



Departamento de
Construcciones
Arquitectónicas 1

arquitectura

Escuela Técnica Superior
Universidad de Sevilla

TESIS DOCTORAL Sevilla 2016



José Agustín Garrido ©

EL SONIDO DE LAS CATEDRALES DE SEVILLA Y GRANADA: ACÚSTICA Y RECUPERACIÓN PATRIMONIAL

Alicia Alonso Carrillo

Departamento de Construcciones Arquitectónicas I



Dirigida por:

Juan José Sendra Salas

Rafael Suárez Medina



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Departamento de Construcciones Arquitectónicas I

**EL SONIDO DE LAS CATEDRALES DE SEVILLA Y
GRANADA: ACÚSTICA Y RECUPERACIÓN PATRIMONIAL**

THE SOUND OF CATHEDRALS OF SEVILLE AND GRANADA:
ACOUSTICS AND HERITAGE RECOVERY

TESIS DOCTORAL / PhD Dissertation

Alicia Alonso Carrillo

Sevilla, 2016

Directores / Supervisors

Dr. Juan José Sendra Salas

Dr. Rafael Suárez Medina

El sonido de las catedrales de Sevilla y Granada: Acústica y recuperación patrimonial por Alicia Alonso. Sevilla, 2016.

Impresa en Full Color Printcolor S. L. (Barcelona)

Ilustraciones en portada: Catedrales de Sevilla y Granada por José Agustín Garrido ©

Tesis doctoral elaborada en el seno del grupo PAIDI TEP 130: Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía, adscrito al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla.



*"Music expresses that which cannot be said
and on which it is impossible to be silent."*

Victor Hugo

AGRADECIMIENTOS

A mis directores, Juan José Sendra y Rafael Suárez, por haberme guiado sabiamente en esta longeva etapa de formación que comenzó años atrás, habiendo depositado una gran confianza en mí desde el primer día. Gracias por vuestra dedicación, disposición, orientación y motivación, que de una forma trascendental han permitido desarrollar esta tesis doctoral, así como alcanzar cada una de las metas conseguidas durante este tiempo.

A los profesores Teófilo Zamarreño, Sara Girón, Miguel Galindo, por toda la enseñanza transmitida y ayuda otorgada en todo momento, que indudablemente han contribuido de forma valiosa a la realización de este trabajo. A Lidia Álvarez, compañera y amiga con la que he compartido esta ardua andadura como doctorandas, por haberme permitido aprender junto a ella y ofrecerme pacientemente su ayuda. A Pedro Bustamante y Ángel Álvarez, por sacarme la sonrisa incluso a última hora del día, al salir del Departamento antes de cerrar la Escuela y por brindarme todo aquello que haya necesitado. A José Garrido, por la facilitación de las espléndidas fotografías realizadas. En el recuerdo quedan aquellas noches que todos juntos hemos vivido en las catedrales, durante las sesiones de medición.

A Francesco Martellotta, Filippo Fazzi y Diego Murillo, investigadores internacionales con los que he tenido el privilegio y el placer de desarrollar las estancias predoctorales. Su experiencia, conocimiento y ayuda han contribuido de forma significativa a mi formación.

A todos mis compañeros y amigos de la "sala", ese espacio en el que pasamos tantas horas y donde hemos compartido vivencias, simpáticas anécdotas y algunos momentos de estrés previos a entregas. Entre ellos, a Rocío Escandón, por haber sido un constante apoyo, en lo profesional, y, especialmente, en lo personal, y porque su compañía ha convertido el trabajo en una labor más agradable. A los veteranos Miguel Ángel Campano, Jessica Fernández, Cristina Ramírez, que desde que llegué al Departamento hicieron que me sintiese como una más.

A mis compañeros del Área de Instalaciones, que desde el inicio de mi experiencia como docente e investigadora han expresado su sincera disposición y ayuda. A Ángel Luis León por la resolución de dudas ofrecida en todo momento y por depositar la confianza en mí en diversos trabajos.

A los YANs, ya que gracias a ellos, los diferentes congresos en los que nos hemos encontrado se han convertido en experiencias divertidas que nos han unido. Entre ellos, a Marcos, por su apoyo y haber hecho que me sienta como en casa durante la estancia doctoral.

A mis padres y hermano, por ser un pilar fundamental en mi vida, posibilitándome llegar hasta aquí. Con ellos, he aprendido a luchar por lo que quiero y a no rendirme.

Y a Nono, por su compañía, constante apoyo y comprensión desde el principio, y porque se ha convertido en alguien indispensable para mí. Junto a él, este camino pedregoso ha sido más fácil de recorrer.

FINANCIACIÓN

En este apartado se ha querido mostrar el agradecimiento a todas aquellas instituciones, organizaciones y proyectos por los cuales esta investigación ha recibido financiación:

La ejecución de la tesis se ha financiado a través de cuatro proyectos de investigación: dos del Plan Nacional (o Estatal) I+D+i, el denominado “La acústica de las catedrales: una aportación científica para la recuperación del patrimonio cultural” (ref. BIA2010/20523) y el titulado “Acústica y realidad virtual en las catedrales españolas: Innovación estratégica aplicada al patrimonio inmaterial hacia una entidad cultural europea” (ref. BIA2014-56755-P); un tercer proyecto en la convocatoria del MINECO de Infraestructura científica-tecnológica, denominado “Laboratorio de Investigación en Patrimonio Histórico-Artístico” (ref. UNSE13-1E-1715); y un cuarto y último proyecto del Campus de excelencia internacional en Patrimonio, PATRIMONIUN-10, titulado “Recuperación y difusión del patrimonio cultural intangible de las catedrales andaluzas mediante la valoración acústica de su arquitectura efímera” (ref. 2014/731).

Además, se ha concedido una beca/contrato predoctoral a la autora de esta tesis, la denominada de Formación de Profesorado Universitario (FPU), en la convocatoria de 2012 (ref. FPU12/04949), por un periodo de cuatro años, financiada por el Gobierno de España. Gracias a la obtención de esta ayuda, se pudo acceder a dos ayudas de movilidad internacional de tres meses de duración cada una: una estancia de tres meses en el Politecnico di Bari (Italia) (ref. EST13/00261); y una segunda estancia, también de tres meses, en Institute of Sound and Vibration Research (ISVR), University of Southampton (Reino Unido) (ref. EST14/00201).

RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xv
LISTADO DE PUBLICACIONES	xvii
LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS	xix
ABREVIATURAS	xxi

BLOQUE A

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN / INTRODUCTION	3
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS	19
CAPÍTULO 3: RESUMEN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	25
3.1 Sección 1: Arquitectura eclesial, liturgia y acústica: de la domus ecclesiae a la catedral	26
3.1.1 Los primeros tipos eclesiales y su adaptación al incremento del número de fieles y del clero, a la evolución de la liturgia de la palabra y del canto	26
• Domus	26
• Basílicas	26
• Iglesias monásticas	27
• Catedrales	28
3.1.2 La acústica asociada a los primeros tipos eclesiales	30
• Domus	31
• Basílicas	31
• Iglesias monásticas	32
• Catedrales	33
3.2 Sección 2: La decoración efímera en las iglesias cristianas y su influencia acústica	35
3.2.1 Caracterización acústica de los materiales textiles mediante el uso de modelos a escala	36
• Modelos a escala	36
• Medición in situ	38

3.2.2	Influencia acústica de la arquitectura efímera con materiales textiles en iglesias	40
	• Parámetros acústicos de la ISO	40
	• Factores temporales y espaciales	41
3.3	Sección 3: El sonido de las catedrales de Sevilla y Granada	42
3.3.1	La catedral de Sevilla	43
	• Condiciones acústicas iniciales para la audición musical	44
	• Crucero	45
	Condiciones acústicas durante la celebración de conciertos masivos (Mod. M ₁ y M ₂)	46
	Condiciones acústicas de las propuestas de mejora (Mod. M ₃ y M ₄)	47
	• Capilla Mayor	49
	Condiciones acústicas en ocasión de grandes festividades (Modelos M ₅ y M ₆)	50
	• Trascoro	51
	Condiciones acústicas en ceremonias litúrgicas (Modelos M ₇ , M ₈ y M ₉)	53
3.3.2	La catedral de Granada	53
	• Fuente sonora asociada a cada modelo	55
	Condiciones acústicas en los tres modelos (M ₁ , M ₂ y M ₃)	55
	• Fuente sonora igualmente posicionada en los tres modelos	55
	Condiciones acústicas en los tres modelos (M ₁ , M ₂ y M ₃)	56
	• Valoración acústica de distintos motivos musicales	57
3.4	Sección 4: Auralizaciones y reproducciones sonoras	58
3.4.1	Evaluación de la impresión acústica espacial	59
3.4.2	Pruebas subjetivas	59
3.4.3	Análisis estadístico de los resultados	61
	• Localización de la fuente	62
	• Anchura aparente de la fuente (ASW)	62
	• Sensación envolvente del sonido (LEV)	63
	• Sensación de realismo	63
	• Relaciones entre variables objetivas y subjetivas	63
	CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES / CONCLUSIONS	65

BLOQUE B**PUBLICACIONES EN REVISTAS INDEXADAS 81**

- **ARTÍCULO 1:** Acoustics, Liturgy and Architecture in the Early Christian Church. From the domus ecclesiae to the basilica 83
- **ARTÍCULO 2:** Archaeoacoustics of intangible cultural heritage: The sound of the Maior Ecclesia of Cluny 95
- **ARTÍCULO 3:** Intangible cultural heritage: the sound of the Romanesque cathedral of Santiago de Compostela 103
- **ARTÍCULO 4:** Room acoustic modeling of textile materials hung freely in space: from the reverberation chamber to ancient churches 109
- **ARTÍCULO 5:** Acoustic evaluation of the cathedral of Seville as a concert hall and proposals for improving the acoustic quality perceived by listeners 129

BLOQUE C**PUBLICACIONES EN FASE DE REVISIÓN EN REVISTAS INDEXADAS 151**

- **ARTÍCULO 6:** Virtual reconstruction of indoor acoustics in cathedrals: the case of the cathedral of Granada 153
- **ARTÍCULO 7:** Significance of binaural synthesis to evaluate the spatial impression of enclosures 177

BLOQUE D**RESULTADOS PUBLICADOS EN ACTAS DE CONGRESOS 197**

- **COMUNICACIÓN 1:** The effect of festive decorations on church acoustics from a temporal design perspective 199
- **COMUNICACIÓN 2:** La acústica del crucero de la catedral de Sevilla en las grandes celebraciones 209
- **COMUNICACIÓN 3:** Sound space reconstruction in the cathedral of Seville for major feasts celebrated around the main chancel 221
- **COMUNICACIÓN 4:** Acoustic assessment of various spatial configurations in the *trascoro* of the cathedral of Seville 229
- **COMUNICACIÓN 5:** Acoustical influence of different locations of the choir in the cathedral of Granada from a subjective and objective overview 239

BIBLIOGRAFÍA

249

ANEJOS

ANEJO A: OTRAS PUBLICACIONES EN ACTAS DE CONGRESOS

ANEJO B: PARÁMETROS ACÚSTICOS

ANEJO C: RELEVANCIA CIENTÍFICA DE LAS PUBLICACIONES

Desde su origen la iglesia ha sido concebida como lugar de asamblea o de reunión, al mismo tiempo que lugar de desarrollo de la música occidental, tanto coral como instrumental; sin embargo, la consideración de sus condiciones acústicas, en ocasiones, ha quedado relegada a un segundo plano frente a otro tipo de criterios.

En este contexto se enmarca esta tesis doctoral, con la que, de forma general, principalmente se persigue ampliar el valor patrimonial de los espacios de culto desde un enfoque que aborde la recuperación del sonido de dos representantes de la máxima expresión de la arquitectura eclesial en Andalucía: las catedrales de Sevilla y Granada. Esta tarea se abordará a partir del desarrollo de una labor de "Arqueología acústica" que incorpore el análisis espacio-funcional y las principales transformaciones pretéritas, espaciales y de los elementos decorativos, que han alterado tanto la configuración espacial de ambos templos como sus condiciones acústicas. Asimismo, esta tesis incluye el análisis tipológico de la evolución de la arquitectura eclesial desde sus orígenes y su vinculación al desarrollo de la liturgia de la palabra o al desarrollo de la música, estableciendo paralelamente una valoración acústica.

Para la realización de esta tesis se aprovechan las posibilidades de las actuales técnicas de simulación virtual o de modelado a escala, con las que ha sido posible reconstruir los diferentes ambientes acústicos, tanto de las catedrales como de los principales ejemplos de la tipología eclesial a lo largo de la historia. La obtención previa de resultados a partir de campañas de medición realizadas in situ ha permitido la calibración y validación de los modelos catedralicios, con objeto de predecir fielmente el comportamiento acústico en situaciones pasadas o efímeras.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende analizar la calidad acústica desde un enfoque tanto objetivo como de preferencia subjetiva de aquellas organizaciones espaciales estudiadas. Del mismo modo, se investiga la disposición de elementos decorativos en el interior de los templos con objeto de conocer su influencia en el campo sonoro, y se valoran diferentes reproducciones sonoras desde un enfoque estadístico, mediante la realización de ensayos experimentales con oyentes.

La discusión de los resultados obtenidos permitirá valorar subjetivamente la impresión espacial y la sensación de realismo de una auralización, ya sea hablada o musical, según las dimensiones del espacio; analizar el impacto en el entorno acústico eclesial que supone la ubicación espacial del recinto coral y disposición decorativa; evaluar las deficiencias acústicas en función de la configuración interior de estos edificios singulares, lo que posibilitaría la proposición de futuros proyectos de intervención que pudieran ser planteados, con el fin de incrementar el confort acústico, respetando el gran valor patrimonial de las catedrales.

ABSTRACT

Since their origin, churches have been conceived as places of assembly or as meeting places and also as places for development of Western music, both choral and instrumental; nevertheless, the consideration of their acoustic conditions has often been given a backseat in comparison with other criteria.

This PhD dissertation is defined in this context, and, mainly seeks to expand the heritage value of the places of worship from an approach that addresses the recovery of the sound of two emblematic examples of the highest expression of Andalusian ecclesial architecture: the cathedrals of Seville and Granada. This task will be addressed from the development of a study of "acoustic archeology" by incorporating a space-functional analysis and the major bygone, spatial and decorative transformations that have changed both the spatial configuration and the acoustic conditions of these temples. In addition, this thesis includes a typological analysis of the evolution of ecclesial architecture from its origins and its relationship to the development of the liturgy or the development of music, while performing simultaneously an acoustic assessment.

Benefits of current techniques of virtual simulation and scale modelling were used in the development of this thesis, which has made possible to reconstruct the different acoustic environments, both of cathedrals and of major examples of ecclesiastical typology throughout history. Obtaining results from onsite measurement campaigns has enabled the calibration and validation of cathedral models so that the acoustic behaviour in past or ephemeral situations may be accurately predicted.

The development of this work aims to analyse the sound quality, from a focus both of objective and subjective preference, of those space configurations under study. Similarly, the arrangement of decorative elements is investigated inside the temples in order to ascertain their influence on the sound field, and different sound reproductions are assessed from a statistical approach, by conducting experimental tests with listeners.

The discussion of results allow the spatial impression and the sense of realism of an auralisation, either spoken or musical, to be subjectively evaluated according to the dimensions of space: the analysis of the impact on the church acoustic environment in terms of the location of the choir and of the decorative arrangement; and the assessment of the acoustic deficiencies in terms of the interior configuration of these unique buildings, which would allow future intervention projects to be proposed in order to increase the listeners' acoustic comfort, respecting the great heritage value of the cathedrals.

LISTADO DE PUBLICACIONES

ARTICULOS PUBLICADOS EN REVISTAS INTERNACIONALES INDEXADAS EN ISI-JCR

- Suárez, R; Sendra, J.J; **Alonso, A.** Acoustics, Liturgy and Architecture in the Early Christian Church. From the domus ecclesiae to the basilica. *Acta Acustica United with Acustica* 99 (2) (2013) pp.292-301. DOI: 10.3813/AAA.918611.
- **Alonso, A.**; Sendra, J.J; Suárez, R; Zamarreño, T. Acoustic evaluation of the cathedral of Seville as a concert hall and proposals for improving the acoustic quality perceived by listeners. *Journal of Building Performance Simulation* 7 (5) (2014) pp.360-378. DOI: 10.1080/19401493.2013.848937
- **Alonso, A.**; Martellotta, F. Room acoustic modeling of textile materials hung freely in space: from the reverberation chamber to ancient churches. *Journal of Building Performance Simulation* 9 (5). (2016) pp. 469-486. DOI: 10.1080/19401493.2015.1087594.
- Suárez, R.; **Alonso, A.**; Sendra, J.J. Intangible cultural heritage: the sound of the Romanesque cathedral of Santiago de Compostela. *Journal of Cultural Heritage* 16 (2015) pp. 239-243. DOI:10.1016/j.culher.2014.05.008.
- Suárez, R.; **Alonso, A.**; Sendra, J.J. Archaeoacoustics of intangible cultural heritage: The sound of the *Maior Ecclesia* of Cluny. *Journal of Cultural Heritage* 19 (2016) pp. 567-72. DOI: 10.1080/19401493.2015.1087594.

ARTICULOS EN FASE DE REVISIÓN EN REVISTAS INTERNACIONALES INDEXADAS EN ISI- JCR

- **Alonso, A.**; Suárez, R.; Sendra, J.J. Virtual reconstruction of indoor acoustics in cathedrals: the case of the cathedral of Granada. *Building Simulation*. Under review.
- **Alonso, A.**; Murillo, D. M. Significance of binaural synthesis to evaluate the spatial impression of enclosures. *Acta Acustica united with Acustica*. Under review.

COMUNICACIONES PUBLICADAS EN ACTAS DE CONGRESOS

- Álvarez-Morales, L.; **Alonso, A.**; Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. Initial acoustic model to simulate the sound field of the cathedral of Seville. Proceedings of the International Seminar on Virtual Acoustics (2011) pp. 106-113. ISBN:978-84-8363-764-7
- Álvarez-Morales, L.; **Alonso, A.**; Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. Virtual acoustic of the cathedral of Malaga (Spain). Proceedings of Forum Acusticum (2011) pp. 1-6. ISBN:978-84-694-1520-7, (CD-ROM) ISSN: 221-8767.
- **Alonso, A.**; Suárez, R.; Sendra, J.J.; Álvarez, L. La acústica del crucero de la Catedral de Sevilla en las grandes celebraciones. Proceedings of Acustica (XLIII Tecnicacústica) (2012) pp. 1-10. ISBN:978-989-20-3284-9.
- **Alonso, A.**; Sendra, J.J.; Suárez, R.; Álvarez, L. Acoustic assessment of various spatial configurations in the trascoro of the Cathedral of Seville. Proceedings of the 20th International Congress on Sound and Vibration, Volume 3 (2013) pp 2424-2431. ISBN:978-616-551-682-2.
- Álvarez-Morales, L.; Franco, A.; **Alonso, A.**; Girón, S.; Galindo, M.; Zamarreño, T. Modelo acústico virtual de la Catedral Renacentista de Jaén. Proceedings of Tecnicacustica (2013) pp. 1456-1463. ISBN:978-84-87985-23-2. ISSN Digital: 2340-7441.
- **Alonso, A.**, Suárez, R., Sendra, J. J. Sound Space Reconstruction in the Cathedral of Seville for major feasts celebrated around the main chancel. Proceedings of Forum Acusticum (2014) pp. 1-6. ISBN: 987-83-61402-28-2, (CD-ROM) ISSN: 2221-3767.
- **Alonso, A.**; Martellotta, F. The effect of festive decorations on church acoustics from a temporal design perspective. Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration , Volume 7 (2015) pp. 5765-5773. ISBN: 978-88-88942-48-3 , (CD-ROM) ISSN: 2329-3675
- Álvarez-Morales, L.; **Alonso, A.**; Girón, S.; Galindo, M.; Suárez, R.; Sendra, J.J.; Giménez, A. Absorción acústica de materiales textiles en recintos de culto. Actas de Tecnicacústica (2015) pp. 1-8. ISBN: 978-84-87985-26-3 pp. 705-712, ISSN: 2340-7441.
- **Alonso, A.**; Suárez, R.; Sendra, J.J. Acoustical influence of different locations of the choir in the cathedral of Granada from a subjective and objective overview. Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration (2016) pp. 1-8. ISBN: 978-960-99226-2-3, (USB) ISSN: 2329-3675.

LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

LISTADO DE FIGURAS

BLOQUE A

Figura 1. Plantas de las principales tipologías objeto de estudio: domus, basílica, iglesia monástica y catedral románica. Representación de zonas ocupadas por el clero y los fieles.

Figura 2. Tiempo de reverberación obtenido en cada una de las tipologías estudiadas. V=vacío, O=ocupado.

Figura 3. Plantas y secciones de los modelos a escala utilizados: a) cámara reverberante (RC), b) basílica (CH). Representación de las posiciones de fuente (A y B) y receptores (R1-R12). Las líneas rojas discontinuas corresponden a la posición de las muestras de textil en cada modelo.

Figura 4. Equipos comerciales utilizados para la caracterización de textiles. Representación del montaje de SPU (a) y SZ (b)

Figura 5. a-c) Valores medidos y promediados espacialmente de los parámetros acústicos EDT y D50, correspondientes al modelo de referencia y a los modelos con materiales colgados T1 y T4; b-d) Valores medidos en cada receptor de los parámetros acústicos EDT y D50.

Figura 6. Diferencias obtenidas para cada parámetro en el modelo basílica, expresadas en términos JND, para diversas hipótesis de ocupación y posiciones de fuente, cuando los textiles son añadidos.

Figura 7. Plantas en la que se especifican los diferentes espacios generados en su interior: catedral de Sevilla (a), catedral de Granada (b).

Figura 8. Configuraciones espaciales durante conciertos masivos actuales: Modelos M1 (a) y M2 (b).

Figura 9. Mapeados obtenidos para C80 a 1kHz para: a) modelo M0 y b) modelo M4.

Figura 10. a) Representación en planta del modelo propuesto M4, b) colgaduras en pilares, c) disposición de audiencia en crucero, d) representación en sección del modelo propuesto M4.

Figura 11. a) Configuración adoptada en la Canonización Real (M5); b) configuración adoptada en Semana Santa (M6); c) valores del parámetro STI promediados espectralmente.

Figura 12. a) Configuración adoptada en las ceremonias del trascoro; b) liturgia en el trascoro (vista desde S_3); c) vista del trascoro desde la fachada oeste (vista desde S_4)

Figura 13. a) Valores promediados espectralmente y espacialmente del parámetro EDT.

Figura 14. Plantas de la catedral de Granada. a) Periodo 1619-1929; b) Periodo 1929-1992; c) Estado actual, desde 1992, con representación de mobiliario. Posición de fuentes sonoras (S) y puntos receptores (R).

Figura 15. Influencia de las diferentes configuraciones de la catedral en los parámetros ortogonales considerados en el valor escala (S_i) de cada receptor, desde la misma posición de fuente sonora (S_3).

Figura 16. Influencia de la representación de diferentes tipos de música en los parámetros ortogonales considerados en el valor escala (S_i) de cada receptor. Modelo M_3 y posición de fuente sonora S_3 .

Figura 17. Espacios objeto de estudio: (A) Sala de reuniones del ISVR, (B) Hall del Ightham Mote, (C) Catedral de Granada.

Figura 18. a) Interfaz gráfica creada en el software MAX MSP para que el oyente diera sus respuestas durante el desarrollo del experimento, b) Configuración adoptada para el experimento.

Figura 19. Evaluación dada por los oyentes para ASW en función de las características de la auralización escuchada. El tamaño de las burbujas varía en función del porcentaje de respuestas dadas a ese valor.

Figura 20. Evaluación dada por los oyentes para LEV en función de las características de la auralización escuchada. El tamaño de las burbujas varía en función del porcentaje de respuestas dadas a ese valor.

LISTADO DE TABLAS

BLOQUE A

Tabla 1. Coeficientes de absorción y dispersión de los materiales empleados en los modelos virtuales.

Tabla 2. Características de los materiales textiles seleccionados para el estudio.

Tabla 3. Coeficientes de absorción y dispersión de los materiales empleados en el modelo virtual.

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

a	Coeficiente de absorción	<i>Absorption coefficient</i>
a_d	Coeficiente de dispersión	<i>Scattering coefficient</i>
a_i	Coeficiente para la obtención valor escala de preferencia	<i>Coefficient to obtain the preference scale value</i>
An	Posición fuente sonora	<i>Sound source position</i>
ASW	Ancho aparente de la fuente	<i>Apparent source width</i>
c	Velocidad del sonido (m/s)	<i>Speed of sound (m/s)</i>
C_{80}	Claridad calculada para los primeros 80 ms (dB)	<i>Clarity calculated for the early 80 ms (dB)</i>
C_{80m}	Valor promedio de la Claridad calculada para los primeros 80 ms (dB)	<i>Average value of Clarity calculated for the early 80 ms (dB)</i>
CH	Modelo a escala de iglesia	<i>Scale model of church</i>
Δp	Caída de presión	<i>Pressure drop</i>
Δt_1	Retardo de la primera reflexión (ms)	<i>Delay of first reflection (ms)</i>
$[\Delta t_1]_p$	Valor óptimo del retardo de la primera reflexión (ms)	<i>Optimal value of delay of first reflection (ms)</i>
d	Grosor del material (mm)	<i>Material thickness (mm)</i>
D_{50}	Definición	<i>Definition</i>
D_{50m}	Valor promedio de la Definición	<i>Average value of Definition</i>
EDT	Tiempo de reverberación inicial (s)	<i>Early Decay Time (s)</i>
EDT_m	Valor promedio del tiempo de reverberación inicial (s)	<i>Average value of Early Decay Time (s)</i>
G	Fuerza sonora (dB)	<i>Sound strength (dB)</i>
G_m	Valor promedio de la Fuerza sonora (dB)	<i>Average value of Sound strength (dB)</i>
GA	Acústica geométrica	<i>Geometrical acoustics</i>
H	Altura (m)	<i>Height (m)</i>
IACC	Índice de correlación cruzada interaural	<i>Interaural cross correlation index</i>
i_j	Índice parcial	<i>Partial index</i>
θ	Ángulo de incidencia del sonido	<i>Angle of incidence of sound</i>
J_{LF}	Fracción de energía lateral precoz	<i>Early lateral energy fraction</i>
J_{LFm}	Valor promedio de la Fracción de energía lateral precoz	<i>Average value of Early lateral energy fraction</i>

JND	Umbral de percepción subjetiva	<i>Just Noticeable Difference</i>
λ	Longitud de onda (m)	<i>Wavelength (m)</i>
L	Longitud (m)	<i>Length (m)</i>
L_{eq}	Nivel de ruido continuo equivalente (dB)	<i>Equivalent continuous noise level (dB)</i>
LEV	Envolvente del oyente (dB)	<i>Listener Envelopment</i>
L_J	Nivel sonoro lateral tardío (dB)	<i>Late lateral sound level (dB)</i>
L_{Jm}	Valor promedio del Nivel sonoro lateral tardío (dB)	<i>Average value of Late lateral sound level (dB)</i>
LL	Nivel relativo de presión Sonora (dB)	<i>Listening level (dB)</i>
LL_p	Valor óptimo del Nivel relativo de presión Sonora (dB)	<i>Optimal value of Listening level (dB)</i>
m	Masa superficial (g/m^2)	<i>Surface mass (g/m^2)</i>
Mo	Modelo inicial de la catedral de Sevilla	<i>Initial model of cathedral of Seville</i>
M1-9	Modelos de las diferentes configuraciones adoptadas en la catedral de Sevilla	<i>Models of different configurations adopted in the cathedral of Seville</i>
p	Densidad (g/dm^3)	<i>Density (g/dm^3)</i>
$p(t)$	presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva	<i>Instantaneous sound pressure of the impulse response (Pa)</i>
$pL(t)$	presión acústica instantánea impulsiva del espacio	<i>Instantaneous sound pressure of the lateral impulse response (Pa)</i>
ρ	Probabilidad residual	<i>Residual probability</i>
R	Pérdida de transmisión	<i>Transmission loss</i>
Rn	Posición del receptor	<i>Receiver position</i>
RASTI	Índice Rápido de transmisión del habla	<i>Rapid Speech Transmission Index</i>
RC	Modelo a escala de la cámara reverberante	<i>Scale model of reverberant chamber</i>
RH	Humedad relativa	<i>Relative humidity</i>
RIR	Respuesta al impulso del recinto	<i>Room Impulse Response</i>
σ	Resistividad del flujo ($Pa*s/m$)	<i>Flow resistivity ($Pa*s/m$)</i>
σ_s	Resistencia del flujo ($Pa*s/m$)	<i>Flow resistance ($Pa*s/m$)</i>
S	Superficie (m^2)	<i>Surface (m^2)</i>
Sn	Posición de la fuente sonora	<i>Sound source position</i>
S_i	Valor escala de preferencia	<i>Preference scale value</i>
SNR	Relación señal ruido (dB)	<i>Signal to noise ratio (dB)</i>
STI	Índice de transmisión del habla	<i>Speech Transmission Index</i>

STI_{avg}	Valor promedio del Índice de transmisión del habla	<i>Average value of Speech Transmission Index</i>
τ	Coefficiente de transmisión	<i>Transmission coefficient</i>
T	Temperatura (°C)	<i>Temperature (°C)</i>
T_{30}	Tiempo de reverberación basado en un rango de evaluación de 30 dB (s)	<i>Reverberation time based on a 30 dB evaluation range (s)</i>
T_{30}	Valor promedio del Tiempo de reverberación	<i>Average value of Reverberation time</i>
T_{20C}	Tiempo de reverberación calculado basado en un rango de evaluación de 20 dB (s)	<i>Calculated reverberation time based on a 20 dB evaluation range (s)</i>
T_{20M}	Tiempo de reverberación medido basado en un rango de evaluación de 20 dB (s)	<i>Measured reverberation time based on a 20 dB evaluation range (s)</i>
T_5	Tiempo central (ms)	<i>Centre time (ms)</i>
T_{5m}	Valor promedio del Tiempo central (ms)	<i>Average value of Centre time (ms)</i>
T_{sub}	Tiempo de reverberación de la señal tras las primeras reflexiones (s)	<i>Subsequent reverberation time (s)</i>
$[T_{sub}]_p$	Valor óptimo del Tiempo de reverberación de la señal tras las primeras reflexiones (s)	<i>Optimal value of Subsequent reverberation time (s)</i>
V	Volumen (m ³)	<i>Volume (m³)</i>
v	Velocidad del flujo (m/s)	<i>Flow velocity (m/s)</i>
W	Anchura	<i>Width (m)</i>
x_i	Coefficiente para la obtención valor escala de preferencia según el parámetro ortogonal	<i>Coefficient to obtain the preference scale value according to the orthogonal parameter</i>
Z	Impedancia (ohm)	<i>Impedance (ohm)</i>

BLOQUE A

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El acondicionamiento acústico es uno de los requerimientos básicos a conseguir para alcanzar unas adecuadas condiciones de confort ambiental en un espacio habitable. Con este fin, la acústica de salas se ha convertido en una destacada línea de investigación desde su comienzo como disciplina científica desde principios del siglo XX, de la que se ha servido gran parte de la arquitectura civil destinada a dar respuesta a las manifestaciones culturales de la sociedad moderna: teatros, auditorios, salas de concierto, etc. En las últimas décadas, su desarrollo se ha extendido al estudio y valoración del campo sonoro de la arquitectura religiosa que, más allá de sus exigencias acústicas consustanciales a la liturgia que en ella tiene lugar, durante gran parte de la historia de la arquitectura occidental fue el lugar de la música (Navarro y Sendra 1996; Benevolo 1988). Ello ha permitido, además, un mayor conocimiento del patrimonio cultural asociado a esa arquitectura religiosa, al incorporar su sonido como valor inmaterial.

Desde su origen, la iglesia ha sido concebida principalmente como lugar de predicación y de representación musical, tanto coral como instrumental. No obstante, en diversas ocasiones, la consideración de otro tipo de criterios, principalmente formales, ha sido antepuesta, desplazando a un segundo plano sus condiciones acústicas. De hecho, más allá de unos tímidos intentos de órdenes mendicantes y de predicadores en el siglo XIII, con clara intención reformadora, la preocupación por las condiciones acústicas en los espacios de culto no se hizo patente hasta la celebración del Concilio de Trento, en el que se resaltó la importancia de la cualidad acústica, principalmente para la predicación en lengua vulgar, unos de los instrumentos puestos en práctica por la Contrarreforma católica (Ackerman 1972). Fue entonces cuando se hizo patente la dificultad de comprensión de la palabra en las

INTRODUCTION

Acoustic conditioning is one of the basic requirements to achieving suitable environmental conditions of comfort in a living space. For this reason, room acoustics has become a prominent line of research since its inception as a scientific discipline in the early twentieth century, and has been used by much of the civil architecture designed to respond to the cultural manifestations of modern society: theatres, auditoriums, concert halls, etc. In recent decades, its development has been extended to include the study and assessment of the sound field of religious architecture, which was the place of music for much of the history of Western architecture, beyond its inherently acoustic requirements linked to the liturgy (Navarro and Sendra 1996; Benevolo 1988). This has also allowed a greater awareness of cultural heritage associated with religious architecture, by incorporating sound as an intangible value.

Since their origin, churches have been conceived primarily as places of preaching and musical performance, both choral and instrumental. However, on several occasions, the consideration of other criteria, mainly formal, has been given higher priority thereby leaving its acoustic conditions with secondary importance. In fact, beyond timid attempts from mendicant orders and preachers in the 13th century with a clear intention to reform, concerns about the acoustic conditions in places of worship were not made clear until the conclusion of the Council of Trento. In this Council, the importance of sound quality was highlighted, mainly for preaching in the vernacular, as one of the instruments implemented by the Counter Reformation (Ackerman 1972). It was then when the difficulty in understanding speech in churches was recognised, which was mainly due to excessive reverberation, in addition to the problem of the transmitter-receiver distance. However, this was not until 500 years later, in the 2nd Vatican Council, when various measures were taken for the revaluation of preaching and linking the faithful to the liturgical celebration (Svidercoschi 1968).

iglesias, principalmente debido a una excesiva reverberación, además del problema de la distancia emisor-receptor. No obstante, hay que esperar 500 años, con el Concilio Vaticano II, para que de nuevo se produzca una revalorización de la predicación y de la vinculación de los fieles a la celebración litúrgica, adoptando diversas medidas para ello (Svidercoschi 1968).

En todas las culturas la relación con lo divino se materializa de diferentes maneras, siendo el espacio sagrado una de estas formas de relación. En el cristianismo, la máxima expresión de esta relación se da en las catedrales. Estas se encuentran entre las edificaciones más impresionantes y perdurables que ha creado la humanidad. El alto valor histórico y el simbolismo son algunas de las principales características que convierten a estos templos en el más digno y representativo monumento de su ciudad. Dentro de la arquitectura religiosa, las catedrales cobran un protagonismo especial, pues unen su condición de representar lo más valioso del patrimonio cultural en muchas de las ciudades europeas, a la de ser la máxima expresión arquitectónica de la comunidad cristiana.

Con el paso de los años, las catedrales han adquirido un carácter variado y multifuncional, dejando de ser la celebración de la liturgia la única finalidad para la cual se concebían. Estos edificios emblemáticos también se han convertido en sede de eventos de finalidad variada, como suntuosos ceremoniales, fiestas, asambleas, procesiones y conciertos musicales. Esta diversificación de usos se ha plasmado principalmente en dos aspectos que han influido significativamente en el comportamiento acústico de las catedrales: la configuración de su espacio interior y la decoración efímera dispuesta para ocasiones singulares (Goehring 2009; Cutts 1854).

En relación al primero de los aspectos, cabe señalar que la articulación del espacio interior de las catedrales se rige fundamentalmente por la disposición espacial del coro. Desde el punto de vista arquitectónico, el coro tiene un papel de primera magnitud por su forma y ubicación, condicionando el desarrollo litúrgico y llegando a introducir, en ocasiones, transformaciones importantes en la configuración espacial, lo que supone un significativo impacto en la acústica de la catedral (Navascués 1998).

El segundo de los aspectos mencionados está vinculado con el acondicionamiento del templo para la celebración de eventos destacados. El desarrollo de todos ellos ha exigido, en numerosas ocasiones, la incorporación de un tipo de arquitectura efímera, como la introducción de tribunas y colgaduras que revestían las superficies del templo a la vez que acotaban su espacio interior. Estas intervenciones tuvieron lugar principalmente a partir de la segunda mitad del siglo XVI, alcanzando su máximo esplendor en los dos siglos barrocos, XVII y XVIII. Los tapices, los bordados y los velos se disponían sobre las paredes, los retablos o las columnas, mientras que las alfombras y las moquetas se utilizaron en el suelo (Torre Farfán (ed.) 1995). A pesar de que la finalidad era principalmente ornamental, la inclusión de los textiles ha condicionado la acústica de las catedrales, y de los diferentes escenarios que se

In all cultures, the relationship with the divine is embodied in its own way, and forms the sacred space of the relationship. In Christianity, the ultimate expression of this relationship is given in its cathedrals. These stand among the most impressive and enduring buildings that humanity has created. The great historical value and symbolism present two of the main features that make these temples the most dignified and representative monuments of their cities. Within religious architecture, cathedrals play a special role, as they link its status in representing the most valuable cultural heritage in many European cities to the highest architectural expression of the Christian community.

Over the years, cathedrals have acquired a varied and multifunctional character, and the celebration of the liturgy has ceased to be the only purpose for which they were conceived. These iconic buildings have also become a venue for events of varying purpose, such as sumptuous ceremonial feasts, assemblies, processions and musical concerts. This diversification of uses has resulted in the identification of two main aspects that have significantly influenced the acoustic behaviour of cathedrals: the configuration of their interior spaces and the ephemeral decoration arranged for special occasions (Goehring 2009, Cutts 1854).

Regarding the first aspect, it should be noted that the articulation of the interior of the cathedral is primarily governed by the spatial arrangement of the choir stalls. From an architectural point of view, the choir area plays a major role via its shape and location, since it conditions the liturgical development and may even introduce major changes in the spatial configuration, which represents a significant impact on cathedral acoustics (Navascués 1998).

The second of these aspects is linked to the preparation of the temple for the celebration of important events. On numerous occasions, this preparation of all has demanded the incorporation of a kind of ephemeral architecture, such as the introduction of grandstands and draperies lining the surfaces of the temple and delimiting the interior space. These interventions took place mainly from the second half of the 16th century, reaching a peak in the two Baroque centuries: those of the XVII and XVIII. The tapestries, embroideries and veils were arranged on walls, altarpieces and columns, while rugs and carpets were used on the floor (Torre Farfán (ed.) 1995). Although the result was primarily ornamental, the inclusion of textiles conditioned the acoustics of cathedrals, and the various scenarios that have been built thanks to events that have taken place within their walls with different acoustic requirements, whether it be for word or for music. In addition, the massive attendance at these celebrations contributes to significantly increase in the sound absorption of these interior scenarios.

Deepening the knowledge of architectural heritage, whether material or immaterial, has led to profuse work in what is referred to as the study of the acoustics of existing worship spaces. Music has always represented a significant aspect to be considered when analysing the acoustics of worship spaces. Each era has its own preferences and every musical genre has its own acoustic characteristics. In fact, throughout history, there are clear examples of

han construido a raíz de eventos que han tenido lugar en su interior con diferentes exigencias acústicas, ya sea para la palabra o para la música. Además, la ocupación, en algunos casos masiva, del público asistente a esas celebraciones contribuye a aumentar significativamente la absorción sonora de esos escenarios interiores.

La profundización en el conocimiento del patrimonio arquitectónico, ya sea material o inmaterial, ha dado lugar a una profusa labor en lo que se refiere al estudio de la acústica de espacios eclesiales existentes. La condición musical siempre ha representado un aspecto significativo a considerar a la hora de analizar la acústica de los espacios eclesiales. Cada época tiene sus propias preferencias y cada género musical sus propias características acústicas. De hecho, a lo largo de la historia, existen claros ejemplos de compositores que escribían su música acomodándola a las condiciones de los lugares donde iba a ser interpretada (García de Paredes 1986, Sendra y Navarro 1996; Keibs and Kuhl 1959). La música, al ser un arte que se desarrolla en el tiempo y no en el espacio, necesita ser recreada continuamente. Es por ello que la lenta parsimonia de ciertos cantos o pasajes musicales encuentran su marco perfecto en la solemne reverberación de las catedrales, las cuales favorecieron el desarrollo y evolución musical: del canto monódico al desarrollo polifónico. El análisis realizado se enfoca principalmente a la calidad musical del espacio interior, dada la amplia variedad de registros musicales representados en la catedral: canto, música instrumental (orquesta y órgano).

Dentro de esta tipología arquitectónica, las catedrales andaluzas no son una excepción, destacando entre los monumentos históricos en esta región. La mayoría de las catedrales andaluzas se erigen tras la Reconquista sobre las trazas de la mezquita Alhama, como sucede en las catedrales de Sevilla y Granada, espacios objeto de estudio en este trabajo (Jiménez 1997, Gila Medina 2005). El interior de ambos templos también se caracteriza por su multifuncionalidad, convirtiéndose en sede de eventos significativos que han transformado en diversas ocasiones su apariencia interior. Valiosos escritos, iconografías y grabados han permitido abordar esta investigación, reproduciendo algunos de los escenarios y configuraciones más característicos y relevantes, desde el origen de su construcción hasta nuestros días (Torre Farfán (ed.) 1995).

Ante la imposibilidad de reproducir e incorporar las configuraciones mencionadas en las condiciones acústicas actuales, se requiere el uso de herramientas de modelado virtual para la reconstrucción acústica de los templos, las cuales se han convertido en una de las técnicas ampliamente utilizadas para evaluar y cuantificar el impacto acústico de todo este tipo de intervenciones y transformaciones. Por tanto, para obtener una estimación fiable del comportamiento acústico original, se requiere el desarrollo de esta interesante combinación entre la investigación histórica y científica, que aporta una nueva forma de conocimiento del patrimonio inmaterial.

composers who wrote their music, accommodating it to the conditions of the places where it was to be interpreted (Garcia de Paredes 1986; Sendra and Navarro 1996; Keibs and Kuhl 1959). Music, an art developed over time and not in space, needs to be recreated continually. That is why the slow rhythm of certain songs or musical pieces tends to find its perfect setting in the solemn reverberation of those cathedrals that favoured musical development and evolution: from monodic singing to polyphonic development. The analysis focuses primarily on the quality of the music of the interior space, given the wide variety of recordings of music performed in the cathedral: singing, and instrumental music (orchestra and organ).

Within this architectural typology, Andalusian cathedrals are no exception, and these stand out among the monuments in this region. Most Andalusian cathedrals were erected after the Reconquest upon the foundations of the Alhama Mosques, such as were the cathedrals of Seville and Granada, which constitute the spaces under study in this work (Jiménez 1997, Gila Medina 2005). The interior spaces of these two temples are also characterized by their multifunctionality, and host significant events that have transformed their appearance several times. Valuable writings, iconography and engravings have helped in tackling this research, through their reproduction of a number of scenarios and of the most distinctive and relevant configurations, from the origin of their construction until today (Torre Farfán (ed.) 2005).

Faced with the inability to reproduce and incorporate these configurations into the current acoustic conditions, our research requires the use of virtual modelling tools for the acoustic reconstruction of the temples, which have become widely used in the evaluation and quantification of the noise impact of all these interventions and transformations. Therefore, to obtain a reliable estimate of the original acoustic behaviour, the development of this interesting combination of historical and scientific research is required, which provides a new form of intangible heritage knowledge.

The development of acoustic measurement campaigns in the cathedral has allowed both their sound field and the properties of existing materials to be characterised, thereby enabling the creation of a solid basis for the development of virtual models in which changes are introduced. Moreover, the use of scale models has become an optional alternative ifor the analysis of those environments or materials whose properties cannot easily be evaluated and reproduced with simulation software based on geometrical acoustics, as is the case of the energy transmission capacity of textiles that are installed to reproduce historical configurations.

Over the past decades, a number of studies have dealt with a similar methodology to that of this kind of research, whose purpose and focus vary widely. However, there is a lack of studies that jointly address acoustics, ecclesial architecture, and music and that are associated with a historical moment. This thesis is framed in this context, in which a tour of the evolution of the church typology from its origin is performed, and the sound of cathedrals is virtually reconstructed, by introducing an innovative space-functional approach that tackles past or

El desarrollo de campañas de medición acústica en los recintos catedralicios ha permitido caracterizar su campo sonoro, así como las propiedades de los materiales existentes, posibilitando la creación de una base sólida para la elaboración de modelos virtuales en los que se introduzcan las transformaciones objeto de estudio. Asimismo, el uso de modelos a escala se ha convertido en una alternativa opcional en la acústica para analizar los entornos o materiales, cuyas propiedades difícilmente puedan ser evaluadas y reproducidas con programas de simulación basados en la acústica geométrica, como es el caso de capacidad de transmisión de energía de los materiales textiles, instalados para reproducir las diferentes configuraciones históricas.

Durante las últimas décadas se han llevado a cabo estudios que han abordado con una metodología similar este tipo de investigaciones, cuya finalidad y enfoque son ampliamente variadas. Sin embargo, existe una carencia de estudios que aborden la acústica, la arquitectura eclesial y la música desde una visión de conjunto, asociadas a un momento histórico. En este contexto se enmarca la presente tesis doctoral, en la cual se realiza un recorrido por la evolución tipológica eclesial desde su origen y se reconstruye virtualmente el sonido de las catedrales, introduciendo un innovador enfoque espacio-funcional que aborde configuraciones espaciales pretéritas o efímeras. Con la realización de esta investigación se aprovechan las posibilidades de las actuales herramientas de predicción virtual o de modelado a escala, además de analizar la calidad acústica desde un enfoque tanto objetivo como de preferencia subjetiva. La evaluación acústica permitirá identificar las deficiencias en este ámbito en función de la organización y articulación en estos templos, posibilitando la proposición de posteriores mejoras de intervención acústica que aumenten la calidad acústica percibida por los asistentes, respetando cuidadosamente los valores patrimoniales.

La tesis doctoral, de acuerdo a la normativa de la Universidad de Sevilla, opta por presentarse por compendio de publicaciones, siguiendo la estructura que esa misma normativa recoge, a saber, una introducción donde se justifique la temática, una definición de los objetivos, un resumen global de los resultados y su discusión, y unas conclusiones. Esto constituye el bloque denominado como A. Al final se presenta el compendio de publicaciones, que se ha estructurado en 3 bloques: el bloque B, publicaciones en revistas; el bloque C con las publicaciones en revisión y el bloque D, con las publicaciones en actas.

Los resultados de investigación ya se han publicado y difundido en cinco artículos publicados en revistas indexadas en Journal Citation Report (JCR) y en cinco comunicaciones presentadas oralmente y publicadas en libros de actas en congresos nacionales e internacionales. Las revistas en las que se ha publicado son: Journal of Building Performance Simulation (2 arts.; cuartil 1), revista oficial de una de las sociedades científicas internacionales más prestigiosas en temas de simulación en edificios (International Building Performance Simulation Association - IBPSA); Journal of Cultural Heritage (2 arts.; cuartil 3), la revista internacional quizás más importante sobre patrimonio cultural; Acta Acustica

ephemeral spatial configurations. With the development of this research, advantage is taken of the possibilities of current virtual prediction and those of or scale modelling, as well as the analysis of the sound quality from an objective and a subjective focus. The acoustic assessment can identify deficiencies in this subject in terms of organization and coordination in these temples, thereby enabling further acoustic improvement proposals that may increase the sound quality perceived by the audience, while carefully respecting heritage values.

This doctoral thesis, in accordance with the regulations of the University of Seville, is presented through a compendium of publications, following the structure that this legislation includes: an introduction that justifies the subject; a definition of the objectives; an overall summary and discussion of the results; and conclusions. This block is referred to as A. The compendium of publications is presented at the end of the document, and it is structured in 3 blocks up: the block B, publications in journals; block C contains publications under review, and block D, with publications in proceedings.

The research results have already been published and disseminated in five articles published in journals indexed in the Journal Citation Report (JCR) and in five conference papers presented orally and published in the proceedings of national and international congresses. The journals of these publications are: Journal of Building Performance Simulation (2 arts.; quartile 1), the official journal of one of the most prestigious international scientific societies in the areas of simulation in buildings (International Building Performance Simulation Association - IBPSA) ; Journal of Cultural Heritage (2 arts.; quartile 3), perhaps the most important international journal on cultural heritage; Acta Acustica united with Acustica (1 art.; quartile 3), which is international reference publication of the European Acoustic Association (EAA). There are also two other articles, currently under review, which were submitted to indexed journals: Acta Acustica united with Acustica (1 art.; quartile 3), one of the major journals that address the subject of acoustics; and Building Simulation (1 art.; quartile 2), a journal that belongs to the prestigious editorial group Springer. The advances of this research were published in two types of conferences: On the one hand, two major international acoustic congresses in the form of the Forum Acusticum, held once every three years, and the International Congress on Sound and Vibration, held annually ; and on the other hand, the most prestigious conference nationwide, the National Congress of Acoustics (Tecniacustica).

