
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,82	11,76	0,06	0,51	0,02
T_S (ms)	10 ms ¹	18,08	16,17	1,92	10,62	0,19

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.25. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *Odeon* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente I.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	1,31	1,35	0,05	3,45	0,69
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,24	0,23	0,01	4,83	0,97
G (dB)	1 dB ¹	15,53	14,98	0,55	3,54	0,55
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	15,68	16,69	1,01	6,44	0,40
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,92	11,46	0,46	3,86	0,18
T_S (ms)	10 ms ¹	17,42	15,00	2,42	13,89	0,24

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

En las Tablas 3.26-3.34, se indican los valores de *JND* obtenidos entre la medición y la simulación acústica con *CATT-Acoustic* para cada una de las ubicaciones de la fuente de emisión sonora (A-I). Para el tiempo de reverberación (T_{30}), el error relativo entre la medición y la simulación únicamente supera el 5% en la fuente C, siendo el valor de *JND* próximo a la unidad. Para el tiempo de caída inicial (*EDT*), el error relativo entre la medición y la simulación únicamente supera el 5% en las fuentes E y H, siendo los valores de *JND* próximos a la unidad. Con ello, queda garantizado que las diferencias en la reverberación percibida son mínimas. Para la fuerza sonora, G, el número de *JND* resulta ligeramente superior a la unidad únicamente en las fuentes A y B, con lo que se puede estimar que la variación del nivel sonoro subjetivo entre la simulación y el entorno real es mínima. Para la claridad musical, C_{80} , la claridad de la voz, C_{50} , y el tiempo central, T_s , los números de *JND* son inferiores a la unidad en todas las ubicaciones de la fuente sonora. Con ello, se puede estimar que la diferencia de la claridad del sonido percibida entre la simulación y el entorno real no es perceptible para el oído humano.

Tabla 3.26. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *CATT-Acoustic* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente A (alguacil)

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	2,13	2,17	0,04	1,88	0,38
<i>EDT</i> (s)	Rel. 5% ¹	0,16	0,16	0,00	0,78	0,16
<i>G</i> (dB)	1 dB ¹	15,88	14,68	1,20	7,56	1,20
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	17,46	18,88	1,42	8,13	0,57
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	12,86	13,62	0,75	5,83	0,30
T_s (ms)	10 ms ¹	13,67	10,99	2,68	19,60	0,27

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.27. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *CATT-Acoustic* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente B.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	2,07	1,98	0,09	4,23	0,85
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,22	0,23	0,01	2,60	0,52
G (dB)	1 dB ¹	10,30	11,77	1,47	14,27	1,47
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	17,09	17,88	0,78	4,56	0,31
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,64	12,71	1,07	9,19	0,43
T_S (ms)	10 ms ¹	14,92	11,27	3,65	24,46	0,36

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.28. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *CATT-Acoustic* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente C.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	2,11	2,22	0,11	5,35	1,07
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,23	0,22	0,01	4,52	0,90
G (dB)	1 dB ¹	14,34	14,92	0,57	3,97	0,57
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	15,75	17,25	1,50	9,52	0,60
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	12,15	10,81	1,33	10,95	0,53
T_S (ms)	10 ms ¹	16,50	10,51	5,99	36,30	0,60

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.29. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *CATT-Acoustic* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente D.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	1,08	1,06	0,02	2,23	0,45
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,20	0,20	0,00	0,83	0,17
G (dB)	1 dB ¹	14,55	14,67	0,12	0,82	0,12
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	16,48	15,49	1,00	6,07	0,40
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,35	11,13	0,21	1,85	0,09
T_S (ms)	10 ms ¹	19,92	15,75	4,16	20,88	0,42

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.30. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *CATT-Acoustic* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente E.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	1,41	1,44	0,03	2,43	0,49
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,28	0,26	0,02	5,97	1,19
G (dB)	1 dB ¹	14,87	14,98	0,11	0,74	0,11
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	15,18	15,29	0,11	0,72	0,05
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,23	11,33	0,10	0,89	0,04
T_S (ms)	10 ms ¹	18,92	15,46	3,46	18,29	0,35

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.31. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *CATT-Acoustic* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente F.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	1,68	1,62	0,06	3,43	0,69
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,28	0,27	0,01	4,71	0,94
G (dB)	1 dB ¹	14,74	14,03	0,71	4,82	0,71
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	15,15	14,26	0,89	5,87	0,35
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,64	11,82	0,18	1,55	0,07
T_S (ms)	10 ms ¹	17,25	15,22	2,03	11,77	0,20

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.32. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *CATT-Acoustic* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente G.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	1,44	1,49	0,04	3,01	0,60
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,25	0,25	0,00	1,66	0,33
G (dB)	1 dB ¹	15,21	14,80	0,41	2,70	0,41
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	15,64	14,76	0,88	5,63	0,35
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,64	11,82	0,18	1,55	0,07
T_S (ms)	10 ms ¹	17,92	14,87	3,05	17,02	0,30

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.33. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *CATT-Acoustic* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente H.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	2,01	1,92	0,09	4,24	0,85
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,28	0,27	0,02	5,69	1,14
G (dB)	1 dB ¹	15,53	15,13	0,40	2,58	0,40
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	16,77	15,84	0,92	5,49	0,37
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,23	12,10	0,87	7,75	0,35
T_S (ms)	10 ms ¹	18,08	10,97	7,12	39,38	0,71

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

Tabla 3.34. Umbrales Diferenciales (*JND*) de la simulación acústica con *CATT-Acoustic* obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente I.

Parámetro acústico	Umbral diferencial <i>JND</i>	Promedio medición ³	Promedio simulación ³	Error abs.	Error rel. (%)	Nº de <i>JND</i>
T_{30} (s)	Rel. 5% ¹	1,31	1,32	0,02	1,21	0,24
EDT (s)	Rel. 5% ¹	0,24	0,25	0,01	3,45	0,69
G (dB)	1 dB ¹	15,53	15,28	0,25	1,61	0,25
C_{80} (dB)	2,5 dB ²	15,82	15,05	0,77	4,87	0,31
C_{50} (dB)	2,5 dB ²	11,82	11,08	0,74	6,26	0,30
T_S (ms)	10 ms ¹	17,42	15,19	2,23	12,80	0,22

¹ UNE-EN ISO-3382-1.

² R. Höhne y G. Stroth (1995).

³ Promediado en frecuencias de 500 a 1000 Hz.

En las Figuras 3.13 y 3.14, se muestra un resumen de los valores de JND obtenidos en las simulaciones acústicas realizadas con *Odeon* y *CATT-Acoustic*. En la Figura 3.15, se muestra una comparativa entre la medición acústica y las simulaciones acústicas con *Odeon* y *CATT-Acoustic*. Se han analizado los valores promedio obtenidos para el tiempo de reverberación (T_{30}), el tiempo de caída inicial (EDT), la fuerza sonora (G), la claridad musical (C_{80}), la claridad para la palabra (C_{50}) y el tiempo central (T_S). Se observa un alto grado de similitud entre la medición y las simulaciones acústicas. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se puede determinar que el modelo acústico tiene un comportamiento similar al entorno real estudiado. Con ello, resultan adecuadas las calibraciones realizadas con ambos programas acústicos, presentado la simulación acústica con *Odeon* mejores valores de JND .

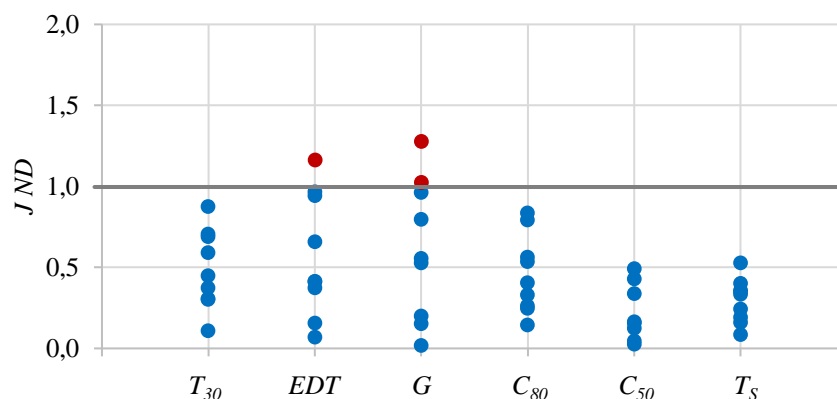


Figura 3.13. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con *Odeon*.

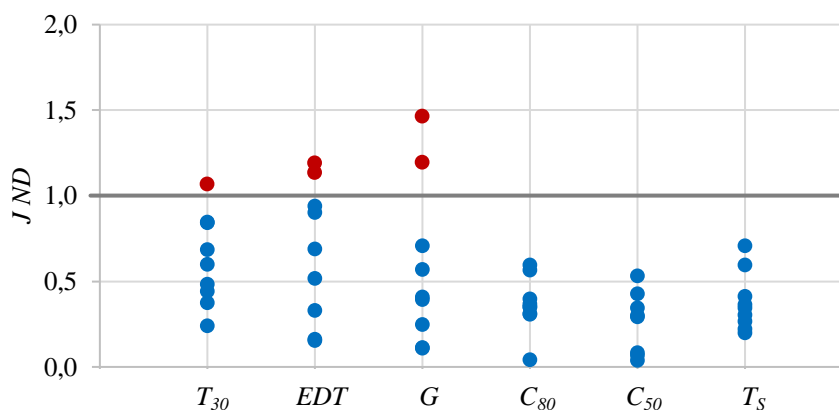


Figura 3.14. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con *CATT-Acoustic*.