In accordance with the four general objectives set out in Chapter 2 of this block A, publications are divided into as many sections:

Section 1: Church Architecture, liturgy and acoustics: from the domus ecclesiae to the cathedral.

These articles delve into the study of the early types of Christian churches of the West: from the domus, the basilica model, the great medieval monastic churches, mainly the French abbey of Cluny, up to the first Romanesque cathedrals, especially the Spanish cathedral of

united with *Acustica* (1 art.; cuartil 3), publicación de referencia internacional de la Sociedad Europea de Acústica. Además hay otros dos artículos más enviados a revistas indexadas en JCR que están actualmente en fase de revisión: *Acta Acustica united with Acustica* (1 art.; cuartil 3), una de las principales revistas que abordan la temática de la acústica aplicada; y *Building Simulation* (1 art.; cuartil 2), revista publicada por el prestigioso grupo editorial Springer. Los congresos en los que se han presentado los avances de la investigación son: por una parte, dos de los principales congresos internacionales de acústica: el Forum Acusticum, de celebración trienal, y el International Congress on Sound and Vibration, celebrado anualmente; por otra parte, el congreso de mayor prestigio a nivel nacional, el Congreso Nacional de Acústica (Tecniacustica).

De acuerdo a los cuatro objetivos generales enunciados en el capítulo 2 de este bloque A, las publicaciones se estructuran en otras tantas secciones:

Sección 1: Arquitectura eclesial, liturgia y acústica: de la domus ecclesiae a la catedral.

Se profundiza en el estudio de los primeros tipos eclesiales cristianos de Occidente: las domus, el modelo basilical, las grandes iglesias monásticas medievales, principalmente la abadía francesa de Cluny, para terminar con las primeras catedrales románicas, especialmente la catedral española de Santiago de Compostela. En todos los casos se hace mención a la liturgia de la palabra que en ellas se desarrolla, y se muestra la idoneidad de esos tipos para unas adecuadas condiciones acústicas, tanto para esa liturgia de la palabra en la que el canto y la recitación están incluidos, como para la música religiosa, principalmente coral, ya que la instrumental apenas se había iniciado en esos primeros tipos eclesiales.

Los contenidos de esta sección se presentan en tres artículos ya publicados, todos ellos en coautoría con los directores de la tesis:

- ARTICULO 1: Suárez, R.; Sendra, J.J.; **Alonso, A.** Acoustics, Liturgy and Architecture in the Early Christian Church. From the domus ecclesiae to the basilica. *Acta Acustica United with Acustica* 99 (2) (2013) pp.292-301. DOI: 10.3813/AAA.918611
- ARTICULO 2: Suárez, R.; **Alonso, A.**; Sendra, J.J. Archaeoacoustics of intangible cultural heritage: The sound of the *Maior Ecclesia* of Cluny. *Journal of Cultural Heritage* 19 (2016) pp. 567-72. DOI: 10.1080/19401493.2015.1087594
- ARTICULO 3: Suárez, R.; **Alonso, A.**; Sendra, J.J. Intangible cultural heritage: the sound of the Romanesque cathedral of Santiago de Compostela. *Journal of Cultural Heritage* 16 (2015) pp. 239-243. DOI:10.1016/j.culher.2014.05.008

Santiago de Compostela. In all cases, the liturgy of the word developed within these churches is mentioned, and the suitability of these types for suitable acoustic conditions is shown, for both the liturgy of the word, in which singing and recitation are included, and for religious music, mostly choral, since instrumental music had barely started in those early church types.

The contents of this section are presented in three published articles, all of which are co-authored with the supervisors of the thesis:

- *ARTICLE 1: Suárez, R; Sendra, J.J; **Alonso, A.** Acoustics, Liturgy and Architecture in the Early Christian Church. From the domus ecclesiae to the basilica. Acta Acustica United with Acustica 99 (2) (2013) pp.292-301.
DOI: 10.3813/AAA.918611*
- *ARTICLE 2: Suárez, R.; **Alonso, A.**; Sendra, J.J. Archaeoacoustics of intangible cultural heritage: The sound of the Maior Ecclesia of Cluny. Journal of Cultural Heritage 19 (2016) pp. 567-72. DOI: 10.1080/19401493.2015.1087594*
- *ARTICLE 3: Suárez, R.; **Alonso, A.**; Sendra, J.J. Intangible cultural heritage: the sound of the Romanesque cathedral of Santiago de Compostela. Journal of Cultural Heritage 16 (2015) pp. 239-243. DOI:10.1016/j.culher.2014.05.008*

Section 2: Ephemeral decoration in Christian churches and its acoustical influence.

The objective of this second section is to assess the acoustical influence of the ephemeral decoration with which churches were usually adorned, principally for major celebrations.

This work was mainly developed during the research stay that took place at the Politecnico di Bari, and was later completed at the University of Seville. This study resulted in two publications, both co-authored with Professor Martellotta, supervisor of the research stay.

- *ARTICLE 4: **Alonso, A.**; Martellotta, F. Room acoustic modeling of textile materials hung freely in space: from the reverberation chamber to ancient churches. Journal of Building Performance Simulation 9 (5) (2016) pp. 469-486.
DOI: 10.1080/19401493.2015.1087594*
- *COMMUNICATION 1: **Alonso, A.**; Martellotta, F. The effect of festive decorations on church acoustics from a temporal design perspective. Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, Volume 7 (2015) pp. 5765-5773.*

Sección 2: La decoración efímera en las iglesias cristianas y su influencia acústica.

Esta segunda sección tiene como objetivo evaluar la influencia acústica que tiene la decoración efímera con la que habitualmente se han adornado las iglesias, principalmente para las grandes celebraciones.

Fue principalmente desarrollada en la estancia que tuvo lugar en el Politecnico di Bari, aunque posteriormente fue completada en la Universidad de Sevilla. Ha dado lugar a dos publicaciones, ambas en coautoría con el profesor Martellotta, tutor de la estancia.

- ARTICULO 4: **Alonso, A.**; Martellotta, F. Room acoustic modeling of textile materials hung freely in space: from the reverberation chamber to ancient churches. *Journal of Building Performance Simulation* 9 (5) (2016) pp. 469-486. DOI: 10.1080/19401493.2015.1087594
- COMUNICACIÓN 1: **Alonso, A.**; Martellotta, F. The effect of festive decorations on church acoustics from a temporal design perspective. *Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration*, Volume 7 (2015) pp. 5765-5773.

Sección 3: El sonido de las catedrales de Sevilla y Granada

Esta tercera sección constituye el núcleo fundamental de esta tesis. Los objetos de estudio son las dos principales catedrales de Andalucía: la catedral de Sevilla y la catedral de Granada. Su construcción comenzó en fechas similares, los primeros años del siglo XVI, siendo la de Sevilla la catedral gótica de mayor superficie de la cristiandad, y la de Granada uno de principales edificios del Renacimiento en España. Más que centrarse en la evaluación acústica en su estado actual, lo que se pretende es desvelar cómo ha sido el sonido de ambas catedrales en el pasado, o puede llegar a ser a través de futuros proyectos de intervención.

Las publicaciones de esta parte son fundamentalmente seis, cuatro sobre la catedral de Sevilla y dos sobre la catedral de Granada, aunque no hay que entenderlas de modo separado puesto que son complementarias, es decir, no reproducen la misma metodología para una y otra catedral, sino que cada una propone métodos de investigación que se aplican a uno u otro caso de estudio, como forma de expresión del avance del trabajo.

Sobre la catedral de Sevilla se ha publicado un artículo en coautoría con los directores de la tesis y con el investigador principal del primero de los proyectos del Plan Nacional I+D+i que han dado soporte financiero a esta investigación, ya ejecutado; además, se han publicado tres comunicaciones a congresos en coautoría con los directores de la tesis, si bien en dos de ellas se añade una cuarta autora, técnica del proyecto de investigación mencionado.

Section 3: The sound of the cathedrals of Seville and Granada

This third section forms the core of the thesis. The objects of study are the two main cathedrals of Andalusia: the Cathedral of Seville and the Cathedral of Granada. Their construction began on similar dates, in the early 16th century. The Gothic cathedral of Seville has the largest area of any Christian temple, and the Cathedral of Granada is one of the main Renaissance buildings in Spain. Rather than focusing on the acoustic evaluation in its current state, the aim is to reveal both cathedrals sounded in the past, and how they may sound through future intervention projects.

There are six publications of this part: four of the Cathedral of Seville, and two on the Cathedral of Granada, although they must not be understood as separate since they are complementary. Publications do not reproduce the same methodology for the two cathedrals; but each publication proposes research methods that apply to one or another case study, as an expression of the progress of work.

One article was published on the Cathedral of Seville, co-authored with the thesis supervisors and with the lead researcher of one of the National R+D+i Projects that have given financial support to this research; three other conference papers were also published and co-authored with the supervisors of the thesis, although a fourth author, another researcher of the aforementioned project, is included in two of them.

- *ARTICLE 5: **Alonso, A.**; Sendra, J.J.; Suárez, R.; Zamarreño, T. Acoustic evaluation of the cathedral of Seville as a concert hall and proposals for improving the acoustic quality perceived by listeners. *Journal of Building Performance Simulation* 7 (5) (2014) pp.360-378. DOI: 10.1080/19401493.2013.848937*
- *COMMUNICATION 2: **Alonso, A.**; Suárez, R.; Sendra, J.J.; Álvarez, L. La acústica del crucero de la Catedral de Sevilla en las grandes celebraciones. *Proceedings of Acustica (XLIII Tecniacústica)* (2012) pp. 1-10*
- *COMMUNICATION 3: **Alonso, A.**, Suárez, R., Sendra, J. J. Sound Space Reconstruction in the Cathedral of Seville for major feasts celebrated around the main chancel. *Proceedings of Forum Acusticum* (2014) pp. 1-6*
- *COMMUNICATION 4: **Alonso, A.**; Sendra, J.J.; Suárez, R.; Álvarez, L. Acoustic assessment of various spatial configurations in the trascoro of the Cathedral of Seville. *Proceedings of the 20th International Congress on Sound and Vibration, Volume 3* (2013) pp 2424-2431*

A total of two publications regarding the Cathedral of Granada are presented: an article recently submitted, which is currently under review, and a conference paper. In both cases the co-authorship corresponds to the author of the thesis and its supervisors.

- ARTICULO 5: **Alonso, A.**; Sendra, J.J.; Suárez, R.; Zamarreño, T. Acoustic evaluation of the cathedral of Seville as a concert hall and proposals for improving the acoustic quality perceived by listeners. *Journal of Building Performance Simulation* 7 (5) (2014) pp.360-378. DOI: 10.1080/19401493.2013.848937
- COMUNICACIÓN 2: **Alonso, A.**; Suárez, R.; Sendra, J.J.; Álvarez, L. La acústica del crucero de la Catedral de Sevilla en las grandes celebraciones. *Proceedings of Acustica (XLIII Tecniacústica)* (2012) pp. 1-10
- COMUNICACIÓN 3: **Alonso, A.**, Suárez, R., Sendra, J. J. Sound Space Reconstruction in the Cathedral of Seville for major feasts celebrated around the main chancel. *Proceedings of Forum Acusticum* (2014) pp. 1-6
- COMUNICACIÓN 4: **Alonso, A.**; Sendra, J.J.; Suárez, R.; Álvarez, L. Acoustic assessment of various spatial configurations in the trascoro of the Cathedral of Seville. *Proceedings of the 20th International Congress on Sound and Vibration*, Volume 3 (2013) pp 2424-2431

Sobre la catedral de Granada se presentan un total de dos publicaciones, un artículo que se ha enviado recientemente y está en fase de revisión, y una comunicación. En ambos casos la coautoría corresponde a la autora de la tesis y a sus directores.

- ARTICULO 6: **Alonso, A.**; Suárez, R.; Sendra, J.J. Virtual reconstruction of indoor acoustics in cathedrals: the case of the cathedral of Granada. *Building Simulation*. Under review.
- COMUNICACIÓN 5: **Alonso, A.**; Suárez, R.; Sendra, J.J. Acoustical influence of different locations of the choir in the cathedral of Granada from a subjective and objective overview. *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration* (2016) pp. 1-8

Sección 4 : Auralizaciones y reproducciones sonoras

De acuerdo a los objetivos de la tesis, hay una cuarta y última sección centrada en la valoración subjetiva de la percepción de los oyentes a través de auralizaciones, abriendo una vía por la que se pretende seguir avanzando en una fase postdoctoral, principalmente vinculada al segundo de los proyectos del Plan Estatal I+D++i centrado en acústica y realidad virtual en las catedrales españolas, actualmente en ejecución.

- *ARTICLE 6: **Alonso, A.**; Suárez, R.; Sendra, J.J. Virtual reconstruction of indoor acoustics in cathedrals: the case of the cathedral of Granada. Building Simulation. Under review.*
- *COMMUNICATION 5: **Alonso, A.**; Suárez, R.; Sendra, J.J. Acoustical influence of different locations of the choir in the cathedral of Granada from a subjective and objective overview. Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration (2016) pp. 1-8*

Section 4 : Auralizations and sound reproductions

In accordance with the objectives of the thesis, there is a fourth and final section, which focuses on the subjective assessment of the perception of listeners through auralizations, thereby opening a route along which it is intended to move forward in a postdoctoral phase, principally linked to the second current National R+D+i Project focused on acoustics and virtual reality in Spanish cathedrals.

This fourth section was mainly developed in the Institute of Sound and Vibration Research (ISVR), at the University of Southampton, completed at the University of Seville. The research results have been presented in an article co-authored by one of the researchers of this British research Institute, and it is currently under review.

- *ARTICLE 7: **Alonso, A.**; Murillo, D. M. Significance of binaural synthesis to evaluate the spatial impression of enclosures. Acta Acustica united with Acustica. Under review.*

In addition to this set of publications, the author of the thesis has also been the coauthor of other related publications regarding other objectives, due to her participation in teams of various research projects. These publications were papers submitted to one international and two national conferences and are included in the documentary Appendix A:

- *COMMUNICATION 6: Álvarez-Morales, L.; **Alonso, A.**; Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. Initial acoustic model to simulate the sound field of the cathedral of Seville. Proceedings of the International Seminar on Virtual Acoustics (2011) pp. 106-113.*
- *COMMUNICATION 7: Álvarez-Morales, L.; Franco, A.; **Alonso, A.**; Girón, S.; Galindo, M.; Zamarreño, T. Modelo acústico virtual de la Catedral Renacentista de Jaén. Proceedings of Tecniacustica (2013) pp. 1456-1463.*
- *COMMUNICATION 8: Álvarez-Morales, L.; **Alonso, A.**; Girón, S.; Galindo, M.; Suárez, R.; Sendra, J.J.; Giménez, A. Absorción acústica de materiales textiles en recintos de culto. Proceedings of Tecniacústica (2015) pp. 1-8.*

Esta cuarta sección ha sido principalmente desarrollada en el Institute of Sound and Vibration Research (ISVR), University of Southampton, aunque ha tenido continuidad posteriormente en la Universidad de Sevilla. Los resultados de la investigación se han presentado en un artículo, en coautoría con uno de los investigadores de este instituto de investigación británico, y que está actualmente en fase de revisión.

- ARTICULO 7: **Alonso, A.**; Murillo, D. M. Significance of binaural synthesis to evaluate the spatial impression of enclosures. *Acta Acustica united with Acustica*. Under review.

Además de este conjunto de publicaciones, la autora de la tesis ha sido coautora de otras publicaciones afines en cuanto a objetivos, dada su pertenencia a los equipos de diversos proyectos de investigación. Dichas publicaciones, tres comunicaciones presentadas a congresos nacionales o internacionales, y que se incluyen en el apéndice documental A, son las siguientes:

- COMUNICACIÓN 6: Álvarez-Morales, L.; **Alonso, A.**; Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. Initial acoustic model to simulate the sound field of the cathedral of Seville. *Proceedings of the International Seminar on Virtual Acoustics* (2011) pp. 106-113.
- COMUNICACIÓN 7: Álvarez-Morales, L.; Franco, A.; **Alonso, A.**; Girón, S.; Galindo, M.; Zamarreño, T. Modelo acústico virtual de la Catedral Renacentista de Jaén. *Proceedings of Tecniacustica* (2013) pp. 1456-1463.
- COMUNICACIÓN 8: Álvarez-Morales, L.; **Alonso, A.**; Girón, S.; Galindo, M.; Suárez, R.; Sendra, J.J.; Giménez, A. Absorción acústica de materiales textiles en recintos de culto. *Proceedings of Tecniacústica* (2015) pp. 1-8.

La ejecución de la tesis se ha financiado a través de cuatro proyectos de investigación: dos del Plan Nacional (o Estatal) I+D+i, el denominado "La acústica de las catedrales: una aportación científica para la recuperación del patrimonio cultural" (ref. BIA2010/20523), de 01/01/11 a 31/12/2013, del que la autora de este tesis como sus directores formaron parte del equipo de investigación; y el titulado "Acústica y realidad virtual en las catedrales españolas: Innovación estratégica aplicada al patrimonio inmaterial hacia una entidad cultural europea (ref. BIA2014-56755-P)", de 01/01/2015 a 31/12/2017, por tanto, actualmente en desarrollo, del que la autora de la tesis es miembro del equipo de trabajo y los directores miembros del equipo de investigación; un tercer proyecto en la convocatoria del MINECO de Infraestructura científica-tecnológica, denominado "Laboratorio de Investigación en Patrimonio Histórico-Artístico" (ref. UNSE13-1E-1715), de 01/01/2013 a 31/12/2015, del que la

This PhD Dissertation has been financed by four research projects, two of which are projects of the National (or State) Plan R – D – i: the so-called "Acoustics of cathedrals: a scientific contribution for the recovery of cultural heritage" (BIA2010 / 20523), from 01/01/11 to 12/31/2013, for which the author of this thesis and the two thesis supervisors form part of the research team; and other project entitled (Acoustics and virtual reality in Spanish cathedrals: strategic innovation applied to intangible heritage towards European cultural identity" (ref. BIA2014-56755-P) from 01/01/2015 to 12/31/2017, and therefore currently under development, for which the author of the thesis is also a member of the work team, and the thesis supervisors are members of the research team. The third project, funded by the Spanish Ministry of Economy within the call for scientific-technological infrastructure, is called "Research Laboratory of Historical and Artistic Heritage" (ref. UNSE13-1E-1715) of 01/01/2013 to 12/31/2015. The author of the thesis and one of the supervisors are members of the research team. The fourth and final project is from the Campus of International Excellence in Heritage PATRIMONIUN-10, entitled "Recovery and dissemination of intangible cultural heritage of the Andalusian Cathedrals by acoustic assessment of its ephemeral architecture" (ref. 2014/731), from 10/24/2014 to 09/23/2015. One of the thesis supervisors is the lead researcher, and the other supervisor and the author of the thesis constitute members of the research team.

In addition, the author of the thesis obtained a predoctoral grant / contract for a period of four years (from 03/01/2013 to 02/28/2017) in order to be trained as a University Lecturer (FPU) in the call for the year 2012 (ref. FPU12 / 04949.). This FPU grant, funded by the Government of Spain, was linked to the first of two aforementioned research projects of the National R + D + i Plan. This project also enabled access to two international mobility grants of three months each: a research stay at the Politecnico di Bari (Italy), under the supervision of Professor Francesco Martellotta, researcher of international reference in "Worship Acoustics", from 20/04/2014 07/19/2014 (ref. EST13 / 00261.); and a second research stay in the Institute of Sound and Vibration Research (ISVR), University of Southampton (UK), one of the internationally recognised institutes on Acoustics, under the supervision of Professor Filippo M. Fazi, from 09/21/2015 to 12/20/2015 (ref. EST14 / 00201).

autora de la tesis y uno de sus directores son miembros del equipo de investigación; y un cuarto y último proyecto del Campus de excelencia internacional en Patrimonio, PATRIMONIUN-10, titulado "Recuperación y difusión del patrimonio cultural intangible de las catedrales andaluzas mediante la valoración acústica de su arquitectura efímera" (ref. 2014/731), de 24/10/2014 a 23/09/2015, del que uno de los directores es investigador principal y el otro director y la autora de la tesis son miembros del equipo de investigación.

Además, la autora de la tesis ha disfrutado de una beca/contrato predoctoral de Formación de Profesorado Universitario (FPU), en la convocatoria de 2012 (ref. FPU12/04949), por un periodo de cuatro años: de 01/03/2013 a 28/02/2017. Esta beca FPU, financiada por el Gobierno de España, se vinculó al primero de los dos proyectos de investigación del Plan Nacional I+D+i citados. Además, permitió acceder a dos ayudas de movilidad internacional de tres meses de duración cada una: una estancia en el Politecnico di Bari (Italia), bajo la tutela del profesor Francesco Martellotta, investigador de referencia internacional en "Worship Acoustics", de 20/04/2014 a 19/07/2014 (ref. EST13/00261); y una segunda estancia en Institute of Sound and Vibration Research (ISVR), University of Southampton (Reino Unido), uno de los centros internacionales de referencia en Acústica, bajo la tutela del profesor Filippo M. Fazi, de 21/09/2015 a 20/12/2015 (ref. EST14/00201).

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo es profundizar en el conocimiento del sonido del espacio catedralicio, más concretamente, de las catedrales de Sevilla y Granada, que constituyen la muestra de estudio, desde la consideración del sonido como parte del patrimonio cultural europeo, en este caso inmaterial.

En concordancia con este objetivo principal, esta tesis doctoral, más que caracterizar la acústica de las dos mencionadas catedrales en su estado actual, se centra en desvelar cómo sería el sonido percibido en el pasado, desarrollando una labor que algunos autores han denominado como “Arqueología acústica”. La introducción de esta nueva forma de identificación busca conocer cómo pueden llegar a condicionar la acústica del templo las distintas configuraciones espaciales o la presencia de una arquitectura efímera, principalmente con ocasión de magnas ceremonias, religiosas o civiles, festivas o luctuosas, prestando especial atención a la interpretación de la música coral o instrumental. Pero, además, esta tesis también incide en predecir cuáles serían las principales características del sonido percibido en futuros proyectos de intervención que pudieran ser planteados en esas catedrales, con medidas correctoras compatibles con su valor patrimonial, una tarea propia de la Arquitectura.

2.1 **Objetivos generales**

Esta tesis doctoral, pues, trata de acústica de salas, más concretamente de acústica de espacios de culto, ya que la evaluación acústica de las dos catedrales se realiza tanto desde un enfoque objetivo como de preferencia subjetiva; se generan modelos acústicos de las catedrales, modelos que van a ser simulados, tras la calibración y posterior validación de los

mismos a partir de mediciones acústicas realizadas in situ (sección 3); y se hace uso de nuevas herramientas para la evaluación, como las auralizaciones (sección 4).

No obstante, esta tesis también tiene una fuerte componente patrimonial, por lo que se incluye el análisis de la evolución de los tipos eclesiales desde sus orígenes y su vinculación al desarrollo de la liturgia de la palabra o al desarrollo de la música, haciendo al mismo tiempo una valoración acústica (sección 1). Asimismo, esta tesis tiene presente toda esa arquitectura efímera asociada a las grandes ceremonias que en ellas han tenido lugar a lo largo de su historia, y que la han ornamentado. Más allá de que la corrección acústica haya sido, o no, la principal finalidad, lo cierto es que tiene indudables repercusiones acústicas que conviene conocer (sección 2).

La tesis se presenta por compendio de publicaciones agrupadas en las cuatro secciones señaladas, cada una dando respuesta principalmente a los cuatro objetivos generales mencionados, a saber:

- OG1: Estudiar la relación establecida entre arquitectura, música y liturgia, a través de un análisis que aborde la evolución de la tipología eclesial cristiana desde sus inicios, con objeto de realizar una labor de "Arqueología acústica", así como proporcionar un mejor conocimiento del comportamiento acústico de las iglesias cristinas en el pasado.
- OG2: Desarrollar una labor de investigación sobre arquitectura efímera en espacios eclesiales, y efectuar una caracterización acústica de dicha arquitectura, principalmente de materiales textiles, con el fin de poder valorar su influencia acústica cuando con ella se ornamentan las iglesias con ocasión de ceremonias.
- OG3: Mediante la aplicación de técnicas de simulación de modelos acústicos virtuales previamente calibrados, efectuar una evaluación de la influencia acústica debidas a las principales transformaciones espaciales y/o a la inclusión de una arquitectura efímera en las dos catedrales de mayor importancia patrimonial en Andalucía: las catedrales de Sevilla y Granada.
- OG4: Profundizar en el estudio de la valoración acústica subjetiva y de implementación de sistemas audibles o auralizaciones, a través de la elaboración de ensayos perceptivos con oyentes, que podrían ser aplicados a espacios catedralicios.

2.2 Objetivos específicos

Cinco son los objetivos específicos del trabajo desarrollado:

- OE1: Definir los ejemplos más representativos de los principales tipos eclesiales de Occidente, previos a los modelos catedralicios del Gótico y Renacimiento español, para desarrollar un análisis desde el punto de vista acústico.
- OE2: Desarrollar un estudio pormenorizado de las propiedades acústicas de los materiales textiles utilizados en la decoración efímera de iglesias y catedrales durante el desarrollo de singulares eventos, así como valorar el efecto de su inclusión desde un enfoque tanto objetivo como subjetivo.
- OE3: Identificar y analizar los escenarios actuales o del pasado más representativos de la catedral de Sevilla, tanto por una asistencia masiva de público en grandes celebraciones, como por la introducción de una arquitectura efímera. Efectuar una valoración acústica de estos escenarios e identificar deficiencias acústicas de los mismos, para proponer posteriores mejoras de intervención acústica que incrementen el confort acústico de los oyentes respetando cuidadosamente los valores patrimoniales.
- OE4: Investigar las principales reformas e intervenciones llevadas a cabo en la catedral de Granada a partir del traslado de su espacio coral, con objeto de evaluar la influencia acústica de cada una de las configuraciones establecidas, en función de la posición de la fuente y del tipo de música interpretada.
- OE5: Profundizar en la evaluación en términos perceptivos para determinar la importancia de proporcionar información de acuerdo a la escala del espacio y el tipo de estímulo escuchado, mediante la consideración de parámetros tales como la localización, la impresión espacial y el realismo, con el fin de analizar cómo los sujetos se sienten al reproducir un estímulo en un escenario específico.

RESUMEN Y DISCUSIÓN GLOBAL DE RESULTADOS

Tal y como se expone en la introducción, la presente tesis doctoral se presenta por compendio de publicaciones, concretamente cinco artículos en revistas indexadas en JCR y cinco comunicaciones a congresos. Además, otros dos artículos que han sido enviados a revistas indexadas en JCR, y se encuentran en fase de revisión, son igualmente incluidos en este conjunto. Todas las publicaciones se han desarrollado siguiendo una línea de investigación sobre la acústica de los espacios de culto y mayoritariamente están escritos por la autora de la tesis y sus dos directores.

De acuerdo a los cuatro objetivos generales enunciados en el capítulo 2 de este bloque A, las publicaciones se encuentran agrupadas en otras cuatro secciones:

- Sección 1: Arquitectura eclesial, liturgia y acústica: de la domus ecclesiae a la catedral [Artículos 1, 2 y 3].
- Sección 2: La decoración efímera en las iglesias cristianas y su influencia acústica [Artículo 4, Comunicación 1].
- Sección 3: El sonido de las catedrales de Sevilla y Granada [Artículos 5 y 6, Comunicaciones 2, 3, 4].
- Sección 4: Auralizaciones y reproducciones sonoras [Artículo 7, Comunicación 5].

3.1 Sección 1: Arquitectura eclesial, liturgia y acústica: de la *domus ecclesiae* a la catedral [Artículos 1, 2 y 3].

Se estudia la influencia de la evolución de la tipología eclesial y el desarrollo de la liturgia en el comportamiento acústico de los espacios de culto cristianos de Occidente desde su origen. Para ello, se realiza un recorrido por los principales ejemplos de la arquitectura cristiana: las *domus*, el modelo basilical, la abadía francesa de Cluny, para terminar con la catedral románica española de Santiago de Compostela. En todos estos casos se establece un análisis que aborde la relación entre la arquitectura de cada tipo y la articulación del espacio para la celebración litúrgica, mostrando su grado de idoneidad de esos tipos para unas adecuadas condiciones acústicas, tanto para la liturgia de la palabra como para la música religiosa. En ese sentido, se analiza la repercusión de la condición musical en la actividad litúrgica, desde el canto monódico a la introducción de la polifonía.

3.1.1 Los primeros tipos eclesiales y su adaptación al incremento del número de fieles y del clero, a la evolución de la liturgia de la palabra y del canto.

- Domus [Art. 1]

El nacimiento del Cristianismo trajo consigo la necesidad de crear nuevos espacios, a día de hoy inexistentes o transformados, destinados a difundir y promover la predicación de la palabra, cuyas características dimensionales y funcionales fueron adaptadas a los requerimientos del culto (Righetti 1964). Es por ello que las primeras sedes de la comunidad cristiana para la celebración de la liturgia tenían un carácter familiar y privado y eran conocidas como casas de oración o *domus ecclesiae* (Krautheimer 1965; Figura 1). El desarrollo ceremonial por parte del obispo se basaba en lecturas, predicación y oración, todo ello de cara a la congregación, ubicado en la cátedra y rodeado por el clero (Dix 2005).

Con el transcurso del tiempo, la capacidad económica y el tamaño de las congregaciones crecieron, dando lugar a las nuevas casas para el culto, denominadas *domus Dei*, cuya escala aumentó significativamente hasta alcanzar incluso los 5000 m³ (Figura 1). Esta variación dimensional requirió la disposición de columnas como elementos estructurales para cubrir las luces de más de 10 metros. Dichos soportes, a su vez, establecían una nueva articulación del espacio interior, diferenciando las zonas donde se ubicaban el clero y los fieles (Kaehler 1972). En relación a la celebración litúrgica, a la predicación del sermón y la misa se sumó la recitación de los fieles mediante versos cantados (Garbini 2005).

- Basílica [Art. 1]

El incesante incremento de fieles en la comunidad cristiana, tras el edicto de Milán en el año 313 por el que el cristianismo se convirtió en religión oficial del imperio romano, dificultó la adaptación de las *domus* a las necesidades del culto y multiplicó la construcción de edificios

sagrados, dando lugar a las primeras basílicas de tres naves heredadas de la tipología de basílica romana (White 1990).

Nuevamente se produjo un incremento en la escala de los templos, llegando a alcanzar volúmenes de 10000 m³. La organización interna evolucionó gracias a la introducción de un ábside semicircular en la cabecera, cubierto por media cúpula, mientras que en las naves se disponían techos de madera sustentados por cerchas triangulares del mismo material. Una hilera de columnas establecía una diferenciación entre la nave central y las laterales que, en diversas ocasiones, fueron compartimentadas mediante la disposición de cortinajes colgados.

La ubicación de los elementos constructivos y del mobiliario dieron lugar a la creación de distintos espacios litúrgicos y a la existencia de varios focos de celebración: la cátedra en la exedra y el altar en el presbiterio o la nave central (Righetti 1964; Figura 1). También se introdujeron cambios en la celebración del Oficio, siendo sustituida la recitación por el canto solemne, e incrementándose la participación de la congregación en la liturgia. Del mismo modo, la nueva configuración espacial estableció un nuevo foco de celebración que podría considerarse como el origen de los púlpitos: el ambón, ubicado en la nave central y en una posición elevada.

Las nuevas exigencias musicales del rito litúrgico impulsaron la integración del canto durante la misa, alternando la participación de dos grupos ubicados en el ábside y en la nave central (Righetti 1964). Fue entonces cuando surgieron los primeros espacios corales, conocidos como *schola cantorum*, delimitados físicamente con un pretil que diferenciaba la zona de cantores y la de los fieles (Navascués 1998). Estos últimos fueron convirtiéndose en meros espectadores de la ceremonia a medida que se afianzaba la privatización de la liturgia para el clero, dado el crecimiento en número de este colectivo.

La tipología basilical se fue adaptando a las nuevas necesidades de participación masiva, dando lugar a las grandes basílicas patriarcales de cinco naves, iglesias predecesoras de las futuras catedrales. El notable aumento de las dimensiones de estos templos, cuyo volumen alcanza los 75000 m³, estableció una diferenciación más significativa entre el clero y los fieles, reduciendo la participación de estos últimos en la liturgia (Senn 1997). Durante la ceremonia, la palabra y la música se fusionaron dando lugar al canto de los salmos, cuya principal finalidad era la predicación (Abraham 1979).

- Iglesias monásticas [Art. 2]

A partir de los siglos X-XI se produjo la unificación político-religiosa de Occidente, implantándose la reforma de la liturgia y provocando una evolución tipológica de la arquitectura religiosa que finalizaría con las primeras catedrales europeas. Un significativo ejemplo dentro de este grupo es la abadía benedictina de Cluny (Conant 1959), actualmente

un espacio patrimonial intangible y desaparecido, que ha podido ser recuperado gracias a las herramientas de predicción y modelado virtual que permiten la inmersión sensorial (Blake 2002). Este monasterio se convirtió en el más prestigioso de Europa, y fue donde se promovió una renovación de la vida monástica basada en el esplendor ceremonial, el cual se analiza en este trabajo. Este factor supuso la triple ampliación de la iglesia del monasterio, cada una con una escala mayor que la anterior, hasta superar los 100000 m³ en la última reforma del siglo XI (Conant 1968).

Este nuevo modelo eclesial tenía una planta de cruz latina con dos cruceros, una gran bóveda de cañón como cobertura de la nave central, y bóvedas de crucería sobre las laterales. El modelo responde a las necesidades monásticas gracias a la disposición de un altar para la celebración de la ceremonia, y un recinto coral pétreo y cerrado, descendiente de la conocida *schola*, en la nave central frente al mismo (Figura 1). La agrupación de ambos espacios conformaba una iglesia de carácter privado en el interior de otra gran iglesia.

El oficio divino dependía del foco de celebración utilizado: por una parte, se desarrollaba la misa diaria con la fuente sonora situada en el presbiterio (S2), mientras que, por otra, cerca de 500 monjes se ubicaban en el coro (S1) para cantar la oración siguiendo el estilo monódico del canto gregoriano (Edson and Bradford 1984). Con la construcción de esta monumental iglesia el estilo Románico se asentó en Europa, siendo el primer estilo artístico extendido por Occidente gracias a las rutas de peregrinación.

- **Catedrales [Art. 3]**

La reforma litúrgica gregoriana dio lugar a una nueva interpretación del espacio eclesial que daría paso al modelo catedralicio, máximo exponente de la arquitectura religiosa. Además, se impulsa el desarrollo de la música, dando lugar al nacimiento de la polifonía (Navarro y Sendra 1996).

Entre los siglos XI y XIII se llevó a cabo la construcción de la catedral románica de Santiago de Compostela, un excepcional ejemplo de la nueva tipología cuyo volumen se aproxima a los 50000 m³. Este espacio litúrgico multifuncional se destina principalmente a la acogida de los peregrinos y a la liturgia cantada mediante el canto gregoriano modulado. La catedral sigue el modelo de Cluny y el de "iglesias de peregrinación" de origen francés: una planta de cruz latina con tres naves, una central cubierta por una bóveda de cañón y dos laterales con bóvedas de crucería; un presbiterio con girola, a la cual abren las capillas laterales, y un gran coro pétreo para los cantos (Conant 1926; Wunderwald and Ruffer 2008). Este espacio coral, posicionado en mitad de la nave central, es un antecedente de los futuros coros catedralicios dispuestos según el denominado "modo español" (Navascués 1998).

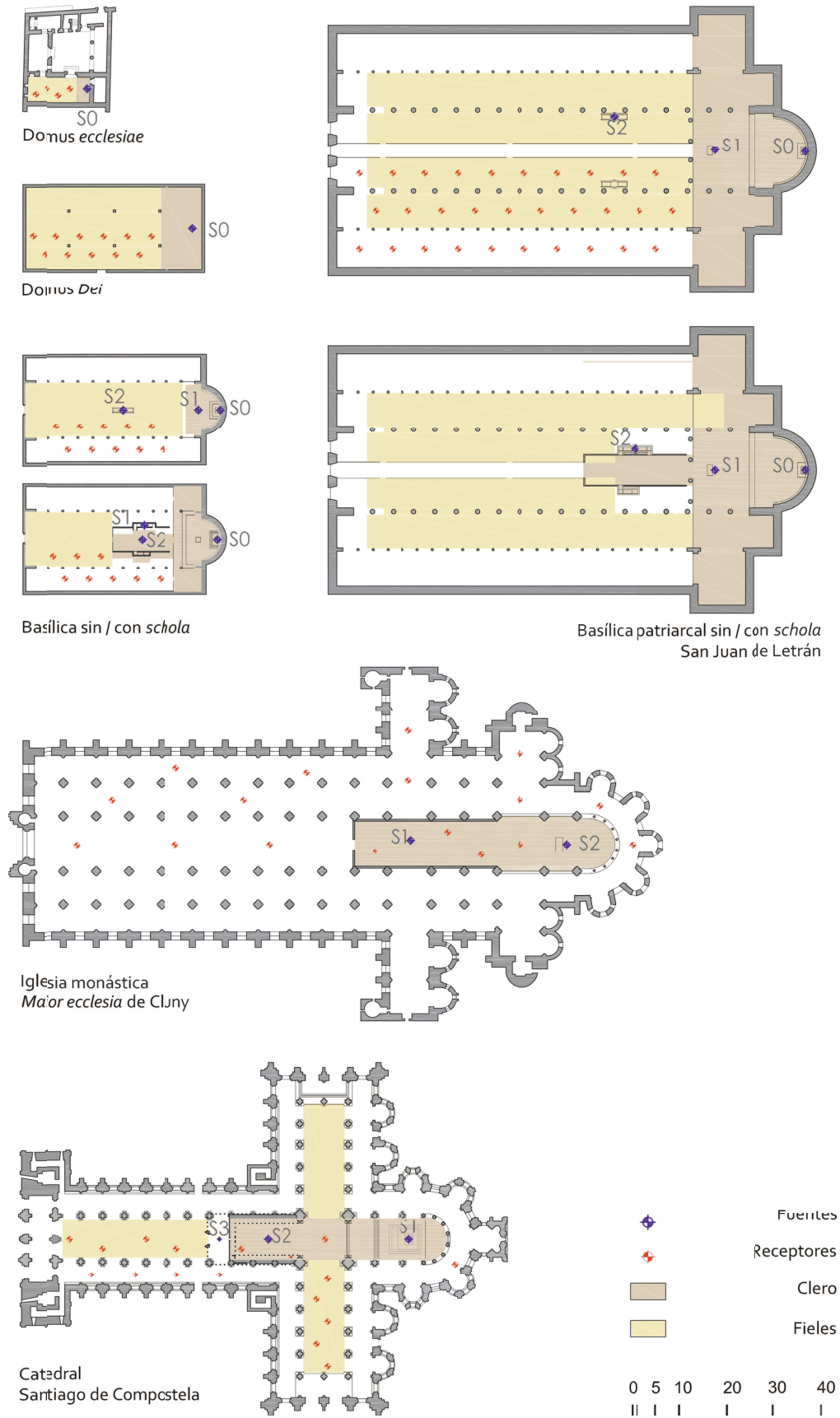


Figura 1. Plantas de las principales tipologías objeto de estudio: domus, basílica, iglesia monástica y catedral románica. Representación de zonas ocupadas por el clero y los fieles.

3.1.2 La acústica asociada a los primeros tipos eclesiales.

Para la valoración de las condiciones acústicas de estos espacios pretéritos, fue requerida la utilización de programas de simulación, capaces de predecir el comportamiento acústico del recinto estudiado mediante la aplicación de métodos de acústica geométrica (Dalénback 2011). El desarrollo de dicha metodología ha exigido caracterizar la geometría y las propiedades de los materiales existentes en el interior del modelo. El espacio interior se ha generado previamente en SketchUp v.08, un programa de modelizado tridimensional, a partir de la correspondiente planimetría, para, posteriormente, exportarlo al software de simulación Catt Acoustic v.09, que incluye el motor de cálculo TUCT V.01. Las propiedades de absorción y dispersión de los acabados interiores (Tabla 1) se han obtenido gracias a la consulta de diversas fuentes bibliográficas (Vörländer 2008; Cox and D'Antonio 2004; PTB Database; Martellotta et al. 2011). El tipo de análisis desarrollado ha sido denominado como "arqueología acústica" (Scarre and Graeme 2006), un nuevo método de evaluación de la calidad acústica de recintos pretéritos con objeto de analizar los espacios de culto desde un enfoque objetivo y perceptivo.

Tabla 1. Coeficientes de absorción y dispersión de los materiales empleados en los modelos virtuales

Modelo	Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Domus y Basílicas	Suelo mármol	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
	Enlucido yeso	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05
	Piedra paredes ^a	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05
	Madera ^a	0.09	0.09	0.08	0.08	0.1	0.07
	Cubierta madera ^b	0.16	0.16	0.13	0.10	0.06	0.05
	Cortinas ^a	0.57	0.56	0.62	0.55	0.55	0.52
	Audiencia ^c	0.47	0.7	0.86	0.9	0.93	0.79
Maior Ecclesia de Cluny	Suelo mármol	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	Piedra (arcos ^a , pilares ^a)	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05
	Yeso (paredes ^a , bóvedas ^a)	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05
	Madera (coro ^b , puertas ^a)	0.09	0.09	0.08	0.08	0.10	0.07
	Vidrieras ^a	0.13	0.12	0.08	0.07	0.06	0.04
	Audiencia ^b bancos madera	0.24	0.40	0.78	0.98	0.96	0.87
	Audiencia ^b area 1.5 person/m ²	0.22	0.38	0.71	0.95	0.99	0.99
Catedral Santiago de Compostela	Granito (suelo ^a , pared ^a , coro ^c)	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
	Yeso (bóvedas) ^a	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05
	Vidrieras ^a	0.13	0.12	0.08	0.07	0.06	0.04
	Madera ^a	0.09	0.09	0.08	0.08	0.10	0.07
	Audiencia ^c area, 1 pers/m ²	0.16	0.29	0.55	0.80	0.92	0.90
	Audiencia ^c area, 0.72 pers/m ²	0.10	0.20	0.41	0.65	0.75	0.71

^a Coeficientes de dispersión 0.12 0.13 0.14 0.15 0.16 0.17

^b Coeficientes de dispersión 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80

^c Coeficientes de dispersión 0.55 0.60 0.65 0.70 0.75 0.80

- Domus [Art. 1]

Las condiciones acústicas de las *domus* debían adaptarse a la predicación. La simplicidad geométrica de ambos espacios (*domus ecclesiae* y *domus Dei*) da lugar a una única posición de fuente sonora: la cátedra (So, Figura 1). Los acabados de ambas tipologías son similares, destacando principalmente el yeso en los paramentos y la madera en la cubierta y el estrado sobre el que se ubicaba la fuente sonora.

Bajo la hipótesis de ocupación, las condiciones acústicas de la *domus Dei* se alejan ligeramente de las más apropiadas para este tipo de actividad, dado el mayor volumen, superior a los 5000 m³, y la disminución de reflexiones tempranas con respecto a la *domus ecclesiae*. En esta última el tiempo de reverberación se aproxima a 1 s, y el valor de definición a 0.60, por lo que presenta una inteligibilidad adecuada para la predicación. En la *domus Dei*, de mayores dimensiones, se produce un incremento del 30% en la reverberación objetiva (T_{30} , Figura 2), mientras que la subjetiva, medida por el parámetro EDT, se duplica hasta alcanzar 2.13 s. Las condiciones de inteligibilidad empeoran, rozando la categoría de “pobre” dentro de la escala de medición del STI. Sin embargo, el ritmo lento de la recitación, adaptado a la reverberación, se utilizaba como mecanismo para mejorar la inteligibilidad del discurso.

- Basílicas [Art. 1]

Para analizar el comportamiento acústico de las primeras basílicas, se ha hecho un estudio de la influencia del ábside en los resultados obtenidos. Tal como era previsible, la ubicación del ábside mejora la acústica del templo, estableciendo diferencias de 1.5 JND en D_{50} . Asimismo, en condiciones de espacio ocupado, se ha evaluado la influencia de los distintos focos de celebración: So en la cátedra, S1 en el altar, centrado en la nave, y S2 en el ambón, en una posición elevada (Figura 1). Se observa una mejoría de las condiciones cuando se predica sobre S1 y S2. La proximidad a los oyentes influye significativamente, especialmente en la nave central y de manera menos destacada en las naves laterales, dando lugar a una inteligibilidad categorizada como “aceptable”.

Para adaptar la oratoria a estas condiciones se recurre a la cantilación, enfatizando la puntuación y modulando la frecuencia hablada. La disposición de cortinajes pesados delimitando la nave central de las laterales incrementó la superficie de absorción acústica, disminuyendo las primeras reflexiones y generando un recinto de carácter más íntimo. Esta intervención, de carácter efímero, supone una disminución de 1 s en T_{30} y una mejora de 3 JNDs en la definición de la palabra.

En el caso de las grandes basílicas patriarcales, la elevada reverberación, próxima a los 3.5 s (Figura 2), dificulta la adecuación de las condiciones a la palabra, por el efecto de enmascaramiento que se producía debido a la lenta caída de la energía sonora. Se opta por el

canto de la palabra con la finalidad de predicar: los salmos. El EDT supera en 1 s los valores de T_{30} . Desde la cátedra (S_0), las condiciones acústicas dificultan la inteligibilidad y definición, debido al aumento de la distancia fuente-receptor y la disminución de las reflexiones tempranas. La introducción del crucero supone la reubicación de la fuente sonora (S_1), anteriormente localizada en el ábside, que se desplaza a la nave central. Este hecho deriva en un deterioro de la definición e inteligibilidad de la palabra. El aumento de absorción sonora por incorporación de cortinajes, o por una asistencia masiva del público, contribuyen a mejorar significativamente las condiciones acústicas, aunque los parámetros no llegan a alcanzar los valores recomendados.

La introducción del nuevo espacio destinado al canto (*schola cantorum*) obliga a establecer una nueva hipótesis de cálculo en la que se consideran varias fuentes simultáneas, que incrementaban los niveles sonoros y reducían el efecto de la reverberación. Dados los propósitos musicales, se incorpora en el estudio el análisis del parámetro C_{80} , cuyos resultados varían en función de la posición del emisor, con valores que oscilan entre -2.7 y -5.82 dB.

Se sustituye el salmo por la solemnidad del canto gregoriano. La lenta y monótona pronunciación, junto con una modulación de la voz que se adapta a la reverberación del templo, incrementaban la sensación de inteligibilidad. Sin embargo, todos estos factores, a los que se añadía la carencia de visibilidad, dificultaban el seguimiento de la liturgia.

- Iglesias monásticas [Art. 2]

La importancia cultural de la vida monástica, así como el incremento en el número de los componentes de la comunidad cristiana, son algunos de los aspectos que condicionan significativamente la naturaleza de la arquitectura eclesial, cuya nueva escala y configuración interior dificulta notablemente unas condiciones acústicas apropiadas. En el caso de la iglesia monástica de Cluny, la disposición de materiales pétreos muy reflectantes, unido al enorme volumen, son las principales causas que generan una elevada reverberación: T_{30} de 10,5 s. con ocupación (Figura 2). Según sea la posición de la fuente, se observa una significativa variabilidad de los resultados obtenidos para el EDT, aproximándose a los 9 s. en el recinto coral, donde las reflexiones tempranas son mayores. Los resultados obtenidos en las naves distan entre sí hasta 4 JNDs, con valores que en algunos casos están cercanos a los 12 s. En consecuencia, los cantos debieron resultar incomprensibles, aunque eso dejaría de tener importancia frente a los cambios vocales en tono y entonación del canto, lo que daba lugar a una percepción de carácter sensorial, vinculada con la solemnidad y majestuosidad del entorno eclesial.

En relación al resto de parámetros, con la fuente en el coro (S_1), se obtienen valores pobres de C_{80} , próximos a 0 dB en este mismo recinto y a -9 dB fuera del mismo. La celebración

litúrgica en realidad era para el clero, generando un débil sonido, casi ininteligible, en el resto de la catedral, con valores de T_s superiores a 700 ms. Con la fuente situada en el altar (S_2), comparando los resultados obtenidos en la posición anterior, se observa un deterioro de 5,5 JNDs en los puntos receptores localizados en el espacio destinado al canto, y de más de 10 JNDs en el resto de las naves, por lo que las condiciones acústicas eran muy deficientes.

En el coro el sonido era cercano, lo que facilitaba la distinción de las sílabas. Fuera de esta zona la alta reverberación y la caída de la energía generaba un efecto de enmascaramiento de las voces y un sonido irregular y confuso que dificultaba la definición. Posiblemente, el motivo de este efecto era debido a un efecto de acoplamiento entre el coro y el resto de la iglesia, el cual se producirá ocasionalmente en los tipos catedralicios posteriores. La distribución espacial mediante la representación de mapeados permite apreciar de forma más detallada este efecto.

- **Catedrales [Art. 3]**

Un nuevo paso evolutivo en la tipología eclesial se produjo en España con la construcción de la catedral románica de Santiago de Compostela. El espacio interior se delimita fundamentalmente con paramentos construidos con materiales muy reflectantes, como el granito, lo que originaba una elevada reverberación: en torno a 8 s.

Durante las festividades se producía una ocupación masiva del crucero por el clero, del trancoro y transepto por los fieles, y de las naves por los peregrinos. Además, el *leedoiro*, una zona elevada ubicada en la zona trasera del coro, la más lejana al presbiterio, tenía como propósito hacer partícipe al resto de la congregación de lo acontecido en la zona privada del coro y el altar mayor, una actividad que difícilmente podrían seguir los fieles dadas las carencias de adecuación acústica del trancoro cuando la fuente sonora se establece en el altar (Conant 1959). Cuando la ocupación era masiva el tiempo de reverberación disminuía drásticamente: de 8 s hasta 3.4 s. El templo, más que producir una correcta audición del mensaje de la palabra, difundía y amplificaba el sonido a través del canto que se convierte, gracias a la reverberación, en el elemento de relación con lo divino.

Se han obtenido los valores del resto de parámetros para cada una de las tres fuentes consideradas: S_1 en el altar, S_2 en el coro y S_3 en la tribuna elevada del *leedoiro*. El EDT varía considerablemente en función de qué posición de fuente y receptor se considere. Los resultados de este parámetro son adecuados para el canto cuando la emisión es desde el coro (S_2) y el oyente se ubica en zonas cuya distancia a la fuente es menor de 30 m. y con visibilidad directa. Cuando la fuente se sitúa en S_3 , la zona del trancoro y naves laterales contiguas son aquellas donde se obtienen los valores de EDT más bajos: alrededor de 2.5 s.

Los valores de los parámetros C_{80} y D_{50} dependen igualmente de la posición de fuente y receptores. Para S_1 , en el altar, la ausencia de sonido directo en un gran número de zonas, así

como la carencia de reflexiones tempranas, determinan las pobres condiciones acústicas, con valores de C_{80} menores a -5 dB y D_{50} menores a 0,3. Sin embargo, no primaba el contenido del discurso tanto como las variaciones de entonación. Para S_2 , en el coro, las condiciones acústicas eran muy diferentes en el propio recinto coral, dados los efectos de amplificación conseguidos por la multiplicidad de fuentes y la emisión desde un recinto delimitado por muros pétreos. Si bien se obtienen resultados adecuados de estos parámetros en el interior del mismo, la definición y claridad disminuyen sensiblemente en el resto de zonas. Cuando se emitía el sonido desde S_3 , en la posición elevada del *leedoiro*, las lecturas y sermones se realizaban mediante el mecanismo de la cantilación, con un ritmo lento, lo que favorecía la mejora de la inteligibilidad en las zonas del trascoro.

En resumen, las pobres condiciones acústicas derivan en la necesidad de buscar una nueva actividad para la predicación, la cual se adapte a la prolongada reverberación de los espacios de culto. Por este motivo, se opta por la elección del canto sagrado durante el desarrollo litúrgico.

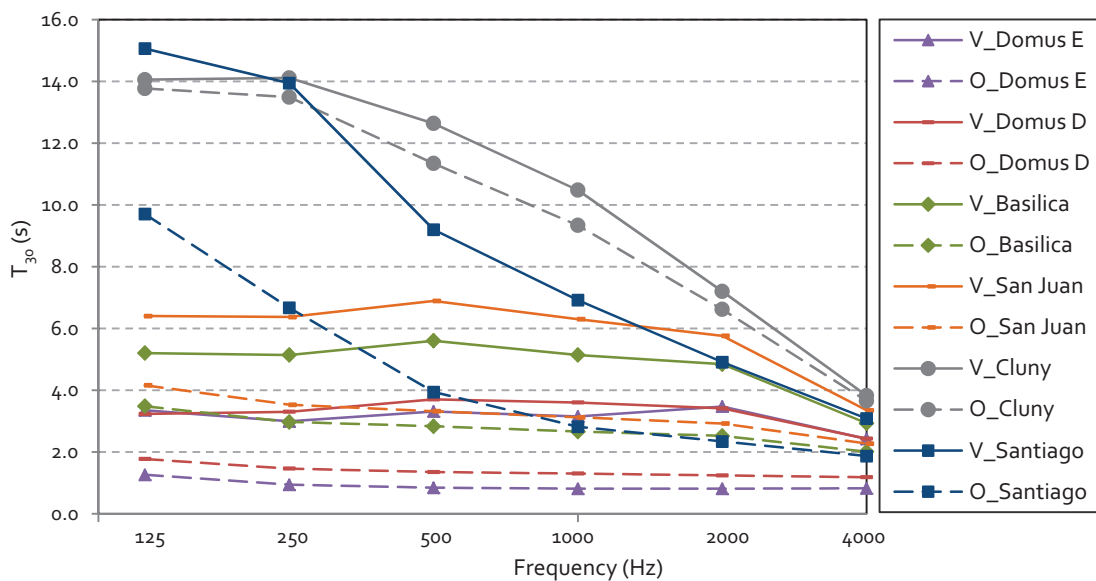


Figura 2. Tiempo de reverberación obtenido en cada una de las tipologías estudiadas. V=vacío, O=ocupado.

3.2 Sección 2: La decoración efímera en las iglesias cristianas y su influencia acústica [Artículo 4, Comunicación 1].

En esta segunda sección se investiga la disposición de elementos decorativos en el interior de los templos, con objeto de conocer sus características y propiedades acústicas, así como la influencia que puede llegar a generar su variada disposición en el sonido de iglesias y catedrales. Principalmente, se realiza un estudio pormenorizado de materiales textiles, atendiendo a las configuraciones más significativas adoptadas en el interior de las iglesias, entre las que destaca la disposición de textiles colgados libremente entre dos espacios, ya sea entre la nave central y la lateral, o en la embocadura de las capillas laterales.

Estos espacios, y especialmente las catedrales, se convirtieron a lo largo de la historia en lugar de celebración de ceremonias singulares, festividades, procesiones y eventos de finalidad variada, tanto de carácter religioso como civil, dejando de ser la liturgia la única finalidad para la cual se concebían (Wardropper 1967). La preparación del recinto eclesial para estas singulares ocasiones suponía una transformación del espacio mediante la incorporación de una arquitectura efímera, principalmente realizada con materiales textiles con diferentes tipos de tratamientos y disposiciones (Goehring 2009; Cutts 1854). Tapices, paños y colgaduras frecuentemente se disponían en arcos y capillas, con objeto de segregar estos espacios del espacio principal, o sobre columnas y paredes. Muchos de estos textiles eran pintados y enmarcados, a modo de lienzos, con temas de carácter religioso. Toda esta información ha llegado hasta nuestros días gracias a la conservación de valiosos escritos, dibujos y grabados, que intentan transmitir la solemnidad que se alcanzaba en la catedral en esas celebraciones (Weigert 2004).

Existe constancia en algunos casos de que la finalidad de adornar los interiores de las iglesias no fue únicamente decorativa y de transformación de la imagen interior del templo, sino también de mejora de las peculiares condiciones acústicas existentes en el interior de estos espacios reverberantes (Schnoebelen 1969).

Existen diversas fuentes bibliográficas y bases de datos que definen los coeficientes de absorción de materiales textiles próximos a paramentos (Cox and D'Antonio 2004, Kuttruff 2009). No obstante, dichas referencias resultan insuficientemente explícitas para conocer su comportamiento acústico debido a las diferentes variables que intervienen: material, densidad, disposición (colgada, lisa o drapeada), porcentaje de superficie drapeada y distancia del material textil a la pared (Martellotta and Castiglione 2011).

Por ello, mediante el desarrollo de mediciones acústicas realizadas en modelos a escala, se analiza la capacidad de absorción y transmisión del material textil atendiendo a estas variables, y su aplicación en las herramientas de simulación acústica.

3.2.1 Caracterización acústica de los materiales textiles [Art. 4, Com.8].

- Modelos a escala [Art. 4]

El uso de modelos a escala reducida es uno de los métodos para caracterizar las propiedades acústicas de materiales textiles. Permite trabajar en el laboratorio, sin necesidad de disponer de grandes cantidades de materiales en espacios reales (Chiles 2004; Summers et al. 2005; Astolfi et al. 2000).

La principal consideración a tener en cuenta cuando se trabaja con modelos a escala reducida es que las ondas sonoras se propagan de la misma forma que en un espacio de tamaño real, pero son N-veces más pequeñas y la frecuencia utilizada en la medición es N-veces mayor, siendo N la reducción de la escala (Farnetani et al. 2008; Ryu and Jeon 2008). Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado el modelo de una cámara reverberante y el de una iglesia de planta basilical, ambos a escala 1:20.

Se procede a la selección de una serie de tejidos finos y escasamente resistivos, con el fin de poder asemejarlos a los valores de referencia de materiales a escala real. Cuatro son los materiales seleccionados para el estudio, siendo todos ellos evaluados en dos configuraciones principales: apoyados sobre el suelo del modelo (a) y colgados en mitad de la cámara reverberante (b). Sus propiedades de absorción (α) y transmisión (τ_m) son caracterizadas mediante medición in situ, siendo la primera de ellas directamente proporcional al aumento de la frecuencia, y la segunda inversamente proporcional a la variación de frecuencia. El resumen de los valores obtenidos, en un rango de frecuencia entre 100-1250 Hz, es el mostrado en la tabla 2.

Tabla 2. Características de los materiales textiles seleccionados para el estudio

Material	Densidad m (g/m ²)	Resistencia de flujo σ_s (Pa·s/m)	Absorción α (100 Hz-1250Hz)	Transmisión τ_m
S1	20	20	(a) 0.03-0.3 / (b) 0.1-0.37	0.65
S2	150	90	(a) 0.1-0.45 / (b) 0.11-0.4	0.6
S3	250	150	(a) 0.17-0.95 / (b) 0.21-0.68	0.5
S4	300	290-530	(a) 0.08-0.61 / (b) 0.21-0.52	0.35

A la vista de los resultados, puede confirmarse el parecido entre las muestras S1 y S2, así como su similitud al comportamiento real de un tejido ligero. Los adecuados valores de transmisión de S1 justifican el hecho de seleccionar esta muestra para el estudio. En relación a S3 y S4, se observan diferentes características acústicas entre ambas muestras, y se confirma que los coeficientes de absorción y transmisión de S4 tienen una gran concordancia con un textil de lana pesado.

Más allá del estudio previamente realizado, se lleva a cabo un nuevo ensayo para la evaluación de la transmisión en textiles. Se ha colgado el textil en el modelo de la cámara, de manera que obstruya parte de la misma y subdivida el volumen en dos partes diferenciadas. En el caso de cortinas colgadas, está teóricamente comprobado que la contribución más significativa a la absorción se obtiene de la separación que se disponga entre el tejido y la pared (Delany and Bazley 1970; Kuttruff 2009). Asimismo, dado que en este caso el textil no ocupa uno de los límites del recinto, la absorción se multiplicaría por dos, debido a la duplicidad de caras expuestas. Los resultados obtenidos muestran que esta disposición difiere notablemente de aquella en la que el textil se cuelga en una posición intermedia, quedando espacio libre a su alrededor. Se observa que cuando el tejido subdivide totalmente el espacio, los coeficientes de absorción aumentan hasta del orden de un 20%, dada la poca contribución de una de sus caras. Este hecho confirma la importancia de considerar la transmisión (τ_m) en esta disposición a la hora de simular su comportamiento (Ognedal 2005). Es decir, cuando los coeficientes de transmisión son considerados, los coeficientes de absorción no varían en relación a los previamente obtenidos cuando el tejido está libremente colgado; sin embargo, en caso de omitir la inclusión de la transmisión, el coeficiente de absorción requerido en la simulación variaría incluso un 20%.

Las propiedades obtenidas para el tejido colgado en la campaña de medición acústica en el modelo a escala de la cámara reverberante son utilizadas como punto de partida en la geometría virtual generada con el software de simulación acústica. Se puede confirmar la adecuada concordancia de los resultados obtenidos entre la medición y la simulación, mostrando ligeras variaciones a altas frecuencias, así como la necesidad de considerar los correspondientes coeficientes de transmisión cuando la colocación del material textil da lugar a dos subvolúmenes diferenciados.

Con objeto de poder analizar el comportamiento del material en otras condiciones de propagación, así como su influencia acústica, se procede a la inclusión de los textiles seleccionados en el modelo a escala de la iglesia. Las muestras de material se disponen colgadas bajo los arcos que delimitan la nave central de las laterales; a escala real ocuparían una superficie aproximada de 150 m². Al comparar los coeficientes de absorción medidos con los obtenidos tras la calibración del modelo virtual, se observan pequeñas discrepancias a bajas frecuencias. Asimismo, se comprueba que la omisión de los coeficientes de transmisión en el modelo eclesial apenas repercute en los resultados. Esto se justifica por el hecho de que las muestras no cierran por completo un subvolumen, sino que únicamente cubren un porcentaje de la apertura, dejando pasar el sonido (Figura 3).

Para corroborar que el proceso de calibración es adecuado, además de ajustar T_{30} , se comprueba el ajuste del resto de parámetros acústicos (EDT, C_{80} , D_{50} , Ts). Aquellos que tienen una dependencia de la posición fuente-receptor reflejan mayores diferencias en términos JND. Este hecho puede deberse a la disposición elevada de los textiles, lo que

disminuye el impacto de las primeras reflexiones. Cabe señalar que, para obtener un adecuado ajuste del modelo cuando existen textiles colgados, es muy importante aplicar las propiedades acústicas previamente obtenidas para el material objeto de estudio con la misma disposición; de lo contrario, los errores podrían duplicarse a bajas frecuencias, especialmente en aquellos parámetros influidos por la energía tardía (T_{30} , EDT y T_s).

Se puede concluir que los modelos acústicos son capaces de predecir un comportamiento fiable de los materiales textiles libremente colgados, siempre que los datos de entrada que determinen las características de los tejidos, como la capacidad de transmisión de energía, sean previamente determinados según el procedimiento correspondiente, ya sea diferenciando subvolúmenes mediante la ubicación del material, o suspendiendo la muestra sin llegar a generar una separación completa de ambos volúmenes.

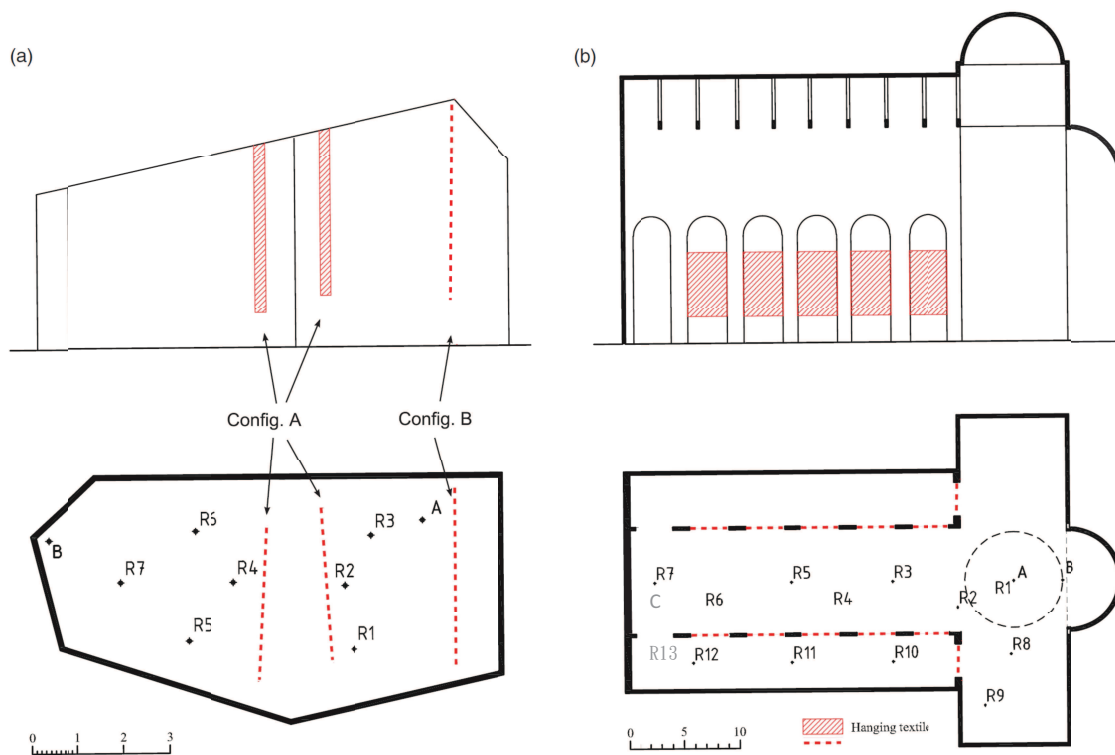


Figura 3. Plantas y secciones de los modelos a escala utilizados: a) cámara reverberante (RC), b) basílica (CH). Representación de las posiciones de fuente (A y B) y receptores (R1-R12). Las líneas rojas discontinuas corresponden a la posición de las muestras de textil en cada modelo.

- **Medición in situ [Com. 8]**

Otra de las opciones para la caracterización de los materiales es la realización de ensayos experimentales en iglesias, basados en diferentes métodos desarrollados por equipos comerciales de medida: la sonda Zircon (SZ), la cual utiliza la técnica de sustracción (SPU), basada principalmente en la sustracción de la respuesta obtenida en campo libre de la obtenida in situ, mediante la cancelación de sonido directo; y la sonda de impedancia, que

permite medir la presión sonora y la velocidad de partículas, donde la señal de referencia también se obtiene en campo libre (Pratico et al. 2014; Haugen 2013). Tras un primer grupo de ensayos, se observa que las condiciones de medición no se adaptan a las recomendadas por el fabricante de la sonda Zircon, por lo que se realiza el estudio únicamente con la sonda de impedancia.

Para la realización de esta campaña de mediciones se han seleccionado tres tipos de muestras de material frecuentemente utilizado como revestimiento en las festividades de las iglesias: terciopelo ligero de 320 g/m^2 , damasco bordado de 227 g/m^2 y un lienzo de algodón. También se han analizado la disposición del material, liso y drapeado, y la distancia del elemento textil al paramento: 6, 10, 15, 25 y 50 cm. A la hora de evaluar las disposiciones lisas de terciopelo y damasco bordado, se confirma que, a medida que aumenta la distancia al paramento, la absorción aumenta hasta alcanzar los 25 cm, donde los resultados se mantienen uniformes. Las variaciones son más significativas a bajas frecuencias, siendo menor su influencia a medias y altas frecuencias. En cuanto al lienzo, se observa el máximo valor de absorción a bajas frecuencias, probablemente debido al efecto resonador generado por la rígida sujeción del mismo con un marco y a la cámara de 5 cm de separación con la pared.

Para la evaluación de la configuración drapeada, surge la necesidad de establecer una malla de puntos de medida, con el propósito de analizar los entrantes y salientes del tejido. La medición y posterior promediado de los resultados manifiesta disparidad en los resultados con respecto al comportamiento teórico esperado, dificultando la caracterización del conjunto del material para este tipo específico de disposición. No obstante, al analizar sin promediar los entrantes y salientes, se observa un claro contraste entre ambos grupos de puntos, hecho justificado por la existencia de reflexiones y las diferentes cámaras de aire. Asimismo, cabe destacar el máximo contraste de resultados cuando la estructura que sustenta la muestra drapeada se dispone a poca distancia de la pared, siendo despreciables dichas variaciones cuando el textil está más alejado, por la carencia de superficie rígida cercana tras el textil.

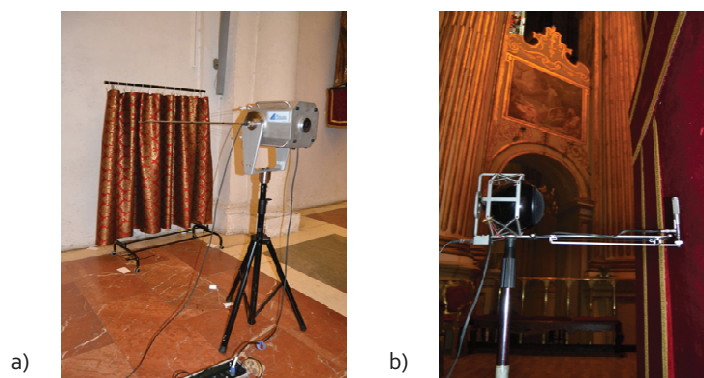


Figura 4. Equipos comerciales utilizados para la caracterización de textiles. Representación del montaje de SPU (a) y SZ (b)

3.2.2 Influencia acústica de la arquitectura efímera con materiales textiles en iglesias [Art. 4, Com. 1].

Se investiga el efecto de las adiciones ornamentales mencionadas en el modelo de la basílica, demostrando la considerable influencia que tienen en la acústica, a pesar de la pequeña relación de superficie del material con respecto a la superficie total del modelo. Se valora el efecto generado tanto en términos de los diferentes parámetros acústicos definidos en la ISO 3382, como desde una perspectiva de carácter temporal y subjetiva, considerando aquellos parámetros detallados por Ando (1998).

- **Parámetros acústicos de la ISO [Art. 4].**

La inclusión de materiales textiles produce variaciones perceptibles en aquellos parámetros de la ISO relacionados con la reverberación, mostrando diferencias que oscilan entre 2 y 4 JNDs. Sin embargo, las diferencias obtenidas para el parámetro C_{80} no son perceptibles (<1 JND). Probablemente, la elevada posición de los textiles tenga poca influencia en la reflexión frente a la importancia del sonido directo y las primeras reflexiones. Se podría obtener una variación mayor en la claridad percibida si se aproximasen los elementos absorbentes a los oyentes. En general, tal como se puede observar en la Figura 5, las variaciones más significativas se aprecian en diferentes bandas de octava. A bajas frecuencias se producen pequeñas variaciones en la mayoría de parámetros, un hecho que puede ser justificado por la baja absorción de los materiales textiles en ese rango de frecuencias.

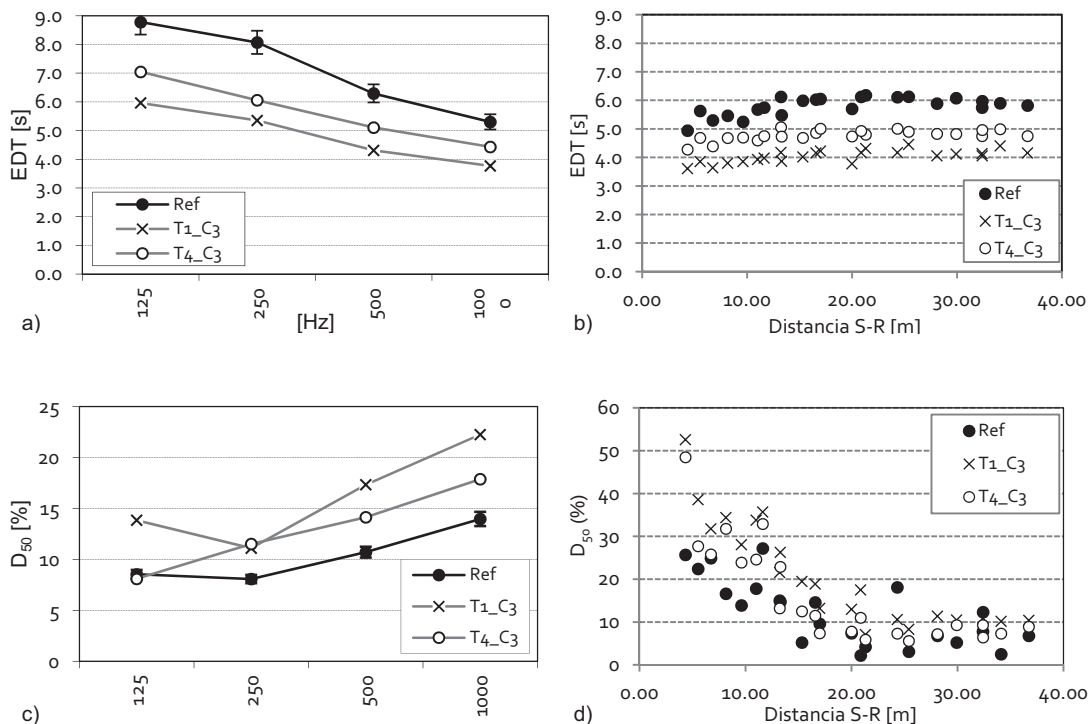


Figure 5. Valores medidos y promediados espacialmente (a-c) y obtenidos en cada receptor (b-d) para EDT y D_{50} , correspondientes al modelo de referencia y a los modelos con muestras (S1 y S4).

- Factores temporales y espaciales [Com. 1].

Los parámetros definidos por Ando (1998) son dos factores temporales: el tiempo de reverberación (T_{sub}) y el retardo de la primera reflexión (Δt_1), y dos espaciales: el nivel sonoro (LL) y el Correlación cruzada inter auricular (IACC).

Se realiza un análisis en función de la posición fuente-receptor, para lo cual es necesario determinar qué tipo de actividad se produce, asociada a cada una de las fuentes sonoras. Las exigencias acústicas del espacio varían en función del uso, ya sea la predicación de la palabra o la representación musical. Por tanto, se elegirá el tipo de representación que concuerde con cada fuente: la predicación en la fuente A, localizada en el altar, el canto en la fuente B, ubicada en el coro del ábside, y la música de órgano, con la fuente situada en la posición C. El sumatorio de los valores de escala (S_i) de cada uno de los cuatro parámetros determinará el impacto negativo generado en cada posición. Asimismo, cada actividad posee una preferencia diferente de tiempo de reverberación que, a su vez, dependerá del retardo de las primeras reflexiones (Martellotta 2008a).

Dadas las condiciones reverberantes de la iglesia, resulta evidente que el mayor impacto negativo de T_{sub} se obtiene con la fuente A, para la predicación, cuya preferencia dista enormemente de los resultados. En cuanto a las primeras reflexiones, la posición C del órgano es la más perjudicada por los elevados valores que requiere, en un espacio donde la primera reflexión raramente supera los 30 ms.

Se ha evaluado el efecto de las colgaduras tanto cuando el espacio está ocupado como desocupado. En la figura 6 se observa que el impacto acústico se percibe en mayor medida cuando el modelo está desocupado, y que las diferencias (en términos JND) son menores en los puntos más cercanos a la fuente. A la vista de los resultados, se podría afirmar que estas incorporaciones ornamentales han condicionado significativamente la acústica de estos reverberantes espacios, en su mayoría de forma positiva.

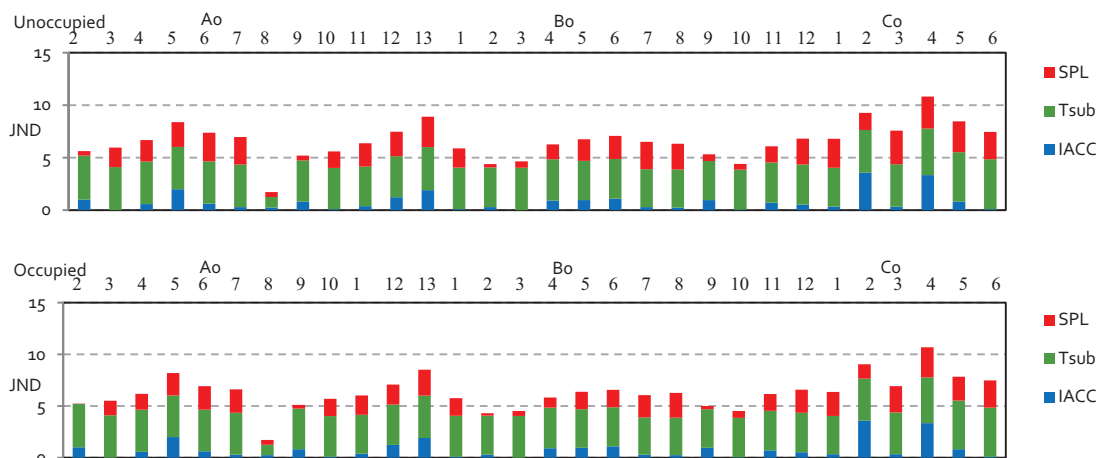


Figura 6. Diferencias obtenidas para cada parámetro en el modelo basílica, expresadas en términos JND, para diversas hipótesis de ocupación y posiciones de fuente, cuando los textiles son añadidos.

3.3 Sección 3: El sonido de las catedrales de Sevilla y Granada [Artículo 5 y 6, Comunicaciones 2, 3, 4 y 5].

Esta tercera parte constituye el núcleo fundamental de esta tesis. Los objetos de estudio son las dos principales catedrales de Andalucía, la catedral de Sevilla y la catedral de Granada. Una diferencia fundamental entre estas dos catedrales es que en la de Granada, a diferencia de la de Sevilla (Fig. 7a), una de las reformas llevó a la supresión del coro del centro de la nave central (Fig. 7b), dejándola libre (Gila Medina 2005), lo que ha dado lugar a una forma de ocupación de los fieles en la liturgia o del público en conciertos totalmente diferente en una y otra. La celebración de ceremonias de asistencia masiva en la catedral de Sevilla requirió buscar nuevas formas de acondicionamiento del espacio para que la mayoría de los asistentes gozaran con unas condiciones de visibilidad (en menor medida, acústicas) adecuadas. Esto no ha sucedido en la catedral de Granada.

Las catedrales son lugares acústicamente complejos debido, entre otros aspectos, al carácter multifuncional que las definen. A consecuencia de ello, durante el desarrollo de una misma ceremonia, pueden llegar a coexistir diferentes acciones con diferentes exigencias acústicas, desde la predicación de la palabra en un sermón hasta la representación musical de un canto o pieza. Por tanto, los requerimientos necesarios para conseguir unas condiciones acústicas adecuadas pueden variar según el tipo de celebración.

Más que centrarse en la evaluación acústica en su estado actual, lo que se pretende en esta parte de la tesis es desvelar cómo ha sido en el pasado, o puede llegar a ser a través de futuros proyectos de intervención, el sonido de ambas catedrales. La incorporación de una arquitectura efímera en el interior de las catedrales durante la conmemoración de festividades las ha convertido frecuentemente en dignos escenario de las mismas, además de producir alteraciones de su acústica.

El análisis del sonido de la catedral de Sevilla se orienta principalmente al estudio de diversas configuraciones generadas en su interior, con motivo del desarrollo de conciertos y singulares ceremonias, así como por la variada disposición de la fuente sonora en el interior del templo, según el carácter y finalidad de la misma.

La investigación realizada sobre el sonido de la catedral de Granada se enfoca al estudio de las reformas llevadas a cabo en su espacio interior a lo largo del tiempo, atendiendo a la variación de la posición del recinto coral y a la influencia de distintos tipos de música en la valoración acústica.

3.3.1 La catedral de Sevilla [Art. 5, Com. 2, Com. 3, Com. 4].

La catedral de Sevilla es el templo gótico de mayores dimensiones, con un volumen aproximado de 200000 m³. Posee cinco naves y un crucero. Su planta rectangular está articulada por dos ejes ortogonales, uno longitudinal en la nave central y otro transversal en el transepto. En su intersección se localiza el cimborrio, una cúpula que alcanza los 40 metros de altura. El coro, localizado en el centro de la nave central, es acorde a la tipología de planta conocida como "modelo español" (Navascués 1998), ya presente en la catedral de Santiago, descrita anteriormente.

La configuración espacial de la catedral de Sevilla posee un carácter multifuncional. En el transcurso de los años, se ha documentado la celebración de eventos significativos que han transformado su apariencia habitual (Guichot y Sierra 1991; González de León 1844). En la actualidad, este templo sigue siendo sede de ceremonias singulares y magnos conciertos musicales.

En primer lugar, se ha llevado a cabo un estudio que analiza las condiciones acústicas de la catedral en su estado actual considerando la hipótesis del espacio desocupado (Mo), estudio que se ha realizado a partir de las mediciones realizadas in situ. Ello ha servido fundamentalmente para calibrar el modelo de simulación y validarlo.

En segundo lugar, dada la multifuncionalidad del espacio catedralicio, y la diversidad de configuraciones existentes, se han analizado diversos focos de celebración y escenarios, cuyas posiciones de fuente sonora se establecen a continuación (Fig. 7a):

- Crucero (Fuente S1): definición de los escenarios adoptados en la actualidad para el desarrollo de conciertos masivos (Miserere de Semana Santa y el Mesías), con una asistencia que alcanza incluso la 2000 personas (Modelos M1 y M2) (Jiménez 1999). A raíz de los resultados observados, se elabora un plan de intervención para conseguir una calidad acústica adecuada para todos sus asistentes, incorporando las medidas correctoras que sean necesarias. Dichas propuestas de intervención han de ser compatibles con el carácter patrimonial de la catedral (Modelos M3 y M4).
- Capilla Mayor (Fuente S2): estudio de las transformaciones espaciales llevadas a cabo siglos atrás en torno a este espacio, durante grandes festividades como la Canonización Real (Modelo M5) y Semana Santa (Modelo M6) (Torre Farfán (ed.) 1995; Santos-Gómez and San Andrés-Moya 2004)
- Trascoro (Fuentes S3 y S4): estudio de celebraciones litúrgicas, tanto ordinarias como de periodicidad anual (Periódico ABC nº19433 1966; Baena Gallé 2002), estableciendo diversas hipótesis de estudio que evalúan la posición de la fuente junto con la variación de ocupación (Modelos M7a, M8a y M9a) y la disposición de arquitectura efímera (Modelos M7b y M8b y M9b).

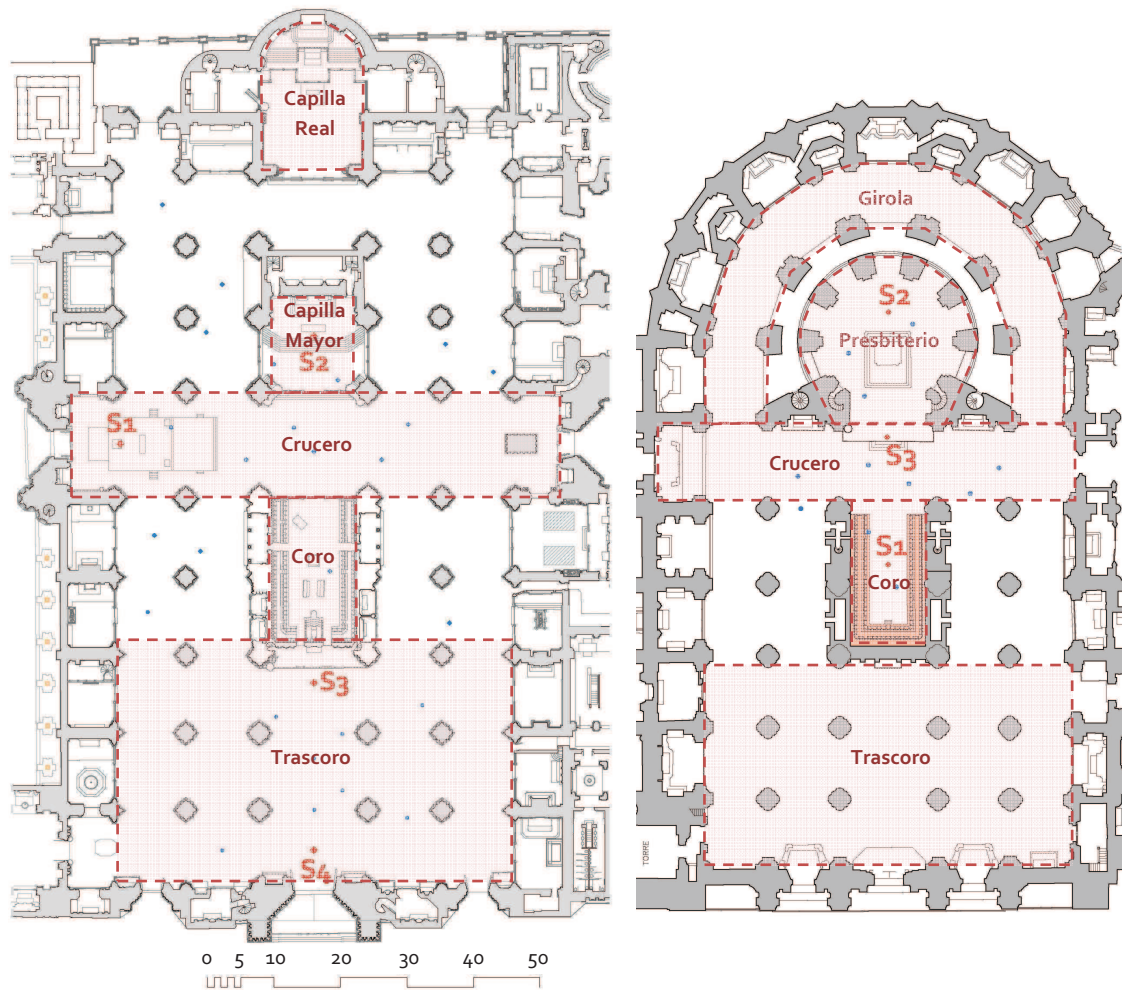


Figure 7. Plantas en la que se especifican los diferentes espacios generados en su interior: catedral de Sevilla (a), catedral de Granada (b).

Table 3. Coeficientes de absorción y dispersión de los materiales empleados en el modelo virtual

Modelo	Surface (%)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Mampostería piedra * ^a	65.1	0.13	0.13	0.13	0.14	0.16	0.16
Suelo mármol ^a	14.5	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Molduras piedra * ^b	5.3	0.13	0.13	0.13	0.14	0.16	0.16
Vidrieras ^a	2.1	0.13	0.12	0.08	0.07	0.06	0.04
Retablos de madera ^c	1.9	0.12	0.12	0.15	0.15	0.18	0.18
Órgano ^c	1.4	0.12	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16
Madera coro ^c	1.1	0.12	0.12	0.15	0.15	0.18	0.18
Sillas plástico ^c	0.4	0.06	0.10	0.10	0.20	0.30	0.20
Bancos madera ^c	0.7	0.10	0.15	0.18	0.20	0.20	0.20
Bancos tapizados ^c	0.2	0.30	0.32	0.27	0.30	0.33	0.33
Asientos madera ocupados ^c	-	0.24	0.40	0.78	0.98	0.96	0.87
Asientos plástico ocupados ^c	-	0.30	0.50	0.80	0.80	0.90	0.80
Bancos madera ocupados ^c	-	0.23	0.37	0.83	0.99	0.98	0.98

* Material usados para validar el modelo

^a a_d 0.12 0.13 0.14 0.15 0.16 0.17 / ^b 0.20 0.25 0.30 0.35 0.40 0.45 / ^c 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80

- Condiciones acústicas iniciales para audición musical (Mod. Mo) [Art. 5].

Dada la singular categoría del espacio estudiado, cabe señalar la dificultad de elección de los valores recomendados para unas condiciones ideales de audición de la música. Principalmente estos valores están orientados a teatros y auditorios. Con motivo de la adaptación de la catedral a una gran "sala" donde se representa música de orquesta, se opta por considerar las sugerencias de valores de parámetros acústicos óptimos para las grandes salas de concierto (Gade 2007).

El desarrollo de medidas experimentales en el interior de la catedral ha permitido la correcta calibración del modelo virtual generado, el cual reproduce las características geométricas en su estado actual. La Tabla 3 muestra la asignación de los diversos coeficientes de absorción y dispersión (a y a_d) obtenidos de fuentes bibliográficas y el ajuste de aquellos de los que no se tenía información. Cuando se evalúa el valor medio en frecuencia de cada parámetro, los resultados obtenidos de la calibración son altamente satisfactorios.

Al estudiar sus valores promediados espacialmente en cada banda de octava, se observa que la aproximación entre los valores medidos y simulados es, en general, bastante aceptable, presentando menores similitudes a bajas frecuencias. Por último, las diferencias entre valores medidos y simulados en cada punto receptor expresadas en términos del JND, para cada banda de octava (Zwicker and Fastl 1990), se encuentran generalmente por debajo de 1 JND y, en casos singulares, bajo el umbral admitido para este espacio, 2- 3 JNDs.

Los resultados obtenidos indican la elevada reverberación de la catedral, tal como cabía esperar, distando 2 segundos de los óptimos considerados. No obstante, se observa que son menores de los habitualmente obtenidos en este tipo de espacios de culto. A ello contribuye, entre otros aspectos, la alta porosidad de la piedra. La baja densidad de reflexiones tempranas en varios de los puntos considerados supone una reducción de 0,5 s de EDT con respecto a T_{30} . La evaluación de la claridad percibida tampoco se ajusta a los valores recomendados. A pesar de que la adecuación de la calidad acústica no resulta tan estricta como en el resto de espacios, y que los oyentes subjetivamente prefieren una mayor reverberación en los espacios de culto, los resultados reflejan las deficientes condiciones acústicas en la hipótesis de espacio desocupado.

- Crucero [Art. 5, Com. 2].

El denominado "modelo español" de catedral, con coro en la nave central (Navascués 1998), condiciona la organización del espacio, exigiendo la búsqueda de nuevas soluciones que permitan alojar un gran número de ocupantes en las celebraciones masivas, ya que la disposición habitual, en la que la fuente sonora se localiza en el altar mayor, genera numerosas zonas de limitada visibilidad. Por ello en la catedral de Sevilla se dispone una nueva configuración a lo largo del eje transversal en el crucero, la cual es adoptada para los conciertos de Semana Santa y el Mesías (Fuente S1; Modelos M1 y M2).

Condiciones acústicas durante la celebración de conciertos masivos (Mod. M1 y M2)

Para la valoración del impacto acústico generado tras adaptar el espacio a las configuraciones de conciertos masivos, representadas en la figura 8, se realiza un análisis comparativo de los valores de los parámetros acústicos de la ISO con respecto al modelo inicial (Mo).

En el caso de T_{30} y EDT, dado el aumento de absorción acústica por parte de la audiencia, los nuevos valores difieren hasta 4 JNDs con respecto a Mo. Se observan valores de C_{80} aceptables hasta una distancia desde la fuente limitada a 30 m en las naves laterales y a 35 m en el crucero, lo que supone un 77% y un 45%, respectivamente, de la totalidad de los oyentes. En el caso de T_s , las diferencias más significativas con respecto al modelo inicial se observan en los puntos más cercanos a la fuente; sin embargo, a partir de 25 metros de distancia, se observa una reducción de la magnitud de esa diferencia. La existencia de columnas de casi 3 metros de anchura incide considerablemente en la existencia de reflexiones laterales tempranas, con una distribución no uniforme.

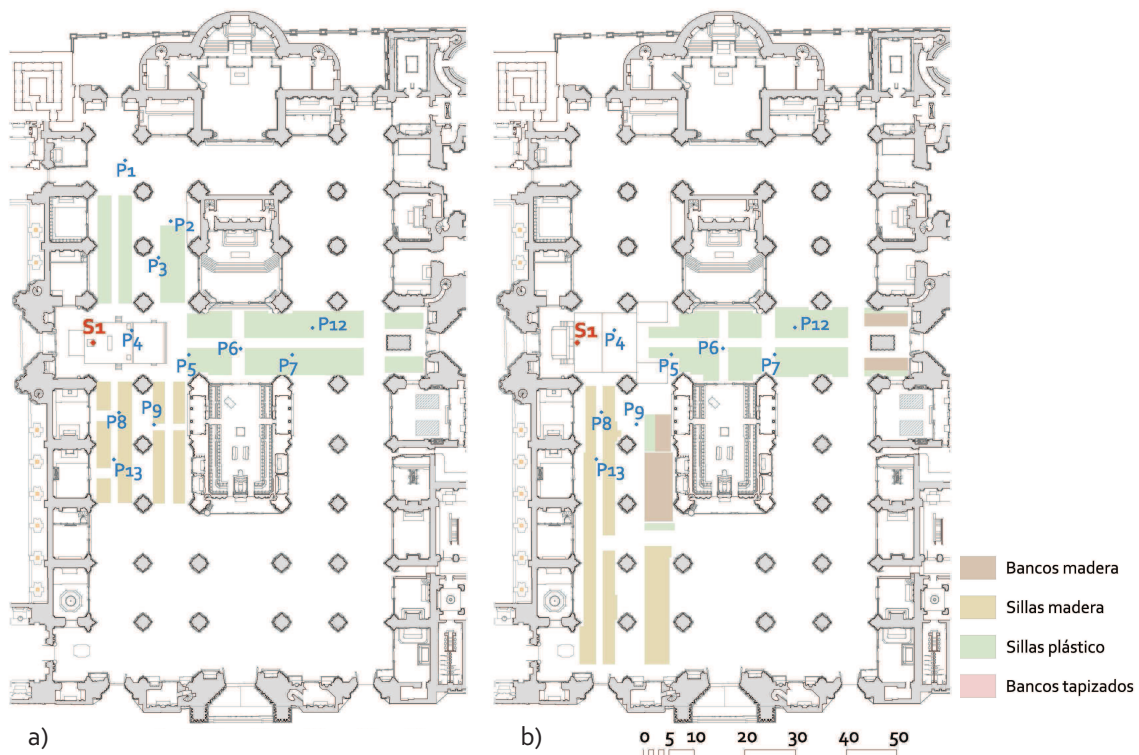


Figura 8. Configuraciones espaciales durante conciertos masivos actuales en la catedral de Sevilla: Modelos M1 (a) y M2 (b).

Tras la valoración de ambas adaptaciones, se puede afirmar su adecuación parcial a las condiciones acústicas. La principal finalidad no reside únicamente en la obtención de valores en los rangos recomendados, sino en garantizar la distribución espacial lo más uniformemente posible.

Condiciones acústicas de las propuestas de mejora (Mod. M₃ y M₄).

Surge, por tanto, la necesidad de proponer intervenciones que tengan por objetivo lograr una acústica adecuada. El valor patrimonial del templo no admite la utilización de medidas correctoras convencionales que reduzcan su valor, por lo que este estudio permite la obtención de interesantes conclusiones sobre la incidencia de otras medidas alternativas, con el objetivo de ser consideradas como posibles intervenciones de mejora.

Esas propuestas de mejora, representadas en la figura 9, se centran en dos aspectos: por una parte, la delimitación de un área ideal de audiencia, con el fin de evaluar el efecto de su presencia (M₃); y, por otra, la incorporación de materiales absorbentes ampliamente utilizados en el pasado en las catedrales (M₄).

En relación a M₃, se establece una ocupación limitada a 1500 personas, con una máxima distancia fuente-receptor de 35 metros en las naves laterales. Unas mejores condiciones en el crucero permiten aumentar esta distancia, no obstante, la visibilidad podría deteriorarse, por lo que se decide elevar la posición de los oyentes mediante la instalación de una grada. Para M₄, se opta por incorporar elementos textiles que cubran un porcentaje de los acabados pétreos, en este caso, de las columnas. Se trata de una intervención desarrollada en otras épocas con motivo de singulares ceremonias con las que se pretendía transmitir suntuosidad al espacio. Con el fin de que la posición de los tejidos de terciopelo no condicione la llegada de reflexiones tempranas, se instalan a 3 metros de la altura del suelo.

Con la adición de M₃ se reduce hasta 1 segundo el parámetro T_{30} , lo que equivaldría a 4 JNDs, mientras que la incorporación de materiales textiles aumentaría la reducción hasta 5 JNDs. Esta drástica disminución del tiempo de reverberación se ajusta en mayor medida a los valores óptimos, sin embargo, siguen siendo superiores. No ocurre lo mismo con la reverberación percibida valorada por EDT, donde se consigue una adecuación de los tiempos. En el caso de C_{80} y T_s , destaca la obtención de mayores variaciones con respecto al valor inicial (M_0) en aquellos puntos localizados en la grada. La superficie de inclinación de esta estructura efímera para acomodar asistentes genera un aumento de las reflexiones tempranas. La figura 10 muestra la distribución del parámetro C_{80} en ambas configuraciones. El análisis de los valores muestra en todo momento unos mejores resultados para M₄ que para M₃, dado el aumento de elementos absorbentes en el primero.

En general, se pueden considerar aceptables las condiciones acústicas, a pesar de que EDT sea ligeramente superior al tiempo óptimo medio. Al analizar toda la superficie de audiencia, la cual se articula con tres grandes agrupaciones de oyentes, dos en las naves laterales y una en el crucero, se puede afirmar que los puntos ubicados en esta última presentan unos resultados mejores, incluso cuando la distancia es mayor, llegando incluso a los 40 metros.