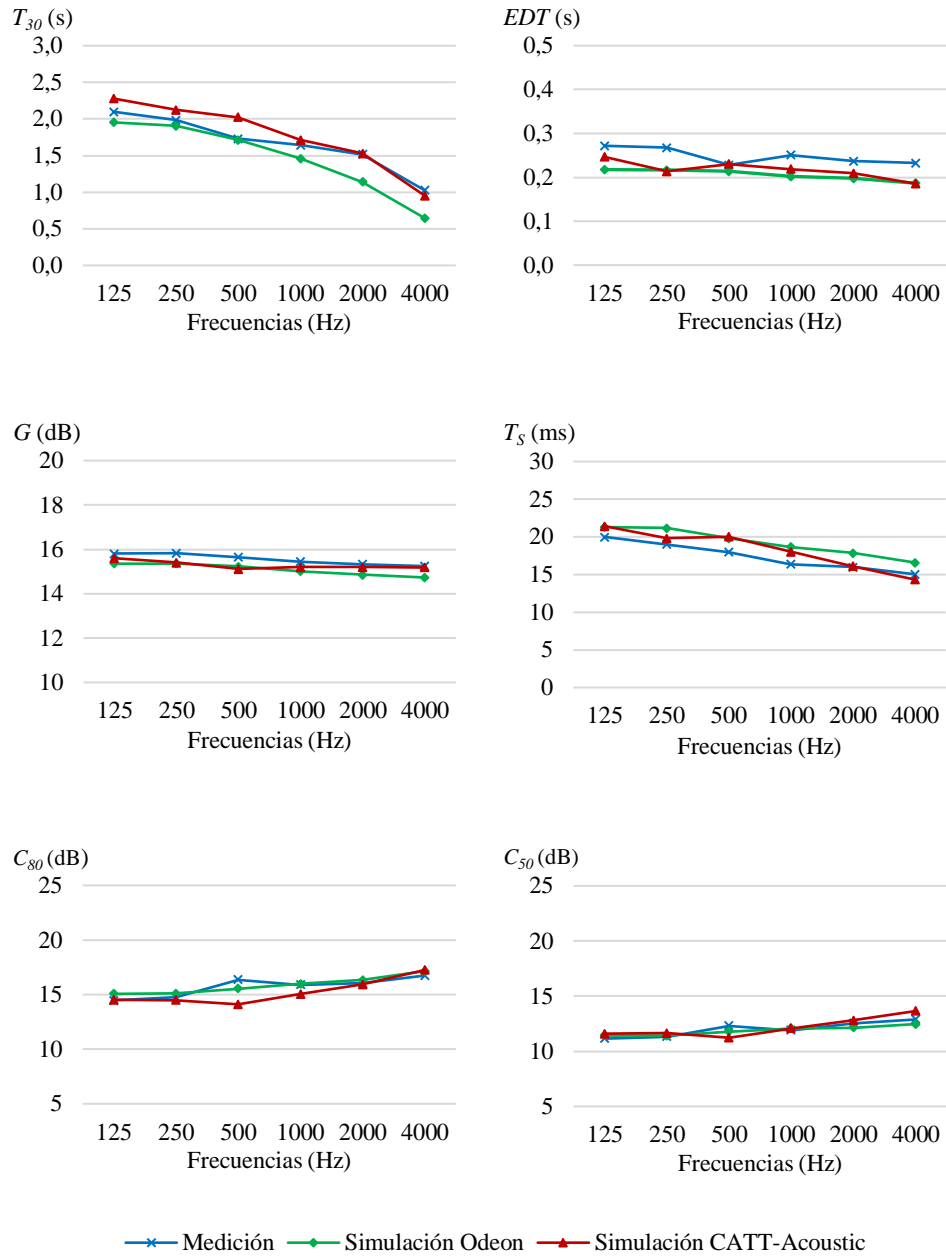


Figura 3.15. Comparativa entre la medición acústica y las simulaciones acústicas con *Odeon* y *CATT-Acoustic*.

3.3. Influencia de la presencia de audiencia en la acústica del entorno.

A través de simulaciones acústicas, se ha analizado la influencia de audiencia en la acústica del entorno del Tribunal de las Aguas. Para ello, se han construido unos volúmenes simplificados que representan a la audiencia. Estos volúmenes se han incorporado al modelo acústico en la ubicación habitual de los oyentes y de los miembros del Tribunal de las Aguas. A las superficies que forman estos volúmenes se les ha aplicado los coeficientes de absorción que se indican en la Tabla 3.35, tomando como referencia los resultados obtenidos en ensayos experimentales normalizados (Vörländer, 2008).

Tabla 3.35. Coeficientes de absorción por frecuencias aplicados a la audiencia en las simulaciones acústicas.

Revestimientos	Coeficientes de absorción por frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Audiencia ¹	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87

¹ Vörländer (2008).

En la Figura 3.16, se muestra una comparativa de los valores promedio obtenidos de los parámetros T_{30} , EDT , G , C_{80} , C_{50} y T_s en las simulaciones acústicas realizadas con y sin audiencia. Se observa que con la presencia de audiencia los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) y el tiempo de caída inicial (EDT) disminuyen, debido al aumento de la absorción acústica. Con la disminución del tiempo de reverberación del entorno, se produce una ligera disminución de la fuerza sonora (G). Los valores obtenidos para la claridad musical (C_{80}) y la claridad de la voz (C_{50}) aumentan con la presencia de audiencia, mientras que los valores del tiempo central (T_s) disminuyen. Estos datos muestran que se produce una mejora en la claridad del sonido percibida por los oyentes con la presencia de audiencia. En la Tabla 3.36, se indica la variación del parámetro STI con y sin audiencia. En análisis de los resultados muestran que se produce una mejora de la inteligibilidad del habla con la presencia de audiencia.

Tabla 3.36. Comparativa de los valores del parámetro STI obtenidos en las simulaciones acústicas con y sin audiencia.

Fuente sonora	A	B	C	D	E	F	G	H	I
STI (sin audiencia)	0,90	0,86	0,87	0,87	0,85	0,85	0,85	0,85	0,86
STI (con audiencia)	0,93	0,89	0,92	0,92	0,90	0,89	0,89	0,90	0,91

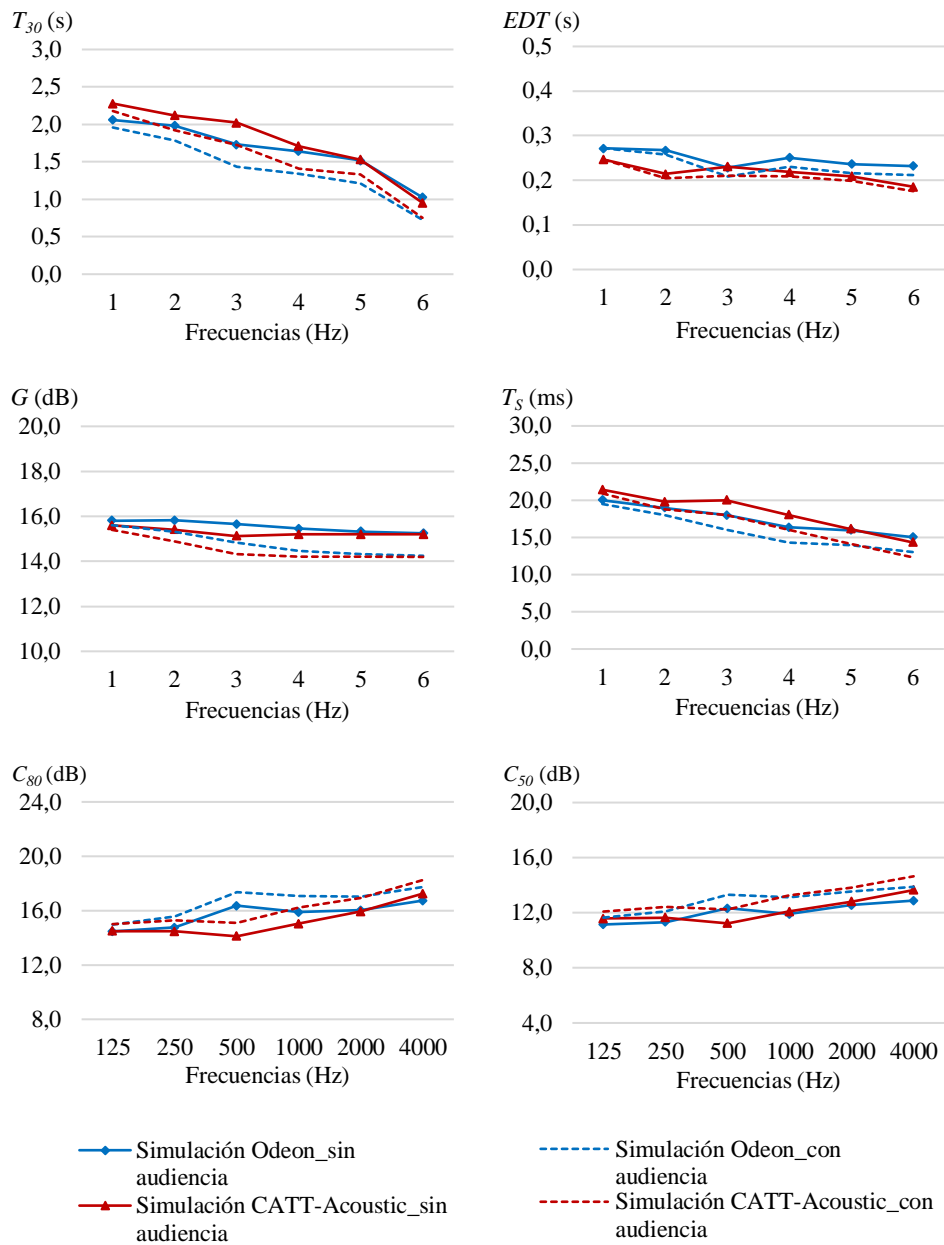


Figura 3.16. Comparativa de los valores promedio obtenidos de los parámetros T_{30} , EDT , G , C_{80} , C_{50} y T_s en las simulaciones acústicas con y sin audiencia.

3.4. Caracterización de la fuente habla.

A partir de la medición realizada en cámara anecoica, se ha determinado la directividad de la fuente habla del alguacil del Tribunal de las Aguas. En la Figura 3.17, se muestran los resultados obtenidos para las frecuencias de 125 a 4000 Hz. Tomando como base estos resultados, se ha generado una fuente específica en el programa informático *Odeon*³.

La fuente generada en el programa informático *Odeon* se ha empleado en el proceso de auralización del sonido del Tribunal de las Aguas. El empleo de la fuente habla caracterizada, en vez de una fuente habla genérica proporcionada por el programa informático *Odeon*, permite que el sonido auralizado tenga un mayor grado de similitud con el sonido real del paisaje sonoro estudiado.

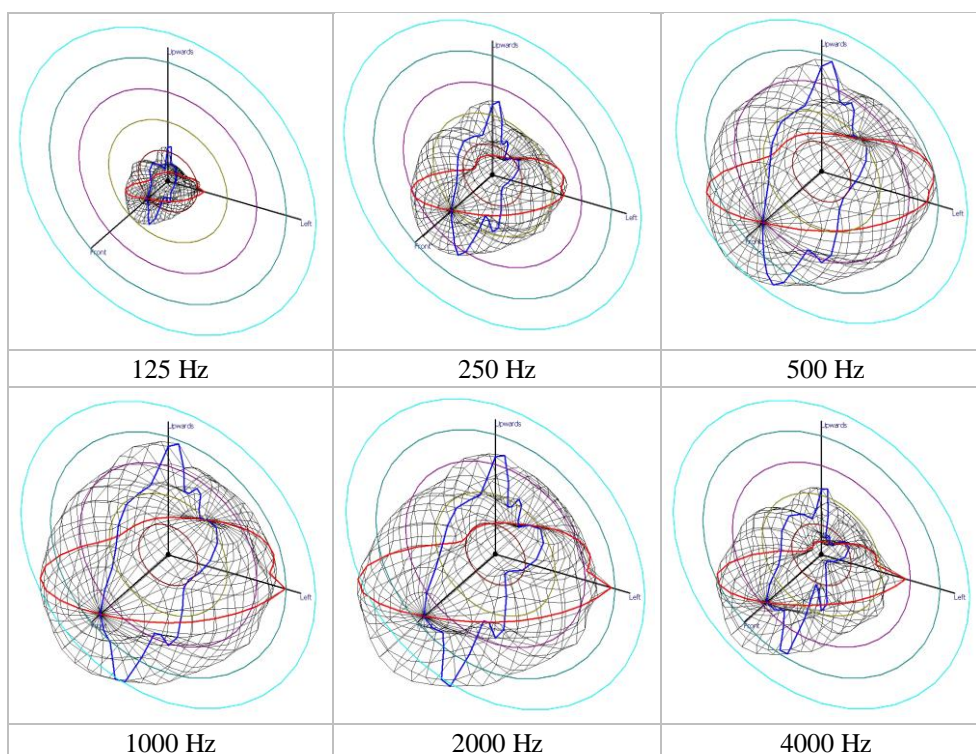


Figura 3.17. Directividad de la fuente habla generada a partir de la grabación de una sesión del Tribunal de las Aguas en cámara anecoica.