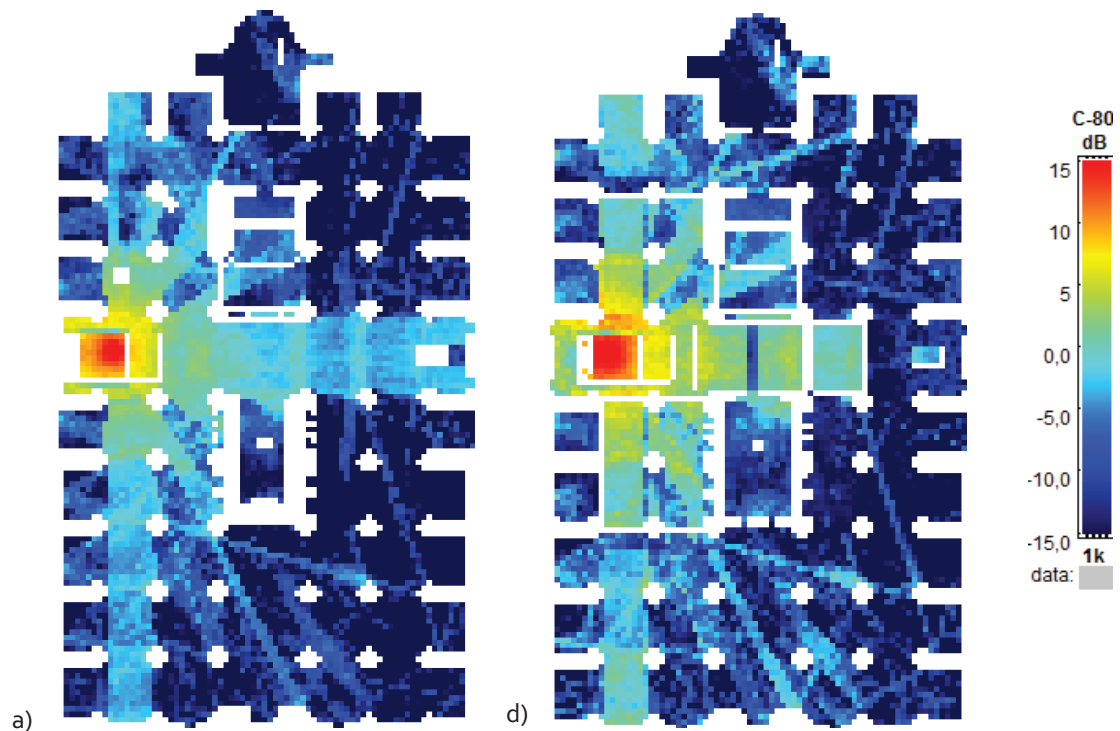


Figura 9. Mapeados obtenidos de la catedral de Sevilla para C_{80} a 1kHz para: Modelo Mo (a) y M4 (b).

En resumen, la incorporación de diversos tipos de arquitectura efímera en lugares estratégicos permite optimizar el comportamiento acústico de la catedral, y adecuar en mayor medida sus condiciones acústicas como sala de conciertos a la totalidad de la audiencia estimada en el plan de intervención planteado.

- **Capilla Mayor [Com. 3].**

Este espacio ubicado en la nave central ocupa dos módulos y se localiza frente al coro (Fig. 7), uno de los recintos que condicionan la organización de todo el conjunto del templo, fragmentando la nave central. El espacio localizado entre capilla mayor y coro es sede principal de construcciones efímeras o lugar para los asistentes a las ceremonias.

Se analizan acústicamente dos eventos históricos del pasado de gran importancia, cuya preparación requería de la disposición de gran cantidad de arquitectura efímera, con la que se creaba un nuevo entorno. Por una parte, la celebración de la Canonización Real (Modelo M5) (Torre Farfán (ed.) 1995), para la que se colocaba cerca de 6000 m² de materiales textiles que cubrían superficies pétreas poco absorbentes y acústicamente reflectantes, además de un suntuoso túmulo construido para la ocasión. El público ocupaba los brazos del crucero.

Por otra parte, los oficios desarrollados en Semana Santa (Modelo M6) (C. Y P., M. d. I., 1850), momento en el que, al igual que en otras iglesias y catedrales, se cubrían los retablos e imágenes religiosas con una tela o paño, o se colocaban cortinas colgadas en la embocadura

de las capillas laterales. Se calcula que cerca de 1000 m² de materiales textiles se llegaron a disponer en la catedral de Sevilla en esos oficios. También existen indicios que muestran la colocación de un gran lienzo que ocultaba parte de la superficie del Retablo Mayor (Guichot y Sierra 1991).

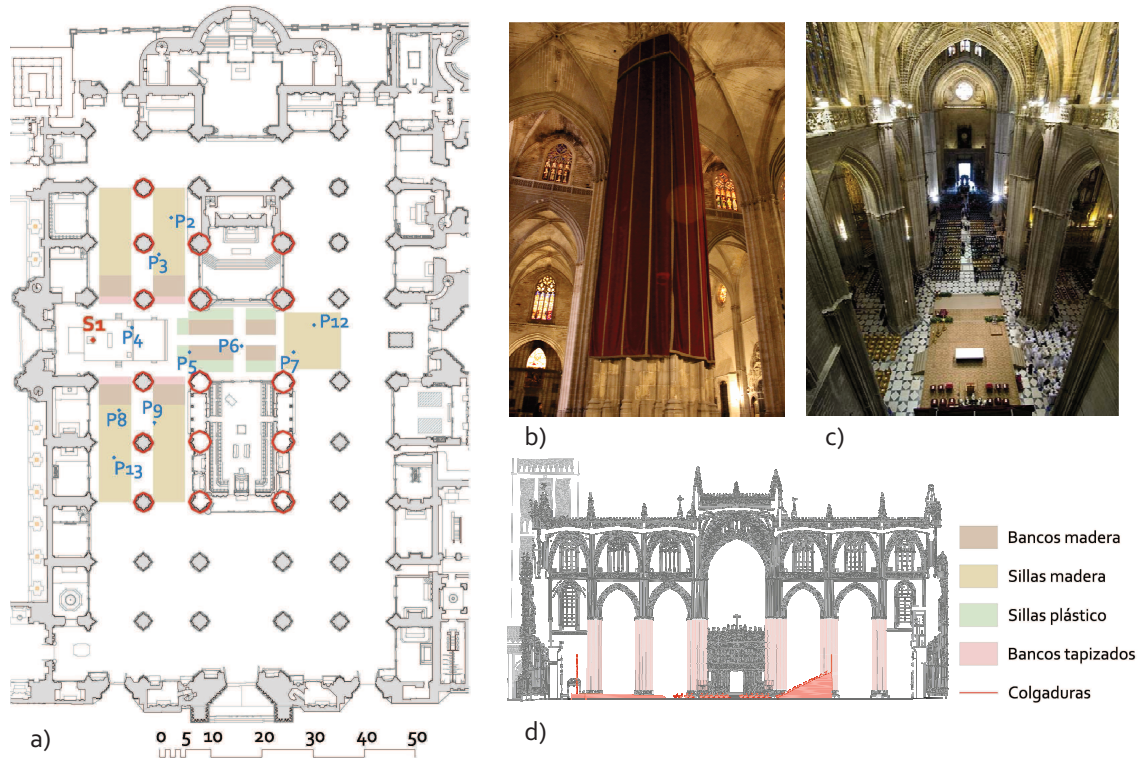


Figure 10. Catedral de Sevilla: a) Representación en planta del modelo propuesto M₄, b) colgaduras en pilares, c) disposición de audiencia en crucero, d) representación en sección del modelo propuesto M₄.

Condiciones acústicas en ocasión de grandes festividades (Modelos M₅ y M₆)

A pesar de no ser la principal finalidad de estas transformaciones, se comprueba que la incorporación de tratamientos decorativos para dichos eventos reduce apreciablemente la reverberación e influye de forma significativa en el comportamiento acústico del espacio. La Figura 11 b) y c) representa las configuraciones adoptadas en cada modelo durante ambas festividades.

Se observa que el modelo M₅ repercute de una forma significativa en los parámetros relacionados con la reverberación, disminuyendo algo más de 1 s (5 JNDs) el T₃₀ y cerca de 4 JNDs el EDT, con respecto al modelo inicial carente de intervención y ocupación. También son perceptibles las variaciones del resto de parámetros, ya que los valores medios de C₈₀ se incrementan casi 2JNDs y hasta 4 JNDs para el T_s.

Con el modelo M₆, a pesar de incorporar una menor superficie de material textil que en M₅, y ser éste más ligero, tiene una mayor influencia acústica, con una disminución de 1 JND

respecto a M5. Este hecho se debe a la disminución de volumen generado por el cierre de las capillas con tejidos de baja densidad que absorben y transmiten la energía. Tal como se comentó en secciones anteriores, esta disposición subdivide el gran espacio en diferentes volúmenes, obstruyendo la llegada de gran porcentaje de energía sonora al interior de las capillas laterales. La inteligibilidad, evaluada con el parámetro STI, mejora en la totalidad de los puntos evaluados de “pobre” a “aceptable” en ambos modelos, tal como se puede observar en la figura 11 a).

La ocupación del público en ambos modelos no produce cambios acústicos significativos en comparación con los producidos con la inclusión del ornamento. Los resultados de los parámetros acústicos en M6 con ocupación son muy similares a los obtenidos en M5 sin asistencia de fieles, lo cual indica el elevado grado de impacto acústico que supone la colocación de colgaduras bajo los arcos de entrada a las capillas laterales.

- **Trascoro [Com. 4].**

El espacio del trascoro estaba destinado en su origen a la ocupación por parte de los fieles que asistían a la liturgia, ajenos al desarrollo de ésta desde el presbiterio y coro. Por lo general, carecía de púlpitos para la predicación, si bien en la catedral de Sevilla, donde ocupa los tres últimos tramos del templo, se incorporaron éstos a principios del siglo XX. La amplia espacialidad del trascoro habilita este espacio como lugar de celebración litúrgico, al mismo tiempo que favorece el desarrollo de gran cantidad de eventos en ocasión de festividades, adquiriendo un carácter multifuncional. En la figura 12 a) se representa la planta del templo con las configuraciones adoptadas en el espacio del trascoro, mostrándose en la figura 12 b) y c) las imágenes gráficas de cada una de las vistas según la posición de fuente sonora.

Se establecen tres hipótesis principales de estudio (Modelos M7, M8 y M9) que, a su vez, se subdividen en dos para evaluar la influencia acústica de la ocupación (versión a) y la ornamentación efímera dispuesta sobre los pilares (versión b): M7 reproduce la configuración habitual con la fuente sonora localizada en el altar existente (S3); M8 representa un escenario singular, con el foco emisor situado en una plataforma frente a la puerta del templo (S4); y M9 establece la configuración correspondiente a eventos multitudinarios con la misma posición de fuente que M8.

Condiciones acústicas en ceremonias litúrgicas (Modelos M7, M8 y M9)

Las configuraciones M7a y M8a establecen un área de audiencia de aproximadamente 160 m², lo que supone un aforo aproximado de 320 personas acomodadas en bancos. La valoración de los resultados permite concluir que la simple ocupación de la nave central en el trascoro disminuye casi en 1 s el parámetro EDT con respecto al modelo vacío de mobiliario y público.

Para el resto de parámetros acústicos también se obtienen unos valores más satisfactorios, experimentando un aumento de la claridad C_{80} de casi 2 JND en puntos situados más cercanos a la fuente, o de 1 JND en receptores ubicados a una distancia de 20 metros. En general, si se compara la repercusión de la posición de la fuente: S_3 y S_4 , se observan resultados ligeramente más favorables para S_4 .

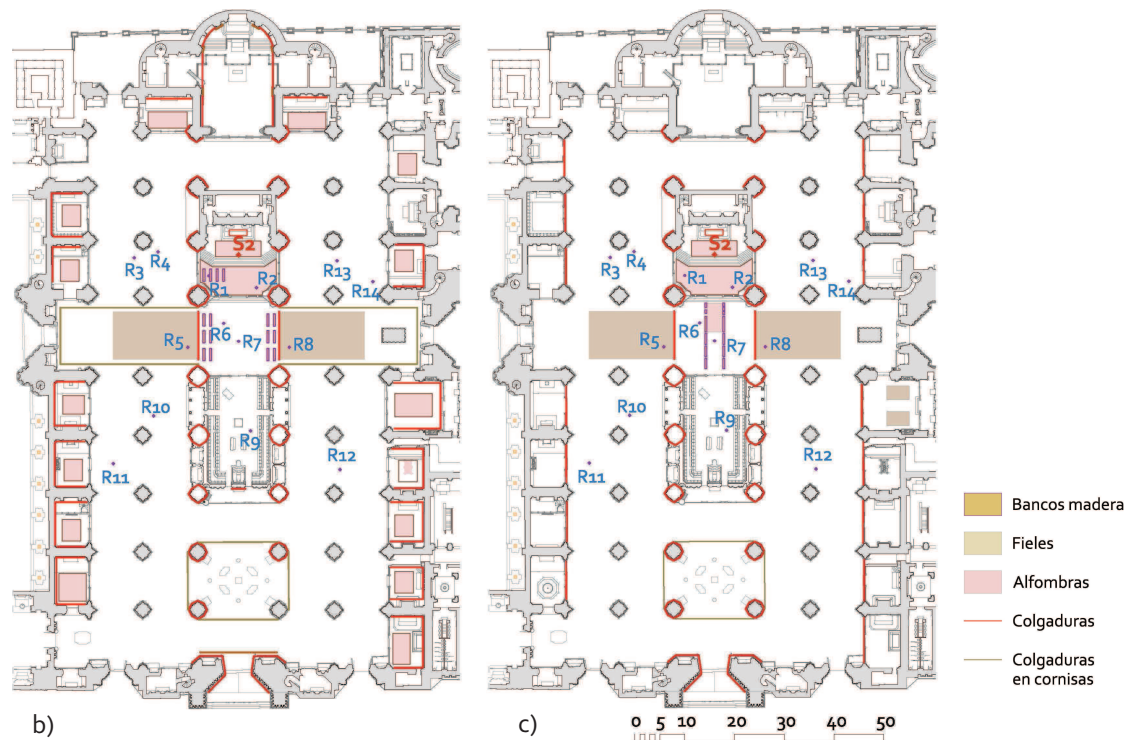
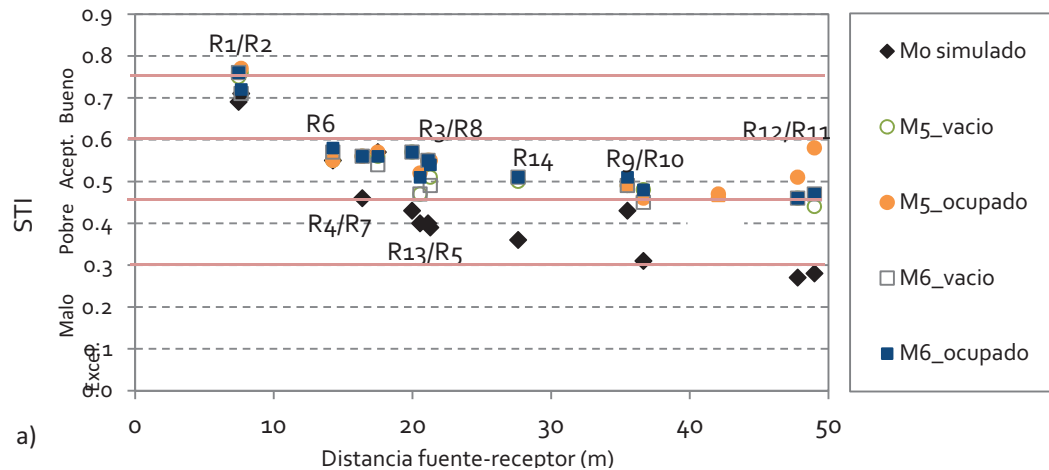


Figure 11. Catedral de Sevilla: a) Valores del parámetro STI promediados espectralmente; b) configuración adoptada en la Canonización Real (M5); c) configuración adoptada en Semana Santa (M6).

El aumento de absorción generado por la adición de colgaduras textiles en los pilares, correspondiendo con los modelos M7b y M8b, supone una perceptible disminución de la sensación reverberante valorada por EDT, especialmente en la banda de frecuencia de 1kHz, donde se obtienen variaciones de 2 JNDs, tal como se observa en la Figura 13 en la que se muestran los valores promedio. Resulta destacable que la inteligibilidad llegue a alcanzar la calificación de "aceptable" tras la inclusión de la decoración, incluso a distancias próximas a 25 metros de la fuente sonora.

La consideración de ocupación masiva (Mg), próxima a los 1000 m² de superficie de audiencia y con un aforo estimado de unas 2000 personas, proporciona un notable aumento en la absorción sonora, llegándose a alcanzar diferencias superiores a los 3 JND para C₈₀ con respecto a la simulación en condiciones de no ocupación. Incluso a distancias superiores a 30 metros se obtienen valores aceptables. No obstante, a pesar de mostrar una mejora generalizada de los resultados, cabe señalar que la presencia de pilares de 3 metros de anchura perjudica la obtención de condiciones acústicas aptas en diversas zonas ocupadas por la audiencia. Este hecho se debe a la carencia de contacto visual y, por consiguiente, de sonido directo.

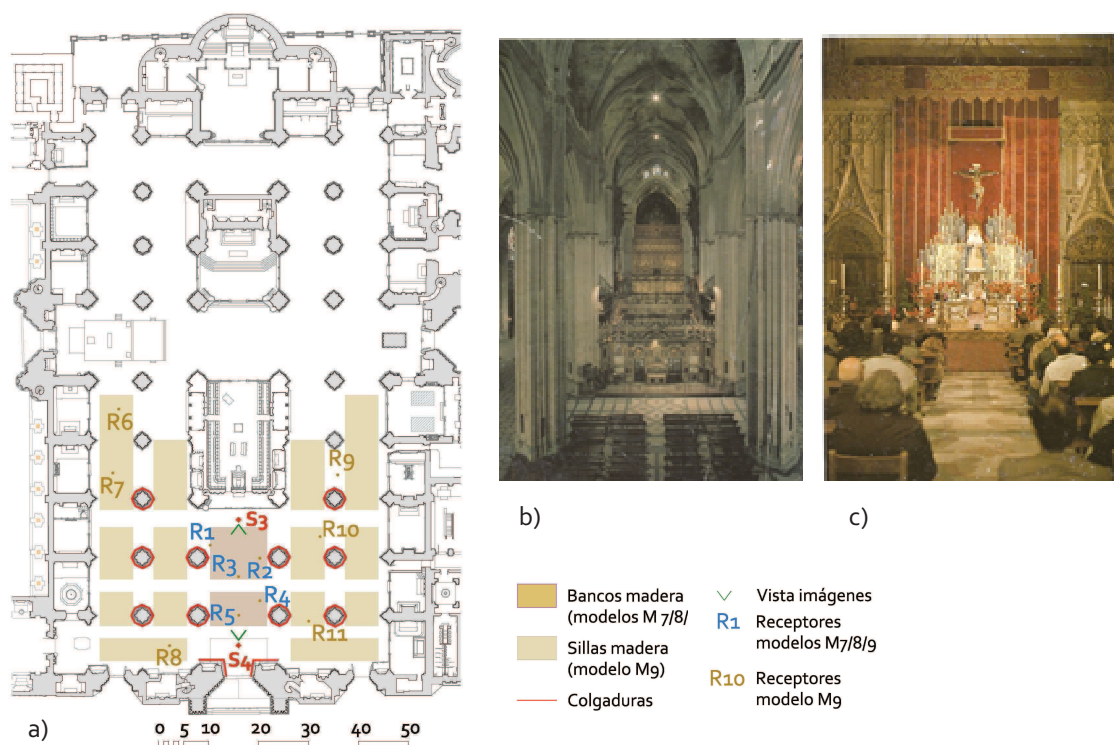


Figura 12. Catedral de Sevilla: a) Configuración adoptada en las ceremonias del trascoro; b) liturgia en el trascoro (vista desde S3); c) vista del trascoro desde la fachada oeste (vista desde S4).

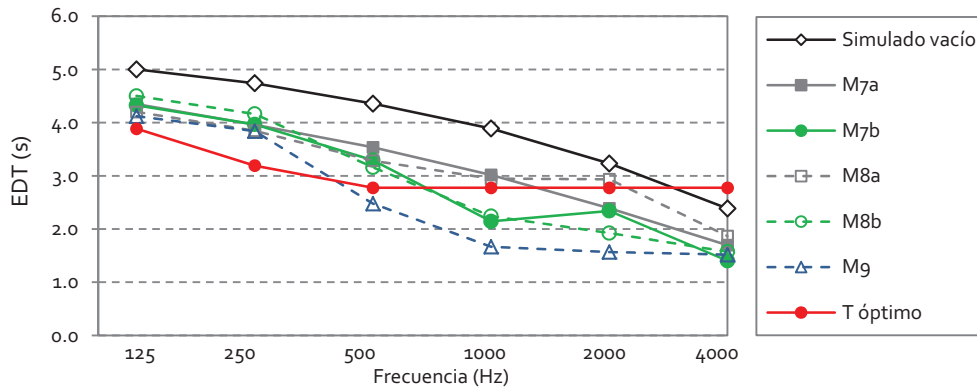


Figura 13. a) Valores promediados espectralmente y espacialmente del parámetro EDT.

3.3.2 La catedral de Granada [Art. 6, Com. 6].

La configuración de la Catedral de Granada se origina a partir de un innovador enfoque que incorporaba el concepto de centralidad y pretendía potenciar la vinculación del clero y los fieles. Este templo de estilo renacentista y planta basilical dispone de cinco naves y una girola poligonal. Fue concebido con un crucero principal y otro secundario de menor escala; de esta forma se proporcionaba luz independiente a los dos ámbitos generados por la posición del coro en mitad de la nave central: el de la liturgia solemne (crucero principal) y el del culto ordinario (crucero secundario). Anteriormente, en la figura 7b, se pudo observar una representación de las zonas generales.

La catedral de Granada posee un volumen aproximado de 160000 m³. La altura de las bóvedas de la nave principal y el crucero superan ligeramente los 30 metros, y la altura de la clave de la bóveda principal que cubre la Capilla Mayor se aproxima a los 50 metros.

Se ha pretendido recuperar el sonido de esta catedral mediante el uso de herramientas de simulación, estableciendo un análisis comparativo entre el ambiente acústico actual y pretérito, y evaluando la influencia acústica que la evolución de la ubicación del espacio coral ha tenido. Por ello, se han generado tres modelos de esta catedral (Figura 14):

- Modelo M1. Reproduce el origen de su construcción, con el espacio coral en el centro de la nave principal, utilizado principalmente para la interpretación de la música instrumental y el canto.
- Modelo M2. En el primer tercio del siglo XX el coro fue suprimido de la nave central para ser instalado en la capilla mayor, posibilitando una óptima relación espacio-funcional. Esta intervención descuidó la originaria posición de los órganos, dejándolos suspendidos en la nave. Desaparece el concepto de centralidad en la girola con motivo del cierre físico de la Capilla Mayor.

- Modelo M₃. La última intervención llevada a cabo a finales del siglo XX suprimió por completo el coro, distribuyendo sus estalos por todo el templo, sin llegar a establecer un espacio propio. Nuevamente se posibilitaba la vinculación con la congregación de fieles en la girola.

Se valora la influencia de la representación de diferentes motivos musicales: música coral e instrumental, cuyas preferencias subjetivas difieren y varían en función del espacio donde se escucha.

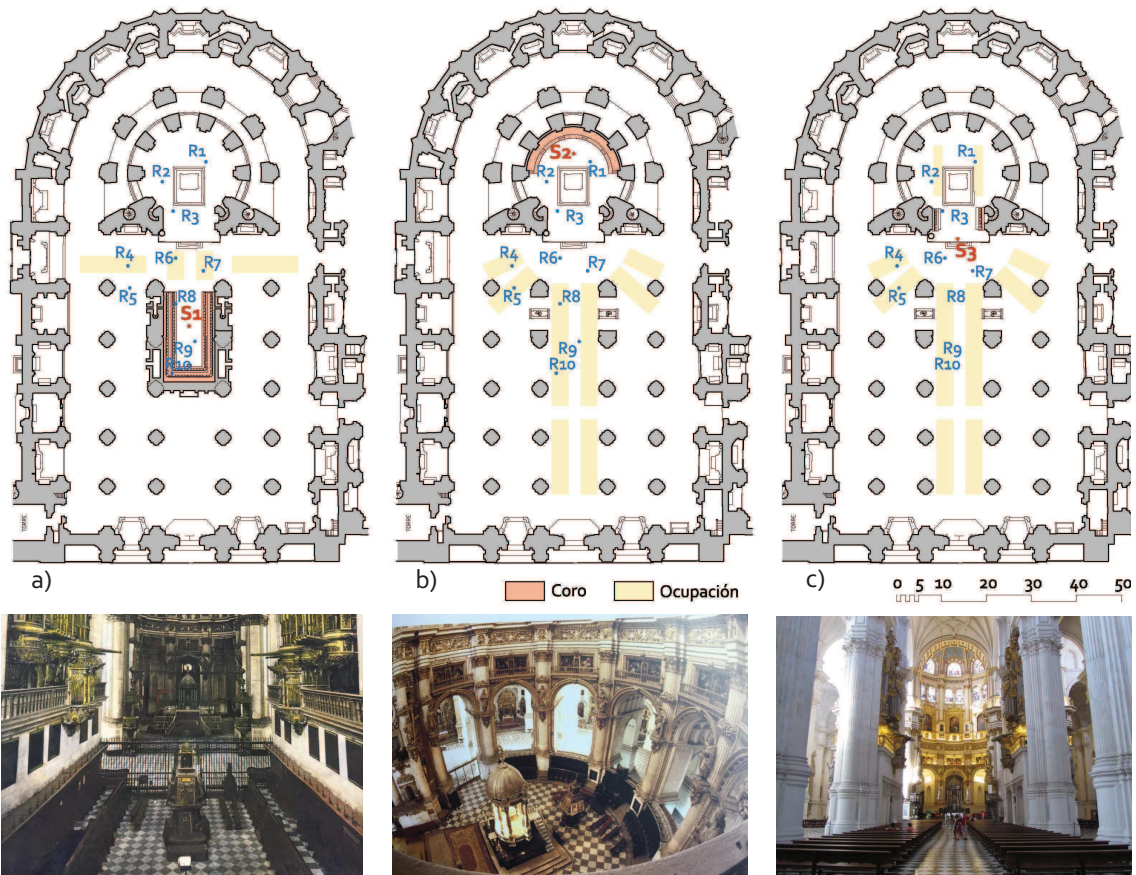


Figura 14. Plantas de la catedral de Granada. a) Periodo 1619-1929; b) Periodo 1929-1992; c) Estado actual, desde 1992, con representación de mobiliario. Posición de fuentes sonoras (S) y puntos receptores (R).

- Fuente sonora asociada a cada modelo [Art. 6].

En un primer análisis, se han considerado las fuentes sonoras asociadas a cada una de los modelos: S₁ en M₁, S₂ en M₂ y S₃ en M₃ (Fig. 14), con objeto de estudiar la adecuación acústica de cada uno de ellos en función de la posición del coro, variable en cada caso. A la hora de realizar las evaluaciones acústicas, se ha atendido a la división en tres zonas principales del espacio interior catedralicio: presbiterio, transepto y nave central.

Condiciones acústicas en los tres modelos (M1, M2 y M3)

Tal y como cabía esperar, el tiempo de reverberación en cada uno de los modelos estudiados se aleja considerablemente de los óptimos considerados para cualquier actividad musical (Gade 2007), principalmente debido al elevado volumen y al gran porcentaje de materiales de acabado reflectantes. En los tres modelos se obtienen los valores más bajos de sensación de reverberación percibida, una mejor claridad y, en general, una mejor adecuación acústica en el propio espacio del coro, es decir, cuando la fuente sonora está asociada a dicho recinto en cada modelo. Fuera de él hay una considerable disminución en la llegada de reflexiones tempranas, determinando la relación obtenida entre la energía inicial y tardía que llega al oyente. Consecuentemente, los valores de los parámetros acústicos difieren significativamente en cada una de las tres zonas señaladas, en función de la posición de la fuente sonora.

Los promedios espaciales obtenidos para M1 y M2, (coro en nave central y presbiterio, respectivamente), donde los espacios corales están delimitados físicamente, reflejan unas mejores condiciones acústicas en la proximidad de los mismos. Si se tienen en cuenta la totalidad de los receptores estudiados (Fig. 14), los valores generales de C_{80} y T_s resultan ser claramente más desfavorables en la configuración M2, dado que la mayoría de la audiencia se encuentra a una distancia superior de la fuente que en el resto de los modelos, mientras que se obtienen mejores valores con M3.

El aumento de absorción sonora con la ocupación en M2 y M3 puede llegar a variar el EDT en 3 JNDs respecto a sin ocupación, aumentando esa diferencia hasta 8 JNDs en el caso de T_s .

- Fuente sonora igualmente posicionada en los tres modelos [Art. 6, Com. 5].

El análisis comparativo de los resultados de los parámetros acústicos con una misma ubicación de fuente (S_3) para los tres modelos permite su evaluación, con independencia de cuáles sean las distancias fuente-receptor en cada caso. Dicho análisis se ha realizado teniendo en cuenta tanto los parámetros acústicos referidos en la ISO 3382 como los factores temporales y espaciales investigados por Ando.

Condiciones acústicas en los tres modelos (M1, M2 y M3)

Los parámetros energéticos C_{80} y T_s son menos adecuados en M3 que en M1 y M2, fundamentalmente por la ausencia de primeras reflexiones, confirmando que la ausencia de obstáculos visuales para el público resulta muy favorable para lograr un espacio diáfano que permita su uso para eventos de asistencia masiva. La presencia de ocupación solo produce variaciones inferiores a 1 JND en el EDT y de 2 JNDs en T_{30} .

En términos subjetivos, resulta necesario determinar un motivo musical común para la evaluación de los parámetros de diseño temporal. Debido a la importancia del canto eclesial dentro del desarrollo de la liturgia, y con motivo del significativo papel representado por los coros en las catedrales, en este análisis comparativo se ha considerado el canto gregoriano como pieza musical representada en la fuente S_3 . Cabe señalar que, en general, IACC es el parámetro con mayor influencia negativa en la preferencia subjetiva, aproximándose a -1 el valor escala (S_i) en casi todos los puntos considerados (Figura 15). Esto significa que las señales en la catedral procedentes de ambos lados son muy similares, ya que la sensación binaural se aproxima en la catedral a un comportamiento monofónico, con valores IACC próximos a 1.

Este hecho será analizado de forma detallada en la sección 4, la cual versa sobre Auralizaciones y reproducciones sonoras. Una vez evaluados los resultados de los parámetros subjetivos, se confirma la mejor calidad acústica percibida en la configuración M_2 , donde se obtiene el menor valor escala (S_i), el cual determina la influencia total negativa de los factores temporales y espaciales.

Al valorar la multiplicidad de fuentes sonoras en esta posición S_3 , se observa que las variaciones obtenidas en la reverberación son imperceptibles, mientras que en los parámetros C_{80} y T_s , son obviamente notables, especialmente al aumentar la distancia fuente-receptor.

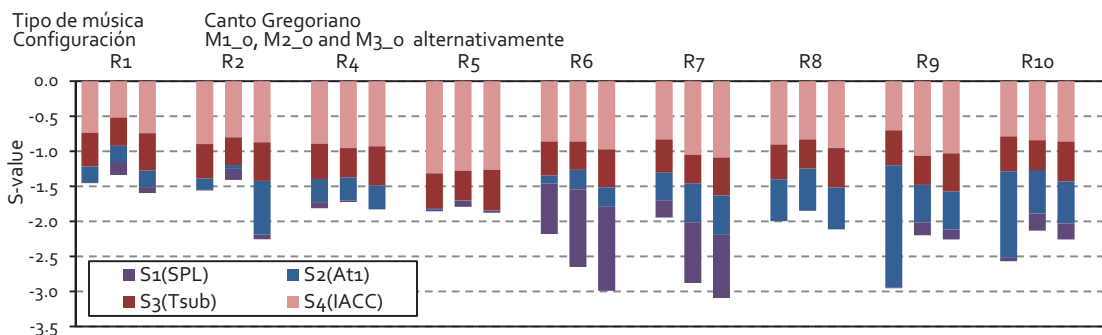


Figura 15. Influencia de las diferentes configuraciones de la catedral de Granada en los parámetros ortogonales considerados en el valor escala (S_i) de cada receptor, desde la misma posición de fuente sonora (S_3).

- Valoración acústica de distintos motivos musicales [Art. 6].

Se evalúa la influencia de diferentes motivos musicales en los parámetros ortogonales considerados en el valor escala (S_i) de cada receptor. Dichas muestras son dos piezas corales cantadas y otras dos instrumentales: en el primer grupo, el Alleluia y el canto gregoriano; y en el segundo, la sinfonía Romántica de Bruckner y la sinfonía Overture de Mozart. La influencia obtenida según el tipo de música representado se muestra en la figura 16.

En función de los estudios realizados, cabe señalar la preferencia de mayor reverberación para la escucha del canto gregoriano y la pieza de Bruckner. En el caso de la primera, tal como se expuso en secciones anteriores, los pasajes lentos y la monotonía de la pronunciación silábica incrementaban la sensación de inteligibilidad en un entorno tan reverberante como una catedral; en la segunda, aquellos fragmentos graves de tiempo lento representados por instrumentos de viento o cuerda también repercuten en la percepción. Esta condición está vinculada con la preferencia de tiempos más largos para la llegada de reflexiones tempranas, por lo que se concluye que las condiciones óptimas de cada motivo musical interpretado tienen una significativa influencia en la preferencia subjetiva.

La elevada reverberación de la catedral, próxima a los 10 s, determina una influencia negativa para cualquier estilo musical. No obstante, la disminución del valor escala para ciertas piezas o melodías señala una mejor adecuación acústica para el oyente. A la vista de los resultados obtenidos, se observa que la penalización debida a la preferencia de la llegada tardía de las primeras reflexiones no es tan significativa, por lo que se puede confirmar que la catedral resulta acústicamente más adecuada cuando la reverberación óptima de la pieza es más prologada.

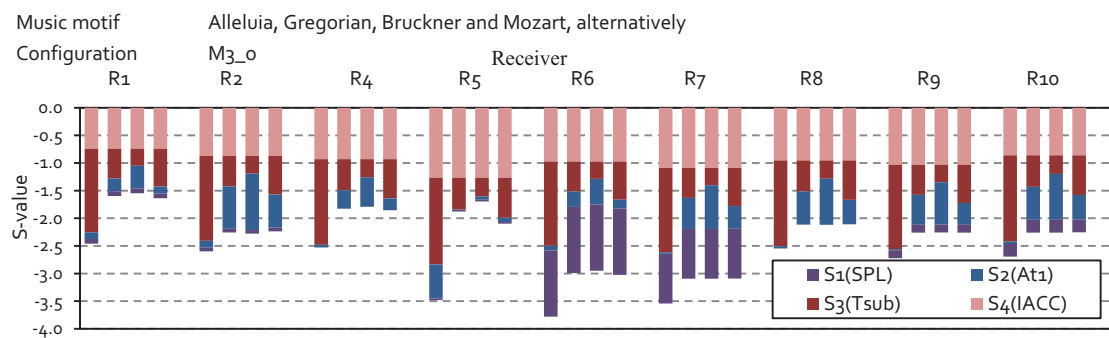


Figura 16. Influencia de la representación de diferentes tipos de música de la catedral de Granada en los parámetros ortogonales considerados en el valor escala (S_i) de cada receptor. Modelo M3 y posición de fuente sonora S3.

3.4 Sección 4: Auralizaciones y reproducciones sonoras [Artículo 7].

En esta última sección se desarrolla la valoración subjetiva mediante la elaboración de ensayos experimentales con oyentes.

La auralización de un recinto se define como el proceso mediante el cual se simula la sensación de escuchar sonido tridimensional en el interior de una sala, para una posición dada del oyente y de la fuente sonora, así como para unas señales sonoras determinadas (Kleiner et al. 1993). En otras palabras, estas reproducciones sonoras virtuales representan cómo se escucharía un sonido determinado en un lugar específico, desde una posición concreta y pueden ser generadas mediante el uso de nuevas tecnologías y herramientas de predicción acústica. Su utilidad puede ser extendida para evaluar la calidad acústica de un espacio basado en la percepción subjetiva, de forma complementaria a los parámetros acústicos.

Para su adquisición, se convoluciona una señal de excitación que ha sido obtenida previamente mediante una grabación en una sala anecoica, para que, posteriormente, sea transformada con objeto de generar la correspondiente señal binaural o monoaural deseada, dependiendo de si se aplica una componente de la RI a cada oído, o la misma componente si se considera al oyente como un único punto dentro del recinto. La respuesta de la sala añade los fenómenos típicos de la propagación del sonido en el interior de un recinto, con el fin de simular las primeras reflexiones, la reverberación y los modos propios de la sala.

El proceso de audición es complejo, ya que implica la necesidad de interpretar la información de un sonido por parte del cerebro. En el caso del sonido binaural, la información recibida por parte de cada oído es diferente, por lo que se crea una sensación de escucha tridimensional muy similar a la de estar presencialmente en el lugar donde se produce el sonido. Dado que los requerimientos subjetivos no son los mismos en función de las características del espacio y la señal reproducida, una de las soluciones convencionales para cuantificar estas diferencias son las pruebas subjetivas con oyentes, mediante las cuales diferentes sujetos establecen una valoración personal. Por tanto, la reproducción de este material de audición hace posible evaluar las variadas condiciones acústicas y sensoriales de cada uno de los espacios y señales de excitación.

La finalidad del trabajo desarrollado, el cual se analiza desde un enfoque estadístico, tiene como objetivo evaluar las ventajas de la renderización binaural sobre la monofónica, cuando un oyente escucha una auralización. Asimismo, se valoran los diversos atributos subjetivos en función de la acústica del recinto, la escala y el propósito del sonido que se reproduce.

3.4.1 Evaluación de la impresión acústica espacial

La espacialidad o sensación de amplitud de un recinto puede describirse como la sensación percibida por un oyente de encontrarse en un lugar amplio y envolvente. Este atributo está vinculado con la impresión espacial, siendo mayor cuando la impresión aumenta, pero no al revés. Es decir, puede darse el caso de que la impresión espacial en una habitación sea alta pero, a su vez, que la percepción acústica no transmita una sensación envolvente. También es posible que la audición de esa misma pieza musical o discurso en un espacio reverberante proporcione una elevada impresión espacial, así como una elevada sensación de amplitud (Griensinger 1997).

Según la normativa (ISO 3382-1 2010), la impresión acústica espacial se puede expresar mediante dos parámetros: el ancho aparente de la fuente (ASW), definido como la amplitud espacial percibida de la fuente sonora, determinando los límites virtuales de la misma; y la sensación envolvente (LEV), la cual se refiere a la sensación de inmersión en el sonido escuchado por el oyente. Dichos atributos están relacionados con parámetros objetivos derivados de la parte temprana o tardía de la curva de caída de la energía: por una parte, ASW está vinculado con el nivel de reflexiones tempranas en los primeros 80 ms tras la llegada del sonido directo; y por otra parte, LEV está asociado con el nivel sonoro lateral tardío del campo reverberante, el cual depende del tipo de espacio, y generalmente se asume que empieza 80 ms después de la llegada del sonido directo, cuando se trata de espacios reverberantes.

Todos estos parámetros objetivos y subjetivos se convierten en diferentes formas de describir la calidad acústica de un recinto. Por tanto, la valoración de la percepción auditiva mediante el desarrollo de pruebas con oyentes se convierte en una útil herramienta para investigar y cuantificar los diferentes aspectos subjetivos de las reproducciones sonoras virtuales o auralizaciones. Cabe señalar que, en este estudio, el grupo de sujetos está compuesto por expertos y no expertos del campo de la acústica.

3.4.2 Pruebas subjetivas

El trabajo que se ha realizado pretende analizar, mediante la aplicación de métodos estadísticos, si las dimensiones del espacio y el tipo de estímulo tienen un efecto significativo en la percepción de escucha por parte del oyente, es decir, evaluar si la correspondencia con los parámetros subjetivos es la misma cuando el tamaño del recinto y el tipo de estímulo varían. Por tanto, el desarrollo de los test realizados en este trabajo exige la combinación de diferentes factores relacionados con el espacio, la señal de excitación y la sintetización de la misma. Para ello, dos grabaciones anecoicas, una correspondiente a un discurso hablado (Speech) y la otra a un fragmento musical representado por un chelo (Music), son convolucionadas con respuestas al impulso sintetizadas tanto de forma binaural (Bin) como

monoaural (Mono), de tres tipos de espacios de diferente escala, expuestos a continuación y mostrados en la figura 17:

- (A) - Una sala de reuniones de 90 m³ del *Institute of Sound and Vibration Research* (ISVR), localizado en Southampton (Reino Unido).
- (B) - Un hall de 430 m³ localizado en el edificio medieval *Ightham Mote*, ubicado en Kent (Reino Unido).
- (C) - La catedral de Granada, cuyo volumen alcanza los 160000 m³.



(A)

(B)

(C)

Figura 17. Espacios objeto de estudio: (A) Sala de reuniones del ISVR, (B) Hall del Ightham Mote, (C) Catedral de Granada.

Por tanto, un total de tres factores, de dos y tres niveles cada uno, suponen un total de doce interacciones entre ellos:

- Espacio: A, B y C
- Estímulo: Palabra y música
- Sintetización: Binaural y Monoaural

Para el desarrollo del estudio se han realizado previamente mediciones acústicas en cada espacio, con objeto de caracterizar las propiedades de los materiales de cada una de las superficies que los delimitan. A continuación, se han creado y calibrado los correspondientes modelos acústicos virtuales, los cuales reproducen el comportamiento acústico de cada recinto, para así proceder a la obtención de las diversas respuestas al impulso (RI).

Posteriormente, se ha procedido a la equalización de los auriculares que se utilizan para la reproducción de las auralizaciones, que serán evaluadas a fin de minimizar la frecuencia de coloración generada y mejorar la calidad del audio. Para ello, mediante la aplicación de una metodología propuesta por Masiero y Fels (2001), se han creado los correspondientes filtros HRTF, los cuales permiten simular las sensaciones y procesos de la percepción binaural. Dichos filtros proceden de medidas, realizadas previamente en condiciones anecoicas, de la señal que llega a los tímpanos cuando son excitados por un estímulo sonoro que se transmite a una cabeza maniquí a la que se le colocan unos micrófonos en el interior del oído. Mediante el desarrollo de este proceso se mide la frecuencia de respuesta de los dos canales, con objeto de reducir los picos generados en la respuesta invertida.

Finalmente, se han generado las auralizaciones objeto de estudio, con el fin de reproducirlas individualmente y evaluar los diferentes atributos subjetivos, así como las ventajas de la reproducción binaural por parte de un grupo de oyentes. La interfaz gráfica utilizada para registrar las respuestas de los sujetos y el montaje adoptado durante el experimento se muestran en la figura 18. La percepción acústica se ha investigado en cuatro fases:

- La localización virtual de la fuente sonora. Los oyentes han de estimar la ubicación de la fuente, indicando el rango angular desde el cual consideran que proviene el sonido.
- La impresión espacial acústica, evaluada por:
 - o El ancho aparente de la fuente (ASW). Los sujetos tienen que calificar ASW en una escala de 1 (estrecha) a 5 (amplia).
 - o La sensación envolvente del sonido (LEV). Los sujetos tienen que cuantificar LEV en una escala de 1 (no envolvente) a 5 (totalmente envolvente).
- La sensación de realismo entre dos auralizaciones, binaural y monoaural, respectivamente. Los oyentes deben valorar si no perciben diferencias entre ambos audios, o si la audición de una de ellas les transmite una mayor sensación de realismo.

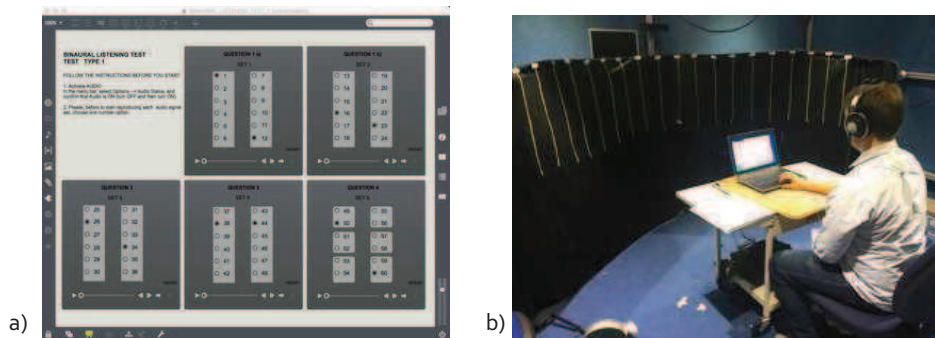


Figura 18. a) Interfaz gráfica creada en el software MAX MSP para que el oyente diera sus respuestas durante el desarrollo del experimento, b) Configuración adoptada para el experimento.

3.4.3 Análisis estadístico de los resultados

Principalmente, los resultados obtenidos se han estudiado mediante la aplicación del método de análisis de varianzas (ANOVA) de medidas repetidas, por la posibilidad que ofrece para justificar las diferencias estadísticas entre los factores intra-sujetos (espacio, tipo y estímulo), cuando se evalúan varios atributos diferentes (localización, impresión espacial y realismo). Este método establece una correlación significativa entre los diferentes factores cuando la probabilidad residual (p) es menor al 0,05. Cabe señalar que existen algunos requerimientos que han de cumplirse para la aplicación del método paramétrico propuesto: por una parte, los resultados han de seguir una distribución normal, no obstante, el método ANOVA es suficientemente robusto ante la violación de esta suposición; y, por otra parte, ha de cumplirse la propiedad de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas.

Las relaciones estadísticas entre los diferentes niveles de cada factor posibilitan evaluar el efecto significativo de un factor independiente (escala, tipo o sintetización de la señal) sobre una variable dependiente (el parámetro a evaluar), sin tener en consideración la influencia de otros factores, como, por ejemplo, la consideración independiente del factor “escala” en los resultados. Del mismo modo, permiten analizar las interacciones entre dos o más factores, como, por ejemplo, el estudio de la relación del factor “escala” del recinto en función del factor “tipo” de estímulo reproducido, ya sea palabra o música.

- **Localización de la fuente**

Se observa en los resultados que el oyente pierde por completo la percepción de procedencia del sonido lateral cuando la señal escuchada es monoaural. En el caso de la reproducción binaural, se muestra una llegada del sonido más lateralizada, es decir, un aumento en el rango angular. Este hecho puede deberse al uso de una HRTF genérica. Asimismo, cabe señalar que el margen de error es menor en las respuestas proporcionadas por el grupo de expertos.

- **Anchura aparente de la fuente (ASW)**

En la figura 19 se representan las respuestas dadas por los oyentes. Al analizar este parámetro, se observa que el efecto generado por la interacción de los tres factores (espacio, tipo de estímulo y sintetización de la señal) es estadísticamente significativo ($p < 0.05$), dado que la percepción de ASW considerando el espacio no es la misma si se convolucionan palabra o música, y no se percibe de la misma forma si se sintetiza de forma binaural o monoaural. No obstante, al atender a las relaciones entre “espacio” y “estímulo” o “espacio” y “sintetización”, se observa que las diferencias no son significativas. En caso de analizar las relaciones por pares, los resultados muestran que no existen diferencias significativas entre las señales binaurales de los espacios A y C, pero sí existen relaciones estadísticamente significativas en las señales monoaurales. Este hecho se debe a que al escuchar la señal Mono, el sujeto pierde drásticamente la sensación de amplitud de la fuente en los espacios de pequeña escala, mientras que en los espacios reverberantes se mantienen valores altos.

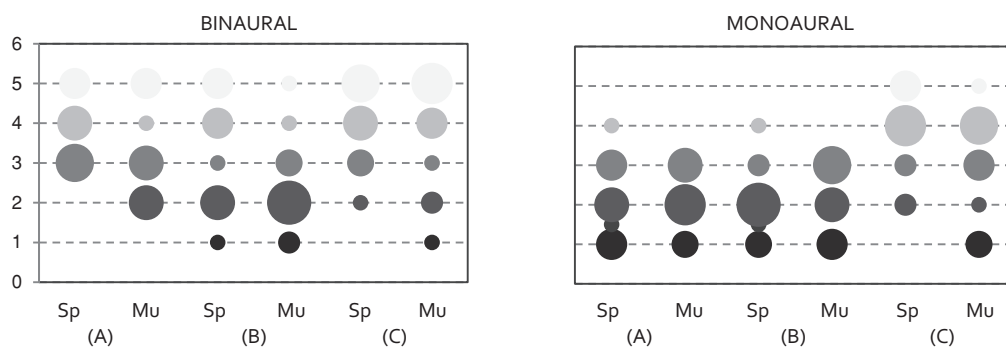


Figura 19. Evaluación dada por los oyentes para ASW en función de las características de la auralización escuchada. El tamaño de las burbujas varía en función del porcentaje de respuestas dadas a ese valor.

- **Sensación envolvente del sonido (LEV)**

En general, se observa que la inmersión en el espacio disminuye al escuchar la señal musical, ya que existe cierta tendencia a enmascarar esta sensación, siendo menores las valoraciones cuando se reproduce el chelo. Los valores de LEV dados por los oyentes se representan en la figura 20, y se observa que aumentan cuando la reverberación es mayor, por lo que las variaciones aparecen principalmente al analizar el espacio C. En ese sentido, los sujetos tienen a percibir las señales generadas en los espacios reverberantes como más envolventes, siendo destacadas las diferencias cuando se sintetiza de forma monoaural. Por tanto, en el caso del espacio de mayor escala, no existe una diferencia estadísticamente significativa al comparar los resultados entre señales binaurales y monofónicas.

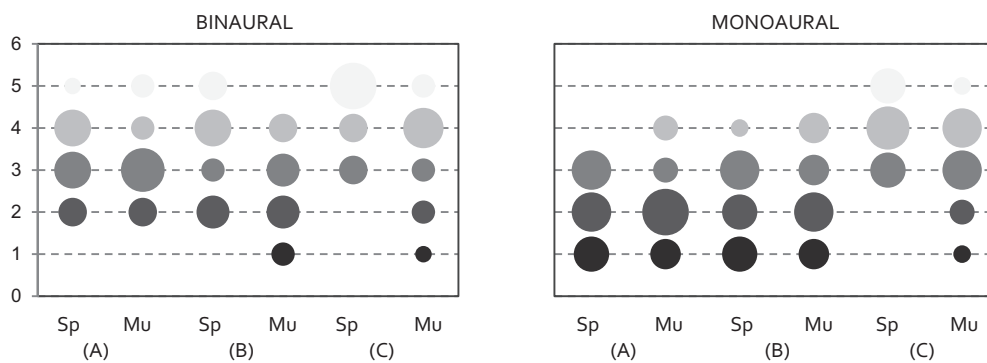


Figura 20. Evaluación dada por los oyentes para LEV en función de las características de la auralización escuchada. El tamaño de las burbujas varía en función del porcentaje de respuestas dadas a ese valor.

- **Sensación de realismo**

Al valorar este atributo subjetivo se confirma la existencia de diferencias significativas entre los tipos de señal, siendo algo mayor la valoración en el caso de la música. A excepción del espacio A, donde la auralización transmite una sensación enlatada, el oyente se decanta por la preferencia de señales binaurales. Se puede observar en los resultados que la información espacial proporcionada por la reproducción Binaural no resulta una carencia significativa en espacios muy reverberantes, como es el caso de la catedral (C), ya que el oyente tiene una sensación realista con ambas.

- **Relaciones entre variables objetivas y subjetivas**

En este apartado se investiga la dependencia entre los atributos de preferencia subjetiva y los parámetros acústicos objetivos: T_{30} , LF e IACC. Los valores del tiempo de reverberación y la fracción de energía lateral de cada uno de los espacios presentan una correlación alta. En el caso de LF, cabe señalar la obtención de valores más pequeños en el espacio C, mientras que en el caso de ASW, la situación era contraria, evocando más anchura de la fuente en el espacio más reverberante. Esta falta de correspondencia entre ASW y LF puede justificarse debido a que la energía tardía reflejada es espacialmente difusa, y la llegada de sonido

directo queda parcialmente enmascarada por la reverberación del espacio. En el caso de la relación entre la preferencia subjetiva por las señales binaurales y los valores del parámetro IACC, se observa que en espacios muy reverberantes (C), donde los valores de IACC se aproximan a 1, es decir, donde las señales procedentes de ambos lados son muy similares, el oyente no presenta una clara predilección por la información espacial en las reproducciones sonoras. Esto significa que la sensación binaural se aproxima en la catedral a un comportamiento monofónico, y es la prolongada reverberación del espacio uno de los factores que transmiten una mayor sensación de realismo al oyente.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

En esta tesis doctoral se ha profundizado en el conocimiento del sonido de las catedrales desde su consideración como parte del patrimonio inmaterial, a partir de una labor de “Arqueología acústica” como nueva forma de identificación. Con el desarrollo de esta investigación ha sido posible valorar el campo sonoro y la calidad acústica, desde un enfoque tanto objetivo como subjetivo, de aquellas configuraciones pretéritas o que pudieran existir en el futuro en los espacios catedralicios. Para ello se ha evaluado la repercusión acústica de diversas transformaciones espaciales o intervenciones efímeras que han tenido lugar en las catedrales de Sevilla y de Granada, así como la influencia de distintos factores en los principales atributos perceptivos de la audición.

A ello contribuye la aplicación de técnicas innovadoras que han permitido reconstruir virtualmente el sonido de las principales tipologías eclesiales desde su origen hasta su máxima expresión: la catedral. Este recorrido por la evolución histórica de la arquitectura eclesial occidental ha permitido desarrollar un análisis de las condiciones acústicas de estos singulares espacios, descubriendo cómo la actividad litúrgica y la actividad musical asociada se han ido adaptando a las diferentes necesidades y requerimientos de cada época:

- La necesidad de reunir a los primeros fieles de la nueva religión y la predicación dieron lugar a los primeros tipos de espacios de culto cristianos, adoptados de la arquitectura doméstica: la *domus ecclesiae* y la *domus Dei*. Gracias a las reducidas dimensiones de la primera, las condiciones acústicas eran adecuadas para la audición de la prédica y de la misa. El incremento de escala de la *domus Dei*, junto a la separación de las zonas donde se ubicaba el clero de aquellas donde se situaban los fieles, supuso un deterioro de la calidad acústica, con un incremento del tiempo de

CONCLUSIONS

This thesis has furthered in the knowledge of the sound of cathedrals from its consideration as part of intangible heritage, starting with the study of "acoustic archeology" as a new form of identification. Thanks to the development of this research, it was possible to assess the sound field and sound quality, from an objective and a subjective focus, of those bygone configurations and of those that may exist in the future in cathedrals. To this end, the acoustic impact was evaluated of various spatial transformations and of ephemeral interventions that have taken place in the cathedrals of Seville and Granada, and the influence of various factors on perceptual attributes of hearing was also assessed.

Innovative techniques also contribute to this task, the application of which has allowed the acoustic environment of the main ecclesial typologies to be virtually reconstructed ranging from its origin (the domus) to its highest form (the cathedral). This tour through the historical evolution of Western ecclesiastical architecture has helped in the analysis of the acoustic conditions of these unique spaces, by discovering how the liturgical and musical activity was adapted to meet the different needs and requirements of each period:

- *The need to preach and to bring together the first members of the new religion gave rise to the first types of spaces of Christian worship, adopted from domestic architecture: the domus ecclesiae and domus Dei. Thanks to the small size of the former, the acoustic conditions were suitable for preaching and hearing Mass. The increased scale of the domus Dei, together with the separation of the clergy area from the zone occupied by the faithful, implied a deterioration in the sound quality, and an increase of reverberation time to around 30%. The slowing down of sung recitation of the congregation favored the intelligibility of speech, which could be classified as "poor".*

reverberación en torno a un 30%. La disminución del ritmo de la recitación cantada de la congregación favoreció la inteligibilidad de la palabra, que podría ser calificada de "pobre".

- El progresivo aumento del número de fieles conllevó la necesidad de espacios específicos de culto, adoptándose la tipología basilical, heredera de la basílica civil romana, lo que produjo un notable aumento de las dimensiones del espacio de culto. Los techos de las primeras iglesias basilicales eran de armaduras de madera, a excepción del ábside que se introdujo en la cabecera del templo. La inteligibilidad de la palabra dependía de la distancia emisor-receptor y de la reverberación, por lo que se adoptaron diversas posiciones para la fuente en función de la actividad a desarrollar, y se recurrió frecuentemente a la cantilación. La evolución hacia las grandes basílicas produjo un deterioro de las condiciones acústicas, por la disminución de las primeras reflexiones y el aumento de la reverberación (en torno a 3.5 s), lo que dificultaba aún más la inteligibilidad y definición de la palabra. La respuesta litúrgica fue la práctica de los salmos y, posteriormente, la introducción de la *schola cantorum* para el desarrollo de la liturgia musical determina un efecto positivo en la valoración acústica, gracias al incremento de los niveles sonoros, lo que enmascara la sensación de reverberación.
- El aumento de la comunidad cristiana y la importancia cultural de la vida monástica dio lugar a un nuevo tipo eclesial, multifuncional, con diferentes espacios litúrgicos, entre los que destacaba el coro, cuya situación enfrentada al presbiterio crea una "iglesia" para el clero. El comportamiento acústico variaba notablemente en función de la posición de fuente y de la actividad a desarrollar. La celebración de la ceremonia en el coro supone una clara mejoría de las condiciones acústicas, siempre que los oyentes se encuentren en las proximidades de este recinto, cuyos paramentos incrementan la llegada de reflexiones tempranas. Se observa grandes diferencias en los resultados acústicos obtenidos en las naves del templo, donde la carencia de inteligibilidad de la palabra en el canto carecía de importancia, ya que se opta por una percepción sensorial fruto de los cambios vocales, principalmente la entonación.
- Con la llegada del modelo catedralicio la música adquiere un gran protagonismo, impulsándose su desarrollo gracias al nacimiento de la polifonía. La gran escala de estos templos determinaba que la principal finalidad no sea la correcta audición del mensaje, sino su difusión y amplificación. Nuevamente, el carácter multifuncional y la articulación en diferentes zonas producen resultados acústicos muy variables según la posición de la fuente sonora y del recinto coral. Esto trajo consigo la creación de espacios como el *leodoiro*, que favorecía las condiciones acústicas de la congregación ubicada en el trascoro, reduciéndose los valores de EDT de forma notable.

- *The progressive increase in the number of the faithful led to the need for specific places of worship, and hence the basilica typology was adopted, heir to the Roman civil basilica, which produced a marked increase in the dimensions of the space of worship. The ceilings of the first basilica churches were wooden structures, except for the apse, which was introduced at the head of the temple. Speech intelligibility depended on the source-receiver distance and reverberation, and therefore various positions for the source were adopted in accordance to the activity, and cantillation was often used. Evolution towards the great basilicas resulted in the deterioration of the acoustic conditions, by decreasing early reflections and increasing reverberation (around 3.5 s), thereby further hindering intelligibility and definition of the word. The use of psalms was the liturgical response, and subsequently a positive effect on the acoustic assessment for the development of the musical liturgy was determined by the introduction of the schola cantorum, thanks to increased sound levels, which masks the feeling of reverberation.*
- *The increase in the Christian community and the cultural importance of monastic life gave rise to a new multifunctional church with different liturgical spaces, among which was the choir area, whose location in front of the presbytery created a "church" for the clergy. The acoustic behaviour varied considerably depending on the source position and the activity performed. Holding the ceremony in the choir area supposed a clear improvement of the acoustic conditions, on the condition that the listeners were in the vicinity of this enclosure, whose walls increased the arrival of early reflections. There are large differences in acoustic results obtained in the aisles, where the lack of intelligibility in the sung word was irrelevant, because a sensory perception related with vocal changes was chosen, mainly in the form of intonation.*
- *Once the cathedral model was established, music acquires a leading role since the development of music was boosted thanks to the birth of polyphony. The large scale of these temples determined that the main purpose was not the correct hearing of the message, but its dissemination and amplification. Again, the multifunctional character and the existence of different areas produced highly variable acoustic results depending on the position of the sound source and the choir. This fact resulted in the creation of spaces such as the leedoiro, which favoured the acoustic conditions of the congregation who were sitting behind the choir by reducing significantly the EDT values.*

Since the Middle Ages, the cathedral became the most representative example of the entire ecclesial architecture type, and became the venue of special ceremonies and festivities, both religious and civil in character. During the course of these events, the arrangement of ephemeral architecture in the cathedral became a recurring measure, mainly through the use of hanging textiles. Scale models of a reverberant chamber and a church, enabled research into: the absorption and transmission properties of these materials; the prediction of their behaviour on

Desde la Edad Media, la catedral llegó a ser el tipo eclesial más representativo de toda la arquitectura eclesial, convirtiéndose en sede de singulares ceremonias y festividades, tanto de carácter religioso como civil. Durante el desarrollo de estos eventos, la disposición de arquitectura efímera en la catedral, principalmente con el empleo de materiales textiles colgados, fue una medida muy recurrente. Mediante el uso de modelos a escala de una cámara reverberante y de una iglesia, se han investigado las propiedades de absorción y transmisión de energía de estos materiales, la posterior predicción de su comportamiento en modelos virtuales, así como la influencia que puede llegar a tener su incorporación en el comportamiento acústico de estos templos:

- Se ha valorado la disposición del tejido de dos formas diferentes: apoyado en un paramento y colgado libremente. La exposición de las dos caras del material cuando está colgado supone una duplicidad de la absorción del mismo.
- No obstante, existe a su vez una diferencia significativa a la hora de considerar el material colgado de manera que subdivida el volumen del espacio en dos partes diferenciadas, o que de lo contrario esté colgado quedando espacio libre a su alrededor, dejando pasar el sonido. Se observa que cuando el tejido subdivide totalmente el espacio, los coeficientes de absorción aumentan hasta del orden de un 20%, debido a la escasa influencia de una de sus caras. Este hecho confirma la necesidad de considerar los coeficientes de transmisión en esta disposición a la hora de simular su comportamiento en las herramientas de predicción acústica, siendo asimismo un requisito la aplicación de las propiedades acústicas previamente obtenidas con la misma disposición objeto de estudio, con el fin de evitar la duplicación de errores a bajas frecuencias.
- En el caso del modelo eclesial, al considerar la colocación de los textiles colgados bajo los arcos que delimitan la nave central de las laterales, se comprueba que la omisión de los coeficientes de transmisión apenas repercute en los resultados, ya que su disposición no diferencia por completo los volúmenes de ambas zonas, permitiendo el paso de energía sonora.
- Desde el punto de vista de los parámetros acústicos de la ISO, el efecto acústico generado por la disposición de este tipo de decoración es significativo, especialmente en los parámetros relacionados con la reverberación. Los resultados podrían mostrar unas mayores mejoras de las condiciones acústicas cuando el material textil está cercano a los oyentes.
- Al considerar los factores temporales y espaciales y determinar un tipo de actividad asociada a cada una de las fuentes sonoras (predicación en el altar, canto en el coro y música instrumental del órgano), se observa que el mayor impacto negativo para la predicación es la prolongada reverberación. En el caso de la música de órgano, la pronta llegada de las primeras reflexiones lo aleja de los valores preferidos para este

virtual models; and the influence on the acoustic behaviour when these hanging textiles are incorporated in these temples.

- *Two different arrangements of the fabric were evaluated: wall hangings and freely hung textiles. A duplication of absorption is observed when both sides of the material are exposed.*
- *However, there is a significant difference when the hanging material subdivides the volume of the space into two distinct parts, from when the material is hung in such a way that there is free space around it, thereby letting the sound carry. It is noted that when fabric divides the space completely, absorption coefficients increase to the order of 20% due to the minor influence of one of its sides. This fact confirms that transmission coefficients should be considered when simulating its behaviour in acoustic simulation tools. It is therefore a requirement to apply previously obtained the acoustic properties, in order to prevent duplication of errors at low frequencies.*
- *When considering the hanging textiles placed under the arches delimiting the central nave of the aisles in the ecclesial model, it is found that omission of transmission coefficients bears little effect on the results, as this arrangement does not divide the volumes in both areas, and lets the sound carry.*
- *From the point of view of ISO acoustic parameters, the acoustic effect generated by the arrangement of this type decoration is significant, especially in the parameters related to reverberation. Results might show a greater improvements of acoustic conditions when the fabric is close to the listeners.*
- *When considering temporal and spatial factors and determining a type of activity associated with each of the sound sources (preaching at the altar, chants in the choir, and instrumental music of the organ), it is observed that the greatest negative impact for preaching is prolonged reverberation. In the case of organ music, the early arrival of first reflections negatively affects from preferred values for this type of activity. It is confirmed that the effect of draperies is perceived to a greater extent when the temple is not occupied and at the receivers farthest from the sound source.*

The multifunctional character of cathedrals gave rise to the adoption of different spatial configurations, determined by the use and occupation of the various liturgical areas, with special emphasis on the case of the choir, whose position regulates the spatial organization of the temple. The two main cathedrals of Andalusia, those of Seville and Granada, have provided the case studies of this thesis: the first thanks to the variety of events held within its walls, either belonging to the past or the present time, some of which were highly decorated and led to a rich ephemeral architecture; and the Cathedral of Granada for its spatial transformations related to the variation in choir position, mainly in terms of its transfer from the central position in the main nave.

tipo de actividad. Se confirma que el efecto de las colgaduras se percibe en mayor medida cuando el templo no está ocupado y en los puntos más lejanos a la fuente sonora.

El carácter multifuncional de las catedrales dio lugar a la adopción de diferentes configuraciones espaciales, determinadas por el uso y la forma de ocupación de las distintas zonas litúrgicas, destacando el caso del coro, cuya posición articula la organización espacial del templo. Las dos principales catedrales de Andalucía, las de Sevilla y Granada, han sido las principales muestras de estudio en esta tesis doctoral: la primera de ellas por la variedad de eventos desarrollados en su interior, tanto pertenecientes a épocas pasadas como a la época actual, algunos de ellos ampliamente decorados, lo que ha dado lugar a una rica y documentada arquitectura efímera; y la catedral de Granada por las transformaciones espaciales llevadas a cabo con motivo de la variación de posición del coro, principalmente su traslado desde su posición central en la nave principal.

En la catedral hispalense se han analizado aquellas configuraciones generadas en distintas zonas del templo con motivo del desarrollo de singulares eventos pretéritos e importantes conciertos musicales de asistencia masiva. Su análisis ha facilitado la proposición de posteriores intervenciones acústicas que mejoren la calidad acústica percibida por los asistentes:

- A pesar de que las exigencias acústicas no son tan estrictas con respecto a las de las salas de conciertos, se ha comprobado que la valoración de la catedral en su estado actual se aleja de alcanzar los valores recomendados en cada uno de los parámetros acústicos.
- El análisis de los resultados permite confirmar que la incorporación masiva de público en el crucero supone una mejora sustancial de las condiciones acústicas de la catedral para la celebración de conciertos, disminuyendo la reverberación en casi un segundo. Lo mismo sucede con los parámetros energéticos, principalmente en aquellas zonas de audiencia ubicadas a una distancia de la fuente sonora inferior a 30 metros, en el caso de las naves laterales, o 35 metros si la audiencia se sitúa en el crucero, lo que supone un 77% y un 45%, respectivamente, de la totalidad de los oyentes. En cualquier caso, no resultan de por sí suficiente estas dos formas de acondicionamiento del crucero, correspondientes a configuraciones actuales adoptadas durante conciertos masivos, para lograr unas condiciones acústicas idóneas.
- Como medidas correctoras compatibles con el valor patrimonial de la catedral, se han propuesto dos tipos de actuaciones: intervenciones asociadas a la ocupación de público, delimitando un área con adecuadas condiciones acústicas y que incluye la introducción de una grada en la parte posterior del crucero; e intervenciones que, de

In the cathedral of Seville, an analysis was performed of those configurations created in different parts of the temple on the occasion of singular past events and important musical concerts that commanded on massive attendance. Its analysis has paved the way for the subsequent proposal acoustic interventions that improve perceived sound quality:

- *Although acoustic requirements here are not as strict with regard to those of concert halls, it was found that acoustic assessment of the cathedral, in the current state, remains far from achieving the optimal values of each of the acoustic parameters.*
- *The analysis of the results confirms that massive attendance in the transept is a substantial improvement of the cathedral acoustics for holding concerts, by reducing the reverberation by almost a second. The same is true for the energy parameters, mainly in audience zones located closer than 30 metres from the sound source, in the case of the aisles, or 35 metres if the congregation is located in the transept, which corresponds to 77% and 45% respectively of all listeners. In any case, these two forms of occupation, which correspond to current configurations adopted during massive concerts, are insufficient to achieve suitable acoustic conditions.*
- *Two types of actions were proposed as corrective measures compatible with the heritage value of the cathedral: interventions associated with occupation, by defining an area with suitable acoustic conditions, and by introducing a grandstand in the back of the transept; and interventions that require covering the surfaces of the pillars closest to the audience zone with textile material. These actions enable the adjustment to optimal values of reverberation time. Moreover, there is a significant increase in the percentage of audience areas where acoustic parameters provide acceptable values for the entire proposed capacity of 1,500 people.*
- *A great influence is perceived on all the acoustic parameters following the incorporation of a large quantity of ephemeral architecture of singular past events, where the source is located in the Main Chancel (Royal canonization of San Fernando and Holy week), with a marked effect in reverberation time. In addition, there is a great improvement from the acoustic point of view when, in certain festivities, hanging textiles were arranged that closed the entrance of side chapels, since a large percentage of the energy cannot be transmitted through the material. Specifically, intelligibility could be considered as "acceptable" with this type of intervention.*
- *In the case of holding events in the trascoro of the cathedral, can be stated that improvement of acoustic conditions is slightly more favourable when the sound source is located on a platform, in front of the temple gate. With the addition of hangings on the pillars, STI values become "acceptable" even at a distance of 25 metres from the sound source, a length that may be extended to 30 metres in the case of the massive*

manera efímera, revistan con materiales textiles las superficies de los pilares más próximos a las áreas de audiencia. Con estas actuaciones se logra ajustar los valores de la reverberación a los valores recomendados. Al mismo tiempo se logra aumentar notablemente el porcentaje de las áreas de audiencia donde los parámetros acústicos tienen unos valores aceptables para la totalidad el aforo propuesto de 1.500 personas.

- Se observa una gran influencia en la totalidad de los parámetros acústicos tras la incorporación de gran cantidad de arquitectura efímera con motivo de singulares festividades pasadas donde la fuente se localiza en la Capilla Mayor (canonización de San Fernando y Semana Santa), siendo más significativo su efecto en la reverberación. Asimismo, se produce una gran mejora desde el punto de vista acústico cuando, en determinadas festividades, se disponían colgaduras textiles cerrando las capillas laterales, ya que un gran porcentaje de la energía no es capaz de ser transmitida por el material. En concreto, con este tipo de intervención la inteligibilidad podría ser considerada como "aceptable".
- En el caso de desarrollar eventos en el trascoro de la catedral, se puede afirmar que la mejora de las condiciones acústicas es ligeramente más favorable cuando la fuente sonora se ubica en una plataforma frente a la puerta del templo. Con la incorporación de colgaduras en los pilares los valores de STI llegan a ser "aceptables" incluso a una distancia de 25 metros a la fuente sonora, una longitud que puede prolongarse a 30 metros en caso de ocupación masiva del trascoro. No obstante, el elevado número de anchos pilares genera varias zonas sin visibilidad ni sonido directo que dificultan el seguimiento de la actividad desarrollada, en el caso de adoptar la configuración de ocupación masiva.

En la catedral de Granada se han estudiado las reformas llevadas a cabo en su espacio interior a lo largo del tiempo, atendiendo al traslado del recinto coral y a la influencia de distintos tipos de música en la valoración acústica:

- Al evaluar cada uno de los modelos con su correspondiente fuente sonora asociada, ha sido posible estudiar la adecuación acústica de cada uno de ellos en función de la posición del coro. Se ha comprobado que los resultados en los parámetros evaluados en todos los modelos se alejan de los valores recomendados, obteniéndose una mejor adecuación acústica en los recintos corales. Fuera de los mismos disminuye considerablemente la llegada de reflexiones tempranas, determinando la relación obtenida entre la energía inicial y tardía que llega al oyente. Si se tienen en cuenta la totalidad de los receptores estudiados, los valores generales de C_{80} y T_s son más adecuados con el modelo carente de coro (M_3).

occupation of the trascoro. However, in this configuration the high number of wide pillars creates several areas without visibility and direct sound, which makes it difficult for some members of the congregation to pay attention to the event.

The reforms carried out over time inside the cathedral of Granada were studied, including the transfer of the choir and the influence of different types of music on acoustic assessment:

- When evaluating each of the models with their corresponding sound source, it was possible to study the acoustic suitability of each model depending on the position of the choir. It was found that the results of the evaluated parameters in all models deviate from the optimal values, and a better acoustic suitability was obtained in choir enclosures. The arrival of early reflections considerably decreases outside these enclosures, which determines the ratio between the early and late energy that reaches the listener. When all receivers are considered, then the general values of C_{80} and T_s are better suited to the model without choir (M3).
- When the sound source, similarly positioned in the three models is evaluated, then conclusions can be drawn regarding the model itself, regardless of the source-receiver distances. Despite the absence of visual obstacles in M3, with a very open space, the decrease of first reflections affects the overall deterioration of the acoustic conditions. In this case, the model that provides a better sound quality, both in objective and subjective terms, is the model with the choir placed at the main chancel (M2). The worst results were obtained in the IACC parameter, since sound signals heard in the cathedral are very similar from both sides, with IACC values close to 1. By carrying out subjective tests, it was later shown, that in the evaluation of listener perception, these results were not confirmed.
- When considering multiple sound sources, variations in terms of reverberation remain imperceptible, while variations in the parameters C_{80} and T_s are markedly noticeable, especially when source-receiver distance is increased.

Finally, subjective tests with listeners were carried out in order to determine the perception by the subjects when given a stimulus in a specific scenario, among which a cathedral was included. By means of statistical methods this task yields the evaluation of the importance of providing spatial information according to the scale of the room, the type of stimuli, and the synthesizing of the signal. To this end, the main subjective attributes were considered: location, spatial impression, and sense of realism:

- It has been confirmed that, when listening to a mono signal, the listener completely loses the perception of the precedence of the lateral monaural sound, regardless of the factors of space and stimuli. As expected, this does not occur in the case of binaural reproduction.

- Cuando se valora la fuente sonora igualmente posicionada en los tres modelos, se pueden obtener conclusiones respecto de la propia configuración, independientemente de las distancias fuente-receptor. A pesar de la ausencia de obstáculos visuales en M₃, con un espacio muy diáfano, la disminución de primeras reflexiones repercute en el deterioro general de las condiciones. En este caso el modelo que proporciona una mejor calidad acústica, tanto en términos objetivos como subjetivos, es aquel con el coro en el presbiterio (M₂). Los peores resultados se obtienen en el parámetro IACC, dado que las señales en la catedral procedentes de ambos lados son muy similares, con valores IACC próximos a 1. Posteriormente, mediante la realización de ensayos subjetivos, se ha demostrado que no ocurre lo mismo al valorar la percepción del oyente.
- Al evaluar la multiplicidad de fuentes sonoras, se observa que las variaciones obtenidas en la reverberación son imperceptibles, mientras que en los parámetros C₈₀ y T_s son obviamente notables, especialmente al aumentar la distancia fuente-receptor.

Finalmente, se ha procedido a la evaluación subjetiva con oyentes, con objeto de determinar la percepción de los sujetos al reproducir un estímulo en un escenario específico, entre los que se incluye una catedral. Esto ha permitido evaluar mediante métodos estadísticos la importancia de proporcionar información espacial de acuerdo a la escala del recinto, el tipo de estímulo escuchado y la sintetización de la señal. Para ello se han considerado los principales atributos subjetivos: localización, impresión espacial y sensación de realismo:

- Se ha confirmado que, al escuchar una señal monoaural, independientemente de los factores de espacio y estímulo, el oyente pierde por completo la percepción de procedencia del sonido lateral monoaural. Tal como cabía esperar, no ocurre lo mismo en el caso de la reproducción binaural.
- La evaluación de la anchura aparente de la fuente sonora (ASW) ha determinado una interacción estadísticamente significativa entre los factores, ya que la percepción de ASW considerando el tipo de espacio no es la misma si se convoluciona palabra o música, y no se percibe de la misma manera si se sintetiza de forma binaural o monoaural. En caso de analizar pares de factores, se ha demostrado que cuando el sujeto escucha la señal monoaural, éste pierde drásticamente la sensación de amplitud de la fuente en los espacios de pequeña escala, mientras que en los espacios reverberantes se mantienen los valores altos. Al establecer una relación entre este atributo y la fracción de energía lateral (LF), parámetro acústico objetivo con el que guarda una íntima correlación, se ha observado una falta de correspondencia. Esto puede justificarse debido a que la energía tardía reflejada es espacialmente difusa, y la llegada de sonido directo queda parcialmente enmascarada por la reverberación del espacio.

- *The evaluation of the apparent source width (ASW) determined a statistically significant interaction between factors, since the perception of ASW when considering the type of space is not the same for convolved speech and for music stimuli, and it is not perceived similarly if the signal is binaural or monaural. In case of analysing two factors, it has been shown that when the subject listens to a monaural signal, then this person dramatically loses sensation of the apparent source width in spaces on a small scale, while values remain high in reverberant spaces. When establishing a relationship between this attribute and the lateral energy fraction (LF), an acoustic parameter with which a close correlation is maintained, a mismatch was observed. This can be justified because the late reflected energy is spatially diffuse, and the arrival of direct sound is partially masked by the reverberation of the space.*
- *The sense of envelopment in space (LEV) decreases when a musical signal is heard, due to its tendency to mask this sensation. It was found that, in reverberant spaces such as cathedrals, there is no statistically significant difference when comparing the values provided by the same signal synthesized as either binaural or monaural, with a sense of immersion in both cases.*
- *In general, listeners perceive a greater sense of presence in space when the binaural signal is heard and when music is reproduced instead of the spoken word. Regarding the relationship between the subjective preference of binaural signals and IACC parameter values, it is observed that in the cathedral, where IACC values approach 1, the listener shows no clear preference for spatial information in the sound reproductions. This means that the binaural sensation approaches monaural behaviour in the cathedral, and that the lack of this information is not significant due to the prolonged reverberation.*

In summary, the development of this thesis mainly aims to recover the historical legacy of cathedrals through the reconstruction of their sound, as an intangible value, following a detailed research into the forms of bygone or ephemeral configurations for different uses of these spaces. In addition, this PhD dissertation provides a new way of valuation of the heritage of the cathedrals of Seville and Granada, which gain value as spaces capable of hosting great multitudinal events by means of the combination and adaptation of formal and functional values to the acoustic requirements. This work is carried out taking into account both the demands of contemporary society and respect for the value of heritage, through a series of proposals that make use of the new methods available today that can predict not only new sound events but can also recover historical sound sensations.

- La sensación envolvente en el espacio (LEV) disminuye al escuchar una señal musical por su cierta tendencia a enmascarar esta sensación. Se ha comprobado que, en espacios reverberantes como las catedrales, no existen diferencias estadísticamente significativas al comparar los valores proporcionados al escuchar la misma señal sintetizada de forma binaural y monoaural, con una sensación de inmersión en ambos casos.
- En general, los oyentes han considerado una mayor sensación de presencia en el espacio cuando la señal escuchada es binaural y cuando se reproduce música en lugar de un discurso hablado. Al atender a la relación entre la preferencia subjetiva por las señales binaurales y los valores del parámetro IACC, se observa que en la catedral, donde los valores de IACC se aproximan a 1, el oyente no presenta una clara predilección por la información espacial en las reproducciones sonoras. Esto significa que la sensación binaural se aproxima en la catedral a un comportamiento monofónico, y que la carencia de esta información no resulta ser significativa dada la prolongada reverberación.

En resumen, con el desarrollo de esta tesis principalmente se ha pretende recuperar el legado histórico de las catedrales a través de la reconstrucción de su sonido, como valor intangible, tras una detallada investigación sobre las formas de uso y organización pretéritas o efímeras para diferentes usos de estos espacios. Además, en esta tesis doctoral se ofrece una nueva forma de valoración del patrimonio de las catedrales de Sevilla y Granada, las cuales adquieren valor como espacios capaces de acoger grandes celebraciones multitudinarias, mediante la conjunción y adaptación de los valores formales y funcionales con los requisitos de carácter acústico. Esta labor se desarrolla contemplando tanto las exigencias de la sociedad contemporánea como el respeto al valor patrimonial, mediante una serie de propuestas de intervención que hacen uso de nuevos métodos, hoy disponibles, que permiten predecir tanto nuevos acontecimientos sonoros como recuperar sensaciones sonoras en el tiempo.

BLOQUE B

PUBLICACIONES EN REVISTAS

PUBLICACIONES EN REVISTAS INDEXADAS EN ISI-JCR

A continuación, se exponen cada uno de los cinco artículos publicados en revistas indexadas en JCR, presentándose en una versión maquetada con formato distinto al de la publicación en sí misma. Tal como se indicó en las secciones previas, todas las publicaciones se han desarrollado siguiendo una línea de investigación sobre la acústica de los espacios de culto y mayoritariamente están escritos por la autora de la tesis y sus dos directores.

ARTÍCULO 2

ARCHAEOACOUSTICS OF INTANGIBLE CULTURAL HERITAGE: THE SOUND OF THE MAIOR ECCLESIA OF CLUNY.

AUTORES: Suárez, R.; **Alonso, A.**; Sendra, J.J.

REVISTA: Journal of Cultural Heritage 19 (2016) pp. 567-72.



ARTÍCULO 3

INTANGIBLE CULTURAL HERITAGE: THE SOUND OF THE ROMANESQUE CATHEDRAL OF SANTIAGO DE COMPOSTELA.

AUTORES: Suárez, R.; **Alonso, A.**; Sendra, J.J.

REVISTA: Journal of Cultural Heritage 16 (2015) pp. 239-243.



ARTÍCULO 4

ROOM ACOUSTIC MODELING OF TEXTILE MATERIALS HUNG FREELY IN SPACE: FROM THE REVERBERATION CHAMBER TO ANCIENT CHURCHES

AUTORES: **Alonso, A.**; Martellotta, F.

REVISTA: Journal of Building Performance Simulation 9 (5). (2016) pp. 469-486



ARTÍCULO 5

ACOUSTIC EVALUATION OF THE CATHEDRAL OF SEVILLE AS A CONCERT HALL AND PROPOSALS FOR IMPROVING THE ACOUSTIC QUALITY PERCEIVED BY LISTENERS

AUTORES: **Alonso, A.**; Sendra, J.J; Suárez, R; Zamarreño, T.

REVISTA: Journal of Building Performance Simulation 7 (5) (2014) pp.360-378.



BLOQUE C

PUBLICACIONES EN REVISIÓN

PUBLICACIONES EN FASE DE REVISIÓN EN REVISTAS INDEXADAS

En esta sección, se expone el contenido de otros dos artículos que han sido enviados a revistas indexadas en JCR, y que actualmente se encuentran en fase de revisión. Estos trabajos se añaden al conjunto de los resultados publicados y presentados en secciones anteriores, completando la investigación seguida sobre la acústica de los espacios de culto.

ARTÍCULO 6

VIRTUAL RECONSTRUCTION OF INDOOR ACOUSTICS IN CATHEDRALS: THE CASE OF THE CATHEDRAL OF GRANADA

AUTORES: **Alonso, A.**; Suárez, R; Sendra, J.J

ABSTRACT

Virtual acoustics provides a highly useful tool for the investigation into the influence that spatial transformations may exert on indoor acoustics of cathedrals, which are remarkable spaces due to their heritage value, complexity and multifunctional character. The spatial organization of cathedrals is primarily governed by the location of the choir, which represents the main musical expression. Following various reforms, certain European cathedrals undertook a relocation of the choir stalls from their original position. The Cathedral of Granada is a highly significant case. Since its original construction, three major changes have occurred due to the relocation of the choir. In this article, simulation of indoor acoustics is employed to recover the soundfield in each of these three configurations. An extensive analysis compares the results of the main acoustic parameters in each of the virtual reconstruction models. Consequently, acoustic models are created and then calibrated based on a campaign of onsite measurements.

ARTÍCULO 7

SIGNIFICANCE OF BINAURAL SYNTHESIS ON THE SPATIAL ACOUSTIC IMPRESSION OF ENCLOSURES

AUTORES: **Alonso, A.**; Murillo, D. M.

ABSTRACT

Listening tests were conducted to investigate about the ideal missing when a monaural signal is reproduced in comparison to a binaural signal in terms of perception. For this, speech and music anechoic signals were convolved with synthesized mono and binaural room impulse responses of three spaces, each of them with different acoustic properties. The auralizations were evaluated by means of subjective ratings using headphones with non-individual equalization. Parameters such as localization, spatial impression and realism were considered to analyse how subjects feel when a given stimuli is reproduced in a specific auralization scenario, both binaural and monaural. The analysis of the data has been carried out following a statistical approach based on ANOVA and Pearson correlation. The main outcome of this research is to determine the significance of providing spatial information according to the scale of the enclosure and the type of stimuli listened.

BLOQUE D

PUBLICACIONES EN ACTAS

RESULTADOS PUBLICADOS EN ACTAS DE CONGRESOS

A continuación, se exponen cada uno de las cinco comunicaciones publicadas en los libros de actas de los diferentes congresos, presentándose en una versión maquetada con formato distinto al de la publicación en sí misma. Al igual que ocurría con las publicaciones en revistas internacionales, todas las publicaciones se han desarrollado siguiendo una línea de investigación sobre la acústica de los espacios de culto y mayoritariamente están escritos por la autora de la tesis y sus dos directores.

COMUNICACIÓN 1

THE EFFECT OF FESTIVE DECORATIONS ON CHURCH ACOUSTICS FROM A TEMPORAL DESIGN PERSPECTIVE.

AUTORES: **Alonso, A.**; Martellotta, F.

CONGRESO: Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration ,
Volume 7 (2015) pp. 5765-5773.



THE EFFECT OF FESTIVE DECORATIONS ON CHURCH ACOUSTICS FROM A TEMPORAL DESIGN PERSPECTIVE

Alicia Alonso

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Universidad de Sevilla, Avenida Reina Mercedes 2, 41004 Seville, Spain.

e-mail: aliciaalonso@us.es

Francesco Martellotta

Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile e dell'Architettura, Politecnico di Bari, via Edoardo Orabona 4, 70126 Bari, Italy

Different methods of decoration were used in worship spaces during the celebration of major events which were hosted inside them throughout history. In particular, addition of textiles was one of the most important components of ephemeral architecture of churches on which the preparation of the interior space was based. The presence of various kinds of fabrics was a singular measure which was likely to affect the acoustics of the space, mainly depending on the placement, properties and amount of the material. Among the diverse ways of arrangement, one of the most interesting and, at the same time, challenging from the acoustic point of view was when textiles were hung in the middle of the space, dividing naves or side chapels. In fact, tapestries show significant acoustic variability depending on their distance from rigid surfaces and on their absorption and transmission coefficients. In order to investigate on the effect that this intervention may have on church acoustics, simulation by means of geometrical acoustic modelling can be a very useful tool to investigate such changes. Consequently, a computer model of an idealized church having a typical basilica plan was built using CATT Acoustic software and hung tapestries were located between naves inside the model. Acoustic properties of these textiles were first determined in scale-down models in order to characterize both their absorption and transmission properties. Then, after checking the agreement between scaled-down and computer models, the effect of a “full” installation (also including occupancy) was investigated using geometrical acoustic model so that binaural IRs could be determined. Finally, the effect of inclusion of free hanging textiles and draperies on both monaural and binaural parameters as well as on temporal parameters is discussed.

1. Introduction

The interior space of churches has been usually characterized by the abundance of luxurious shrines, large canvases and ornate altarpieces. However, a type of decoration of ephemeral character, which could be removed if needed to return to the original state, was arranged only for singular occasions in order to transform the image of the temple depending on its functional needs. This kind of ornamentation was promoted by the addition of a wide decorative variety of fabrics such as silks, damasks and velvets.

Different arrangements were defined according to the position, the quantity and type of material chosen for the sample, which influenced the meaning and purpose of its incorporation.

Even though the intention of these additions was primarily visual, to bring distinction to such events, a clear influence on the acoustic behaviour of church space was also noticeable. Inclusion of hangings and tapestries that covered much of the wall surfaces were some of the elected measures on which the preparation of the inside of the church was based. However, one of the most significant from an acoustic point of view was the location of free hangings and draperies between adjoining spaces, such as aisles or chapels, where the effect on sound absorption and transmission due to the lack of a rigid surface behind the fabric, caused different behaviour.

The aim of this work is to analyse the acoustic effect after the full installation of hanging curtains inside an idealized church space by using geometrical acoustic software. Monaural and binaural parameters will be discussed having in mind the "temporary design" approach as defined by Ando [1].

2. Methods

2.1 Room description

As the purpose of the paper was to evaluate the effect of textiles on the acoustics of a church by means of a geometrical acoustic model, and the primary concern in such cases is a proper characterization of the materials, a mixed approach, taking advantage of measurements made in scaled down models, was used. The scaled down measurements was mainly used to provide absorption and transmission coefficients for textile materials hung freely in the space rather than at close distance from hard reflecting walls. The characterization of materials was performed in a scaled down (1:20) simplified model of a basilica-plan church (Fig. 1), the same geometrical configuration was subsequently used to investigate the effect of textiles under full-scale conditions using a geometrical acoustic model.

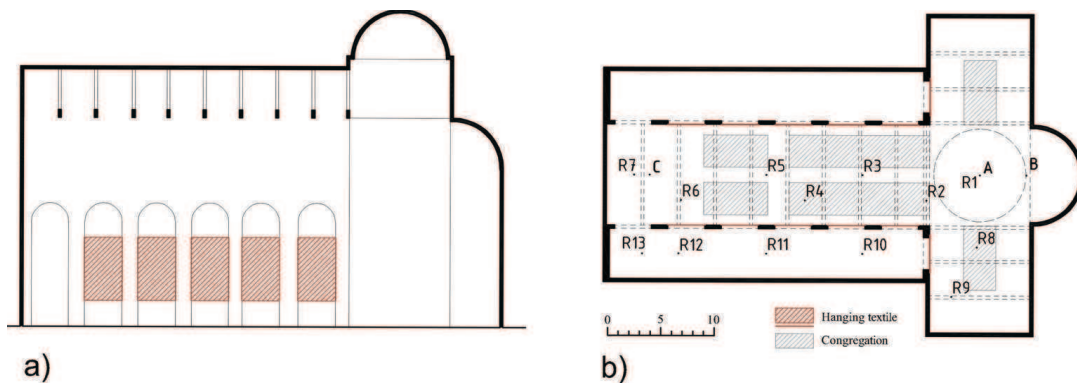
The church scale model was built using only two types of materials: 4 mm thick methacrylate for curved vaults and domes, and 14 mm thick medium density fibreboard (MDF) for the other surfaces. MDF walls were also varnished with transparent coating in order to reduce sound absorption. Dimensions of the model were 1.5 meter high and 2 meters long, which means a full-scale volume of about 18000 m³. T30 and the remaining parameters were in good agreement with typical values found in churches of same typology and dimensions.

Two sound source positions were considered, both representing regular positions of the natural sources: one of them located in the middle of the transept (A) and the other placed in the apse (B). Twelve receiver positions were distributed throughout the whole space (central nave, transept and aisles) (Fig. 1).

As in scaled-down models acoustic properties of materials are referred to frequencies that are increased by a factor equal to that used to reduce the geometry, great care must be taken in order reproduce the desired acoustic effects. In particular, as curtains are porous absorbing materials whose absorption depends on density, flow resistivity and thickness, considerably lighter and thinner materials need to be used in order to achieve the desired result. Among the different materials tested, the one which showed the best characteristics and the most similar behaviour compared to real scale textiles was a thin cotton fabric (235 g/m²). Absorption coefficients calculated in the scaled-down church according to the ISO 354 [2] procedure are given in Table 1, together with the transmission coefficients calculated according to a simplified procedure in which direct sound attenuation (under normal incidence conditions) was determined through comparison between free field measurements with and without the material under test.

Table 1. Absorption and transmission coefficients measured in scaled-down model. Absorption values are calculated assuming that both surfaces of the hung material contribute.

	<i>Frequency [Hz]</i>			
	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>
Abs. Coeff.	0.23	0.29	0.38	0.45
Transm. Coeff (normal incidence)	0.69	0.53	0.49	0.51

**Figure 1.** Transversal section and floorplan of the full-size church model. Position of sources, receivers and hanging textiles considered in the measurements.

The analysis of the differences appearing in church acoustics as a consequence of addition of textile materials was carried out using the CATT Acoustic suite (using, in particular, the new TUCT v1.0 engine). After recreating the geometrical model, a first calibration procedure was made in order to define the absorption coefficients of the surfaces. Considering the relatively small percentage of total area covered by methacrylate, a uniform absorption coefficient was assigned to all the surfaces. This calibration procedure was not strictly necessary for the purpose of the present analysis, as the objective was to compare the differences due to additional materials, but it was nonetheless useful in order to compare the accuracy in the simulated results, considering that transparency was involved.

The number of rays used for the calculation was set manually at 100,000 and the truncation time was set as a function of the reverberation time obtained in the scale model. Hanging textiles were considered as two-sided faces, so that properties were assigned for each of them. Bearing in mind the ability of textiles to transmit sound, transmission coefficients were also assigned to fabric surfaces. In this step, as CATT handles transmission coefficients as the fraction of the energy that is not absorbed, rather than of the incident energy, measured values were converted according to Eq.(1):

$$(1) \quad \tau_c = \tau / (1 - \alpha)$$

Subsequent calibration showed a good agreement between scaled-down and computer model. Agreement was checked first with reference to reverberation time values, proving that T30 differed by less than one just noticeable difference (JND). Then the other acoustic parameters such as EDT, C80, D50 and T_s, were also checked in the following steps, assuming as JND values those specified both in ISO 3382-1:2009 [3] and in Martellotta [4].

In order to analyse the impact of hanging textiles and congregation, various hypotheses were considered: one of them corresponding to the reference model without decoration, and other corresponding to the addition of textiles type 1 (T1). These two computer models were also simulated both in empty (Ref_e and T1_e) and occupied conditions (Ref_o and T1_o), considering 150 m² of congregation sit on wooden pews (Fig. 1).

Table 1. Absorption and transmission coefficients obtained from calibration of computer models, and applied on hanging textiles (based on values calculated from onsite measurements).

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz
α_c	0.26	0.31	0.42	0.55
τ_c	0.92	0.74	0.79	0.94

2.2 Acoustic evaluation and temporal design

Throughout time, acoustic parameters have established links with subjective aspects of human hearing. Brain response to perceived sounds have been analyzed developing methods of electro-neuro-physiological analysis that led to the definition of a model of hearing, developed by Ando, which is based on the specialization of auditory information processing by each cerebral hemisphere. Consequently, Ando's theory to design physical environments uses signals received by both the left and the right ear, processed through operations of auto-correlation and cross-correlation, therefore, it takes into consideration temporal factors together with spatial factors based on brain activities. This makes subjective parameters to describe not only depend on the acoustics, but also by sound processing capabilities in the human brain. In fact, neuro-physiological evidence suggests that such temporal data contains information about important musical qualities [5].

Previous subjective studies [6] have shown that different parameters, obtained from measurements of the impulse responses, are related to the particular subjective aspects of the sound character of an audience. In this study, the main aim is to describe the acoustical quality of the church in terms of temporal design. As the position of the receivers already used in the scale model offered a sufficient coverage of the main listening areas in the church, the same number and position of measurement points was kept in the simulation. Conversely, for sources it was interesting to investigate also a source position which better represents the organ, together with one representing the priest (A), and one representing the choir (B). Thus, a new source (C) located at the top of the entrance wall (opposite to the altar), at a height of 8 meters was used, together with source A and B.

The acoustic quality of the church was described by the four orthogonal parameters identified by Ando:

- Listening level of sound (LL), which coincides with SPL (A-weighted), the primary criterion for listening to the sound that describe the spatial distribution inside the church.
- Delay of first reflection (Δt_1), defined as the physical time between the direct sound reaching the listener and the first reflection. These values were analytically determined using image source model (ISM) calculated by CATT Acoustic.
- Subsequent reverberation time of the signal after the early reflections (T_{sub}). This parameter was calculated according to conventional procedures and coincides with T30.
- Inter Aural Cross Correlation (IACC) that measures the similarity in sound signals arriving at the two ears. This parameter determines degrees of subjective diffuseness and the preference of sound perception.

Once these values are calculated at each source-receiver combination, they can be converted into scale values (S_i), that actually measure how much the parameter deviates from optimal. So, by adding the four S_i , the total scale value can be obtained [5].