³ Procedimiento realizado por el investigador Rafael Fayos Jordá, miembro del Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG.

3.5. Auralización del sonido del Tribunal de las Aguas.

Para la auralización del sonido de Tribunal de las Aguas, se ha establecido un recorrido virtual por la Plaza de la Virgen, formado por 20 puntos separados temporalmente 5 segundos, según se muestra en la Figura 3.18. Para cada uno de los puntos que forman el recorrido virtual, se ha obtenido el resultado del sonido auralizado de una sesión del Tribunal de las Aguas a través de simulaciones acústicas realizadas con el programa informático Odeon. Para ello, se ha utilizado la señal obtenida de la grabación en cámara anecoica y la fuente caracterizada del alguacil. Para lograr un mayor nivel de realismo, se ha incorporado en la simulación acústica el sonido auralizado del agua de la fuente, el murmullo del público y el sonido de las campanas. Los resultados obtenidos en los 20 puntos, se han tratado en un programa informático de edición de sonido, incorporando una separación temporal de 5 segundos entre cada punto, con lo que se ha obtenido como resultado el sonido auralizado en tiempo real del recorrido virtual propuesto.

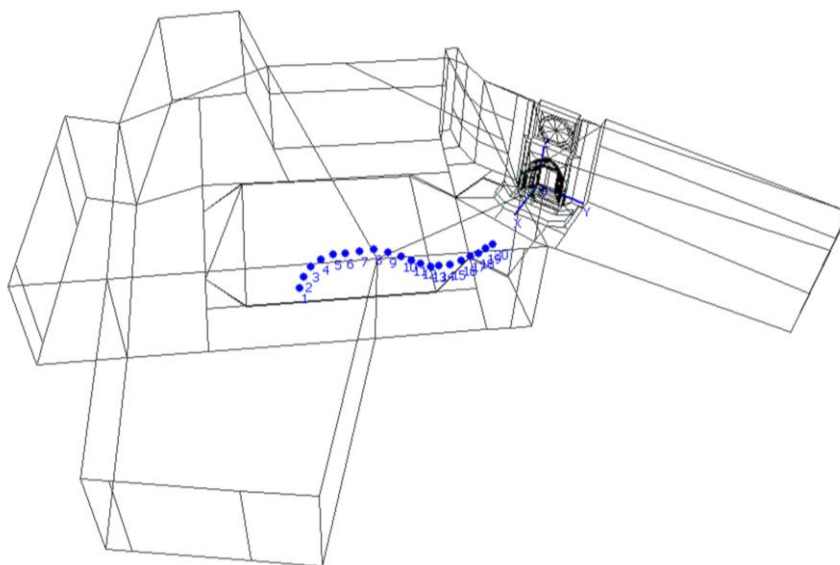


Figura 3.18. Puntos del recorrido virtual.

3.6. Renderizado de la simulación visual.

Como resultado de la simulación visual, se ha obtenido un modelo en 3D del entorno del Tribunal de las Aguas. A través del renderizado del modelo visual a lo largo del recorrido virtual propuesto, se ha obtenido un video realista del entorno. En las Figuras 19-21, se muestra el resultado del renderizado del entorno del Tribunal de las Aguas.



Figura 3.19. Simulación visual. Vista general de la Plaza de la Virgen.



Figura 3.20. Simulación visual. Vista de la Puerta de los Apóstoles de la Catedral de Valencia.



Figura 3.21. Simulación visual. Detalle de la representación del Tribunal de las Aguas.

3.7. Recorrido virtual.

Mediante la fusión de la simulación acústica y visual con un programa informático de edición de video y sonido, se ha obtenido la simulación completa del entorno del Tribunal de las Aguas. Se trata de un recorrido virtual preestablecido que ofrece al espectador una experiencia completa en la que puede ver y oír lo mismo que si se realizara una visita presencial.

Con el objetivo de difundir los resultados de la investigación realizada, el video de la simulación completa del entorno del Tribunal de las Aguas se ha publicado en la página web oficial del Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG (Figura 3.22). Gracias a ello, cualquier persona desde cualquier lugar puede realizar una visita virtual por el entorno del Tribunal de las Aguas, lo que contribuye a preservar y difundir su patrimonio artístico, arquitectónico y sonoro.

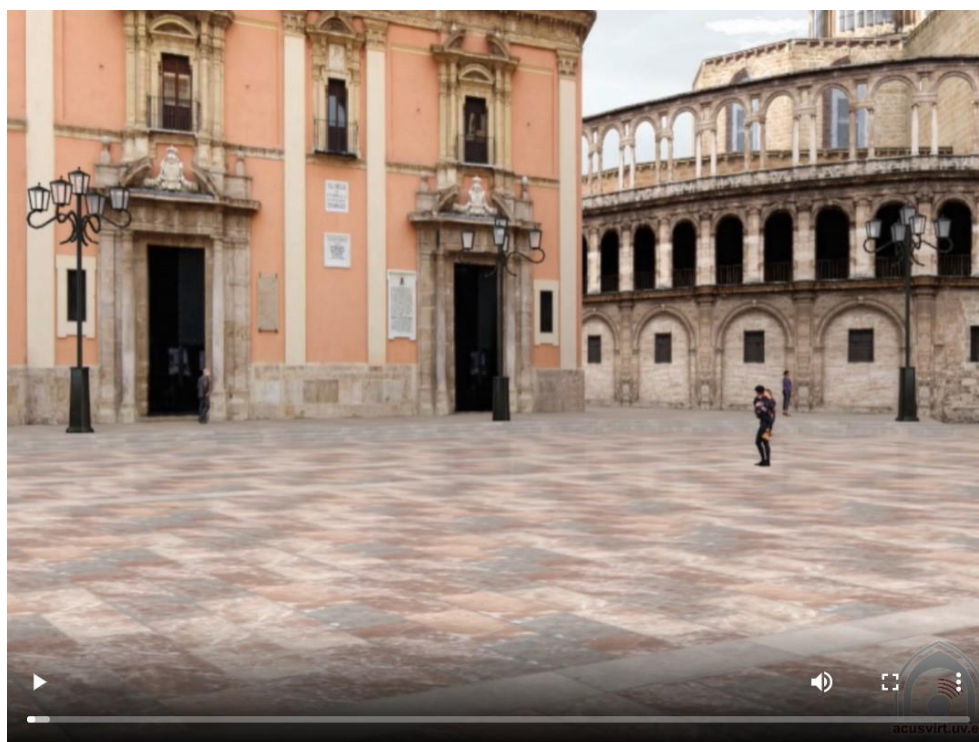


Figura 3.22. Simulación acústica y visual del Tribunal de las Aguas. Disponible en: https://intranet.upv.es/pls/soalu/sic_miweb2.MicroWeb?P_IDIOMA=c&P_IDWEB=851367&P_ID=1091226&P_VER=NORMAL&P_CACHE=&P_ID_NAVEGA_INI=1091226

3.8. Determinación y análisis de parámetros psicoacústicos.

Para la evaluación de la calidad acústica del paisaje sonoro del Tribunal de las Aguas se ha creado una encuesta en una plataforma digital basada en el modelo bidimensional establecido en la norma ISO 12913-3. En total, se han realizado 30 encuestas de las cuales el 61,5% fueron cumplimentadas por hombres y el 38,5% por mujeres. La información sobre los rangos de edad de los encuestados correspondió a menores de 30 años (7,7%), entre 30 y 50 años (34,6%) y mayores de 50 años (57,7%).

En la Tabla 3.37, se indican los resultados obtenidos para las variables agradable (p), desagradable (a), dinámico/con actividad (el), estático/sin actividad (u), calmado (ca), caótico (ch), vibrante (v) y monótono (m). A partir de estos resultados se han calculado las dos componentes principales de la percepción subjetiva de un paisaje sonoro: agrado (P) y dinamismo (E) (Ecuaciones 27 y 28). En la Figura 3.23, se han representado los valores de agrado (P) y dinamismo (E) en el modelo bidimensional. Se puede determinar que los oyentes han percibido, en su mayoría, el paisaje sonoro como calmado y agradable.

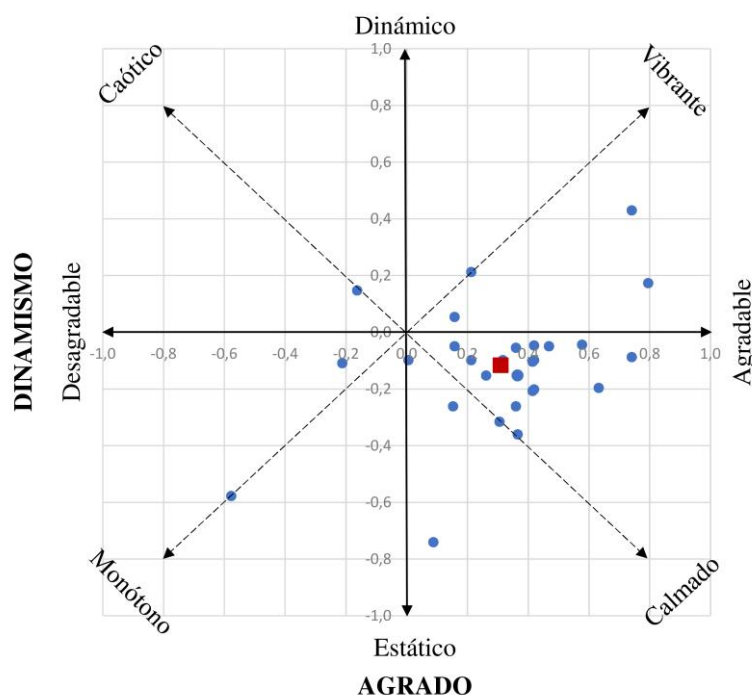


Figura 3.23. Modelo bidimensional del paisaje sonoro del Tribunal de las Aguas.

Tabla 3.37. Resultados obtenidos en la encuesta para la evaluación del paisaje sonoro del Tribunal de las Aguas.