2.3 Definition of optimal values

In order to calculate each scale value S_i , it is preliminary necessary to define the optimum design values, meant as the subjectively preferred sound qualities for the given environment. By researching about responses of humans to sound, and the way sound information is processed by the left and right hemispheres, it is found that the basis for the definition of most of the preferred conditions is related to actual duration of autocorrelation envelope (τ_e), which is extracted from auto-correlation function (ACF). Now, τ_e is largely dependent on the sound signal that is played, therefore in order to state the

acoustic quality of a room, some hypotheses are needed about the repertoire that will be played inside it. For churches, speech is certainly an important aspect to be considered, particularly for places that are still in use and need to satisfy the requirements of the 2nd Vatican Council. However, music and chants always represented an important part of the religious rite, and they are known to have specific features when composed for a given church. Usual values of τ_e are below 20 ms for speech, and may vary over a large interval (but usually tend to be quite large), for music and chants. For the purpose of the present discussion, an average value of 20 ms was used for speech, a value of 90 ms was used for chants, and a value of 150 ms for organ music.

Based on these assumptions, considering the approximate relationship for the most preferred delay time and τ_e , then:

$$(2) \quad [\Delta t_1]_p = \tau_p \approx (1 - \log_{10} A_1) \tau_e$$

where A_1 is the relative pressure amplitude of the first reflection compared to direct sound. In this study, considering that at farther receivers correspond both a weaker direct sound and weaker reflections, a simplified approach was followed, assuming the most preferred delay time (Δt_{1p}) just equal to τ_e value resulting from the different music motifs [4].

The most preferred subsequent reverberation time $[T_{sub}]_p$ also depends on τ_e and it is assumed to be approximately $23\tau_e$. About the optimum values of the listening level, it clearly depends on the performance and on the number of instruments/players, therefore it is conventionally evaluated assuming as the preferred value the level in a specific point of the room, in this case taken approximately at 15 meters from the source (R04 for A and C, and R03 for B). For IACC, as the dissimilarity of signals arriving at the two ears is preferred, the most preferred value is assumed to be 0.

3. Results

At first, variations of each individual parameters (T_{sub} , Δt_i , LL and IACC) following the addition of textiles, as a function of source position, are described. Then, by representing how these factors influence the linear scale value, it could be possible to understand where and why subjective preference decreases. As stated before, a different τ_e was chosen for each source, based on the assumption that source A is likely to be used for speech and preaching, source B can well represent a choir singing chants, while source C is used for organ music. This choice has strong consequences on the individual (and then total) scale values. In fact, T_{sub} has the strongest negative influence on total scale value for speech (source A) because of its low optimum values. A reverberant space like a church is far from reaching so small values ($T_{subp} \approx 0.50$ s). At the same time, except in the aisles, it was observed that delay time values obtained in the church do not greatly differ from the most preferred for this activity ($\tau_p \approx 20$ ms). This was not the same when the source was located in the apse (B), where there was an opposite effect. Preferred reverberation values were longer, being better suited to the acoustic behaviour of the church, however, the optimum delay time was higher in this case ($\tau_p \approx 90$ ms), while early reflections arrived usually within 30 ms. As for the source C, due to its raised position and the longer preferred τ_e requirement for organ music, it can be noted that Δt_i values, which were reasonably shorter, behaved severely worse, getting the poorest quality values. Referring to LL values, the closest points to the sound source, the most negative impact on acoustics of the church was observed. This fact occurred in A, B and C, and resulted in values quite homogeneous in most of the floor area except for those near the sources (Fig.2). As could be predicted, IACC parameter, got almost similar signals arriving at closest receivers, therefore resulting in a bigger negative scale value.

General variations were appreciated in all receivers when the textiles were arranged in unoccupied conditions (Fig.3), reaching a range of dissimilarity between 0.5-0.7 for source A and 0.2-0.4 for source B on the linear scale value. Conversely, when the considered source was the organ (C), a slightly worse condition was observed after adding decoration.

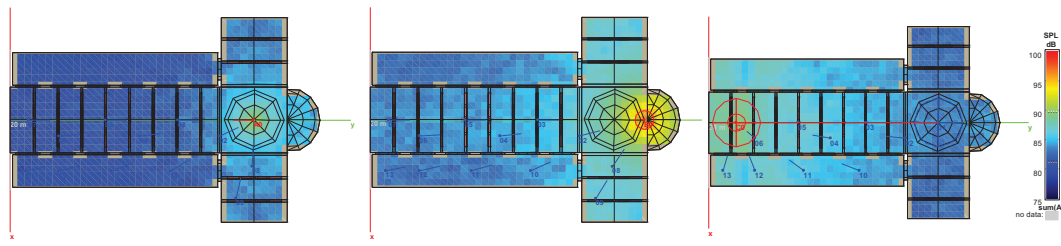


Figure 2. Spatial maps of SPL for Ref_e setting in the church model

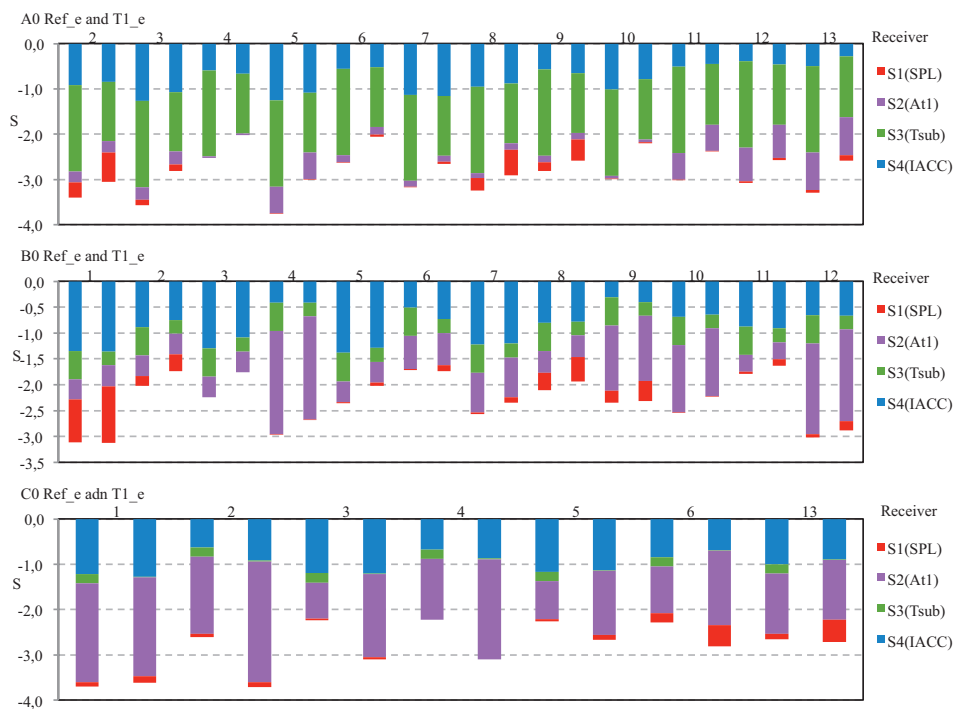


Figure 3. Influence of the different parameters considered on the linear scale value of each receiver, on unoccupied conditions, as a function of source position.

When occupied conditions were analysed (Fig. 4), the situation differed from the previous. In general, S -values were lower than the above and, in this case, the arrangement of fabrics had little impact on subjective perception, as variations were less significant than in unoccupied settings (source A and B). Again source C behaved in a different way, showing a general worsening of the scale value, due to Δt_i values.

Finally, in order to understand whether from a subjective point of view the presence of the curtains could lead to audible variations, the JND variations were calculated for all receivers [3,4], both when the church was empty as when the congregation was added (Fig. 5). In the former case variations were clearly larger, and led to audible differences only for T_{sub} , and, to a minor extent, for LL, following the introduction of fabric that added a significant amount of sound absorbing materials.

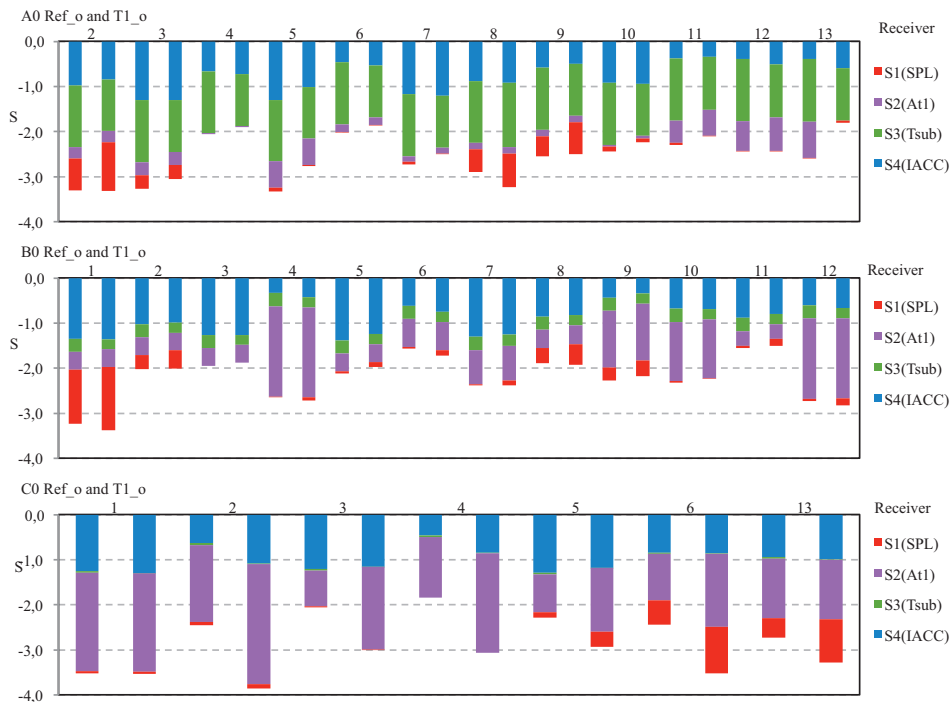


Figure 4. Influence of the different parameters considered on the linear scale value of each receiver, on occupied conditions, as a function of source position.

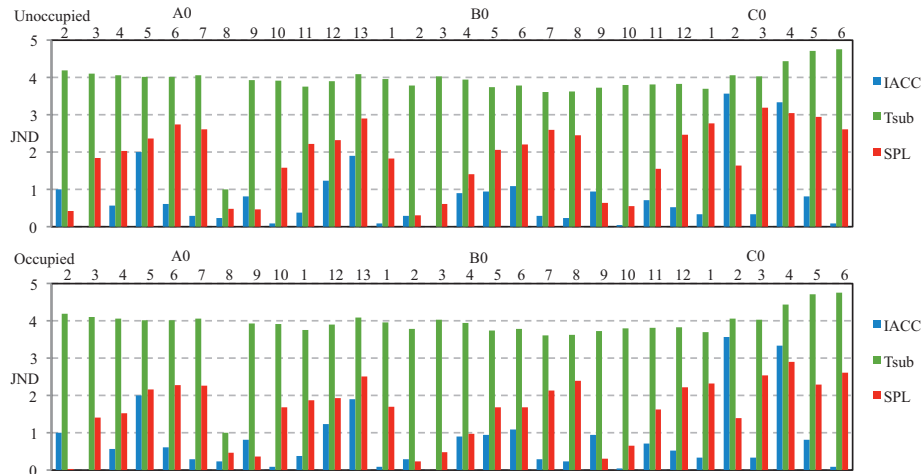


Figure 5. JND values for each parameters both between unoccupied and occupied conditions, when the textiles were added.

4. Conclusions

Inclusion of fabrics as a decorative element in religious spaces has been a widely used technique throughout history. Taking into account the nature and amount of materials disposed, it is interesting to investigate the significant effect on the acoustic behaviour of these reverberant spaces. In this study, one specific arrangement on which textiles were hung in the arches between two different naves.

The 22nd International Congress on Sound and Vibration

The strongest negative influence of each parameter depends on the location of the sound source together with the intended use of the church. Generally, T_{sub} had the worst impact for speech (source A), while the scale value associated with Δt_i factor increased for source C and even B, where optimum values differed from actual ones. Referring to LL, the obtained results supported the idea that apart from points very close to the source, LL varied marginally, so that negligible values for S were observed. As expected, JND differences were shorter in the closest points to the source and bigger values were observed when the model is empty. In the light of the results, it can be confirmed the perceptible impact of textiles incorporation, mainly in unoccupied settings where S values raised nearly by one unit on linear scale value in some receivers.

Further investigations must be carried out to find a direct relation between measured and predicted coefficients and analysing them in greater detail in order to better understand the acoustic properties of materials with this specific way of arrangement.

Acknowledgments

This work was financially supported by the project entitled “Recuperación y difusión del patrimonio cultural intangible de las Catedrales andaluzas mediante la valoración acústica de su arquitectura efímera” (PATRIMONIUN-10 Ref. 2014/731). One of the authors (A. Alonso) received an FPU grant from the Spanish Government (ref. FPU12/04949).

REFERENCES

- 1 Ando, Y. On the temporal design of Environments, *Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment*, **4** (1), 22-14, (2004).
- 2 ISO 354:2003. *Acoustics-Measurement of sound absorption in a reverberation room*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- 3 ISO 3382-1:2009(E). *Acoustics-Measurement of room acoustic parameters, Part 1: Performance spaces*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- 4 Martellotta, F. Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches, *Journal of Sound and Vibration*, **317**, 378-399, (2008).
- 5 Ando, Y. *Architectural Acoustics: Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*, Springer-Verlag, New York, 26-40, (1998).
- 6 Kenji, F., Takuya, H., Kosuke, K., Ryota, S., Yosuke, O., Yukio, S. and Ando, Y. Spatial Distribution of acoustical parameters in concert halls: comparison of different scattered reflections, *Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment*, **4** (1), 59-68, (2004).

COMUNICACIÓN 2

LA ACÚSTICA DEL CRUCERO DE LA CATEDRAL DE SEVILLA EN LAS GRANDES CELEBRACIONES.

AUTORES: **Alonso, A.**; Suárez, R.; Sendra, J.J.; Álvarez, L.

CONGRESO: Proceedings of Acustica (XLIII Tecniacústica) (2012) pp. 1-10.



LA ACÚSTICA DEL CRUCERO DE LA CATEDRAL DE SEVILLA EN LAS GRANDES CELEBRACIONES

Alicia Alonso, Rafael Suárez, Juan J. Sendra, Lidia Álvarez

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla
{aliciaalonso@us.es, rsuarez@us.es, jsendra@us.es, calvarez6@us.es}

Resumen

La catedral de Sevilla es el más valioso representante del patrimonio cultural en la ciudad, modelo del tipo catedralicio español que fue exportado a Iberoamérica. A diario, con motivo de la actividad litúrgica desarrollada en su interior, el templo se convierte en un lugar de culto y oración, y ocasionalmente compatibiliza esta actividad principal con la celebración de grandes ceremonias organizadas para una gran afluencia de público, como festividades religiosas y conciertos. La organización espacial de la catedral responde al denominado "modo español", en el que el coro se ubica en mitad de la nave central, generando una fragmentación de la misma en dos espacios, que deriva en una falta de visibilidad y de profundidad para alojar al público. De ahí que se haya adoptado una nueva configuración espacial en el crucero de la catedral, que permite aumentar notablemente la capacidad de asistentes a esas grandes ceremonias.

En este trabajo se realiza una valoración acústica de ese acondicionamiento del crucero, a partir del análisis de la simulación de los modelos acústicos generados, calibrados previamente tras la medición realizada in situ, que responden a las organizaciones espaciales y de situación de la audiencia normalmente adoptadas.

Palabras-clave: acústica de iglesias, catedral de Sevilla, catedrales de Andalucía, patrimonio inmaterial, patrimonio cultural.

Abstract

The Cathedral of Seville, whose Spanish typology was exported to Latin America, is the most valued example of the city's cultural heritage. With the daily practice of the liturgy, the building is mainly used for worship and prayer, occasionally combining this with the celebration of major ceremonies, such as religious festivities and concerts, organized for a large audience. Spatially, the Cathedral is organized in the so-called "Spanish style" with the choir located in the middle of the nave, dividing it into two spaces, leading to a lack of visibility and depth for accommodating the public. Hence, a new spatial configuration of the cathedral transept was adopted and significantly increased audience capacity for such ceremonies.

In this paper, an acoustic assessment of the adaptation of the transept is performed, based on the analysis of simulation of the acoustic models generated. These had been previously calibrated after in-situ measurements, corresponding to the usual spatial organization and location of the audience.

Keywords: whorship acoustics, cathedral of Seville, cathedrals of Andalusia, intangible heritage, cultural heritage.

PACS no. 43.55.Gx, 43.55.Ka

1 Introducción

La catedral de Sevilla, edificada en un solar de superficie rectangular de 116 metros de largo por 76 metros de ancho [1], que siglos atrás estuvo ocupado por una antigua mezquita aljama, se convierte en el monumento más representativo de la ciudad. Esta destacada categoría, junto con el hecho de ser el edificio gótico con mayor superficie del mundo, promueve el desarrollo en su interior de magnas celebraciones y ceremonias, para las cuales, además del tradicional escenario litúrgico ubicado en la Capilla Mayor y coro, se establecen nuevas configuraciones espaciales que nunca antes habían sido analizadas. La concepción del templo como un espacio de gran valor histórico y patrimonial, no lo exime de poseer un cierto carácter multifuncional, por lo que en su interior, además de celebrarse la liturgia diaria, se conmemoran las fiestas, las representaciones de dramas, las reuniones de los diferentes gremios y corporaciones locales, siendo la situación de la audiencia el principal aspecto que configura el espacio.

A lo largo de la historia, la preparación del espacio catedralicio hispalense para los eventos multitudinarios: coronaciones, bodas, defunciones, sínodos, magnos conciertos, ha requerido, en la mayoría de las ocasiones, de montajes efímeros con la introducción de una ornamentación específica [2], la cual, ya fuese por los materiales utilizados, la disposición de la misma o la invasión del interior por la gran asistencia de público, aumentaba notablemente la absorción sonora.

La preocupación por las condiciones acústicas en los lugares de culto por parte de la comunidad científica se ha incrementado durante las últimas décadas, dando lugar a diversas investigaciones centradas en el estudio del campo sonoro de dichos espacios [3] [4]. Uno de los motivos que ha potenciado esta actividad es la importancia de la concepción acústica en este tipo de edificios, ya que desde su origen fueron concebidos como lugares de asamblea y reunión, así como de desarrollo de la música coral e instrumental.

La amplia espacialidad, el enorme volumen y la gran escala de estos complejos espacios reverberantes se convierten, a lo largo de la historia, en enemigos ante las diferentes exigencias acústicas, tanto para la palabra como para la música, siendo necesario, casi en la totalidad de los casos, intervenir en su interior mediante diferentes tipos de actuaciones [5], como la aportación de tratamientos absorbentes o la incorporación de un apoyo electroacústico para la palabra. Conviene destacar en este ámbito los estudios de Anderson y Lewer en los que se presentan algunas características sonoras en la catedral de San Pablo de Londres [6] [7], el análisis de Martellotta et al. sobre la existencia de espacios acoplados en la basílica de San Pedro de Roma [8] o los ajustes de acústica variable llevados a cabo por Keppler et al. en la catedral de Boston [9].

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento acústico de la catedral de Sevilla cuando se traslada al crucero el escenario para celebrar grandes eventos con asistencia masiva de público, ya sean litúrgico-religiosos o musicales. Esta valoración acústica se realiza a partir de la simulación de modelos acústicos generados y calibrados previamente, tras la medición realizada in situ [10].

2 La catedral de Sevilla

2.1 Descripción del espacio catedralicio

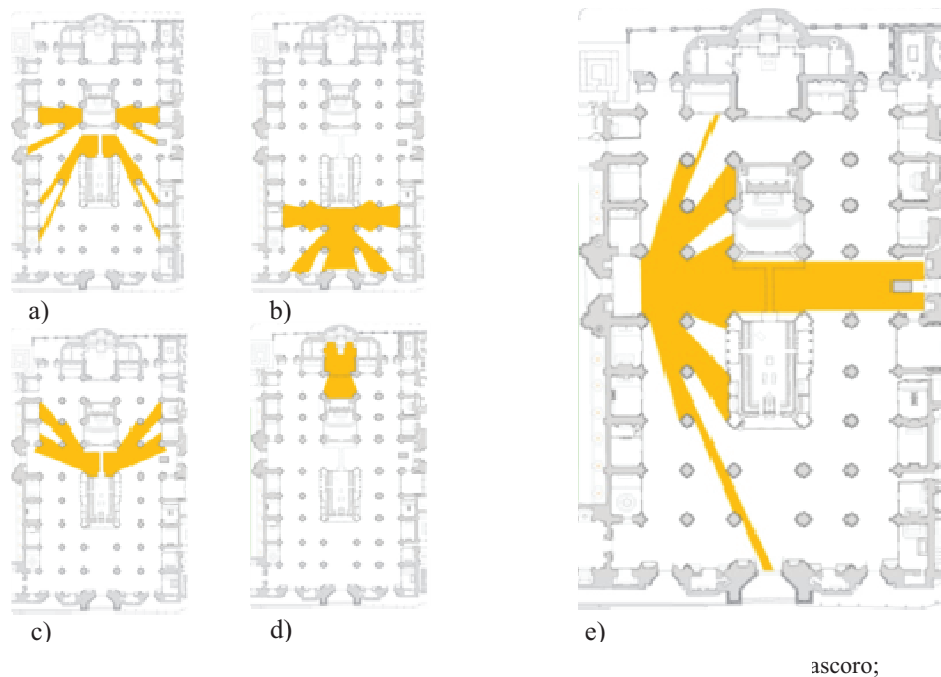
El templo se articula en cinco naves, siendo las más altas la nave del crucero y la nave central, llegando casi a los 40 metros de altura libre. La organización espacial del templo hispalense, modelo

del tipo catedralicio español que fue exportado a Iberoamérica, responde a su vez al denominado “modo español” [11], en el que el coro se ubica en mitad de la nave central.

Desde el punto de vista arquitectónico, el coro tiene un papel de primera magnitud en la generación y transformación de espacios en el interior del templo catedralicio. Su forma y ubicación introduce, en ocasiones, transformaciones importantes en la configuración espacial del edificio, como en el caso de la catedral sevillana, en la que genera una fragmentación de la nave central en dos zonas, que deriva a su vez en una falta de visibilidad y de profundidad para alojar al público. Desde su origen, se trata de un recinto privilegiado y reservado al clero, lo que le aporta un carácter privado y cerrado, en este caso, por muros de cantería en los que se localizan cuatro capillas de alabastro abiertas a las naves laterales, cuenta con una sillería de madera tallada y su entrada, más permeable, está delimitada por una gran reja renacentista.

La estructura de la catedral dispone de 60 pilares de mampostería revestidos de piedra, sobre los cuales descansan las 68 bóvedas de crucería que cubren el conjunto. Un combinado de piezas de mármol coloreado de blanco y azul materializan la solería interior.

2.2 Configuraciones espaciales



El gran valor patrimonial del templo, unido a sus grandes dimensiones, lo convierte en uno de los edificios más atractivos para desarrollar en su interior magnos conciertos y ceremonias multitudinarias. Sin embargo, su organización especial, al “modo español”, altera la concepción espacial original del templo y articula la planta a partir del espacio coral, generando en su nave central dos zonas diferenciadas donde alojar a los fieles dispuestos a escuchar la palabra, el canto o la música.

Históricamente la catedral ha adoptado diferentes escenarios para el desarrollo tanto de su actividad litúrgica como de grandes eventos, situándose espacialmente en su eje este-oeste configurado por la Capilla Real, la Capilla Mayor, el coro y el trascoro. No obstante, la celebración de magnas ceremonias supone una importante ocupación de público, por lo que los escenarios tradicionales no son la mejor opción, principalmente debido a la situación del coro que dificulta el acondicionamiento del espacio por la existencia de numerosas zonas carentes de contacto visual y sonido directo. El análisis de estas posibilidades de organización espacial, definidas en el plan director de la catedral hispalense (Figura 1), donde se sombrea aquellas zonas en las que existe visibilidad desde la fuente, justifica el hecho de adoptar una nueva configuración espacial en el eje transversal, en el crucero, la cual permite aumentar notablemente la superficie de las zonas aptas para la ubicación del público, llegándose a alcanzar la capacidad de 3.090 asistentes en la Toma de posesión de Ángel Asenjo como arzobispo coadjutor de Sevilla (Figura 2), cerca del doble de aforo del teatro de la Maestranza (1.800), uno de los más grandes de Andalucía.

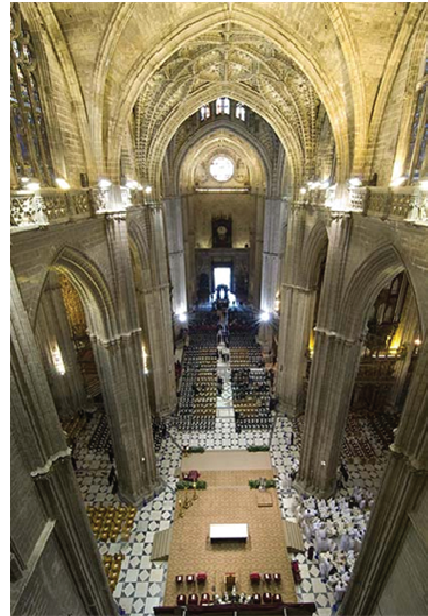


Figura 2 –Toma de posesión de Ángel Asenjo (2009) como arzobispo de Sevilla.

Para acondicionar esta novedosa distribución espacial, se dispone un amplio escenario en el crucero del templo, perpendicularmente a la nave central, con el objetivo de aprovechar tanto la profundidad del crucero, como la de las naves laterales. Haremos a continuación una valoración acústica de la misma.

3 Metodología

En primer lugar, se ha procedido a realizar una medición in situ de las respuestas al impulso registradas en diferentes receptores distribuidos por la catedral, con la fuente situada en el crucero, concretamente en el lugar habitual donde tienen lugar las grandes celebraciones. A partir de esta medición, se han calculado los principales parámetros acústicos de acuerdo a la norma UNE-EN-ISO 3382 [12]. Posteriormente, se ha generado un modelo acústico de la catedral y calculado mediante simulación esos mismos parámetros acústicos. Las comparaciones de unos y otros parámetros, los calculados a partir de la medición y los obtenidos mediante la simulación, nos ha permitido calibrar este modelo acústico y ajustar los coeficientes de absorción y dispersión de los materiales y ornamentaciones de la catedral. Una vez calibrado este modelo inicial, se han elaborado dos nuevos modelos acústicos que reproducen sendas configuraciones espaciales que se han adoptado en dos magnos conciertos en la catedral.

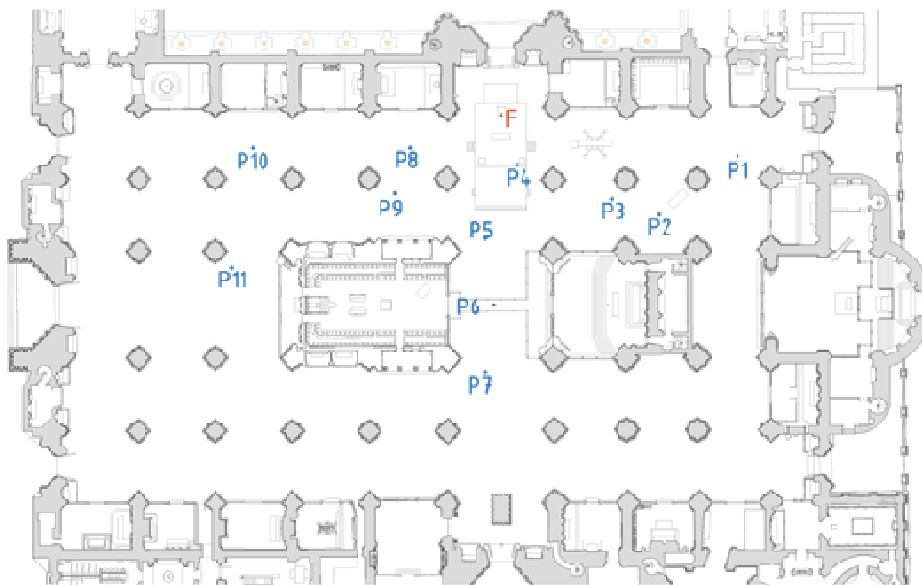


Figura 3 – Plano de planta de la catedral mostrando las posiciones de fuente (F) y los puntos receptores (P).

3.1 Medición in situ

Se ha realizado la medición acústica para una posición F de la fuente omnidireccional (AVM DO-12), ubicada a 1,50 metros sobre el suelo del escenario levantado en el crucero cuando se celebran grandes eventos, y para una serie de receptores distribuidos en las nave central y en las naves laterales anexas en los que se recibe sonido directo (Figura 3). Para cada uno de estos micrófonos multipatrón (Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional), situados a 1,20 metros de altura con respecto al plano de apoyo, se registraron las respuestas impulsivas obtenidas a partir de barridos de señales sinusoidales, en las que la frecuencia se incrementa exponencialmente con el tiempo.

Las mediciones acústicas se realizaron en periodo nocturno con el templo desocupado. Uno de los requerimientos para determinar la calidad de la señal registrada, y calcular con fiabilidad uno de los principales parámetros, T_{30} , fue la obtención de una relación señal-ruido superior a 45 dB en todas las bandas de octava de interés (125-4000 Hz), mediante el ajuste del nivel y duración de la señal de excitación.

Para la valoración de la reverberación de la catedral, tanto objetiva como subjetiva, se ha considerado el tiempo de reverberación evaluado sobre una caída de 30 dB (T_{30}) y el Early Decay Time (EDT), respectivamente. Se han valorado además la claridad (C_{80}) y el tiempo central (T_s), este último como indicador de la nitidez del sonido.

3.2 Simulación

Se ha elaborado un modelo acústico a partir de la geometría del espacio interior de la catedral, necesariamente simplificada por la desmesurada escala del monumento hispalense (216.000 m³ de volumen, aproximadamente), modelo que tiene un total de 7.500 superficies (Figura 4).

El software de simulación acústica empleado para el cálculo de los mismos parámetros acústicos en el modelo ha sido CATT-Acoustic (v8k).

Tras la calibración del mismo [10], una vez realizada la comparación de los valores de esos parámetros acústicos calculados a partir de la medición in situ y de la simulación, se han ajustado los coeficientes de absorción y de dispersión de diferentes materiales y ornamentaciones singulares, cuya información resulta primordial y no es posible obtener a partir de la bibliografía disponible. En la Tabla 1 se recogen los coeficientes absorción finalmente adoptados. Los coeficientes de dispersión varían según sea el grado de irregularidad que presenta cada superficie, de modo que los materiales con superficie lisa tienen un coeficiente de dispersión asociado que varía de 0,12 en la banda de 125 Hz a 0,17 en la de 4 kHz aumentando 0,01 en cada banda. Los de decoración moderada pasa de 0,20 en 125 Hz hasta 0,45 a 4 kHz aumentando 0,05 en cada banda, mientras que en los más irregulares varía de 0,30 en la banda de 125 Hz a 0,80 en la de 4 kHz aumentando 0,10 en cada banda [13].

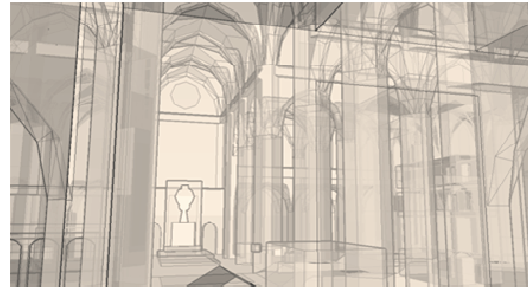


Figura 4 –Interior modelo geométrico de la catedral de Sevilla.

Una vez validado este modelo acústico de la catedral, se ha procedido a elaborar, a partir de él, otros dos modelos acústicos que corresponden a las configuraciones espaciales que se han adoptado para dos magnos conciertos: el Mesías de Händel y el Miserere de Eslava (Figura 5), éste último habitualmente celebrado en Semana Santa, con soluciones diferentes para albergar a una gran cantidad de público.

Se ha utilizado una versión posterior del software CATT-Acoustic (v9) para obtener los principales parámetros acústicos asociados a la actividad musical propia de esos conciertos.

Tabla 1. Coeficientes de absorción acústica asociados a los principales materiales utilizados.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Piedra	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Mármol Suelo	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Molduras	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Sillería Capilla	0,10	0,10	0,10	0,12	0,14	0,14
Vidrieras	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04
Retablos Madera	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Órgano	0,12	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16
Madera Coro	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Sillas de madera (desocupadas)	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Sillas de plástico (desocupadas)	0,06	0,10	0,10	0,20	0,30	0,20
Sillas ocupadas	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87

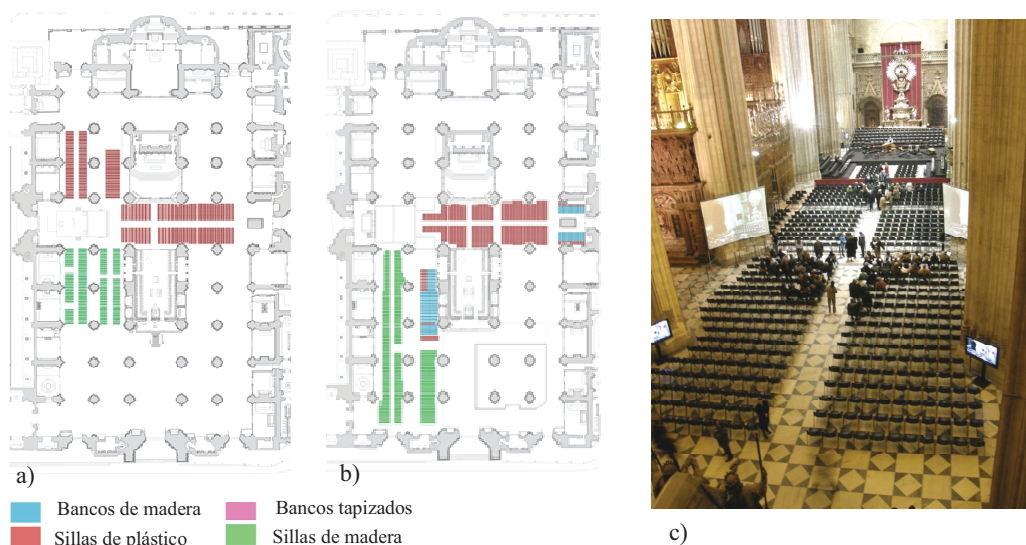


Figura 5 – Configuraciones espaciales adoptadas en la actualidad. a) Miserere de Semana Santa 2012; b) y c) Concierto del Mesías (Händel) 2007

4 Valoración y discusión de resultados

La finalidad del presente estudio es conocer el comportamiento acústico de estas dos configuraciones espaciales propias de las grandes celebraciones catedralicias, averiguar qué influencia tiene la presencia de una gran cantidad de público y valorar los resultados obtenidos de los principales parámetros acústicos.

El análisis de los resultados (Figuras 6a a 6d) se ha realizado en los mismos receptores utilizados en la medición in situ (Figura 3), los cuales reciben sonido directo de la fuente (F) ubicada en el escenario del crucero. Las grandes dimensiones geométricas de la catedral, así como el gran porcentaje de materiales con poca absorción, ya sea piedra (muros, pilares y bóvedas) o mármol (suelo), son responsables del elevado tiempo de reverberación (T_{30}) de este espacio (Figura 6a), con valores a medias frecuencias de 4,5-5 segundos con el templo desocupado. Los valores del EDT, relacionados con la sensación de reverberación, son unos 0,5 s inferiores a los de T_{30} a esas mismas frecuencias.

El acondicionamiento adoptado tradicionalmente para la celebración del Miserere de Semana Santa (Figura 5a), con una ocupación total de 1800 asistentes sentados, supone un incremento notable de la absorción sonora, que reduce el tiempo de reverberación, a medias frecuencias, en 0,7 s en la valoración objetiva (T_{30} , Figura 6a), y hasta 0,9 segundos en la valoración subjetiva (EDT, Figura 6b). Sin embargo, excepto en las frecuencias más altas, en las que también influye considerablemente la absorción del aire, los valores obtenidos superan claramente a los recomendados por Beranek [14] para música religiosa que, a medias frecuencias, serían del orden de 2,8 s.

Por otra parte, la configuración adoptada para el concierto del Mesías, con una ocupación mayor que la anterior, de hasta 2172 personas distribuidas a lo largo de todo el crucero y las naves laterales (Figura 5b), supone una reducción del T_{30} en 0,9 segundos y del EDT en 0,8 segundos, a medias frecuencias, con respecto a los obtenidos en las medidas experimentales, aunque se siguen superando esos valores recomendados por Beranek (Figuras 6a y 6b).

En la valoración de los restantes parámetros energéticos, para la disposición del Miserere (Figura 5a), los valores de claridad (C_{80} , Figura 6c) experimentan mejoras gracias a la presencia de público, especialmente en aquellos receptores ubicados en el crucero, con un incremento de 3 JNDs (P4, P6, P7 y P11), en los términos expresados por la norma ISO, llegando incluso a 5 JNDs en el receptor P5, situado en las primeras filas de audiencia frente al escenario que se sitúa en el crucero, donde se alcanzan 2,8 dB. De la misma manera, los valores del tiempo central (T_s , Figura 6d), indicador de la nitidez del sonido, disminuyen casi en la totalidad de los receptores, con decrementos superiores a 5 JNDs. Estos decrementos de T_s se elevan a 7 JNDs cuando aumenta la superficie de audiencia en la configuración del Mesías, mejorando la nitidez del sonido.

Si bien del análisis de los parámetros temporales previamente analizados, se deduce que resulta ligeramente más favorable la configuración del Mesías, ya que presenta una mayor superficie de área de audiencia, (Figura 5b), del análisis de los parámetros energéticos se concluye que existen valores bastante desfavorables a partir de distancias superiores a 30-40 metros. Resulta pues evidente que, a medida que la distancia foco sonoro-receptor aumenta, existe un deterioro de las condiciones acústicas. Por lo tanto, conviene evitar una disposición similar a la del concierto del Mesías, en la que se aprovecha la profundidad de toda la nave lateral, y apostar por una distribución simétrica del público, más cercana a la fuente sonora, que funciona mejor y proporciona resultados más favorables a un mayor porcentaje de los asistentes.

A pesar de que las configuraciones espaciales analizadas están relacionadas con eventos musicales, no hay que olvidar que la catedral es un espacio en el que se desarrollan eventos litúrgicos en los que prima la palabra sobre la música. El uso de la palabra requiere la utilización de elementos de apoyo electroacústico para poder acondicionar satisfactoriamente toda la superficie de audiencia, ya que gran parte de la misma está en condiciones acústicas desfavorables y con muchos puntos alejados de la fuente, donde resultaría imposible escuchar con definición el discurso sin la existencia de dicho sistema de refuerzo del sonido.

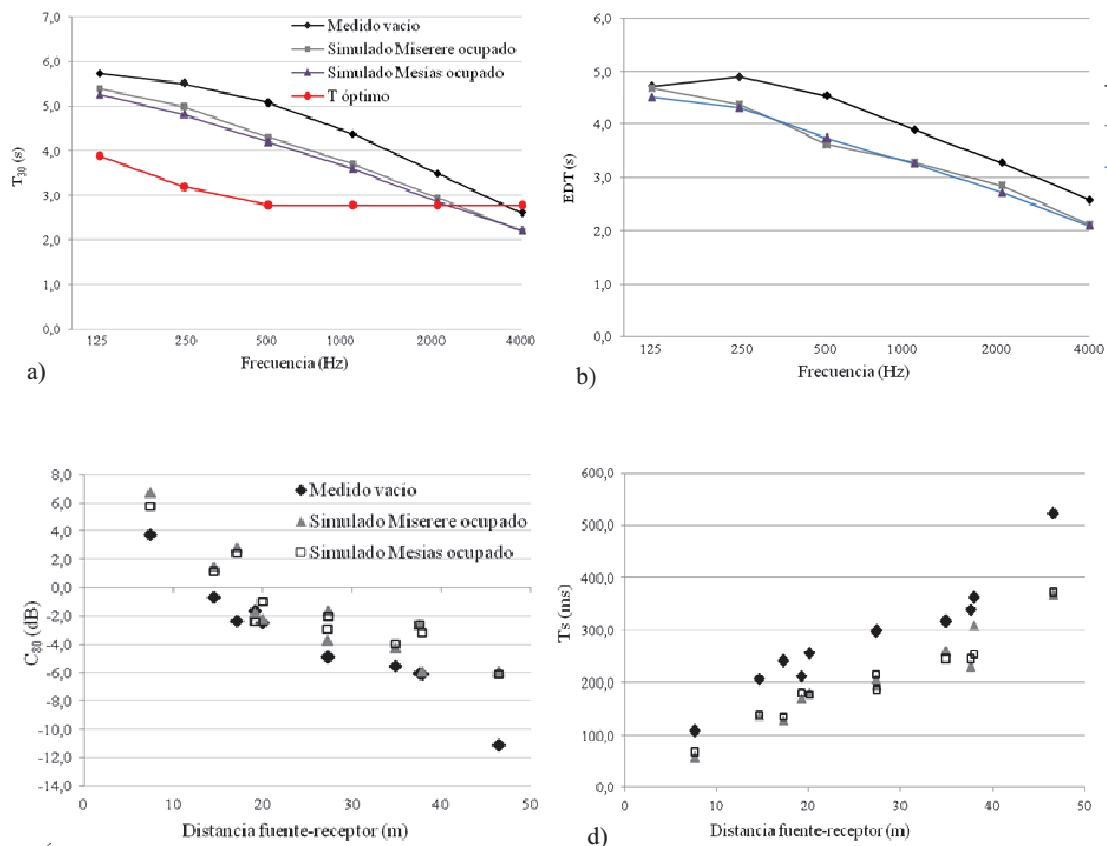


Figura 6 – Comportamiento espectral simulado y medido de los parámetros acústicos estudiados: a) T_{30} ; b) EDT; c) C_{80} ; d) T_s

5 Conclusiones

La organización espacial al “modo español”, con la disposición del coro en el centro de la planta de la catedral, crea una división del espacio interior que fuerza la búsqueda de una nueva organización espacial para grandes eventos, donde resulta necesario disponer una mayor cantidad de público con visibilidad y sonido directo.

La utilización del crucero en las grandes celebraciones ha sido la solución adoptada en recientes eventos musicales, como la celebración del Miserere de Semana Santa o el concierto del Mesías de Händel. A partir del modelo acústico inicial de la catedral, elaborado y calibrado tras la realización de los ensayos experimentales, se ha simulado y posteriormente valorado el comportamiento acústico de otros dos modelos acústicos que reproducen la configuración espacial y de público en estas dos grandes celebraciones.

El análisis de los resultados obtenidos permite confirmar que la incorporación masiva de público en el crucero, de acuerdo a algunas de las dos configuraciones mostradas, supone un importante aumento de la absorción sonora y, por lo tanto, una mejora sustancial de las condiciones acústicas de la catedral para la celebración de conciertos o la interpretación de música religiosa. Respecto a la medición

realizada in situ con la catedral vacía de público, el tiempo de reverberación (T_{30}) disminuye entre 0,7 y 0,9 s, según el tipo de configuración espacial y de público, con valores a medias frecuencias de 4,0 s para el Miserere y 3,8 s para el Mesías. De una forma subjetiva, la sensación de la reverberación, valorada por el EDT, cuyos valores se estiman también en 3,5 s tanto para el Miserere como para el Mesías, también disminuyen entre 0,9 y 0,8 s, respectivamente, con respecto a la medición realizada in situ. Del mismo modo, gracias al aumento de absorción sonora, los parámetros energéticos alcanzan unos valores más adecuados, principalmente en aquellas zonas de audiencia ubicadas a una distancia de la fuente sonora inferior a 30 metros.

En cualquier caso, no resultan de por sí suficiente estas dos formas de acondicionamiento del crucero para lograr unas condiciones acústicas idóneas para la celebración de grandes eventos musicales, y habría que acompañarlas de otras medidas correctoras para mejorar las condiciones acústicas.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo quieren expresar su más sincero agradecimiento a Alfonso Jiménez, maestro mayor de la catedral de Sevilla, Francisco Pinto e Isabel Pérez por facilitarnos documentación de gran utilidad para la elaboración planimétrica y levantamiento de modelos de los escenarios configurados. Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER a través del proyecto del Plan Nacional I+D+i concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. BIA2010-20523).

Referencias

- [1] Cardoso, D. A. *Sevilla, el casco antiguo. Historia, arte y urbanismo*, Ediciones Guadalquivir, 2006.
- [2] Torre Farfán, F. d. l. *Fiestas de la Santa Iglesia Metropolitana y Patriarcal de Sevilla al nuevo culto del Sr. Rey San Fernando*. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla, Sevilla (España), 1995.
- [3] Karabiber, Z. A new approach to an ancient subject: CAHRISMA project, on de CD –ROM: Garmisch-Partenkirchen, July 4-7, *Seventh International Congress on Sound and Vibration*, Germany, 2000.
- [4] Magrini, A.; Ricciardi, P. An experimental study of acoustical parameters in churches, *International J. Acoustics and Vibration*, 7(3), 2002, pp. 177-183.
- [5] Suárez, R.; Sendra, J.J.; Navarro, J.; León, A.L. The acoustics of the Cathedral-Mosque of Córdoba. Proposals for architectural intervention, *Acta Acustica united with Acustica*, 90(2), 2005, pp. 362-375.
- [6] Anderson, J. S.; Bratos-Anderson, M. Acoustic coupling effects in St Paul's Cathedral, London, *J. Sound Vib.*, 236(2), 2000, pp. 209-225.
- [7] Lewers, T.; Anderson J. S. Some Acoustical Properties of St Paul's Cathedral, London, *J. Sound Vib.*, 92(2), 1983, pp. 285-297.
- [8] Martellotta, F. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome, *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 2009, pp. 1175-1186.
- [9] Klepper, D. L. The distributed column sound system at Holy Cross Cathedral, Boston, the reconciliation of speech and music, *J. Acoust. Soc. Am.* 99, 1996, pp. 417-425.
- [10] Álvarez, L.; Alonso A.; Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. Modelo acústico inicial para simular el campo sonoro de la catedral de Sevilla, *ISVA*, Valencia 24-25 Noviembre, pp. 106-113, 2011
- [11] Navascués P. *Teoría del coro en las catedrales españolas*, Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, Madrid (España), 1998
- [12] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010.
- [13] Martellotta, F. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome, *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 2009, pp. 1175-1186.
- [14] Beranek, L. *Acoustics*. Acoustical Society of America, Nueva York, 1993.

COMUNICACIÓN 3

SOUND SPACE RECONSTRUCTION IN THE CATHEDRAL OF SEVILLE FOR MAJOR FEASTS CELEBRATED AROUND THE MAIN CHANCEL.

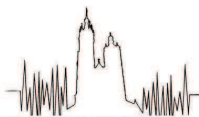
AUTORES: **Alonso. A.**, Suárez, R., Sendra, J. J.

CONGRESO: Proceedings of Forum Acusticum (2014) pp. 1-6.



7 - 12 SEPTEMBER 2014, KRAKÓW

FORUM ACUSTICUM



Sound Space Reconstruction in the Cathedral of Seville for major feasts celebrated around the main chancel

Alicia Alonso^a, Juan J. Sendra, Rafael Suárez

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Av. Reina Mercedes, 2, 41012 Seville, Spain

Summary

Among the different types of church architecture, cathedrals stand out for their lavish and majestic spaces. Accordingly, spaces originally designed solely for the liturgy are now chosen for the celebration of different events.

Some types of ceremony demanded a spatial adaptation of cathedrals through the incorporation of ephemeral, decorative and visual architecture in keeping with their major heritage value. This also involved a modification of acoustic behaviours, affecting the perception of music and speech.

The cathedral of Seville is no exception and became an important venue for numerous festive or commemorative events. These unique historical ceremonies were characteristically events which transformed the interior space of the cathedral, either through the incorporation of a large structure or that of drapes, tapestries, and additional furniture.

This paper reconstructs the sound space resulting from a series of spatial transformations which took place around the main chancel, the choir, and the transept between both spaces, when celebrating major feast days. This analysis is carried out through an acoustic simulation of the cathedral, previously calibrated with in situ measurements, incorporating the spatial alterations and decorations characteristic of such ceremonies and established using documentary and iconographic sources. This has allowed us to ascertain the influence of ephemeral architecture on the acoustic parameters typically found in cathedrals.

In addition, thanks to modern acoustic simulation tools, auralizations were obtained reproducing the musical acoustic environments of these age-old interventions. This knowledge and the reconstruction of the sound space of the cathedral contributes to an increased recognition of its heritage value, intangible in this specific case.

PACS no. 43.55.Gx, 43.55.Ka

1. Introduction

In recent years, the growing interest in the acoustic conditions of major worship spaces has been supported by experimental trials. This has made it possible to characterise these spaces according to their unique geometric characteristics or their varied decoration, in an attempt to establish how their material form affected speech and music [1].

The attendance of the faithful and the introduction of ornament are factors that can greatly affect the results obtained, altering the capacity of energy

absorption and scattering in each space, as well as the variability of the acoustic properties [2]. However, few studies have analysed the influence of occupancy and mass configurations, or observed how the increase in absorption led to improved intelligibility for the public [3,4]. There are also very few studies analysing the acoustic repercussion of ephemeral architecture erected for major celebrations [5], especially in cathedrals.

In general, adornment of the interior of large church spaces aimed to transform the traditional appearance of the interior space of churches through decoration. This was usually associated with the celebration of unique historical ceremonies whose main feature was the adaptation of the space to create a symbolic surrounding

(a) aliciaalonso@us.es

designed expressly for the occasion. However, some studies suggest a concern with acoustic behaviour and attempts to improve the unique acoustic conditions existing inside these large spaces [6].

In a way the behaviour of the cathedral of Seville should be treated as that of a volume containing several subspaces which separately house different types of configurations, some of which have been studied in previous work by the authors, mainly in connection with events with mass audiences [7,8,9].

In this paper the authors reconstruct the sound space of the cathedral of Seville resulting from a series of transformations in the space and decoration as executed centuries earlier for major feasts celebrated around the main chancel. The acoustic alterations brought about by these ephemeral transformations were evaluated generating auralizations, which made it possible to recover the acoustics perceived in these feasts from the past.

2. Methods

Based on experimental tests carried out inside the cathedral of Seville, the room impulse response (RIR) was obtained by using a process of emission of swept sine signals with frequency increasing exponentially with time. To provide an acoustic characterisation of each of the subspaces within the cathedral, the measurements were carried out considering five different source positions and several receivers distributed throughout the inside of the building [1]. WinMLS2004 software was used for measurement, signal processing and obtaining acoustic parameters.

2.1 Calibration and acoustic simulation

The model of the cathedral space in its current condition (M0) was generated using CATT-Acoustic v9.0 and calibrated using the acoustic results of RIR processing obtained from experimental tests. A further process of geometric simplification of the model was carried out reducing the number of planes by almost 40%, in order to cut down on the computer time required for simulating a model over 200000 m³. For this calibration the parameters associated with reverberation, T₃₀ and EDT (Table I), were suitably adjusted without exceeding the

approximate difference of 1 JND in any of the frequency bands (Figure 1). For the rest of acoustic parameters, the simulated results came very close to the measured ones, obtaining a similar difference, except for the 250 Hz frequency band, where the difference was approximately 2 JNDs (Figure 1), a value considered acceptable given the specific characteristics of the model.

Table I. Comparison of T₃₀ between measurements and simulated model after calibration

Hypotheses	Frequency (Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k
Measured	5.89	5.65	5.15	4.40	3.50	2.66
Simulated	5.78	5.52	5.18	4.50	3.54	2.42

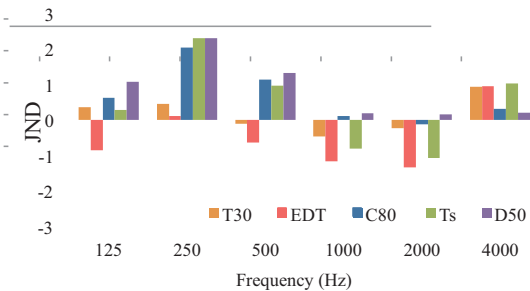


Figure 1. Differences in JND between values measured *in situ* and simulated values

2.2 Spatial configuration for major feast

The inside of the cathedral of Seville is multifunctional and used for the celebration of major events, which are organised around the different sound sources. In this paper an analysis is carried out of some of the main ceremonies held around the main chancel. This space in the central nave is opposite the choir, one of the most important parts of the church, and also conditions the organisation of the space as a whole as it breaks up the central nave. It is essential to consider and analyse the space in the transept between the main chancel and the choir, as it is the main space for ceremonies and ephemeral constructions, or for the congregation (Figure 1a-b).

The great heritage value of the cathedral and its religious character conditioned the type of ephemeral architecture to be used. For more important events, the most frequent type of decoration was the use of textiles to cover the stone surfaces. The main purpose of textile coverings was to create a new space specially

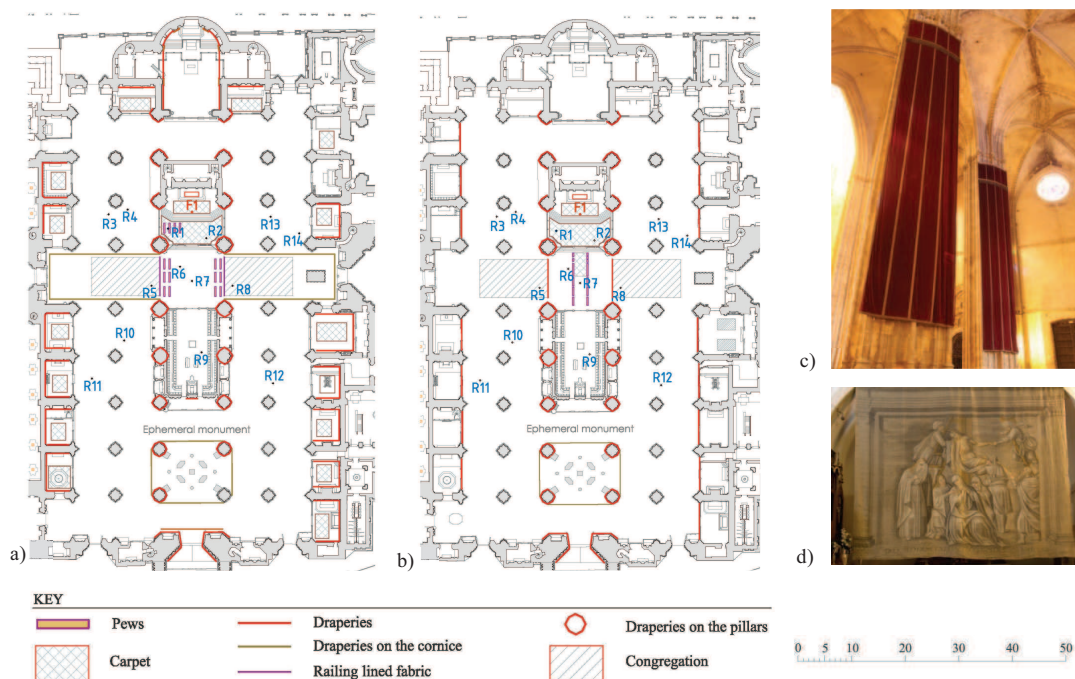


Figure 2. a) Configuration adopted during the Royal Canonisation (RC); b) configuration adopted during Easter Week (EW); c) draperies on the pillars and d) hangings in the church of Garcillán (Segovia)

decorated for the occasion, and we have no records of any acoustic intention. A second measure was the installation of altars, platforms or monuments in different areas inside the building, depending on the configuration adopted. The configurations analysed in this paper are those adopted for a Royal Canonisation (RC, Figure 2a) and for the celebration of one of the ceremonies held in Easter week (EW, Figure 2b). These analyses make it possible to obtain conclusions about the acoustic influence of the incorporation of mass decoration in a huge space.

a. Royal Canonisation (RC)

The canonisation of king San Fernando, in 1671, was one of the most important events held in the cathedral. The interior was transformed by decorating most of its surface. From documentary evidence it was calculated that there were approximately 6000 m² of textile draperies distributed on pillars (Figure 2c), walls and cornices, as well as about 220 m² of carpet in the main chancel and the side chapels. Ornamentation was not limited to a specific area but invaded the entire space. A richly-adorned catafalque was built specifically for the occasion in the *trascoro*. The mass included choral and instrumental music. During the ceremony the congregation stayed standing in the arms of the transept, an area of approximately 350 m² with a density of 2

people/m², watching the celebration which took place in the area between the main chancel and the choir. Seats were only made available to civil and ecclesiastical authorities [10] (Figure 2a).

b. Easter Week (EW)

In many Spanish churches and cathedrals during the religious celebrations of Easter Week, the altarpieces and statues were covered with cloth or hanging curtains [11], and sometimes these were placed at the entrances to the side chapels (Figure 2d). There are still marks on the walls of the cathedral of Seville which confirm this practice in the past. Although this set-up dates from the mid-sixteenth century, the reconstruction used for this analysis features a nineteenth-century configuration. It is reckoned that approximately 1000 m² of these materials were used in total in the Easter Week celebrations of the cathedral, including the entrance arches to the side chapels. In addition, part of the main altarpiece and some of the statues we covered by a large canvas during Easter Week. The recent restoration work carried out on the main altarpiece has allowed access to the large upper rail from which this canvas hung. Just as in the case of the Royal Canonisation, the main chancel was carpeted, velvet draperies hung from the columns and, as in RC, the congregation was in the transept aisles during the ceremony (Figure 2b).

2.3 Acoustical configurations

The spatial alterations and ephemeral decorations characteristic of these ceremonies (RC and EW) were incorporated into the initial model generated with the programme CATT-Acoustic v9.0. Two occupation hypotheses were considered for each of the two models analysed (RC and EW): empty (RC_e and EW_e) and occupied (RC_o and EW_o). In both, the sound source was placed on the main altar and the receivers were positioned as they had been for the experimental measurements. These simulations made it possible to establish a comparative analysis of the repercussion of the presence of an audience and of the ephemeral decoration in the cathedral, extended in one case to most of the surface (RC) and in another to a different more limited ornamentation (EW). The information provided by descriptive and iconographic documents was used to adopt the absorption coefficients of the textile materials. The hangings on walls and pillars were considered to be velvet (Figure 2c), with an approximate density of 500 g/m², not draped and located at an approximate distance of 12 cm from the surface. The hangings at the entrances of the side chapels were lighter and more permeable, approximately 250 g/m² and not draped. Taking into account the characteristics described and consulting the existing documentary sources [12, 5], the absorption coefficients included in Table II were calculated:

Table II. Absorption coefficients for draperies

	Frequency (Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k
Velvet hangings	0.10	0.38	0.63	0.52	0.55	0.65
Chapel drapes	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.50

3. Results and discussion

The acoustical simulation of the study hypotheses shows the clear influence of ornament in the results of each of the acoustical parameters. A significant improvement could be observed in the acoustical conditions following the covering of a large surface with textiles (RC_e). This configuration had a more noticeable repercussion at mid frequencies, falling by slightly over 1s, 5 JNDs, objective reverberation (T₃₀), and with EDT falling by approximately 4 JNDs, compared to the initial model without ornament or occupation (M0) (Figure 3a-b, Table III).

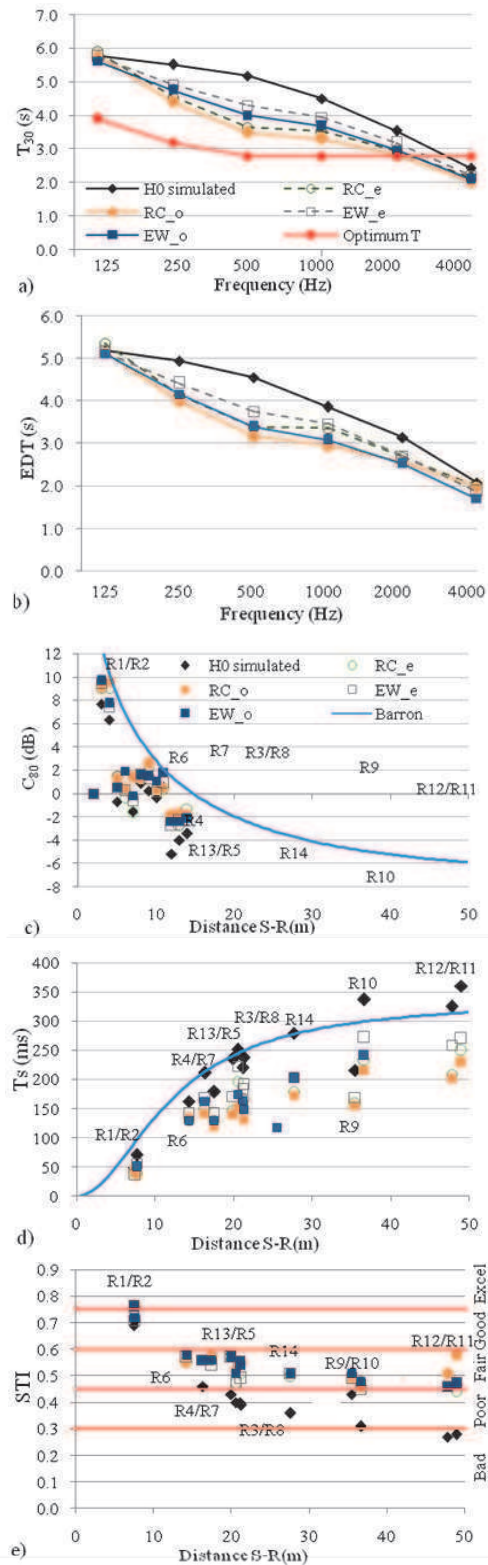


Figure 3. a-b) Spectral behaviour (T₃₀, EDT), optimum T (Beranek); c-e) average values for acoustic parameters with respect to source–receiver distance (C₈₀, T_s, STI)

Table III. Average values and standard error of the acoustic parameters analysed.

Hypotheses	N° P	$T_{30m} \pm std\ err$	$EDT_m \pm std\ err$	$C80_m \pm std\ err$	$D50_m \pm std\ err$	$T_{sm} \pm std\ err$	$STI_{avg} \pm std\ err$
<i>M0.</i>	14	4.84 ± 0.04	4.21 ± 0.17	-0.48 ± 1.04	0.39 ± 0.06	216.13 ± 24.64	0.46 ± 0.04
<i>RC_e</i>	14	3.59 ± 0.06	3.38 ± 0.13	1.36 ± 1.03	0.49 ± 0.05	152.43 ± 17.04	0.55 ± 0.03
<i>RC_o</i>	14	3.39 ± 0.05	3.06 ± 0.13	1.81 ± 1.00	0.50 ± 0.05	140.23 ± 14.75	0.56 ± 0.03
<i>EW_e</i>	14	4.12 ± 0.04	3.61 ± 0.16	0.97 ± 0.99	0.45 ± 0.05	171.57 ± 18.75	0.55 ± 0.02
<i>EW_o</i>	14	3.84 ± 0.04	3.24 ± 0.15	1.19 ± 1.00	0.49 ± 0.05	154.04 ± 17.44	0.56 ± 0.02

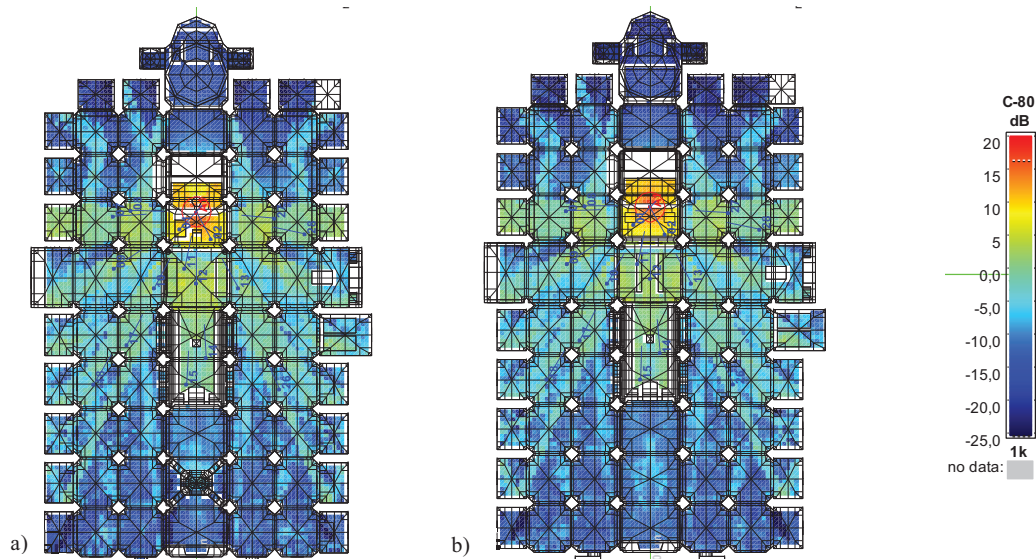


Figure 4. a) Simulation mappings of C80 parameter at 1 kHz: (a) model RC_e; (b) model EW_e

The variation in the remaining parameters could also be perceived, with mid values of C80 increasing by almost 2 JNDs and almost 4 JNDs in the case of Ts. Less perceptible variations were shown in the lower frequencies, where they barely reached 1 JND (Figure 3c-e, Table III). It is worth noting the significant effect perceived after incorporating lighter hangings at the entrances to the side chapels (EW_e). The measure introduced a much smaller textile surface, with less density than in the RC. However, the position of the fabric between two spaces (chapel and nave) improved sound distribution by preventing a high percentage of rays from entering the side chapels.

The variations obtained for EW_e were 1 JND lower than those previously described for RC_e. It was observed that for both configurations the intelligibility evaluated with the STI parameter improves the performance of all the points assessed, changing from “poor” to “fair”.

When simulating both hypotheses with an audience present it can be observed that, as expected, the variations are not as great as those

obtained following the inclusion of ornament. There was an increase of an additional 1 JND, both for T₃₀ and EDT, comparing each configuration with that of the empty model, and lower than 1 JND when referring to the other energy parameters. It should also be noted that at mid and low frequencies, the acoustical conditions evaluated for EW_o are very close to those obtained for RC_e, which shows the clear effect of the extensive decoration incorporated during the canonisation.

Figure 4a-b shows the mappings of C80 for the 1kHz frequency band for the entire surface of the church. As the sound source considered is located on the main altar, the presence of the choir and the columns limit the surface area with suitable acoustical conditions for an audience due to the lack of direct sound. Moreover, the analysis of the mapping which reproduces the EW hypotheses shows the slight influence of the drapes placed at the entrance to the chapels when these are near S1, given the capacity of penetration of the sound energy.

4. Conclusions

The choice of the main chancel of the church as the focus for the celebration of major feasts was a normal practice, not an arbitrary decision. The position opposite the choir made it a unique intermediate space for celebration, and enhanced the ephemeral architecture. It has a substantial influence on the acoustical conditions of the cathedral, significantly improving the perceived speech and music.

The repercussion of the RC model is greater than that of the EW model, although it can be said that the influence of the fabric placed at the entrance of the chapels is greater than that of the material covering surfaces, as it improves the sound distribution by reducing the penetration of a large percentage of rays. Despite the great improvements achieved in acoustical behaviour, it should be emphasized that there is a need to reinforce the absorption of low frequencies since the values of all parameters in the 125 Hz band do not vary significantly from the initial current condition model, empty and without ornament. This does not happen at mid frequencies, where there are variations of 6 and 5 JNDs for the evaluation parameters T_{30} and EDT respectively. The simulation of both hypotheses, occupied, shows that the variations are not as large as those obtained following the inclusion of ornament, given the great sound absorption provided by the fabrics distributed throughout the church.

Acknowledgements

This work has been financially supported by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness, with reference BIA2010-20523, and by the Ministry of Education, Culture and Sport, with the reference FPU12/04949.

References

- [1] L. Alvarez-Morales, T. Zamarreño, S. Girón, M. Galindo: A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: application to the Cathedral of Malaga. *Building and Environment* 72 (2014) 102 - 115.
- [2] F. Martellotta; M. Castiglione: On the use of paintings and tapestries as sound absorbing materials. *Proceedings of Forum Acusticum, Aalborg, 2011.*
- [3] V. Desarnaulds, A.P.O. Carvalho, G. Monay, *Church Acoustics and the Influence of Occupancy, Build. Acoust.* 9(1) (2002) 29-47.
- [4] Suárez, R., Alonso, A., Sendra, J.J., “Intangible cultural heritage: the sound of the Romanesque cathedral of Santiago de Compostela”. *Journal of Cultural Heritage* (Accepted 15 may 2014, DOI 10.1016/j.culher.2014.05.008)
- [5] F. Martellotta, E. Cirillo, M. D’Alba, E. Gasparini, D. Prezioso: Acoustical reconstruction of San Petronio Basilica in Bologna during de Baroque period: the effect of festive decorations. *Acoustic’08, Paris, 2008.*
- [6] A. Schnoebelen: Performance practices at san Petronio in the Baroque. *ActaMusicologica.* 41 (1/2) (1969) 37-55,
- [7] A. Alonso, J.J. Sendra, R. Suárez, T. Zamarreño: Acoustic evaluation of the cathedral of Seville as a concert hall and proposals for improving the acoustic quality perceived by listeners. *Journal of Building Performance Simulation* 7 (5) (2014) 360-378
- [8] A. Alonso, J. J. Sendra, R. Suárez, and L. Álvarez: Acoustic Assessment of Various Spatial Configurations in the *trascoro* of the Cathedral of Seville. *Proceedings of the XX International Congress on Sound and Vibration, Bangkok, 2013.*
- [9] A. Alonso, J. J. Sendra, R. Suárez, and L. Álvarez: La acústica del crucero de la catedral de Sevilla en las grandes celebraciones. *Proceedings of the VIII Iberoamerican Acoustics Congress and XLIII Spanish Acoustics Congress, Evora, 2012.*
- [10] F.d.Torre Farfán: *Fiestas de la Santa Iglesia Metropolitana y Patriarcal de Sevilla al nuevo culto del Sr. Rey San Fernando 1671. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla, Sevilla, 1995.*
- [11] S. Santos-Gómez, M. San Andrés-Moya: La pintura de Sargas, *Archivo Español de Arte* 77 (305) (2004), 59-74.
- [12] M. Vorländer: *Auralization. Berlin: Springer-Verlag, Berlin, 2008.*

COMUNICACIÓN 4

ACOUSTIC ASSESSMENT OF VARIOUS SPATIAL CONFIGURATIONS IN THE TRASCORO OF THE CATHEDRAL OF SEVILLE.

AUTORES: **Alonso, A.**; Sendra, J.J.; Suárez, R.; Álvarez, L.

CONGRESO: Proceedings of the 20th International Congress on Sound and Vibration,
Volume 3 (2013) pp 2424-2431.



ICSV20
Bangkok, Thailand
7-11 July 2013

ACOUSTIC ASSESSMENT OF VARIOUS SPATIAL CONFIGURATIONS IN THE TRASCORO OF THE CATHEDRAL OF SEVILLE

Alicia Alonso, Juan J. Sendra, Rafael Suárez and Lidia Álvarez

Institute of Architecture and Building Science, University of Seville, Seville, Spain
e-mail: aliciaalonso@us.es

The spatial organization of the most common type of Spanish medieval cathedral, with a choir in the center of the main nave, leads to a fragmentation of the inner space and to a double function with an evident impact on architecture, liturgy and acoustics. The closed choir, located in the center of the cathedral, acts as an interior façade and generates a new worship space: the *trascoro* or retro-choir, a place for readings, sermons and liturgical celebrations, including major feasts. The cathedral of Seville, the largest Gothic building in existence, has a spatially important *trascoro*, which has combined liturgy and the celebration of special events and feasts throughout history, often leading to the inclusion of additional ephemeral ornamentation and furniture in order to accommodate the audience, inevitably altering its acoustics. In this paper, starting from experimental tests and based on an acoustic model previously calibrated using an iterative process, we proceed to study the sound field of this particular “chapel without limits” located inside a monumental volume, reproducing the configuration for daily liturgy and feast days, in order to analyze the acoustic impact of the audience or decorations put in place for each occasion.

1. Introduction

The development of the liturgy in churches in terms of both speech and music rests on a series of foci of celebration: the altar, cathedra, pulpits, choir, all of great interest in acoustic terms as they represent the position of the sound source, which varies on the floor plan depending on the type of ceremony held.

In addition to the traditional use of liturgical spaces where the sound source is positioned on the Main Altar of cathedrals, several types of configuration can appear, each conditioned by the organization of the interior space of the church. In the most frequent type of Spanish medieval cathedral, the central position of the choir breaks up the space in the main nave, generating a new space, the *trascoro* (Figure 1a), which was originally occupied by the congregation, who were separate from the presbytery and choir and did not take part in the liturgy.

Unlike French *jubés*, these spaces usually had no pulpits for speech and were considered to a certain extent “silent”¹, although they became part of the “space for preaching” in Seville Cathedral, when pulpits were added in the early 20th century. At present, the existence of an altar in front of the marble altarpiece, as well as the subsequent addition of pews in the *trascoro* area, allows this space to be used for the celebration of the liturgy without resorting to the traditional configuration (Figure 1b).

The spaciousness of the *trascoro* encourages the celebration of many events and festivities, requiring different spatial configuration options, which will be analyzed in this paper studying the sound field of this unique “chapel without limits” through the assessment of the acoustic influence of occupation and ephemeral decoration.

2. Spatial configurations analyzed

In the cathedral of Seville, the *trascoro*, which contains a second altar for ministering to the congregation in the ordinary liturgy, is found in the seventh, eighth and ninth sections at the bottom of the building (Figure 1a). The space is large and mostly open, but for the columns supporting the different vaults over each nave, generating surfaces which cannot be directly seen and therefore do not receive direct sound.

This spatial configuration has been important throughout history, as it was the stage for the major ephemeral arrangements characteristic of Baroque celebrations², and was also where important ceremonies were held. The enclosed area behind the choir is separated off by a marble altar-piece with the same width as the main nave in which it is located, acting as an interior façade. This stonewall makes it possible to connect both spaces given the existence of two accesses.

Due to its size, this part of the cathedral becomes a multifunctional space and is of great importance, making it possible to combine the celebration of different types of events, both on feast days and ordinary days.

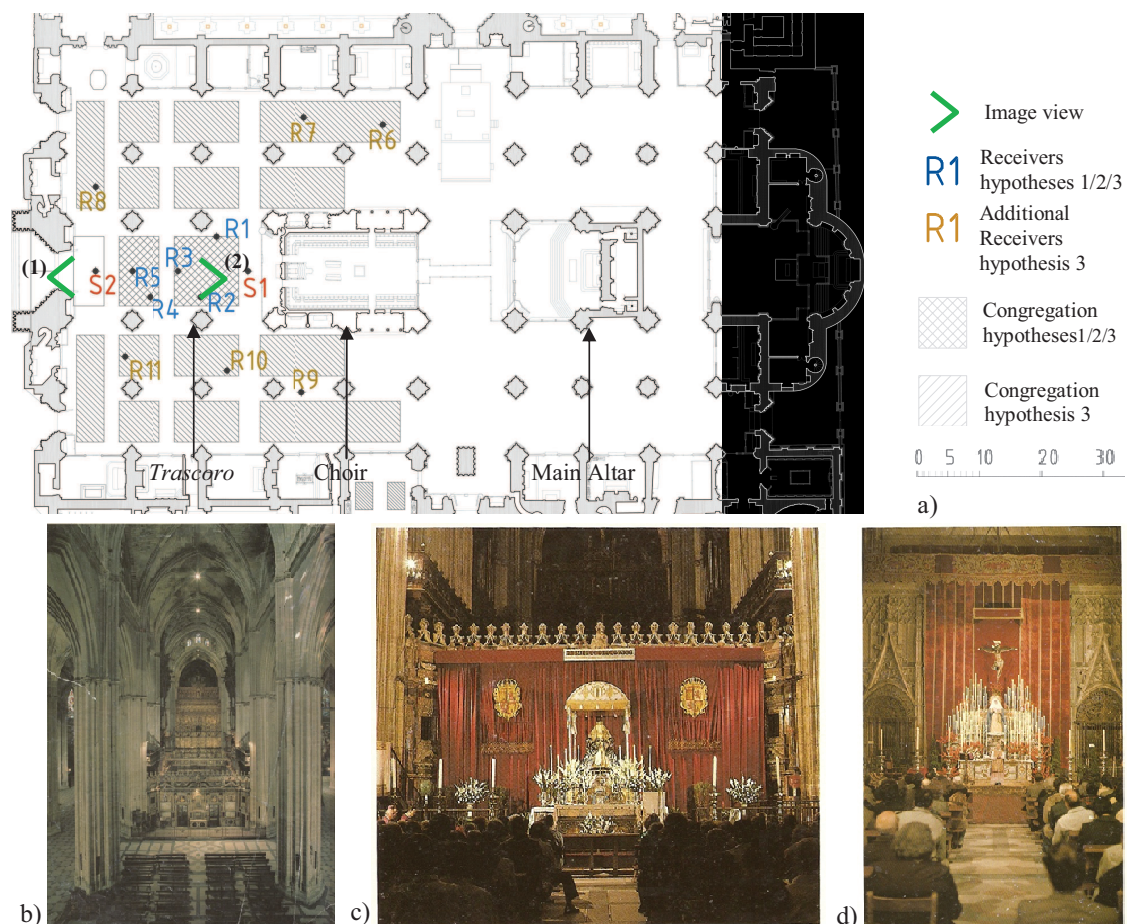


Figure 1. 1a Floor plan of the cathedral of Seville; 1b Central nave. View from the *trascoro* (1); 1c Liturgy in the *trascoro* (1); 1d Liturgy in the *trascoro* (2);

For such celebrations it was sometimes necessary to include additional ephemeral architecture specific to the occasion. These minor interventions, either adding pews to accommodate the audience or including movable elements such as draperies, alter the acoustic behavior under analysis.

2.1 Liturgical celebrations

Various study hypotheses were considered, reproducing specific spatial organizations adopted for the development of the liturgy, both daily and annual. The character of the ceremony determines the position of the sound source and the orientation of the audience. Two study hypotheses were established in which the source position was varied, each with two cases with or without draperies on specific columns supporting the vaults, making it possible to analyze the influence of this use of ephemeral architecture in the acoustic behavior of the *trascoro* of the cathedral:

- *Hypothesis 1.* Usual configuration with a sound source positioned on the existing altar (Figure 1c).
H1A Incorporation of pews with audience (100% occupation) and draperies on the end wall, behind the altar.
H1B Draperies on columns are incorporated into the previous case, H1A.
- *Hypothesis 2.* Occasional configuration with a sound source positioned on a platform at the bottom of the church (Figure 1d).
H2A Incorporation of pews with audience (100% occupation) and draperies on the end wall behind the altar.
H2B Draperies on columns are incorporated into the previous case, H2A.

2.2 Events with mass audiences

At present, ceremonies with mass audiences are held in the transept of the cathedral³, an arrangement which makes it possible to increase the surface of areas available for positioning the audience. However, prior to the consideration of this new configuration in the transept, the setting chosen for the celebration of events with large crowds was the *trascoro* of the cathedral, a fact which prompts a new study hypothesis:

- *Hypothesis 3.* Single configuration with a sound source positioned on a platform facing the door at the bottom of the cathedral.
H3A Incorporation of furniture with an audience (100% occupation) and draperies on the end wall behind the altar.
H3B Draperies on columns are incorporated into the previous case, H3A.

3. Methodology

Tests were carried out to obtain the impulse responses inside the cathedral, considering five sound source positions, including one in the *trascoro* of the church, the sound field of which is analyzed in this paper. This experimental technique, which was developed in situ, made it possible to calibrate the 3D acoustic model generated through the adjustment of the reverberation time using an iterative process with CATT Acoustic v.9 software. In this way, the elements considered in the different interventions, reproducing the configurations established in the study hypotheses above, were added to the validated model obtained. Acoustic simulation was then carried out and the more significant acoustic parameters, both for speech and music, following ISO 3382:2009-1⁴ were obtained in order to assess the influence of different interventions in the sound field.

3.1 Experimental technique

The in situ measurements were carried out at night time in the unoccupied cathedral. A sine sweep signal was emitted from an omni directional source S (AVM DO-12), for five different points of the cathedral at a height of 1.50 meters from the floor. Impulse responses were recorded using a

20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20), Bangkok, Thailand, 7-11 July 2013

multi pattern microphone (Audio-Technica AT4050/CM5 in its omni and bidirectional configurations), placed at different points at a height of 1.20 meters throughout the audience area.

For the study of the acoustic behavior of this space at the bottom of the cathedral, assessments were carried out of the following acoustic parameters: T_{30} , EDT, D_{50} , C_{80} and Ts.

3.2 Calibration of the model and acoustic simulation

A simplified 3D model of the geometry of the cathedral of Seville was built in order to simulate its acoustic behavior.

A calibration process had previously been carried out using the results obtained from the source situated in the Main Chapel, but the size and architectural complexity of this particular space made it necessary to reconsider the adjustment of the main acoustic parameters for the different receivers considered for the sound source situated in the *trascoro*. In fact, most of the standard errors of the average spatial value in each frequency band for each parameter based on impulse responses measured for the different receivers throughout the cathedral, are higher than their respective JNDs. This suggests that perceived reverberation may be different in different areas of the cathedral⁵.

The initial sound field simulation was carried out with the unoccupied cathedral, that is to say, under the same conditions as experimental measurements. In general, the same receiver positions as in the in situ measurement were considered for the simulation, averaging the values obtained in the receivers on which direct sound from sound source S1 in the *trascoro* incides. This was to characterize the acoustics of the specific area, not those of the cathedral as a whole. The number of rays was determined manually and it was confirmed that the calculation converges with 300000 rays. The assessment of the results of this simulation was used as reference for establishing a comparison between the different hypotheses. As was expected, given the particular geometry of the cathedral and its mainly stone interior, high reverberation was obtained with an average T_{30} of around 5 seconds and an EDT slightly higher than 4 seconds, both at mid frequencies.

After comparing the different reverberation time values obtained in situ and through simulation it was observed that there was no need to adapt the different absorption and scattering coefficients of the materials which had already been adjusted (Figure 2).

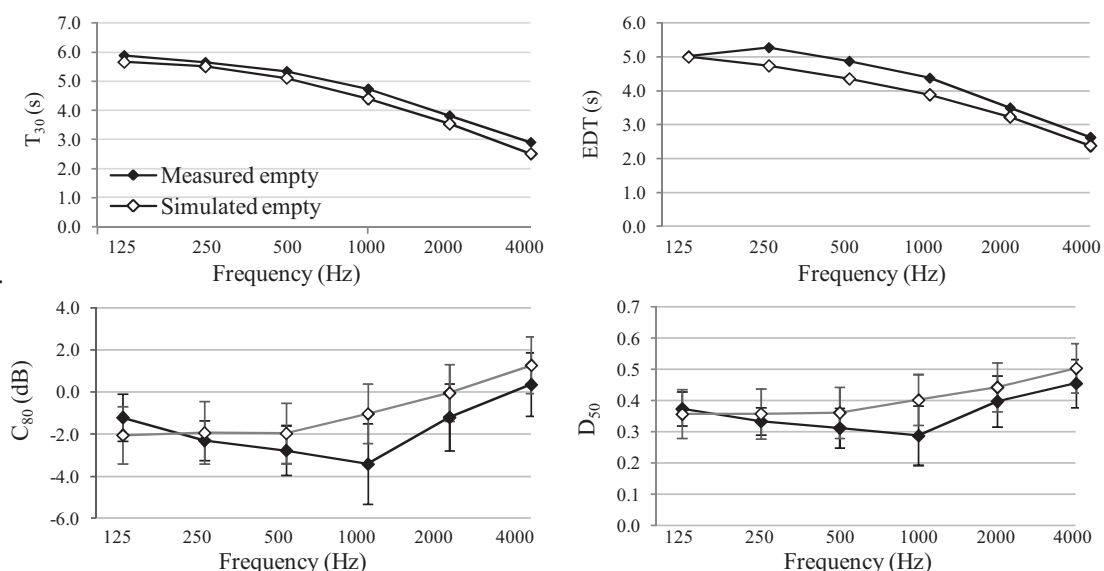


Figure 2. Simulated and measured spectral behavior of the acoustic parameters studied, spatially averaged, and their standard error.

As regards the energy parameters, it was observed that the spectral behavior of the measured and simulated values was very similar. Spatially averaged simulated values were rather similar to values calculated in experimental tests, with the exception of the 1 kHz frequency band, where they slightly exceeded 2 JNDs, which is considered acceptable given the particular characteristics of the enclosure studied and its volume of over 200000 m³. Table 1 shows the main geometric data of the space.

Table 1. Geometric data of the space.

Volume	Maximum measurements of the cathedral			Naves	Chapels
	Height	Length	Width		
≈216000 m ³	37 m	116 m	76 m	5	18

4. Results and assessment

The study of the sound field was carried out in the *trascoro* of the cathedral, a multifunctional space at the bottom of the building, used for different sorts of ceremonies. This study consisted of an analysis of the results of the parameters obtained following the acoustic simulation of different configurations adopted for the celebration of the liturgy and for events with large audiences.

The variation in position of the sound source (S1 and S2, Figure 1a), and the addition of sound absorption due to the presence of an audience, or draperies on the planes at the end behind the celebration altar and on the columns situated in the audience area, made it possible to reach important conclusions on the influence of these aspects on the acoustic behavior of this wide open space in the cathedral of Seville.

It should be noted that the parameters relating to reverberation (T_{30} and EDT) were compared with the optimum theoretical values proposed by Beranek⁶ for religious music. For the remaining energy parameters analyzed (C_{80} , D_{50} , T_s), the values used as typical for concert halls were chosen, given the lack of relevant references for church buildings other than those mentioned previously in Berardi's compilation of the work of several authors on music and speech indices⁷.

4.1 Liturgical celebrations

4.1.1 Configurations H1A and H2A

These configurations feature an audience area of approximately 160 m² which includes wooden pews situated in the central nave with a seating capacity for 320 people. The formula proposed by Martellotta et al. was used to establish the absorption coefficients for the surface of this occupied seating area⁸. In addition, velvet draperies behind the celebration altar were used as ephemeral decoration for the occasion (Figures 1b and 1c).

Five microphones were positioned in the audience area of the central nave (Fig. 1a) and the results were averaged. A clear improvement of acoustic conditions could be observed in the celebration space compared to the initial model, that of an empty *trascoro* with no furniture or public. The mere addition of furniture and public in this audience area, along with the draperies at the end, reduces the EDT by almost 1 s, 5 JNDs, irrespective of the position of the source. (Fig. 3b, Table 2).

More satisfactory values were also obtained for the remaining acoustic parameters: there was an increase in C_{80} of almost 2 JNDs at points close to the source, or of 1 JND at receivers positioned almost 20 meters from the source (Figure 3c, Table 2). Improvements in the case of the parameters evaluating D_{50} , are less perceptible as the results differ by less than 1 JND (Figure 3d, Table 2). Intelligibility assessed with T_s and STI also showed improved behavior (Figure 3e and 3f, Table 2).

In Figure 3 it can be seen that configuration H2A is slightly more favorable than H1A in each of the parameters analyzed, although in fact the variations obtained are more significant in the case of music, as C_{80} was improved, increasing by slightly over 1 JND.

4.1.2. Configurations H1B and H2B

For the celebration of extraordinary or annual liturgies draperies covered the columns and concealed their stone surfaces. This entailed an increase in sound absorption and a greater improvement of acoustic conditions. If T_{30} is taken into account it can be observed that adding draperies to the six columns of the central nave which delimit the audience area do not cause a significant reduction of reverberation time, although there is a reduction of EDT, particularly in the 1kHz frequency band, with values decreasing by close to 1 s, 5 JNDs (Figure 3b, Table 2). This is in keeping with the optimum theoretical values established by Beranek for religious music. For this reason, C_{80} , D_{50} and T_s show small improvements in their results, and it is worth noting that for points within the audience area, 25 m from the sound source, intelligibility is considered to be fair (Figure 3c-f, Table 2).

4.2 Events with large audiences

The considerable increase in the surface area destined to the audience, which occupies almost 1030 m², with seating for approximately 2000 people entails a considerable increase in sound absorption, which is extremely positive for a space as reverberant as the cathedral. However, suitable areas have to be found to accommodate the public as the many columns in the central and side naves hinder the incidence of direct sound on most of the audience area.

There are barely significant variations in the results obtained for the different parameters in the two configurations established, H3A and H3B, but there are variations with respect to the earlier ones, including the two most favorable ones, H1B and H2B (Figure 3, Table 2).

In these configurations for events with large audiences, the EDT at mid frequencies can even be approximately 0.5 s, lower than that advised for religious music although at mid frequencies it was clearly maintained above 0.8-1.0 s, optimum values for speech⁷. The rest of the acoustic parameters analyzed showed a clear improvement in comparison to H2B, providing they were the result of the average of those obtained in the points in the central nave. Improvements of almost 2JNDs were reached for C_{80} , a 3 JND difference for T_s , and of 1 JND for D_{50} , compared to H2B. It seems evident that if the comparison is carried out taking into account the whole cathedral, adding points to distances over 30 meters, this difference decreases although acceptable values are still obtained.

5. Conclusions

The position of the choir in the cathedral of Seville in the middle of the central nave breaks up the space to form a new zone at the bottom of the building. This large multifunctional space is the *trascoro*, which is used to celebrate different types of events. The study of the sound field of the *trascoro* made it necessary to consider several hypotheses in order to reproduce specific spatial configurations adopted both for the liturgy and for the celebration of events with large audiences. The acoustic simulation of the different hypotheses made it possible to establish the acoustic influence of the presence of the public, as well as ephemeral decoration added for extraordinary liturgies or major celebrations.

The assessment of the results allows us to conclude that just occupying the central nave in this part of the cathedral (H1A, H2A), with a seating capacity for approximately 320 people reduces the reverberation for the listeners, EDT, by almost 1 s. When comparing the configurations in which the position of the source varied from S1 to S2, it was observed that the values for S2 were slightly more favorable. Equally, the slight increase in absorption due to the addition of draperies on columns (H1B and H2B), caused a noticeable reduction in the reverberation evaluated by the EDT, particularly in the 1kHz frequency range, in which variations in values around 1 s were reached. It should be noted that even at distances of around 25 meters from the sound source, intelligibility is considered fair.

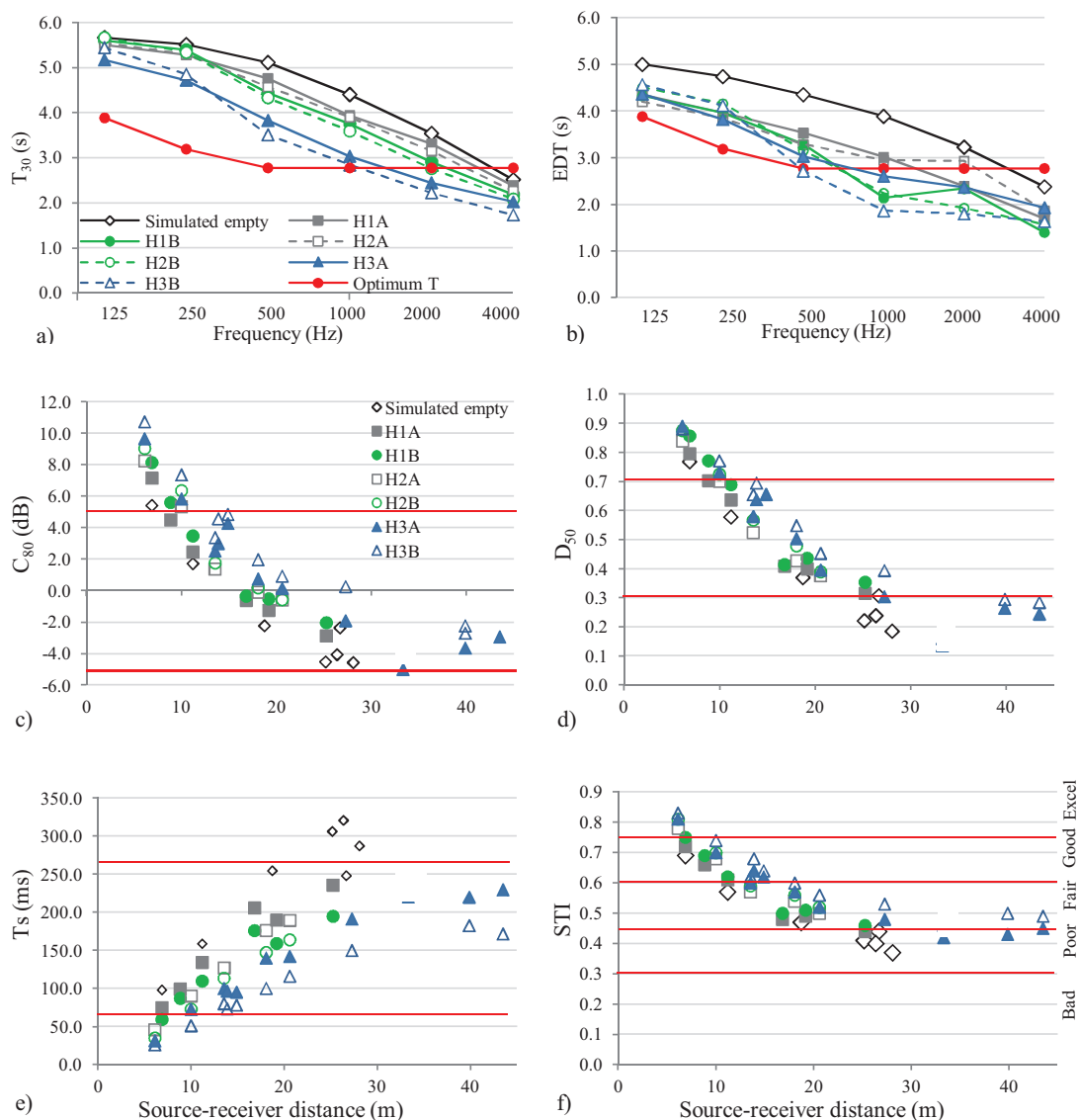


Figure 3. 3a.T₃₀; 3b.EDT; 3c.C₈₀; 3d. D₅₀; 3e.Ts; 3f. STI

Table 2. Average values and standard error of the acoustic parameters analyzed.

HIP/SOURCE	Nº P	T _{30m} ±std err	EDT _m ± std err	C80 _m ±std err	D50 _m ±std err	T _{sm} ±std err	STI _{avg} ±std err
SIM. S1	7	4.76 ± 0.03	4.12 ± 0.18	-1.50 ± 1.42	0.38 ± 0.08	239.2 ± 30.87	0.48 ± 0.04
HIP.1A S1	5	4.35 ± 0.04	3.20 ± 0.10	1.58 ± 1.56	0.59 ± 0.08	140.9 ± 25.96	0.59 ± 0.05
HIP.1B S1	5	4.10 ± 0.02	2.72 ± 0.18	2.47 ± 1.56	0.63 ± 0.09	118.2 ± 21.87	0.61 ± 0.05
HIP.2A S2	5	4.23 ± 0.10	3.12 ± 0.29	3.29 ± 1.63	0.57 ± 0.09	126.0 ± 26.61	0.61 ± 0.05
HIP.2B S2	5	3.96 ± 0.06	2.70 ± 0.19	3.37 ± 1.86	0.61 ± 0.09	106.7 ± 23.71	0.64 ± 0.05
HIP.3A S2	5	3.32 ± 0.10	2.55 ± 0.25	3.80 ± 1.77	0.62 ± 0.09	97.43 ± 20.92	0.64 ± 0.05
	11	3.43 ± 0.09	2.82 ± 0.16	1.17 ± 1.34	0.49 ± 0.07	140.1 ± 20.26	0.57 ± 0.04
HIP.3B S2	5	2.98 ± 0.15	2.07 ± 0.16	4.89 ± 1.82	0.66 ± 0.08	74.97 ± 16.29	0.67 ± 0.05
	11	3.18 ± 0.13	2.30 ± 0.11	2.30 ± 1.35	0.53 ± 0.07	115.8 ± 19.45	0.60 ± 0.03

20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20), Bangkok, Thailand, 7-11 July 2013

Finally, the substantial increase in audience surface area for events with large audiences, approximately 1030 m² (3.1% of the total interior floor area), with a seating capacity for approximately 2000 people (H3A and H3B), brings about a noticeable increase in sound absorption and represents a clear improvement in the results obtained for each of the acoustic parameters analyzed, with differences greater than 3 JNDs for C₈₀ with respect to the empty simulation of this space. However, it was necessary to bear in mind the whole of the audience floor area, which suffered from the presence of column structures generating numerous areas unsuited to accommodating an audience, due to the lack of visual contact, and hence, direct sound.

REFERENCES

- ¹ Navascués Palacio, P., *Teoría del Coro en las Catedral esespañolas*, Speech read by the author on the occasion of his public appointment as member of the Academy of Fine Arts, Madrid, (1998).
- ² Torre Farfán, F. d. l., *Fiestas de la Santa Iglesia Metropolitana y Patriarcal de Sevilla al nuevo culto del Sr. Rey San Fernando*. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla, 22, (1995).
- ³ Alonso, A., Suárez, R., Sendra, J.J., Álvarez, L., La acústica del crucero de la catedral de Sevilla en las grandes celebraciones, *Proceedings of the VIII Congreso Iberoamericano de Acústica and XLIII Congreso Español de Acústica*, Évora, Portugal, (2012).
- ⁴ ISO 3382-1:2009(E): Acoustics-Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance rooms. *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland (2009).
- ⁵ Álvarez, L; Alonso A.; Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. Modelo acústico inicial para simular el campo sonoro de la catedral de Sevilla, *ISVA*, Valencia 24-25 Noviembre, 106-113, (2011)
- ⁶ Beranek, L., *Acoustics*. Acoustical Society of America, Nueva York. (1993)
- ⁷ Berardi, U. A double synthetic index to evaluate the acoustics of churches, *Archives of Acoustics*, **37** (4), 521-528, (2012).
- ⁸ Martellotta, F., Della Crociata, S. D'Alba, M. On site validation of sound absorption measurements of occupied pews.(application of the formulae specified in table 1: density d=2people/m²; clothing resistance I_{cl}=0,75) *Applied Acoustics* **72** (12), 923-933, (2011).