Nº encuesta	Agradable (<i>p</i>)	Caótico (<i>ch</i>)	Vibrante (<i>v</i>)	Estático (<i>u</i>)	Calmado (<i>ca</i>)	Desagradable (<i>a</i>)	Dinámico (<i>e</i>)	Monótono (<i>m</i>)	AGRADO (<i>P</i>)	DINAMISMO (<i>E</i>)
1	5	1	5	5	4	1	3	1	0,80	0,17
2	5	1	1	5	4	1	3	4	0,41	-0,21
3	3	2	2	5	4	1	3	5	0,15	-0,26
4	4	2	5	4	3	1	3	4	0,42	-0,05
5	2	3	3	3	3	3	1	1	0,01	-0,10
6	5	1	4	3	5	1	4	2	0,74	0,43
7	1	1	1	2	2	1	5	5	-0,16	0,15
8	4	1	4	5	1	1	3	2	0,42	-0,10
9	1	4	4	5	1	5	1	4	-0,58	-0,58
10	4	2	3	5	2	2	3	2	0,26	-0,15
11	5	1	2	4	4	1	3	4	0,47	-0,05
12	4	1	1	5	4	1	1	3	0,37	-0,36
13	5	1	1	5	5	1	1	1	0,63	-0,20
14	5	1	1	5	5	1	4	5	0,41	-0,10
15	4	1	1	4	3	1	2	5	0,20	-0,32
16	4	3	5	4	4	1	1	4	0,42	-0,20
17	5	4	5	3	2	1	1	4	0,36	-0,26
18	3	1	4	5	4	2	3	5	0,21	-0,10
19	5	1	5	5	5	1	1	3	0,74	-0,09
20	5	1	1	4	4	1	3	4	0,41	-0,10
21	5	4	1	5	2	1	1	5	0,09	-0,74
22	5	2	4	4	4	4	3	5	0,16	-0,05
23	3	1	3	3	2	2	3	3	0,16	0,05
24	3	3	4	2	5	2	3	4	0,21	0,21
25	3	2	3	3	5	1	1	4	0,32	-0,10
26	2	2	1	4	3	3	4	4	-0,21	-0,11
27	5	1	1	2	5	1	1	4	0,47	-0,05
28	5	1	3	3	5	1	1	4	0,58	-0,04
29	5	1	1	4	3	1	4	4	0,36	-0,05
30	4	1	1	4	3	1	2	2	0,37	-0,15

Capítulo 4

Conclusiones y discusión

4.1. Discusión de los resultados.

A partir de los datos obtenidos de la medición acústica, se ha realizado un estudio del comportamiento acústico del templo. En concreto, se han analizado los siguientes parámetros acústicos: tiempo de reverberación (T_{30}), tiempo de caída inicial (EDT), fuerza sonora (G), claridad musical (C_{80}), claridad para la palabra (C_{50}), tiempo central (T_S) e índice de transmisión del habla (STI). Los resultados obtenidos muestran una reverberación superior a la que cabría esperar en un entorno abierto, debido a las reflexiones producidas por la geometría y proximidad de la Puerta de los Apóstoles. En el entorno singular estudiado, los parámetros de reverberación T_{30} y EDT presentan una mayor variación en función de la ubicación de la fuente sonora y los receptores que los parámetros energéticos G , C_{80} , C_{50} y T_S , en contraste con los resultados habituales en recintos cerrados (Montell et al., 2012).

Tomando como base los datos obtenidos en la medición acústica, se ha generado un modelo virtual simplificado del entorno del Tribunal de las Aguas. Para la calibración del modelo, se han asignado unas características acústicas determinadas a cada una de las superficies del modelo tomando como referencia valores obtenidos mediante ensayos normalizados (Bork, 2005; Vörländer, 2008; Cox & D'Antonio, 2009; Martellotta F. , 2009). Las simulaciones acústicas realizadas con ambos programas informáticos, *Odeon* y *CATT-Acoustic*, reproducen adecuadamente el comportamiento acústico del entorno del Tribunal de las Aguas, presentado la

simulación con *Odeon* mejores valores de *JND*. Los resultados obtenidos en las simulaciones acústicas muestran la aplicabilidad de las herramientas y procedimientos utilizados en recintos cerrados para el estudio acústico de entornos patrimoniales abiertos, siendo necesario realizar ciertas adaptaciones. Para poder trabajar con los programas informáticos empleados en la simulación acústica de salas, es necesario crear un modelo acústico cerrado. Para ello, se han generado unas superficies que representan el campo libre, a las cuales se les ha aplicado una absorción acústica máxima (coeficiente de absorción 1). Con esta adaptación del modelo acústico, se han obtenido resultados adecuados en el proceso de simulación acústica, lo que está en consonancia con los resultados obtenidos en estudios similares (Álvarez-Corbacho et al., 2014; Álvarez-Corbacho et al., 2015; Álvarez-Corbacho et al., 2017; Álvarez-Corbacho et al., 2018; Berardi et al., 2016; Bevilacqua et al., 2022).

4.2. Utilidad de la investigación.

Esta investigación aporta información sobre la aplicabilidad de las herramientas y procedimientos utilizados en recintos cerrados para el estudio acústico de entornos patrimoniales abiertos. La simulación acústica de este tipo de entornos permite conocer de antemano el resultado acústico de cualquier propuesta de intervención y/o conservación antes de su realización práctica, garantizando que no afecte negativamente al paisaje sonoro. A través simulaciones acústicas, es posible aplicar la arqueología acústica en el estudio de entornos abiertos de interés patrimonial. Con ello, se pueden determinar las diferentes etapas sonoras de los paisajes sonoros mediante el estudio de la influencia de las modificaciones e intervenciones realizadas a lo largo del tiempo en el comportamiento acústico de entornos estudiados. Asimismo, la acústica virtual ofrece la posibilidad de plantear mejoras acústicas para usos específicos.

Como resultado final de la investigación realizada, se ha obtenido la simulación acústica y visual del entorno del Tribunal de las Aguas. Gracias a ello, cualquier persona, desde cualquier lugar y en cualquier momento, puede disfrutar de una sesión virtual del Tribunal de las Aguas, ofreciendo la posibilidad de hacer turismo a distancia. Asimismo, si en un futuro el entorno sufriera alteraciones de cualquier índole, se dispondría de un compendio detallado de información visual y sonora de su estado actual, lo que garantizaría su conservación y permitiría su disfrute y estudio por parte de futuras generaciones.

4.3. Líneas futuras de investigación.

Se proponen las siguientes líneas futuras de investigación:

- Ampliar la medición acústica del entono del Tribunal de las Aguas para comprender mejor su comportamiento acústico. Se propone realizar una nueva medición en puntos más alejados de la fuente sonora para determinar con mayor exactitud la acústica del entorno.
- Estudiar la evolución sonora del Tribunal de las Aguas teniendo en cuenta los cambios producidos en el entorno. Realizar la simulación acústica y visual de las diferentes etapas. Difundir los resultados obtenidos y valorar la apreciación subjetiva de los oyentes ante los cambios visuales y acústicos producidos. Para ello, se propone la realización de encuestas a través de una plataforma digital.
- Investigar sobre la generación de modelos acústicos y visuales interactivos en entornos abiertos, en los cuales el espectador pueda moverse libremente escuchando y observando lo mismo que si realizara una visita presencial. Actualmente, se está trabajando en el desarrollo de modelos acústicos y visuales interactivos mediante el programa informático *Unity*.
- Ampliar la evaluación del paisaje sonoro del Tribunal de las Aguas mediante la realización de un mayor número de encuestas, con el objetivo de obtener unos datos como mayor grado de fiabilidad.
- Realizar una comparativa de los parámetros psicoacústicos obtenidos en el entorno del Tribunal de las Aguas respecto a los obtenidos en otros estudios realizados en paisajes sonoros de interés patrimonial.
- Aplicar la acústica virtual en el estudio de otros entornos abiertos de interés patrimonial. Desde el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG, se está realizando una labor de estudio y difusión del patrimonio sonoro de diferentes entornos a través de su página web oficial. https://intranet.upv.es/pls/soalu/SIC_MIWSERS2.microwebservicio?p_entidad=ACUSVIRT&p_idioma=C

Bibliografía

- Alberdi Causse, E. (2019). *El sonido en las iglesias barrocas de Leonardo de Figueroa. Caracterización y análisis evolutivo*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Alonso Carrillo, A. (2016). *El sonido de las catedrales de Sevilla y Granada: acústica y recuperación patrimonial*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Álvarez Morales, C. L. (2016). *Acústica de grandes espacios de culto*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Álvarez-Corbacho, A., Bustamante, P., Girón, S., Zamarreño, T., & Galindo, M. (2018). Acoustic reconstruction of the Roman Theatre of Cadiz. *Tecniacústica. XI Congreso Iberoamericano de Acústica. X Congreso Ibérico de Acústica. 49º Congreso Español de Acústica*. Cádiz: Sociedad Española de Acústica.
- Álvarez-Corbacho, A., Bustamante, P., Zamarreño, T., Galindo, M., & Girón, S. (2017). Virtual acoustic reconstruction of the Roman Theatre of Palmyra. *Tecniacústica. 48º Congreso Español de Acústica. Encuentro Ibérico de Acústica. European Symposium on underwater acoustics applicatios. European Symposium on sustainable building acoustics*. A Coruña: Sociedad Española de Acústica.

-
- Álvarez-Corbacho, Á., Zamarreño García, T., Galindo del Pozo, M., & Girón Borrero, S. (2014). Virtual acoustics of the Roman theatre of Italica. *Tecniacústica. 45º Congreso Español de Acústica. 8º Congreso Ibérico de Acústica. European Symposium in smart cities and environmental acoustics*. Murcia: Sociedad Española de Acústica.
- Álvarez-Corbacho, A., Zamarreño, T., Galindo, M., Girón, S., & Bustamante, P. (2015). Virtual acoustics of the Roman Theatre of Regina Turdulorum. *Tecniacústica. 46º Congreso Español de Acústica. Escuentro Ibérico de Acústica. European symposium on virtual acoustics and amsisonics*. Valencia: Sociedad Española de Acústica.
- Álvarez-Morales, L., Lopez, M., & Álvarez-Corbach, Á. (2019). Cathedral Acoustics: Bristol Cathedral as a Case Study. *Inter.noise 2019*. Madrid.
- Alves Santos, H. (2014). *Estudio comparativo de los parámetros acústicos de la norma UNE-EN ISO 3382-1 medidos con fuente puntual y con el sistema de refuerzo sonoro en salas de cine*. Trabajo Final de Máster, Universidad Politécnica de Madrid.
- Arnau, H. (1988). An improved reverberation formula. *Acústica*, 65(4), 163-180.
- Axelsson, Å., Nilsson, M., & Berglund, B. (2012). The Swedish soundscape-quality protocol. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 3476-3476.
- Azevedo, M., Markham, B., & Wall, N. J. (2013). Acoustical archaeology-Recreating the soundscape of John Donne's 1622 gunpowder plot sermon at Paul's Cross. *Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013. 19*. Montreal, Canada: Acoustical Society of America.
- Balestra, F. (2021). *Estudio acústico de la Catedral de Santiago de Compostela*. Trabajo Final de Máster, Universidad Politécnica de Madrid.
- Barba Sevillano, A. (2016). *La acústica virtual como herramienta arqueológica. Historia y sonido en el Teatro Principal de Valencia*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València.
- Barron, M., & Lee, L. J. (1988). Energy relations in concert auditoriums. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(2), 618-628.
- Beranek, L. L. (1962). *Music, Acoustics and Architecture*. London and New: John Wiley and Sons.
- Beranek, L. L. (1993). *Acoustics. Acoustical Society of America*.

- Berardi, U. (2014). Simulation of acoustical parameters in rectangular churches. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(1), 1-16.
- Berardi, U., Iannace, G., & Maffei, L. (2016). Virtual reconstruction of the historical acoustics of the Odeon of Pompeii. *Journal of Cultural Heritage*, 19, 555-566.
- Bevilacqua, A., Ciaburro, G., Iannace, G., Lombardi, I., & Trematerra, A. (2022). Acoustic design of a new shell to be placed in the Roman amphitheater. *Applied Acoustics*(187), 108524.
- BOE. (2006). *Decreto 73/2006, de 26 de mayo, por el que se declara Bien de Interés Cultural Inmaterial el Tribunal de las Aguas de la Vega de Valencia*. Comunidad Valenciana: Boletín Oficial del Estado.
- Bork, I. (2005). Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation–Part II: Calculations. *Acta Acustica united with Acustica*, 753-763.
- Bradley, J., Reich, R., & Norcross, S. (1999). A just noticeable difference in C50 for speech. *Applied Acoustics*(58), 99-108.
- Bucy, M., Calatayud García, J., Cárdenas García, I., Lapuerta Morales, B., Montalar Aznar, S., Muñoz Ros, C., . . . Valencia Dávila, J. (2013). El Tribunal de las Aguas y la Acequia de Favara. *Revista Jurídica Valenciana*(30), 97-143.
- Bueno, A., León, A. L., & Galindo, M. (2012). Iglesia de Santa Ana de Moratalaz. Propuesta de rehabilitación acústica. Evora, Portugal.
- Cain, R., Jennings, P., & Poxon, J. (2013). The development and application of the emotional dimensions of a soundscape. *Applied acoustics*, 74(2), 232-239.
- Carmona, C., Zamarreño, T., Girón, S., & Galindo, M. (2009). Acústica virtual de la Iglesia de San Lorenzo de Sevilla. *Tecniacústica*. Cádiz.
- Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Carvalho, A. (1994). *Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches*. Tesis doctoral, Universitat de Florida.
- Cerdá, S., Lacatis, R., Segura, J., Giménez, A., Cibrián, R., Montell, R., & Barba, A. (2011). Sobre el tratamiento de la difusión en el software de simulación acústica: Catt-Acoustic y Odeon. *Tecniacústica. 42º Congreso Español de Acústica. Ecuentero Ibérico de Acústica. European symposium on environmental acoustic and on buildings acoustically sustainable*. Cáceres: Sociedad Española de Acústica.

-
- Chaparría, J. E. (1993). Algunas notas sobre la restauración de la puerta de los Apóstoles de la catedral de Valencia (España). *Informes de la Construcción*, 45(427), 57-65.
- Cirillo, E., & Martellotta, F. (2005). Sound propagation and energy relations in churches. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(1), 232-248.
- Company, X. (2006). Ángeles de azul y oro en la Catedral de Valencia: Estudio histórico y análisis estilístico. En *Los Ángeles Músicos de la Catedral de Valencia. Estudios previos* (págs. 43-94). Valencia: Generalitat Valenciana.
- Cortés Meseguer, L. (2014). *La construcción del proyecto neoclásico de la Catedral de Valencia*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València.
- Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2009). *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. Londres y Nueva York: Taylor & Francis.
- De los Reyes Sanchez, P. (2016). *Estudio y Simulación Acústica del Auditorio de la Universidad Carlos III de Madrid*. [Trabajo Final de Grado, Universidad Politécnica de Madrid].
- Díaz Rubio, E., & Giménez Pérez, A. (2021). Preservación y difusión del patrimonio cultural de los recintos de culto a través de la simulación acústica y visual. Aplicación en la Catedral de Valencia. *Culturas. Revista de gestión cultural*, 8(2), 49-60.
- Díaz, E., Montell, R., Cerdá, S., Segura, J., Cibrián, R., Barba, A., . . . Giménez, A. (2021). Metodología para la mejora acústica de recintos de culto. Aplicación en la Catedral de Valencia. *Revista de acústica*, 52(3-4), 49-57.
- Díaz, E., Pastor, A., Fraile, R., López, J., Fayos, R., San Martín, R., . . . Giménez, A. (2020). Simulación acústica de un evento singular en un entorno abierto: el Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia. *XI Congreso Ibérico de Acústica. 51º Congreso Español de Acústica. Tecniacústica 2020*. E-Congress, Portugal.
- D'Orazio, D., G. F., Rossi, E., & Garai, M. (2020). Understanding the acoustics of St. John's. *Journal of Building Performance Simulation*, 3(13), 320-333.
- Echarte Merino, Á. (2010). *Evaluación de la calidad sonora mediante parámetros psicoacústicos*. Proyecto Final de Carrera, Universidad Pública de Navarra.
- Eyring, C. F. (1930). Reverberation time in "dead" rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1, 217-241.

- Fairén Guillén, V. (2003). Breve examen del Tribunal de las Aguas de Valencia y de su proceso. *Arbor*, 175(691), 1295-1330.
- Fazenda, B., & Drumm, I. (2011). Recreating the sound of stonehenge. *Proceedings of the Acous-tics of Ancient Theaters Conference* (págs. 18-21). Patras, Grecia: European Acoustics Association.
- Fitzroy, D. (1959). Reverberation formula which seems to be more accurate with non-uniform distribution of absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*, 31, 893-897.
- Freiheit, R. (2010). Creating an Anechoic Choral Recording. *Proceedings of the international symposium on room acoustics*. Melbourne, Australia .
- Galindo, M. (2003). *La acústica en espacios religiosos católicos: iglesias Gótico-Mudéjares*. [Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla].
- Giménez, A., & Marín, A. (1988). Analysis and assessment of concert halls. *Applied Acoustics*, 25(4), 235-241.
- Giménez, A., Marín, A., Sanchís, A., Romero, J., Cerdá, S., & Jorge, M. D. (2001). Estudio de la evolución de parámetros acústicos que miden la calidad de salas de conciertos. *32º Congreso Nacional de Acústica. Tecniacústica 2001*. La Rioja.
- Giménez, A., Segura, J., Cibrián, R., Cerdá, S., Barba, A., Montell, R., . . . Miralles, J. L. (2011). Estudio acústico de edificios del patrimonio histórico-arquitectónico en entornos de realidad virtual. Dificultades y ventajas. *Tecniacústica. 42º Congreso Español de Acústica. Encuentro Ibérico de Acústica. EAA European Symposium on Environmental Acoustics and on Buildings Acoustically Sustainable* (pp. 1-10). Cáceres: Sociedad Española de Acústica.
- Gómez, M. (2007). Del ludicci signum al Canto de la Sibila: primeros testimonios. En *Hispania vetus: manuscritos litúrgico-musicales de los orígenes visigóticos a la transición francorromana (s. IX-XII)* (págs. 159-173). Bilbao: Fundación BBVA.
- Guerrero García, J. D. (2020). *Diseño de un nuevo sistema de sonorización para la Catedral de Santiago de Compostela*. Trabajo Final de Grado, Universidad Politécnica de Madrid.
- Hermida Cadena, L. F. (2019). *Desarrollo de un modelo de evaluación de paisajes sonoros según aspectos espaciales, temporales, subjetivos y de contexto*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

-
- Höhne, R., & Stroth, G. (1995). Zur Wahrnehmbarkeit von Deutlichkeits- und Durchsichtigkeitsunterschieden in Zuhörersälen (The visibility of definition and clarity parameters in concert halls). *Acustica*(81), 309-319.
- Iannace, G. (2016). Acoustic correction of monumental churches with ceramic material: The case of the Cathedral of Benevento. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 3(35), 230-239.
- Iannace, G., Berardi, U., De Rossi, F., Mazza, S., Trematerra, A., & Ciaburro, G. (2019). Acoustic Enhancement of a Modern Church. *Buildings*, 9(4), 83.
- Katz, B. F., & Weber, A. (2020). An Acoustic Survey of the Cathédrale Notre-Dame de. *Acoustics*, 2(4), 791-802.
- Kleiner, M., Dalenbäck, B. I., & Svensson, P. (1993). Auralization-an overview. *Journal of the Audio Engineering*, 11(41), 861-875.
- Knudsen, V. O., & Harris, C. M. (1998). Acustical designing in architecture. *Acoustical Society o America*.
- Kuttruff, H. (1979). *Room acoustics*. Londres: El Servier Applied Science.
- Lacatis, R., Cerdá, S., Giménez, A., & Romero, J. (2011). Comparación de los parámetros acústicos obtenidos mediante dos programas de simulación con modelos geométricos de diferente complejidad de una sala. *Revista de acústica*, 1-2(42), 33-42.
- Lubman, D. (2008). Convolution-scattering model for staircase echoes at the temple of Kukulkan. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 3604-3604.
- Martellotta, F. (2008). Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches. *Journal of Sound and Vibration*, 378-399.
- Martellotta, F. (2009). Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1175-1186.
- Mascarell Navarro, M. J. (1997). El Tribunal de las Aguas de la Vega Valenciana. Universidad de Valencia.
- Millington, G. (1932). A modified formula for reverberation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 4, 69-82.
- Montell, R., Gimenez, A., Cerdá, S., Segura, J., Cibrián, R., & Barba, A. (2012). Influencia de la localización de la fuente sonora en los parámetros acústicos en la Catedral Metropolitana de Valencia. *VIII Congreso Iberoamericano de acústica*.

- Moreno Iglesias, D. (2020). *Diseño y validación de un modelo geométrico para el estudio acústico de la Capilla de la Corticela (Santiago de Compostela)*. Trabajo Final de Grado, Universidad Politécnica de Madrid.
- Moreno Iglesias, D. (2021). *Diseño y evaluación de un sistema para la evaluación de paisajes sonoros in situ*. Trabajo Final de Máster, Universidad Politécnica de Madrid.
- Núñez Sanmartín, A. (2017). *Análisis, estudio y restitución gráfica de la Catedral de Valencia antes de la repristación de 1972*. Trabajo Final de Grado, Universitat Politècnica de València.
- Pedrero, A., Ruiz, R., Díaz-Chyla, A., & Díaz, C. (2014). Acoustical study of Toledo Cathedral according to its liturgical uses. *Applied Acoustics*, 85, 23-33.
- Planells Pérez, A. (2017). *La acústica virtual en el estudio del patrimonio arquitectónico de la Basílica de Santa María y el Misteri d'Elx*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València.
- Plaza Penadés, J. (2007). El Tribunal de las Aguas de la Vega de Valencia. *Revista de Derecho Civil Valenciano*, 2.
- Pollow, M. (2015). *Directivity patterns for room acoustical measurements and simulations*. Berlín: Logos Verlag.
- Postma, B. N., Poirier-Quinot, D., Meyer, J., & Katz, B. F. (2016). Virtual Reality Performance Auralization in a Calibrated Model of Notre-Dame Cathedral. *EuroRegio 2016*. Portugal.
- Romero, Á., Navarro, E. A., & Segura, J. (2010). Estudio y rehabilitación acústica de la iglesia Sant Agustí de Vinaròs (Castelló). *Revista de acústica*, 41(1), 28-43.
- Sabine, W. C. (1922). *Collected Papers on Acustics*. Harvard: Harvard.
- San Martín, R., Lopetegui, K., & Arana, M. (2009). Determinación del Just Noticeable Difference (JND) de parámetros acústicos mediante campos sonoros reales. *TecniAcústica*. Cádiz.
- Savioja, L., & Svensson, U. P. (2015). Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2(138), 708-730.
- Sendra, J., Zamarreño, T., Navarro, J., & Algaba, J. (1997). *El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación*. Sevilla: Universidad de Sevilla.

-
- Sukaj, S., Ciaburro, G., Iannace, G., Lombardi, I., & Trematerra, A. (2021). The Acoustics of the Benevento Roman Theatre. *Buildings*.
- Vilaplana Zurita, D. (1997). *La Catedral de Valencia*. Valencia: Everest.
- Villa Ferrer, S. (2006). Recuperación de la bóveda del ábside de la Catedral de Valencia. En *Los Ángeles Músicos de la Catedral de Valencia. Estudio previos* (págs. 253-272). Valencia: Generalitat Valenciana.
- Vörlander, M. (2008). *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlín: Springer.
- Vorländer, M. (2011). Models and algorithms for computer simulations in room acoustics. *International Seminar on Virtual Acoustics*, (págs. 72-82). Valencia.
- Witew, I. B. (2006). Is the perception of listener envelopment in concert halls affected by clarity? *Fortschritte der Akustik - Proceedings of DAGA'06*. Braunschweig.
- Woszczyk, W., Begault, D. R., & Higbie, A. G. (2014). Comparison and contrast of reverberation measurements in Grace Cathedral San Francisco. *Audio Engineering Society Convention*. Los Angeles, CA, USA.
- Zamarreño, T., Girón, S., & Galindo, M. (2007). Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1, 234-250.

Índice de figuras

Parte I. Acústica de la Catedral de Valencia.

Figura 1.1. Valores óptimos del tiempo de reverberación a 500 Hz (Beranek, 1993).	23
Figura 1.2. Valores óptimos del tiempo de reverberación a 500 Hz (Knudsen & Harris, 1998).....	23
Figura 1.3. Plano de situación de la Catedral de Valencia	35
Figura 1.4. Evolución constructiva de la Catedral del Valencia.	36
Figura 1.5. Interior de la Catedral de Valencia. Fotografía tomada desde el transepto hacia la nave del Evangelio, 1917 (Archivo Mas E1-1157, Institut Amatller d'Art Hispànic).	37
Figura 1.6. Interior de la Catedral de Valencia. Fotografía tomada desde la nave de la Epístola hacia el crucero, 1917 (Archivo Mas E1-1971, Institut Amatller d'Art Hispànic).	38
Figura 1.7. Interior de la Catedral de Valencia. Fotografía tomada desde el coro hacia el presbiterio, 1910-1930. (Colección de postales, Archivo de la Catedral de Valencia).....	39

Figura 1.8. Interior de la Catedral de Valencia después de la intervención de Vicente Traver Tomás, 1955 (Archivo Gudiol 36419, Institut Amatller d'Art Hispànic).	40
Figura 1.9. Interior de la Catedral de Valencia en la actualidad.	41
Figura 1.10. Bóveda barroca del ábside construida en el S. XVIII antes de su retirada (Salvador Villa Ferrer, arquitecto de la Catedral de Valencia).	42
Figura 1.11. Interior de la Catedral de Valencia. Fotografía tomada desde el coro hacia el presbiterio, 1917 (Archivo Mas C-16500, Institut Amatller d'Art Hispànic).	43
Figura 1.12. Estado actual del ábside y de los frescos renacentistas.	44
Figura 2.1. Planta y sección longitudinal por el eje de la Catedral (Plan Director de la Catedral de Valencia, 2000).	48
Figura 2.2. Sección longitudinal. Restitución gráfica de la Catedral de Valencia antes de las reпрistinaciones de 1972 (Nuñez Sanmartín, 2017).	49
Figura 2.3. Sección transversal. Restitución gráfica de la Catedral de Valencia antes de las reпрistinaciones de 1972 (Nuñez Sanmartín, 2017).	50
Figura 2.4. Medición acústica de la Catedral de Valencia realizada por el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG.	51
Figura 2.5. Ubicación de los receptores (1-47) y las fuentes de emisión sonora (A, B y C) en la medición acústica de la Catedral de Valencia.	52
Figura 2.6. Esquema de conexiones del equipamiento utilizado en la medición acústica de la Catedral de Valencia.	53
Figura 2.7. Modelo acústico de la Catedral de Valencia.	54
Figura 2.8. Comparativa entre el modelo real y modelo acústico simplificado. Vista desde la nave central hacia el presbiterio.	55
Figura 2.9. Vista general del modelo acústico calibrado de la Catedral de Valencia.	57
Figura 2.10. Vista seccionada del modelo acústico calibrado de la Catedral de Valencia.	57
Figura 2.11. Modelo acústico de la Catedral de Valencia en la actualidad. Vista desde la nave central hacia el presbiterio.	58

Figura 2.12. Modelo acústico de la Catedral de Valencia en 1972. Vista desde la nave central hacia el presbiterio.	59
Figura 2.13. Modelo visual de la Catedral de Valencia.....	61
Figura 2.14. Modelo visual de la Catedral de Valencia con la distribución en capas. Vista desde la nave central hacia el presbiterio.	62
Figura 2.15. Modelo visual de la Catedral de Valencia con la distribución en capas. Vista desde el altar mayor hacia la Puerta de los Apóstoles.	62
Figura 2.16. Ejemplos de texturas utilizadas en la elaboración de modelo visual de la Catedral de Valencia.	63
Figura 3.1. Promedio del tiempo de reverberación (T_{30}) según la ubicación de la fuente sonora.	66
Figura 3.2. Dispersión del tiempo de reverberación (T_{30}) en función de la ubicación del receptor para las tres posiciones de la fuente sonora.....	67
Figura 3.3. Correlación entre el tiempo de reverberación ($T_{30,mid}$) y la distancia fuente-receptor para la fuente A (altar mayor).	68
Figura 3.4. Correlación entre el tiempo de reverberación ($T_{30,mid}$) y la distancia fuente-receptor para la fuente B (coro).	69
Figura 3.5. Correlación entre el tiempo de reverberación ($T_{30,mid}$) y la distancia fuente-receptor para la fuente C (púlpito).	69
Figura 3.6. Promedio del tiempo de caída inicial (EDT) según la ubicación de la fuente sonora.	70
Figura 3.7. Dispersión del tiempo de caída inicial (EDT) en función de la ubicación del receptor.....	71
Figura 3.8. Correlación entre el tiempo de caída inicial (EDT_{mid}) y la distancia fuente-receptor para la fuente A (altar mayor).	72
Figura 3.9. Correlación entre el tiempo de caída inicial (EDT_{mid}) y la distancia fuente-receptor para la fuente B (coro).	73
Figura 3.10. Correlación entre el tiempo de caída inicial (EDT_{mid}) y la distancia fuente-receptor para la fuente C (púlpito).	73
Figura 3.11. Promedio energético de la fuerza sonora (G) según la ubicación de la fuente.	75

Figura 3.12. Dispersión de la fuerza sonora (G) en función de la ubicación del receptor.	76
Figura 3.13. Correlación entre la fuerza sonora (G) y la distancia fuente-receptor (fuente A, altar mayor).....	77
Figura 3.14. Correlación entre la fuerza sonora (G) y la distancia fuente-receptor (fuente B, coro).....	78
Figura 3.15. Correlación entre la fuerza sonora (G) y la distancia fuente-receptor (fuente C, púlpito).....	78
Figura 3.16. Comparativa del modelo de Barron con los resultados obtenidos experimentalmente para G_{mid}	79
Figura 3.17. Promedio energético de la claridad musical (C_{80}) según la ubicación de la fuente sonora.	80
Figura 3.18. Dispersión de la claridad musical (C_{80}) en función de la ubicación del receptor.	81
Figura 3.19. Correlación entre la claridad musical (C_{80}) y la distancia fuente-receptor (fuente A, altar mayor).....	82
Figura 3.20. Correlación entre la claridad musical (C_{80}) y la distancia fuente-receptor (fuente B, coro).....	83
Figura 3.21. Correlación entre la claridad musical (C_{80}) y la distancia fuente-receptor (fuente C, púlpito).....	83
Figura 3.22. Comparativa del modelo de Barron con los resultados obtenidos experimentalmente para $C_{80,mid}$	84
Figura 3.23. Promedio energético de la claridad para la palabra (C_{50}) según la ubicación de la fuente sonora.	85
Figura 3.24. Dispersión de la claridad para la palabra (C_{50}) en función de la ubicación del receptor.....	86
Figura 3.25. Correlación entre la claridad para la palabra (C_{50}) y la distancia fuente-receptor (fuente A, altar mayor).	87
Figura 3.26. Correlación entre la claridad para la palabra (C_{50}) y la distancia fuente-receptor (fuente B, coro).	88
Figura 3.27. Correlación entre la claridad para la palabra (C_{50}) y la distancia fuente-receptor (fuente C, púlpito).	88

Figura 3.28. Promedio del tiempo central (T_S) según la ubicación de la fuente sonora.	89
Figura 3.29. Dispersión del tiempo central (T_S) en función de la ubicación del receptor.	90
Figura 3.30. Correlación entre el tiempo central (T_S) y la distancia fuente-receptor (fuente A, altar mayor).....	91
Figura 3.31. Correlación entre el tiempo central (T_S) y la distancia fuente-receptor (fuente B, coro).....	92
Figura 3.32. Correlación entre el tiempo central (T_S) y la distancia fuente-receptor (fuente C, púlpito).....	92
Figura 3.33. Comparativa del modelo de Barron con los resultados obtenidos experimentalmente para $T_{S,mid}$	93
Figura 3.34. Promedio de la fracción de energía lateral (LF) según la ubicación de la fuente.	94
Figura 3.35. Dispersión de la fracción de energía lateral (LF) en función de la ubicación del receptor.	95
Figura 3.36. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el promediado en frecuencia de número único de la fracción de energía lateral (LF_{E4}) para la fuente A (altar mayor).....	96
Figura 3.37. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el parámetro LF_{E4} para la fuente B (coro).	97
Figura 3.38. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el promediado en frecuencia de número único de la fracción de energía lateral (LF_{E4}) para la fuente C (púlpito).....	97
Figura 3.39. Promedio del índice de calidad biaural ($1 - IACC_E$) según la ubicación de la fuente sonora.	98
Figura 3.40. Dispersión del índice de calidad biaural ($1 - IACC_E$) en función de la ubicación del receptor.	99
Figura 3.41. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el índice de calidad biaural ($1 - IACC_E$) para la fuente A (altar mayor).	100
Figura 3.42. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el índice de calidad biaural ($1 - IACC_E$) para la fuente C (púlpito).	101
Figura 3.43. Correlación entre la distancia fuente-receptor y el índice de calidad biaural ($1 - IACC_E$) para la fuente C (púlpito).	101

Figura 3.44. Correlación entre la distancia fuente-receptor y del índice de transmisión del habla (<i>STI</i>) para la fuente A (altar mayor).	102
Figura 3.45. Correlación entre la distancia fuente-receptor y del índice de transmisión del habla (<i>STI</i>) para la fuente B (coro).	103
Figura 3.46. Correlación entre la distancia fuente-receptor y del índice de transmisión del habla (<i>STI</i>) para la fuente C (púlpito).	103
Figura 3.47. Comparativa del tiempo de reverberación medido y óptimo (Sendra et al., 1997).	104
Figura 3.48. Comparativa entre la medición acústica y la simulación acústica para las tres ubicaciones de la fuente sonora (A, B y C)	110
Figura 3.49. Comparativa del comportamiento acústico de la Catedral de Valencia con y sin audiencia para las tres posiciones de la fuente sonora (A, B y C) .	112
Figura 3.50. Comparativa del comportamiento acústico de la Catedral de Valencia (actualidad -1972) para las tres posiciones de la fuente sonora (A, B y C) .	114
Figura 3.51. Ubicación en planta y alzado de los elementos textiles decorativos en la mejora del acondicionamiento acústico para la música religiosa (mejora A).	116
Figura 3.52. Ubicación en planta y alzado de los elementos textiles decorativos en la mejora del acondicionamiento acústico para la palabra (mejora B).	117
Figura 3.53. Análisis de la mejora acústica para la música religiosa y la palabra (fuente A, altar mayor).	119
Figura 3.54. Análisis de la mejora acústica para la música religiosa y la palabra (fuente B, coro).	120
Figura 3.55. Análisis de la mejora acústica para la música religiosa y la palabra (fuente C, púlpito).	121
Figura 3.56. Mapas de variación del parámetro T_{30} (s) (1000 Hz, sala ocupada).	122
Figura 3.57. Mapas de variación del parámetro EDT (s) (1000 Hz, sala ocupada).	123
Figura 3.58. Mapas de variación del parámetro G (dB) (1000 Hz, sala ocupada).	124
Figura 3.59. Mapas de variación del parámetro C_{80} (dB) (1000 Hz, sala ocupada).	125
Figura 3.60. Mapas de variación del parámetro T_s (ms) (1000 Hz, sala ocupada).	126
Figura 3.61. Mapas de variación del parámetro LF (1000 Hz, sala ocupada).	127

Figura 3.62. Mapas de variación del parámetro <i>STI</i> (sala ocupada).	128
Figura 3.63. Distribución en planta de los puntos del recorrido virtual.	129
Figura 3.64. Simulación visual. Vista desde la nave central hacia el altar.	130
Figura 3.65. Simulación visual. Vista del transepto desde el altar hacia la Puerta de los Apóstoles.	131
Figura 3.66. Simulación visual. Vista desde el altar hacia el ábside.	132
Figura 3.67. Simulación visual. Vista desde la nave central hacia las capillas laterales.	133
Figura 3.68. Simulación acústica y visual de la Catedral de Valencia.	134

Parte II. Acústica del Tribunal de las Aguas.

Figura 1.1. Obra "Tribunal de las Aguas de Valencia, 1808" realizada por Bernardo Ferrándiz en 1865 (MUMA Museu Municipal d'Alzira)	146
Figura 1.2. Grabado "Le tribunal des eaux, a Valence" realizado por Gustave Doré en 1978 (Archivo del Tribunal de las Aguas de Valencia)	147
Figura 1.3. Sesión del Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia (1930-1950) (Colección de postales, Archivo de la Catedral de Valencia).	148
Figura 1.4. Sesión del Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia en la actualidad (Archivo del Tribunal de las Aguas de Valencia).	149
Figura 1.5. Plano de situación del entorno del Tribunal de las Aguas.	150
Figura 1.6. Puerta de los Apóstoles antes de las intervenciones realizadas entre 1991 y 1992 (Julián Esteban Chaparria) y en la actualidad.	151
Figura 2.1. Detalles de la nube de puntos de la Puerta de los Apóstoles de la Catedral de Valencia.	154
Figura 2.2. Nube de puntos del escaneado en 3D del entorno del Tribunal de las Aguas.	155
Figura 2.3 Ubicación de las fuentes sonoras (A-I) y los puntos de medida (1-6) en la medición acústica del entorno del Tribunal de las Aguas.	156

Figura 2.4. Medición acústica del Tribunal de las Aguas realizada por el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG.	157
Figura 2.5. Esquema de conexiones del equipo de medición acústica.	157
Figura 2.6. Modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas.	158
Figura 2.7. Comparativa entre el modelo real y modelo acústico simplificado. ...	159
Figura 2.8. Modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas con la distribución de capas. Vista general.	160
Figura 2.9. Modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas con la distribución de capas. Vista detalle de la Puerta de los Apóstoles.	160
Figura 2.10. Modelo acústico del entorno del Tribunal de las Aguas con audiencia.	162
Figura 2.11. Fotografía tomada durante la grabación en cámara anecoica anecoica de una sesión del Tribunal de las Aguas.	163
Figura 2.12. Ubicación de los micrófonos durante la medición para la caracterización acústica de la fuente (mediciones 1 y 2).	164
Figura 2.13. Ubicación de los micrófonos durante la medición para la caracterización acústica de la fuente (medición 3).	165
Figura 2.14. Ubicación de los micrófonos durante la medición para la caracterización acústica de la fuente (medición 4).	166
Figura 2.15. Modelo visual del entorno del Tribunal de la Aguas.	167
Figura 2.16. Modelo visual del entorno del Tribunal de las Aguas con la distribución en capas.	168
Figura 2.17. Ejemplos de texturas empleadas en la elaboración del modelo visual del Tribunal de las Aguas.	169
Figura 2.18. Modelo bidimensional para la evaluación de paisajes sonoros (ISO 12913-3).	170
Figura 3.1. Promedio del tiempo de reverberación (T_{30}) en función la ubicación de la fuente sonora.	173
Figura 3.2. Promedio del tiempo de reverberación (T_{30}) en función de la ubicación del punto de medida.	173
Figura 3.3. Promedio del tiempo de caída inicial (EDT) en función de la ubicación de la fuente sonora.	175

Figura 3.4. Promedio del tiempo de caída inicial (EDT) en función de la ubicación del punto de medida.	175
Figura 3.5. Promedio de la fuerza sonora (G) en función de la ubicación de la fuente sonora.	177
Figura 3.6. Promedio de la fuerza sonora (G) en función de la ubicación del punto de medida.	177
Figura 3.7. Promedio de la claridad musical (C_{80}) en función de la ubicación de la fuente sonora.	179
Figura 3.8. Promedio de la claridad musical (C_{80}) en función de la ubicación del punto de medida.	179
Figura 3.9. Promedio de la claridad para la palabra (C_{50}) en función de la ubicación de la fuente sonora.	181
Figura 3.10. Promedio de la claridad para la palabra (C_{50}) en función de la ubicación del punto de medida.	181
Figura 3.11. Promedio del tiempo central (T_5) en función de la ubicación de la fuente sonora.	183
Figura 3.12. Promedio del tiempo central (T_5) en función de la ubicación del punto de medida.	183
Figura 3.13. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con <i>Odeon</i>	196
Figura 3.14. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con <i>CATT-Acoustic</i>	196
Figura 3.15. Comparativa entre la medición acústica y las simulaciones acústicas con <i>Odeon</i> y <i>CATT-Acoustic</i>	197
Figura 3.16. Comparativa de los valores promedio obtenidos de los parámetros T_{30} , EDT , G , C_{80} , C_{50} y T_5 en las simulaciones acústicas con y sin audiencia.	199
Figura 3.17. Fuente habla generada a partir de la grabación de una sesión del Tribunal de las Aguas en cámara anecoica.	200
Figura 3.18. Puntos del recorrido virtual.	201
Figura 3.19. Simulación visual. Vista general de la Plaza de la Virgen.	202
Figura 3.20. Simulación visual. Vista de la Puerta de los Apóstoles de la Catedral de Valencia.	203
Figura 3.21. Simulación visual. Detalle de la representación del Tribunal de las Aguas.	204

Figura 3.22. Simulación acústica y visual del Tribunal de las Aguas..... 205

Figura 3.23. Modelo bidimensional del paisaje sonoro del Tribunal de las Aguas.
..... 206

Índice de tablas

Parte I. Acústica de la Catedral de Valencia

Tabla 1.1. Valores del coeficiente k según la frecuencia.....	22
Tabla 1.2. Valores del coeficiente u según el uso del recinto.....	22
Tabla 3.1. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo de reverberación (T_{30}).....	67
Tabla 3.2. Promedio del parámetro $T_{30,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.	68
Tabla 3.3. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo de caída inicial (EDT).....	71
Tabla 3.4. Promedio del parámetro EDT_{mid} según la ubicación de la fuente sonora.	72
Tabla 3.5. Resultados obtenidos para la calidez (BR) y el brillo (Br) según la ubicación de la fuente sonora.	74
Tabla 3.6. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la fuerza sonora (G).....	76
Tabla 3.7. Promedio del parámetro G_{mid} según la ubicación de la fuente sonora. ..	77

Tabla 3.8. Promedio del error absoluto y JND entre el modelo de Barron y los resultados obtenidos experimentalmente para G_{mid}	79
Tabla 3.9. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la claridad musical (C_{80}).	81
Tabla 3.10. Promedio del parámetro $C_{80,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.	82
Tabla 3.11. Promedio del error absoluto y JND entre el modelo de Barron y los resultados obtenidos experimentalmente para $C_{80,mid}$	84
Tabla 3.12. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la claridad para la palabra (C_{50}).	86
Tabla 3.13. Promedio del parámetro $C_{50,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.	87
Tabla 3.14. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo central (T_s).	90
Tabla 3.15. Promedio del parámetro $T_{s,mid}$ para las tres ubicaciones de la fuente sonora.	91
Tabla 3.16. Promedio del error absoluto y JND entre el modelo de Barron y los resultados obtenidos experimentalmente para $T_{s,mid}$	93
Tabla 3.17. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la fracción de energía lateral (LF).	95
Tabla 3.18. Promedio del parámetro LF_{E4} según la ubicación de la fuente sonora. 96	
Tabla 3.19. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el parámetro $1-IACC_E$	99
Tabla 3.20. Promedio del índice de calidad binaural ($1-IACC_E$) para las tres ubicaciones de la fuente sonora.	100
Tabla 3.21. Promedio de parámetro STI para las tres ubicaciones de la fuente sonora.	102
Tabla 3.22. Tiempo de reverberación óptimo para la música religiosa y la palabra.	104
Tabla 3.23. Coeficientes de absorción por frecuencias de los materiales utilizados en la simulación acústica con <i>Odeon</i>	105
Tabla 3.24. Coeficientes de dispersión utilizados en la simulación acústica con <i>Odeon</i>	106

Tabla 3.25. Valores de JND empleados para las distintas magnitudes acústicas. .	106
Tabla 3.26. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>Odeon</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente A (altar mayor). ..	107
Tabla 3.27. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>Odeon</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente B (coro)	108
Tabla 3.28. Umbrales Diferenciales, JND, del modelo acústico para la fuente C (púlpito).....	109
Tabla 3.29. Coeficientes de absorción por frecuencias aplicados a los bancos de madera con y sin audiencia en la simulación acústica con <i>Odeon</i>	111
Tabla 3.30. Comparativa del parámetro STI y la inteligibilidad del habla (actualidad-1972).....	113
Tabla 3.31. Coeficientes de absorción por frecuencias de los textiles incorporados en las propuestas de mejora acústica.	115
Tabla 3.32. Comparativa de la inteligibilidad del habla con y sin mejora acústica.	118

Parte II. Acústica del Tribunal de las Aguas

Tabla 3.1. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo de reverberación (T_{30}).....	172
Tabla 3.2. Promedio del parámetro $T_{30,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.	172
Tabla 3.3. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo de caída inicial (<i>EDT</i>).....	174
Tabla 3.4. Promedio del parámetro $T_{30,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.	174
Tabla 3.5. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la fuerza sonora (<i>G</i>).	176
Tabla 3.6. Promedio del parámetro G_{mid} según la ubicación de la fuente sonora.	176
Tabla 3.7. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo de la claridad musical (C_{80}).	178

Tabla 3.8. Promedio del parámetro $C_{80,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.	178
Tabla 3.9. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para la claridad para la palabra (C_{50}).	180
Tabla 3.10. Promedio del parámetro $C_{50,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.	180
Tabla 3.11. Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el tiempo central (T_s).	182
Tabla 3.12. Promedio del parámetro $T_{s,mid}$ según la ubicación de la fuente sonora.	182
Tabla 3.13. Promedio del índice de transmisión del habla (STI) para las diferentes ubicaciones de la fuente sonora (A-I)	184
Tabla 3.14. Coeficientes de absorción por frecuencias para cada material utilizados en la simulación acústica con <i>Odeon</i>	184
Tabla 3.15. Coeficientes de dispersión utilizados en la simulación acústica con <i>Odeon</i>	185
Tabla 3.16. Valores de JND empleados para las distintas magnitudes acústicas..	185
Tabla 3.17. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con <i>Odeon</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente A (alguacil)	186
Tabla 3.18. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con <i>Odeon</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente B.	187
Tabla 3.19. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con <i>Odeon</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente C.	187
Tabla 3.20. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con <i>Odeon</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente D.	188
Tabla 3.21. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con <i>Odeon</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente E.	188
Tabla 3.22. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con <i>Odeon</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente F.	189
Tabla 3.23. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con <i>Odeon</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente G.	189
Tabla 3.24. Umbrales Diferenciales (JND) de la simulación acústica con <i>Odeon</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente H.	190

Tabla 3.25. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>Odeon</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente I.....	190
Tabla 3.26. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>CATT-Acoustic</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente A (alguacil)	191
Tabla 3.27. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>CATT-Acoustic</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente B.	192
Tabla 3.28. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>CATT-Acoustic</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente C.	192
Tabla 3.29. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>CATT-Acoustic</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente D.	193
Tabla 3.30. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>CATT-Acoustic</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente E.....	193
Tabla 3.31. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>CATT-Acoustic</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente F.....	194
Tabla 3.32. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>CATT-Acoustic</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente G.	194
Tabla 3.33. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>CATT-Acoustic</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente H.	195
Tabla 3.34. Umbrales Diferenciales (<i>JND</i>) de la simulación acústica con <i>CATT-Acoustic</i> obtenidos a partir de los valores promedio para la fuente I.....	195
Tabla 3.35. Coeficientes de absorción por frecuencias aplicados a la audiencia en las simulaciones acústicas.	198
Tabla 3.36. Comparativa de los valores del parámetro <i>STI</i> obtenidos en las simulaciones acústicas con y sin audiencia.	198
Tabla 3.37. Resultados obtenidos en la encuesta para la evaluación del paisaje sonoro del Tribunal de las Aguas.....	207

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Promediado en frecuencia de número único del tiempo de reverberación ($T_{R,mid}$)	22
Ecuación 2. Tiempo de reverberación óptimo de un recinto (T_{OP})	22
Ecuación 3. Promediado en frecuencia de número único del tiempo de caída inicial (EDT_{mid})	24
Ecuación 4. Calidez (BR)	25
Ecuación 5. Brillo (Br)	25
Ecuación 6. Fuerza sonora (G)	25
Ecuación 7. Cálculo de la fuerza sonora (G) a partir de una fuente sonora omnidireccional calibrada	25
Ecuación 8. Cálculo de la fuerza sonora (G) a partir de una fuente sonora omnidireccional cuyo nivel de potencia acústica es conocido	26
Ecuación 9. Promediado en frecuencia de número único de la fuerza sonora (G_{mid})	26
Ecuación 10. Claridad musical (C_{80})	26
Ecuación 11. Promediado en frecuencia de número único de la claridad musical ($C_{80,mid}$)	27

Ecuación 12. Claridad para la palabra (C_{50})	27
Ecuación 13. Promediado en frecuencia de número único de la claridad de la palabra ($C_{50,mid}$)	27
Ecuación 14. Tiempo central (T_5)	28
Ecuación 15. Promediado en frecuencia de número único del tiempo central ($T_{S,mid}$)	28
Ecuación 16. Fracción de energía lateral (LF)	29
Ecuación 17. Promediado en frecuencia de número único de la fracción de energía lateral (LF_{E4})	29
Ecuación 18. Índice de correlación cruzada interaural ($IACC$)	30
Ecuación 19. Promediado en frecuencia de número único del índice de correlación cruzada interaural para reflexiones tempranas ($IACC_{E3}$)	30
Ecuación 20. Promediado en frecuencia de número único del índice de correlación cruzada interaural para el sonido reverberante ($IACC_{L3}$)	30
Ecuación 21. Energía del sonido directo a una distancia r	32
Ecuación 22. Energía correspondiente a las reflexiones tempranas (primeros 80 ms) a una distancia r	32
Ecuación 23. Energía correspondiente a las reflexiones tardías (a partir de los primeros 80 ms) a una distancia r	32
Ecuación 24. Estimación de la fuerza sonora (G) a una distancia r	32
Ecuación 25. Estimación de la claridad musical (C_{80}) a una distancia r	32
Ecuación 26. Estimación de el tiempo central (T_5) a una distancia r	32
Ecuación 27. Componente agrado (P) del modelo bidimensional para la evaluación de paisajes sonoros	144
Ecuación 28. Componente dinamismo (D) del modelo bidimensional para la evaluación de paisajes sonoros	144

Anexo I

Difusión de los resultados

Artículos publicados.

Díaz Rubio, E. y Giménez Pérez, A. (2021). La acústica virtual aplicada a la restauración del patrimonio arquitectónico: la Catedral de Valencia. *Loggia, Arquitectura & Restauración*, 34, 108-119. Disponible en: <https://doi.org/10.4995/loggia.2021.14430>

Díaz Rubio, E. y Giménez Pérez, A. (2021). Preservación y difusión del patrimonio cultural de los recintos de culto a través de la simulación acústica y visual. Aplicación en la Catedral de Valencia. *Culturas. Revista de Gestión Cultural*, 8(2), 49-60. Disponible en: <https://doi.org/10.4995/cs.2021.16004>

Díaz, E., Montell, R., Cerdá, S., Segura, J., Cibrián, R., Barba, A., Lacatis, R., Planells, A., Fayos, R., Navasquillo, J. y Giménez, A. (2021). Metodología para la mejora acústica de recintos de culto. Aplicación en la Catedral de Valencia. *Revista de acústica, Sociedad Española de Acústica SEA*, 52(3-4), 49-57. Disponible en: http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/05_17.pdf

Díaz-Rubio, E., Segura-García, J., Fayos-Jordan, R., Cerdá, S., Cibrián, R.M., Giménez-Pérez, A. (2022). Soundscape Evaluation of a Heritage Event in an Open Environment: The Water Tribunal of the Plain of Valencia (Spain). *Applied Science* 2022, 12(9), 4292. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app12094292>

Participaciones en congresos.

- Díaz, E., Pastor, A., Fraile, R., López, J., Fayos, R., San Martín, R., Galindo, M., Segura, J., Cerdá, S., Arana, M., Cibrián, R. y Giménez, A. (2020). *Simulación acústica de un evento singular en un entorno abierto: el Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia*. XI Congreso Ibérico de Acústica, 51º Congreso Español de Acústica, Tecniacústica 2020. E-Congress, Portugal. Disponible en: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Faro20/ID84.pdf>
- Díaz, E., Cerdá, S., Cibrián, R. y Giménez, A. (2020). *Comparativa de los software CATT-Acoustic y Odeon en el estudio acústico de un entorno abierto singular de interés patrimonial*. XI Congreso Ibérico de Acústica, 51º Congreso Español de Acústica, Tecniacústica 2020. E-Congress, Portugal. Disponible en: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Faro20/ID123.pdf>
- Arana, M., Ezcurra, A., San Martín, R., Giménez, A., Díaz, E., Cerdá, S., Cibrián, R. y Segura, J. (2020). *Variabilidad del promediado espacial de la reverberación y claridad en la Catedral de Valencia*. XI Congreso Ibérico de Acústica, 51º Congreso Español de Acústica, Tecniacústica 2020. E-Congress, Portugal. Disponible en: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Faro20/ID77.pdf>
- Fayos Jordá, R., Díaz Rubio, E., Segura García, J., Cerdá Jordá, S., Cibrián Ortiz de Anda, R.M. y Giménez Pérez, A. (2022). *Metodología para la caracterización de la directividad de una fuente de sonido: el alguacil del Tribunal de las Aguas*. XII Congreso Ibérico de Acústica, 53º Congreso Español de Acústica, Tecniacústica 2022, Elche. Disponible en: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Elche22/ID-52.pdf>
- Segura García, J., Cerdá Jordá, S., Fayos Jordá, R., Díaz Rubio, E., Giménez Pérez, A. (2022) y Cibrián Ortiz de Anda, R.M. *El Tribunal de las Aguas de la Huerta de Valencia, ¿paisaje sonoro o recinto abierto?* XII Congreso Ibérico de Acústica, 53º Congreso Español de Acústica, Tecniacústica 2022, Elche. Disponible en: <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Elche22/ID-93.pdf>

Difusión web.

Simulación acústica y visual de la Catedral de Valencia disponible en:
[https://intranet.upv.es/pls/soalu/sic_miweb2.MicroWeb?p_ver=NORMAL
&P_IDWEB=851367&P_VISTA=&p_modos=&P_IDIOMA=C&p_id=115
2374&p_verids=](https://intranet.upv.es/pls/soalu/sic_miweb2.MicroWeb?p_ver=NORMAL&P_IDWEB=851367&P_VISTA=&p_modos=&P_IDIOMA=C&p_id=1152374&p_verids=)

Simulación acústica y visual del Tribunal de las Aguas disponible en:
[https://intranet.upv.es/pls/soalu/sic_miweb2.MicroWeb?P_IDIOMA=c&P
IDWEB=851367&P_ID=1091226&P_VER=NORMAL&P_CACHE=&P
ID_NAVEGA_INI=1091226](https://intranet.upv.es/pls/soalu/sic_miweb2.MicroWeb?P_IDIOMA=c&P_IDWEB=851367&P_ID=1091226&P_VER=NORMAL&P_CACHE=&P_ID_NAVEGA_INI=1091226)