COMUNICACIÓN 5

ACOUSTICAL INFLUENCE OF DIFFERENT LOCATIONS OF THE CHOIR IN THE CATHEDRAL OF GRANADA FROM A SUBJECTIVE AND OBJECTIVE OVERVIEW

AUTORES: **Alonso, A.**; Suárez, R.; Sendra, J.J.

CONGRESO: Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration
(2016) pp. 1-8.

ACOUSTICAL INFLUENCE OF DIFFERENT LOCATIONS OF THE CHOIR IN THE CATHEDRAL OF GRANADA FROM A SUBJECTIVE AND OBJECTIVE OVERVIEW

Alicia Alonso, Rafael Suárez and Juan J. Sendra

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Spain. e-mail: aliciaalonso@us.es

The choir is a space that greatly influences the design and architectural configuration of a cathedral. Cultural influence, the reform of the liturgy and agreements reached during ecclesiastical councils in the last centuries have promoted a relocation of this space. Since its origins, it has been a privileged and reserved enclosure, providing a private character. This space is reserved for the clergy for prayer, preaching, or chant, promoting churches as places where music can be heard. The Renaissance cathedral of Granada in Spain is one of the most important historic religious spaces in southern Europe. Over time, the choir was moved up from the central nave to the back of the presbytery to be finally distributed inside the cathedral. Virtual modelling using geometrical acoustic prediction is a very helpful tool to investigate these choir locations in the acoustic behaviour of the cathedral. Hence, based on experimental acoustic measurements carried out previously, sound space reconstruction was recreated virtually. The creation of a virtual model of its sound field led to the implementation of the three main documented changes. In this paper, the role of the choir within the liturgy was considered in terms of acoustics and the acoustical performance of the evolution of various interventions was analysed. The impact of the relocation of choral space is evaluated from a perspective that analyses the relationship between subjective qualities and the acoustic parameters measured. In addition, the acoustical suitability of the cathedral in terms of the performance of different music motifs is also considered. Therefore, a comparative analysis in terms of temporal design, incorporating the study of early reflections together with the type of music is addressed to investigate the influence on the acoustical performance of the cathedral.

1. Introduction

Speech and music, especially choral music, are two of the main functions carried out in Christian spaces of worship [1]. For this reason, in recent years there has been a notable increase in the analysis of acoustical conditions of churches, in order to establish their suitability, in addition to assessing and promoting their acoustical heritage value during major liturgical celebrations.

The cathedral type stands out in Western religious architecture as it is the main Christian church, given its spatial and functional complexity and its unique size. The interior configuration and organization of these churches depend on the liturgical function carried out and vary depending on how the space is used by the clergy and the faithful, as well as by the form and location of the choir. Alterations of these variables over time could lead to major spatial and functional transformations inside the cathedrals. The cathedral of Granada is one of the most important examples of the vital role of the choir in the cathedral space. The triple intervention carried out changing the position of the choir throughout its history brought about major spatial, functional and acoustical changes.

The interpretation of music in cathedrals can be classified into different types of chant and instrumental music, with acoustical demands varying depending on the music motif. Different studies

have explored this matter in depth, determining that the ideal acoustical conditions in a church space display greater flexibility than that required in concert halls. In fact, some research has proven the subjective preference for acoustics with higher reverberation than that recommended for other types of spaces [2,3].

This paper carries out an acoustical assessment of the different spatial transformations of the cathedral of Granada depending on the location of the choir, and introducing the musical condition using a form of spatial-functional identification. The results section is analysed in terms of a temporal design approach, considering the four orthogonal parameters defined by Ando [4]. This new approach requires an experimental study based onsite acoustic measurements, as well as the use of simulation techniques for the assessment of the sound perceived depending on the type of music: choral or instrumental.

2. Spatial and functional analysis of the cathedral of Granada

2.1 Description of the cathedral

The cathedral of Granada, considered one of the most important religious spaces in southern Europe, is a renaissance church with a basilica floor plan, divided into five vaulted naves, a transept that sections the naves transversally, a polygonal ambulatory, and chapels along the perimeter.

The original design by Diego de Siloé in the 16th century aimed to distance itself from the conventional Gothic solution by incorporating the concept of centrality in the head of the temple. However, the solution finally adopted in the cathedral placed the choir in the centre of the space. The central nave was divided into two differentiated spaces, one for the clergy and another for the congregation. The main structure of the building and most surfaces are coated with plaster, with a variety of different finishes. Table 1 shows the main geometric data of the space.

Table 1: Geometric data of the space.

Volume (m ³)	Maximum measurements of the cathedral			Naves	Chapels
	Height (m)	Length (m)	Width (m)		
≈160500	35 / dome: 47	106	63	5	19

2.2 Spatial transformations of the cathedral

The choir is a unique space designed for the representation of chant. The three main different positions of the choir brought about major spatial transformations in the cathedral:

- Configuration M1. Originally the choir space was placed in the middle of the central nave, which it divided into two large differentiated areas. The choir space is designed as a fundamental part of the cathedral of Granada given its influence on the interior space of the church and the location of the congregation. Its presence constituted a physical obstacle to the congregation's view of the high altar (Fig. 1.a).
- Configuration M2. An intervention was proposed in the early 20th century suppressing the choir from the central nave to install it in the main chapel, providing an optimal spatial-functional relationship. However, this modification meant that the two organs which had previously been on the walls of the former choir were left hanging. In addition, including the choir in the presbytery, previously conceived as an open space visible from the ambulatory, would eliminate the concept of centrality (Fig 1.b).
- Configuration M3. The final intervention was carried out in the late 20th century. The choir was eliminated from the main chapel and the openings which connected this space with the ambulatory were reopened, allowing connection with the congregation. The result of this process of spatial and functional evolution is an open floor plan that is completely interconnected in all areas. The new location for orchestras and choral groups is established in the transept area and is studied in detail in this paper.

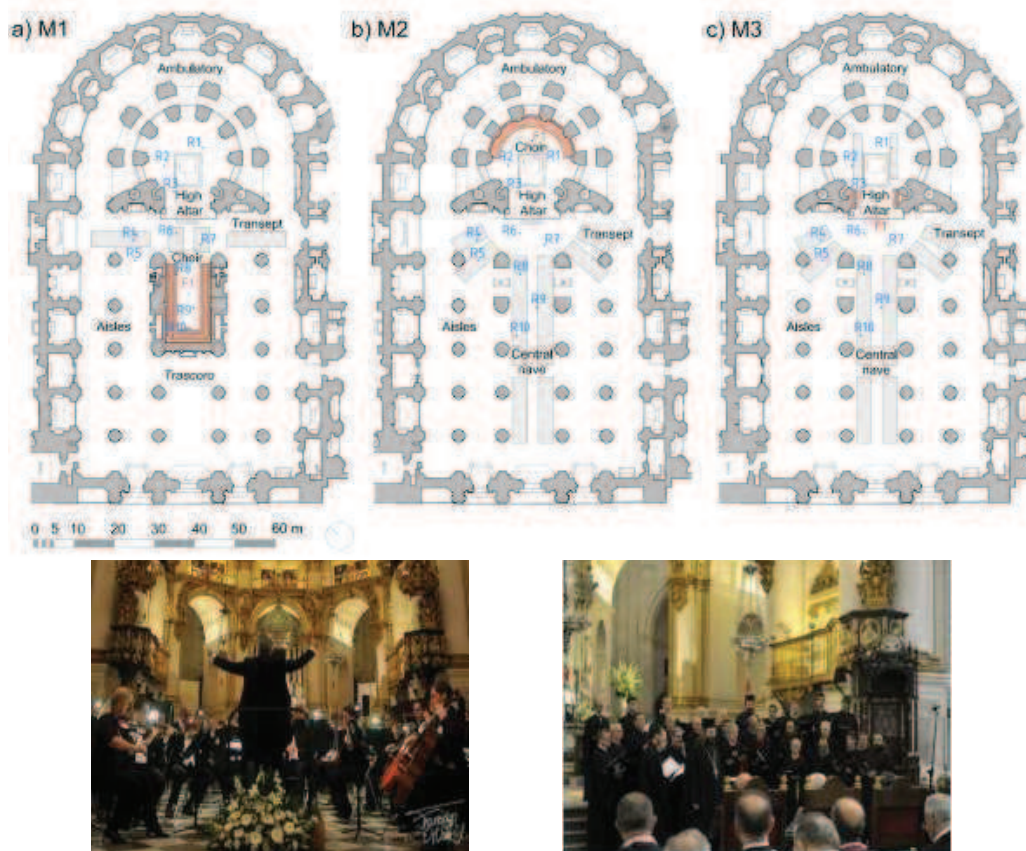


Figure 1: Historical configurations of the cathedral of Granada a) year 1619 (M1); b) year 1929(M2); c) Current conditions, since 1992 (M3); d) Position of orchestra and choir at present.

3. Methods

The methodology followed for the assessment of the perceived acoustical sensation of the different historical configurations of the cathedral of Granada is described according to the music motif performed, categorized into choral (Alleluia and Gregorian chants) or instrumental (Bruckner's Romantic Symphony). Several details relating to the musical pieces selected should be noted: the first chant is characterized by voice modulation; the second is a fragment performed by a choir with four unaccompanied voice parts, with a series of crescendos and diminuendos; finally, the piece for orchestra selected is characterized by a suitable equilibrium in spectral terms and is characterized by a slow initial part moving on to a crescendo [3]. Firstly, a set of onsite acoustic measurements was conducted, based on the guidelines set in ISO 3382 [5], in order to characterize the acoustic sound field of the temple. The calibration process of the virtual model reproducing the current conditions of the space became possible thanks to the development of this experimental technique. In addition, the creation of virtual models of the space in three different historical configurations was necessary in order to research the acoustical influence of the relocation of the choir. The predicted values were provided using the commercial package Catt-Acoustics v9.0c, based on geometrical acoustics (GA) theory. Finally, the values were obtained for temporal and spatial factors depending on the music motif performed: choral or instrumental, in order to carry out a comparative analysis between the acoustical environments of the three scenarios. This was done in two phases: it was firstly necessary to consider the same sound source in the three configurations for the representation of the same music motif, and subsequently the same configuration (M3) was considered using three different pieces of music.

3.1 Experimental technique

Acoustic measurements were conducted at night time in the unoccupied cathedral of Granada. The excitation response of the cathedral was generated by emitting sine swept signals using an omnidirectional dodecahedron sound source (AVM do-12), with frequency increasing exponentially over time. The duration of the sweep was set to 20 s and covered the octave bands from 63 to 16000 Hz with a power amplifier (B&K 2734). Sound source and receiver positions were placed throughout the audience area, at a height of 1.50 meters and 1.20 meters from the floor surface, respectively. Room impulse responses were acquired using a multi pattern microphone (Audio-Technica AT4050/CM5) which directivity switched from omnidirectional to bidirectional in a figure of eight. Consequently, all the acoustical parameters needed for the purposes of calibration were obtained using signal processing.

3.2 Calibration of the model and acoustic simulation

As regards the level of detail used in the construction of the model, it should be noted that the geometry was simplified and cornices and other elements lineally measuring under 50 cm were not included. Although it was necessary to reduce the number of planes, the geometrical base of the model was respected at all times. Values obtained from the acoustic measurements meant that the calibration of the model represented the space accurately. The process was basically generated by adjusting absorption and scattering coefficients and comparing various acoustical parameters using an iterative process. These factors were selected following a visual inspection of the surface of the space. The best adjustment result was obtained with a suitable selection of the characteristics of the stone and its absorption and scattering coefficients.

Conventionally, the calibration process and the acceptance of the model are completed by obtaining JND differences below 1 for T_{30} (5%), and less than 2 when assessing other parameters. However, the calculations for spaces with high reverberation must be more flexible given that the threshold for subjective sound perception shows differences, as reflected in different studies [3]. Figure 2 shows the spectral results of the model tuning process of T_{30} , C_{80} and T_s . A fair adjustment of reverberation time T_{30} with differences of less than 1 JND in all octave bands is observed. As regards the other parameters, it was observed that spatially averaged simulated values were rather similar to measured values, with the exception of low frequency values, where occasional discrepancies appeared, especially for T_s , slightly exceeding 2 JNDs. It must be noted that some studies have proven that GA techniques are sufficiently more accurate and widely used in the prediction of mid-high frequency behaviours of rooms [6], than low frequency results, where the Finite Element Method is the best calculation option.

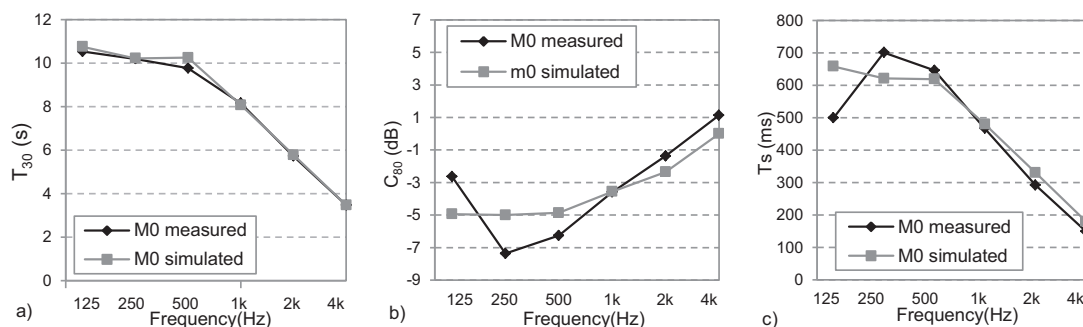


Figure 2: Spectral behaviour of spatially averaged acoustical parameters: a) T_{30} ; b) C_{80} ; c) T_s .

3.3 Temporal and spatial factors

In this study, based on Ando's model of hearing [7], it is taken into consideration the subjective preference of the listener as an overall impression of the acoustical environment and determines the acoustical quality of the cathedral.

In fact, previous research shows that processing sound capabilities by each hemisphere, had a noticeable influence in terms of the description of subjective parameters, categorized into temporal and spatial factors. On the one hand, delay of first reflection (Δt_1) and subsequent reverberation time of the signal (T_{sub}) are included in the first group. Δt_1 values were analytically obtained using the acoustical software and T_{sub} coincides with reverberation time. On the other hand, the second group contained the listening level of sound (LL), which coincides with SPL (A-weighted), and Inter Aural Cross Correlation (IACC), which measures the difference in signals received by both ears. Consequently, the four orthogonal parameters based on brain activities were considered in developing this research.

The same source position and different music motifs (vocal and instrumental concerts) were investigated for the three historical configurations of the cathedral. As fundamental attributes are contained in each sound field, it was possible to check the optimum acoustical design stage and the most suitable type of music. In this research, the repertoire selection for the analysis was made up of two types of chants, Alleluia and Gregorian, together with instrumental music (Bruckner's Romantic symphony). A value of 26 and 90 ms was used for Gregorian and Alleluia chants, respectively and a value of 136 ms for orchestral music.

3.3.1 Subjective preferred conditions

The deviation from the preferred conditions is evaluated by the linear scale value of preference (S_i) for each parameter, whose sum results in the total value S . The obtainment of optimal design values was needed to calculate this new parameter, as is explained in detail in [4]. This is related both to delay of first reflection and to the actual duration of autocorrelation envelope (τ_e). In this sense, in order to determine the subjective sound quality of the cathedral, the definition of the hypotheses of study together with the repertoire that will be performed are needed.

Musical performances in cathedrals vary greatly since these spaces have become one of the venues for promoting vocal and instrumental concerts. A comparative analysis was carried out in terms of temporal design, incorporating the study of early reflections (Δt_1) analytically determined using image source model, as well as the type of music. Based on the assumptions set forth in previous studies, a simplified approach is used in which the preferred delay time (Δt_{1p}) is equal to the τ_e value, depending on the type of music considered [3]. $[T_{\text{sub}}]_p$ also depends on τ_e and is assumed to be approximately $23\tau_e$; LL_p , was assessed in a specific point of the enclosure, in this case approximately 15 metres from the source. In the case of IACC, the dissimilarity of signals arriving at both ears is preferred, thus the preferred value is assumed to be 0. However, research currently being developed shows that this fact is not emphasized when the listener perceives the sound in a reverberant space like a cathedral. This allowed the acoustical suitability of each configuration of the cathedral to be checked.

4. Results and discussion

In this study, acoustical influence is assessed in terms of temporal design of different historical configurations with different positions of the choir. The analysis of the sound field was carried out considering the sound source position in front of the transept, where cantors and orchestra are placed during events and concerts. Firstly, variations of each orthogonal parameter, categorized into temporal (T_{sub} , Δt_1) and spatial factors (LL and IACC), depending on the choir location and the type of music, are described. Parameter values were obtained following the acoustic simulation of different configurations. Consequently, it was possible to observe which model was acoustically more suitable when the same position of sound source is considered, by representing the influence of these parameters on the linear scale value.

4.1 Analysis of different configurations

Figure 3 shows general variations that were observed in receiver points when considering the different historical configurations. In order to carry out this comparative analysis Bruckner's Romantic Symphony was considered, given that orchestral music is one of the main representations occurring in source A1. As regards spatial factors, it should be noted that IACC is the factor with the most negative influence on subjective preference, nearing -1 on the scale value for almost all points considered. This demonstrates that left and right signals in the cathedral are substantially similar. This is because the sound sensation in the cathedral approaches the binaural sensation in the form of monophonic behaviour, as IACC values were close to 1. No significant influence is observed due to the type of configuration analysed. In the case of LL it is observed that the negative effect is greater in the points closest to the sound source (R6 and R7, Fig. 1). This occurs in all three models, although it is slightly less noticeable in configuration M1 as the distribution is more uniform in the central nave given the central location of the choir. As stated previously, LL_p is calculated at a distance of 15 metres, and as a result, points that are excessively close record high SPL values which differ from the optimal value by almost 8 dB (Table 2).

In this case, the same musical repertoire and, consequently, the same τ_e was selected in obtaining the parameters for the three models. However, varying the position of the choir has a strong effect on the arrival of the early reflections at some points. The variations in temporal factors can be understood better when different musical representations are considered. Nevertheless, a significant negative effect is observed in the early reflection delay, as Δt values obtained differ greatly from those preferred for the orchestral representation of Bruckner's Romantic Symphony ($\tau_p \approx 136$ ms). On the contrary, this entails a preference for a relatively high reverberation, slightly higher than 3 seconds, a preference which could even increase given the high reverberation of the space and its acoustics, described earlier as 'church' acoustics.

It should be noted that $S_1+S_2+S_3$ obtain a sum of less than 0.5 in the scale value of R5, as its strategic position between two pillars generated a positive effect on the results. In general, it could be stated that configuration M2 provides the lowest scale value, assuming the best acoustical quality at points located in the estimated occupancy areas. Figure 4 a-b) depict variations of scale value in terms of delay time of first reflection and distance between source and receiver. As was to be expected, in the case of Bruckner's Romantic Symphony, S decreases as the delay increases, nearing the preferred values. The opposite occurs when the S-R distance is taken as factor of reference, given that conditions worsen as distance increases.

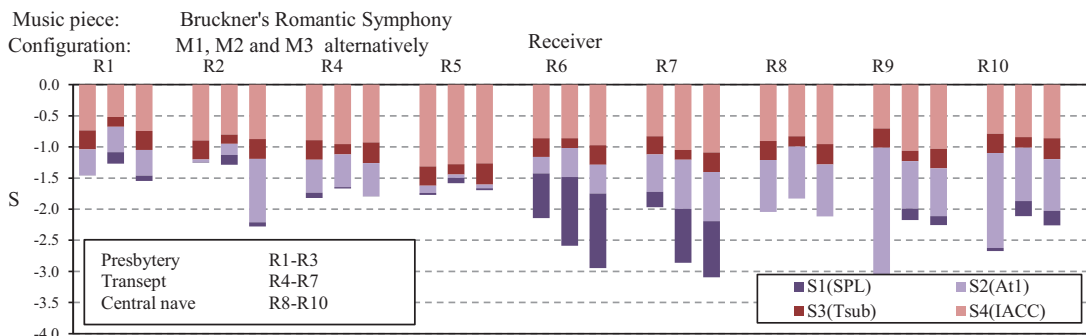


Figure 3: Influence of different configurations of the cathedral in the orthogonal parameters considered on the linear scale value of each receiver, from the same sound source (A1).

Table 2: Variation ranges defined by the differences between the maximum and minimum values.

Hypotheses	SPL (dB)	T_{sub} (s)	IACC	Δt_1 (ms)
M1	6.1	0.44	0.53	77.3
M2	8.04	0.35	0.53	21.4
M3	8.18	0.33	0.27	77.5

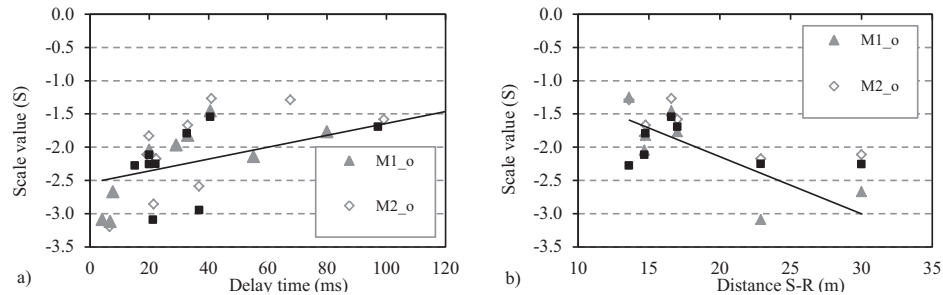


Figure 4: Representation of scale value of preference (S) depending on delay time Δt (a); S-R distance (b).

4.2 Analysis of music motifs

For this analysis the same configuration (M3), representing the current conditions of the cathedral, was considered with various pieces of music in order to assess how the type of music affects the same scenario. As stated before, Alleluia and Gregorian chants, together with Bruckner's Romantic Symphony were the selected repertoire, since sound source A1 represented the real position of a choir group or an orchestra. Accordingly, a different τ_e was chosen for each music motif. This choice has strong consequences on the sum of each scale values (S_i). In this analysis, early reflections remain constant as it is the same configuration, suggesting a constant value of spatial factors. However, as temporal data contains information about important musical qualities, the two temporal factors has a significant influence in the variation of S.

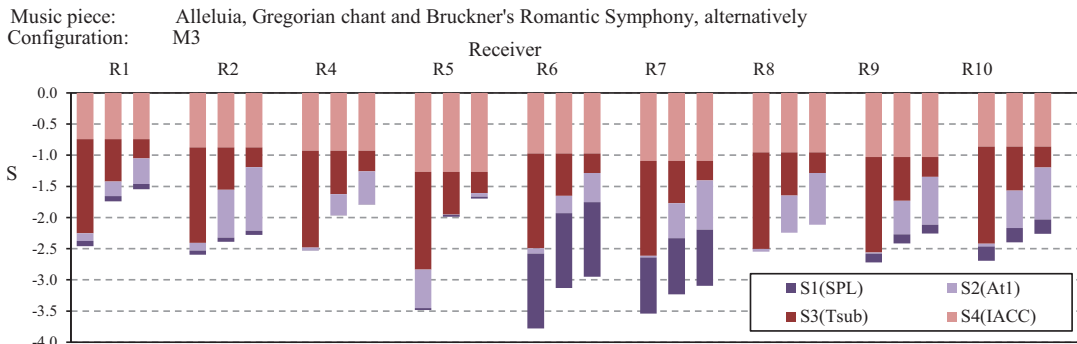


Figure 5: Influence of different music motifs on the orthogonal parameters considered on the linear scale value of each receiver. Configuration M3 and sound source A1.

Based on the assumption that optimum reverberation time value for Alleluia is lower than a second ($T_{subp} \approx 0.60$ s), it can be stated that T_{sub} had the strongest negative influence on total scale value (Figure 5). A reverberant cathedral is far from reaching such low values. Nevertheless, a positive effect is observed in S_2 , since it was observed that delay time values do not greatly differ from those considered optimum for this activity ($\tau_p \approx 20$ ms), while giving the poorest acoustical quality.

The opposite effect occurs when orchestral symphony is performed, due to the longer τ_e requirement preferred for this type of music, featuring slow symphonic passages for wind and string instruments. In this case, T_{subp} were longer, reaching better optimum design objectives in the cathedral.

However, except in some specific points, in general, early reflections usually arrived within 20-30 ms, a value differing greatly from that of τ_p , which was the largest of the three models, resulting in significantly worse behaviour. Figure 5 shows the influence of the type of music and it has been verified that the effect of reverberation is more perceptible. Thus, longer optimum reverberation values are better suited to the acoustical behaviour of the cathedral.

5. Conclusions

Three major interventions changing the position of the choir have been carried out in the cathedral of Granada. This study assesses the subjective acoustical influence of the spatial transformation within the cathedral throughout its history. In addition, the acoustical performance of choral or instrumental music in the cathedral was also evaluated in terms of subjective preference. The analysis and discussion of results took place using a temporal design approach.

It is known that the fundamental attributes are contained in the simplest sound field, which consists of direct sound, and a single reflection representing a set of reflections. It was thus possible to check that configuration M2, with the choir in the main chapel, provides the best acoustical suitability in terms of temporal design in occupied zones. Closing off the main chapel by changing the position of the choir brings about a slight increase in subjective preference at most points considered, while the value of S mainly diminishes in temporal factors.

As for the variation observed at each point when the type of music is varied, it should be noted that there is a subjective preference for certain types of instrumental pieces over sung pieces, as the wider reverberation has a positive effect on low-pitched fragments with a slow tempo featuring wind or string instruments. Generally, T_{sub} has a worse effect on chants, however, a high reverberation time close to 10 s has a negative effect on all types of music. Besides, it should be noted that the scale value associated with Δt_i factor increased for orchestral music, where preferred conditions differed from those obtained. In light of the results, it can be confirmed that the cathedral is acoustically more suitable when optimum reverberation values are longer, since the negative effect of the early reflections is not as significant.

Further research must be carried out to provide a detailed analysis of the acoustical influence of the three spatial transformations, taking into account objective acoustical parameters and determining variations in terms of JND by zone.

Acknowledgments

This work has been financially supported by the Spanish Government, with reference BIA2014-56755-P and FPU12/04949.

REFERENCES

- 1 Navarro, J., Sendra, J.J., Muñoz, S. The Western Latin church as a place for music and preaching: An acoustic assessment, *Applied Acoustics*, **70** (6), 781-789, (2009).
- 2 Carvalho, A. P. O., Morgado, A. E. J. and Henrique, L. Relationship Between Subjective and Objective Acoustical Measures in Churches, *Building Acoustics* **4** (1), 1–20, (1997).
- 3 Martellotta, F. Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches, *Journal of Sound and Vibration*, **317**, 378-399, (2008).
- 4 Ando, Y. *Architectural Acoustics: Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*, Springer-Verlag, New York, 26-40, (1998).
- 5 ISO 354. Acoustics-Measurement of sound absorption in a reverberation room, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, (2003).
- 6 Savioja, L., Svensson, U.P. Overview of geometrical room acoustic modelling techniques. *J. Acoust. Soc. Am.* **138** (2), 708-730 (2015).
- 7 Soeta, Y., Ando, Y. Neurally Based Measurement and Evaluation of Environmental Noise, *Mathematics for Industry* **20**, Springer, Japan, (2015).

PUBLICACIONES

- (A.A.V.V. 1985-1989): A.A.V.V. 1985-1989. History of World Architecture series, general editorship of Pier Luigi Nervi. Electa Rizzoli:New York.
- (Abdou 2003): Abdou, A.A. 2003. "Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia". Journal of the Acoustical Society of America 113: 1505–1517.
- (Abraham 1979): Abraham, G. 1979. "The concise Oxford history of music". Oxford University Press: London.
- (Ackerman 1972): Ackerman J.S. 1972. "The Gesu in the Light of Contemporary Church Design" en: Wittkober, R. & Jallé, 1. B., Baroque Art: the Jesuit contribution. Fordham University Press: Nueva York.
- (Allard and Champoux 1992): Allard, J. F., Champoux, Y. 1992. "New Empirical Equations for Sound Propagation in Rigid Frame Fibrous Materials". Journal of the Acoustical Society of America 91 (6): 3346– 3353.
- (Álvarez et al. 2013): Álvarez, L., Galindo M., Girón S., Zamarreño T. 2013. "La acústica de las Catedrales Andaluzas". Proceedings of Tecniacústica2013, Valladolid, Octubre 2-4, pp. 901-908.
- (Álvarez et al. 2016): Álvarez-Morales, L., Girón, S., Galindo, M., Zamarreño, T. 2016. "Acoustic environment of Andalusian cathedrals". Building and Environment 103: 182-192.
- (Álvarez et al. 2014): Álvarez-Morales, L., Zamarreño, T., Girón, S., Galindo, M. 2014. "A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: application to the Cathedral of Malaga". Building and Environment 72: 102-115.
- (Anderson and Bratos-Anderson 2000): Anderson, J. S., Bratos-Anderson, M. 2000. "Acoustic coupling effects in St Paul's Cathedral, London". Journal of Sound and Vibration 236(2): 209-225.
- (Anderson and Bratos-Anderson 1999): Anderson, J., Bratos-Anderson, J. S. 1999. "St. Paul's Cathedral London, as a Concert Hall". Proceedings of the VI International Congress on Sound and Vibration, Copenhagen, July 5–8.

- (Anderson 2013): Anderson, M. 2013. "London, St Paul's Cathedral: Tallis Scholars' 40th Anniversary: Jackson, Whitacre and Walker". *Tempo* 67 (265): 77–78.
- (Ando 1998a): Ando, Y. 1998. "Subjective Preference as an Overall Impression of the Sound Field". Chap. 4 in *Architectural Acoustics: Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*, 26-40. Springer-Verlag: New York.
- (Ando 1998b): Ando, Y. 1998. "Fundamental subjective attributes for sound fields from a model of auditory brain system". In: *Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics, ICA98, June 20-26, Seattle, USA, vol. 1*, pp.11-12
- (Ando 2004): Ando, Y. 2004. "On the temporal design of Environments". *Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment*, 4 (1): 22-14.
- (Astolfi et al. 2000): Astolfi, G., Garai, M., Secchi, S. 2000. "Scale Model Investigation on the Influence of Boundary Conditions on the Airborne Sound Insulation of Lightweight Double Walls". *Journal of Building Acoustics* 7 (4): 263–276.
- (Ayarra 1991): Ayarra, L. E. 1991. "Música en el culto hispalense". In: *La catedral de Sevilla*, edited by J. Sánchez-Dubé, 699–747. Sevilla: Guadalquivir.
- (Baena Gallé 2002): Baena Gallé, J. M. 2002. "Exequias reales en la catedral de Sevilla durante el siglo XVII", Diputación Provincial de Sevilla: Sevilla.
- (Bagenal and Wood 1931): Bagenal, H. Wood, A. 1931. "Planning for good acoustics". Methuen & Co. Ltd:London.
- (Barron 1983): Barron, M. 1983. "Auditorium Acoustic Modelling". *Applied Acoustics* 16: 279–290.
- (Barron and Lee 1988): Barron, M., Lee, L.J. 1988. "Energy Relations in Concert Auditoriums". *Journal of the Acoustical Society of America*. 84 (2): 618–628.
- (Barron 1988): Barron, M. 1988. "Subjective study of British symphony concert halls". *Acta Acustica United with Acustica* 66(1):1-14.
- (Barron 2000): Barron, M. 2000. "Measured early lateral energy fractions in concert halls and opera houses". *Journal of Sound and Vibration* 232 (1):79-100.
- (Barron and Marshal 1981): Barron, M., Marshall, A.H. 1981. "Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: The derivation of a physical measure". *Journal of Sound and Vibration* 77:211-32.

- (Becker and Sapp 2001): Becker J., Sapp M. 2001. "Synthetic soundfields for the rating of spatial perceptions". *Applied Acoustics* 62: 217-28.
- (Benedetto and Spagnolo 1984): Benedetto, G., Spagnolo, R. 1984. "Evaluation of Sound Absorbing Coefficients in a Reverberant Room by Computer-Ray Simulation." *Applied Acoustics* 17: 365–378.
- (Benevolo 1988): Benevolo, L. 1988. "Historia de la Arquitectura del Renacimiento. La Arquitectura clásica (del siglo XV al siglo XVIII)". Vols. 1 y 2. Gustavo Gili: Barcelona.
- (Beranek 1992): Beranek, L.L. 1992. "Concert hall acoustics". *Journal of Acoustical Society of America*. 92(1), 1-39.
- (Beranek 1993): Beranek, L. 1993. "Acoustics". American Institute of Physics, Acoustical Society of America: New York.
- (Berardi 2012): Berardi, U. 2012. "A Double Synthetic Index to Evaluate the Acoustics of Churches". *Archives of Acoustics* 37 (4): 521–528.
- (Berardi 2013): Berardi, U. 2013. "Simulation of Acoustical Parameters in Rectangular Churches". *Journal of Building Performance Simulation* 7 (1):1-16.
- (Berardi et al. 2009): Berardi, U., Cirillo, E., Martellotta, F. 2009. "A Comparative Analysis of Energy Models in Churches". *Journal of the Acoustical Society of America* 126 (4): 1838–1849.
- (Blake 2002): Blake, J. 2002. "Developing a new standard-setting instrument for the safeguard of intangible cultural heritage". *Elements for consideration, Unesco, Paris*.
- (Blauert and Lindermann 1986): Blauert, J. Lindermann W. 1986. "Auditory spaciousness: some further psychoacoustic analyses". *Journal of the Acoustical Society of America* 80(2):533-42.
- (Blessner and Salter 2011): Blessner, B., Salter, L. R. 2011. "Beyond measurements: a multidisciplinary framework for aural experience of ancient spaces". *The Acoustics of Ancient Theaters Conference, Patras, Greece*.
- (Bonde et al. 2009): Bonde, S., Maines, C., Mylonas, E., Flanders, J. 2009. "The Virtual Monastery: Re-Presenting Time, Human Movement, and Uncertainty at Saint-Jean-des-Vignes, Soissons". *Visual Resources: An International Journal of Documentation* 25 (4):363-377.
- (Bork 2005): Bork, I. 2005. "Report on the Third Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation –Part II: Calculations". *Acta Acustica united with Acustica*. 91 (4): 740–752.

- (Bouyer 1967): Bouyer, L. 1967. *"Liturgy and architecture"*. University of Notre Dame Press: Paris.
- (Bozzo and Magrini 2001): Bozzo, C., Magrini, U. 2001. *"Acoustic Properties of a few Cistercian Abbeys historical aspects and measurements"*. In: Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics. September 02-07, Rome (Italy).
- (Bradley and Soulodre 1995a): Bradley J.S., Soulodre G.A. 1995. *"The influence of late arriving energy on spatial impression"*. Journal of the Acoustical Society of America 97(4):2262-71.
- (Bradley and Soulodre 1995b): Bradley J.S., Soulodre G.A. 1995. *"Objective measures of listener envelopment"*. Journal of the Acoustical Society of America 98:2590-7.
- (Brezina 2015): Brezina, P. 2015. *"Measurement of intelligibility and clarity of the speech in Romanesque churches"*. Journal of Cultural Heritage 16:386–390.
- (Bruno et al. 2010): Bruno, F., Bruno, S., De Sensi, G., Luchi, M., Mancuso, S., Muzzupappa, M. 2010. *"From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition"*. Journal of Cultural Heritage 11(1):42–49.
- (C. y P., M. d. l., 1850). C. y P., M. d. l., 1850. *"Descripción del templo de la catedral de Sevilla y de las principales festividades que en ella se celebran"* Universidad de Harvard. Impr. del Diario de Sevilla de Comercio.
- (Cardoso et al. 2006): Cardoso, D. A. 2006. *"Sevilla, el casco antiguo. Historia, arte y urbanismo"*. Ediciones Guadalquivir: Sevilla.
- (Carmona et al. 2009): Carmona, C., Zamarreño, T., Girón, S., Galindo, M. 2009. *"Acústica virtual de la iglesia san Lorenzo de Sevilla"*. Revista de Acústica 40 (3–4): 7–12.
- (Carrión Isbert 1998): Carrión Isbert, A, 1998. *"Diseño acústico de espacios arquitectónicos"*. Univ. Politècnica de Catalunya: Barcelona.
- (Carvalho 1994): Carvalho, A. P. O. 1994. *"Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches"*. Ph. D. Dissertation, Univ. Florida, USA.
- (Carvalho 1997): Carvalho, A. P. O., Morgado, A. E. J., Henrique, L. 1997. *"Relationship Between Subjective and Objective Acoustical Measures in Churches"*. Building Acoustics 4 (1): 1–20.
- (Carvalho 1999): Carvalho, A. P. O. 1999. *"Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches"*. Applied Acoustics 58(1), 33-49.

- (Carvalho et al. 2002): Carvalho, A., Lencastre, M., Desarnaulds, V. 2002. "Sound absorption of 18th-century baroque woodcarving in churches". Paper presented at the Inter-Noise, Michigan, USA, August 19-21.
- (Cats et al. 2013): Cats P., Tijss E., Comesana D.F. 2013. "Exploration of the differences between a pressure-velocity based in situ absorption measurement method and the standardized reverberant room method". In: Proceeding of Meeting of Acoustics ICA 2013, June 02-07, Montreal, Canada.
- (Cerato and Pescarin 2013): Cerato, I., Pescarin, S. 2013. "Reconstructing past landscapes for virtual museums". In: Good Practice in Archaeological Diagnostics, 285-296. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg.
- (Ch'ng 2009): Ch'ng, E. 2009. "Experiential archaeology: Is virtual time travel possible?" Journal of Cultural Heritage 10 (4): 458-470.
- (Chiles 2004): Chiles, S. 2004. "Sound Behaviour in Proportionate Spaces and Auditoria". Doctoral thesis, University of Bath.
- (Choisy 1991): Choisy, A. 1991. "Histoire de la Architecture". Tome II. Inter-Livres: Paris.
- (Christensen et al. 2014): Christensen, C. L., Koutsouris, G. Rindel, J. H. 2014. "Estimating Absorption of Materials to Match Room Model Against Existing Room Using a Genetic Algorithm". In: Proceedings of Fourm Acusticum 2014, September 7-12, Krakow (Poland).
- (Cirillo and Martellotta 2005): Cirillo, E., Martellotta, F. 2005. "Sound propagation and energy relations in churches". Journal of Acoustical Society of America 118(1): 232-248.
- (Cirillo and Martellotta 2006): Cirillo, E., Martellotta, F. 2006. "Worship, acoustics and architecture". Multi-Science Publishing: Brentwood.
- (Conant 1926): Conant, K.J., 1926. "The early architectural history of the Cathedral of Santiago de Com-postela". Harvard University Press: Cambridge.
- (Conant 1959): Conant, K. J. 1959. "Carolingian and romanesque architecture, 800 to 1200". Penguin: Baltimore.
- (Conant 1968): Conant, K.J. 1968. "Cluny, les églises et la maison du chef d'ordre". Protat Frères: Mâcon.
- (Conant 1971): Conant, K.J. 1971. "The history of Romanesque Cluny as clarified by excavation and comparisons". Monumentum 7 : 10-33..

- (Cox 2004): Cox, T. J., D'Antonio, P. 2004. "Acoustic Absorbers and Diffusers". Spon Press: London.
- (Cremer and Müller 1982): Cremer, L., Müller, H. 1982. "Principles and Applications of Room Acoustics". Vol. 1 y 2. Applied Science Publishers: Londres.
- (Cutts 1854): Cutts, E. L. 1854. "An essay on church furniture and decoration". John Crockford: London.
- (Dalenbäck 2011): Dalenbäck B.-I. L. 2011. "CATT-Acoustic v9 Powered by TUCT User's Manual". CATT : Gothenburg.
- (Dalenbäck 1996): Dalenbäck, B. I. 1996. "Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection." Journal of Acoustical Society of America 100:899-909.
- (De Blaauw 1991): De Blaauw, S.1991. "Architecture and liturgy in Late Antiquity and the Middle Ages.Traditions and trends in modern scholarship". Archiv für Liturgiewissenschaft 33: 1–34.
- (De Reu et al. 2014): De Reu, J., De Smedt, P., Herremans, D., Van Meirvenne, M., Laloo, P., De Clercq, W. 2014. "On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice". Journal of Archaeological Science 41:251-262.
- (Debertolis 2014): Debertolis, P., Gullà, D., Richeldi, F.2014. "Archaeoacoustic analysis of an ancient hypogeum using new TRV camera (Variable Resonance Camera) technology". In: Proceedings of The 2nd international virtual Scientific Conference, June, 9–13, Malta, 323-329.
- (Del Rey 2013): Del Rey, R., Alba, J., Arenas, J. P., Ramis, J. 2013. "Evaluation of Two Alternative Procedures for Measuring Airflow Resistance of Sound Absorbing Materials". Archives of Acoustics 38 (4): 547–554.
- (Delany and Bazley 1970): Delany, M. E., Bazley, E. N. 1970. "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials". Applied Acoustics 3: 105– 116.
- (Desarnaulds et al. 2002): Desarnaulds, V., Carvalho, A.P.O., Monay, G. 2002. "Church Acoustics and the Influence of Occupancy". Building Acoustics 9(1) 29-47.
- (Desarnaulds et al. 1998): Desarnoulds, V., Eggenschwiler, K., Bossoney, S. 1998. "Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen" ("Acoustic study of Swiss churches"). In: Proceedings of DAGA, Zürich, 710-711.

- (Díaz-Andrew and García 2012): Díaz-Andreu, M., García, C. 2012. "Acoustics and Levantine rock art: auditory perceptions in La Valltorta Gorge (Spain)". *Journal of Archaeological Science* 39(12), 3591-3599.
- (Díaz Chyla et al. 2013): Díaz-Chyla, A., Pedrero, A., Díaz-Sanchidrián, C. 2013. "Influencia en los parámetros acústicos de las posiciones conocidas del coro catedralicio de León y sus revestimientos históricos". In: Proceedings of 44th Tecniacustica and EAA European Symposium, October 2-4, Valladolid, Spain.
- (Dix and Bradford 2005): Dix, D. G. 2005. "The shape of the liturgy". Continuum: London.
- (Edson 1984): Edson Armi, C., Bradford Smith, E. 1984. "The Choir Screen of Cluny III". *The Art Bulletin* 66 (4): 556-573,
- (Esbert et al. 1988): Esbert, R. M., Ordaz, J., Alonso, F. J., Ruiz de Argandoña, V. G., Montoto, M., Marcos, R., Valdeon, L. 1988. "Petrophysical Characterization and Weatherability of the Stones of the Seville Cathedral". *Materiales de construcción* 38 (210): 5-23.
- (Evjen et al. 2001): Evjen P., Bradley J.S., Norcross, S.G. 2001. "The effect of late reflections from above and behind on listener envelopment". *Applied Acoustics* 62:137-53.
- (Farnetani et al. 2008): Farnetani, A., Prodi, N., Pompoli, R. 2008. "On the Acoustics of Ancient Greek and Roman Theaters". *Journal of Acoustical Society of America* 124: 1557-1567.
- (Fearn 1975): Fearn, R. W. 1975. "Reverberation in Spanish, English, and French churches". *Journal of Sound and Vibration* 43:562-567.
- (Field 2003): Field A, Hole G. 2003. "How to design and report experiments". Sage Publications: London.
- (Fischetti et al. 1992): Fischetti A., Joughaneau J., Hemim Y. 1992. "Relations between Subjective Spatialisation, Geometrical Parameters and Acoustical Criteria in Concert Halls". *Applied Acoustics* 37 (3):233-47.
- (Forsyth 1985): Forsyth, M. 1985. "Buildings for Music: The Architect, the Musician, and the Listener from the Seventeenth Century to the Present Day". Cambridge University Press: Cambridge.
- (Freiheit 2010): Freiheit, R. 2010. "Creating an Anechoic Choral Recording". Proceedings of the international symposium on room acoustics, Melbourne, August 29-31.
- (Gade 2007): Gade, A. C. 2007. "Acoustics in Halls for Speech and Music". In *Springer Handbook of Acoustics*, edited by T. D. Rossing, 301-350. Springer: New York.

- (Galindo et al. 2005): Galindo M., Zamarreño T., Girón S. 2005. Acoustic analysis in Mudéjar-Gothic churches: Experimental results. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(5):m2873-2888.
- (Galindo et al. 2009): Galindo, M., T. Zamarreño, and S. Giron. 2009. "Acoustic Simulations of Mudéjar-Gothic Churches". *Journal of the Acoustical Society of America* 126 (3): 1207–1218.
- (Garbini 2005): Garbini, L. 2005. "Breve storia della musica sacra". Saggiatore: Milan.
- (García de Paredes 1986): García de Paredes, J. M. 1986. "Paseo por la arquitectura de la música". Discurso del Académico Exmo. Sr. D. José M^a García de Paredes. Madrid.
- (Gibbons 2004): Gibbons, O. 2004. "Almighty and everlasting god, sung by St. Olaf Cantorei". Anechoic choral recordings provided by Wenger Corporation. Audio CD and DataDVD.
- (Giménez et al. 2014): Giménez A., Cibrián R. M., Cerdá S., Girón S., Zamarreño T. 2014. Mismatches between objective parameters and measured perception assessment in room acoustics: A holistic approach. *Build. Environ.*, 74, 119-131.
- (Girón et al. 2008): Girón S., Galindo M., Zamarreño T. 2008. Distribution of lateral acoustic energy in Mudéjar-Gothic churches. *J. Sound Vib.*, 315(4-5), 1125-1142.
- (Goehring 2009): Goehring, M. 2009. "Shrine, Decoration, Textiles". In: *Encyclopedia of Medieval Pilgrimage*, edited by Larissa J. Taylor, Leigh Ann Craig, John B. Friedman, Kathy Gower, Thomas Izbicki, Rita Tekippe, 682–683. E.J. Brill: Leiden.
- (González de León 1844): González de León, F. 1844. "Noticia artística: Histórica y curiosa de todos los edificios públicos, sagrados y profanos de esta muy noble, muy leal, muy heroica e invicta ciudad de Sevilla, y de muchas casas particulares, con todo lo que les sirve de adorno artístico, antigüedades, inscripciones y curiosidades que contienen". J. Hidalgo: Sevilla.
- (Griesinger 1997): Griesinger D. 1997. "The psychoacoustics of ASW, spaciousness and LEV". *Acta Acustica United Acustica* 83 (4):721-31.
- (Guichot y Sierra 1991): Guichot y Sierra, A. 1991. "El cicerone de Sevilla. Monumentos y artes bellas". Tomo II. Sevilla, pp. 465.
- (Guidorzi 2008): Guidorzi P., Garai M. 2008. "Signal analysis in the sound absorption measurement procedure: the importance of time subtraction and reference surface corrections". In: *Proceedings of Acoustics 2008*, 1755–1760, June 29. July 4, Paris.

- (Hak et al. 2012): Hak, C. C. J., Wenmaekers, R. H. C., van Luxemburg, L. C. J. 2012. "Measuring Room Impulse Responses: Impact of the Decay Range on Derived Room Acoustic Parameters". *Acta Acustica United with Acustica* 98: 907–915.
- (Happa et al. 2010): Happa, J., Mudge, M., Debattista, K., Artusi, A., Gonçalves, A., Chalmers, A. 2010. "Illuminating the past: state of the art". *Virtual Reality* 14(3): 155-182.
- (Haugen, S. 2013). Haugen, S. 2013. Master thesis: *Sound Reflection from Building Facades*. Department of Electronics and Telecommunications. Norwegian University of Science and Technology
- (Hodgson et al. 2008): Hodgson, M., N. York, and W. Yang. 2008. "Comparison of Predicted, Measured and Auralized Sound Fields with Respect to Speech Intelligibility in Classrooms Using CATTAcoustic and ODEON". *Acta Acustica united with Acustica* 94 (6): 883–890.
- (Howard and Moretti 2009): Howard, D., Moretti, L. 2009. "Sound and space in Renaissance Venice: Architecture, music, acoustics". Yale University Press, New Haven.
- (Ingard and Dear 1985): Ingard, U. K., Dear, T. A. 1985. "Measurement of Acoustic Flow Resistance". *Journal of Sound Vibration* 103: 567–572.
- (ISO 9053:1991). "Acoustics Materials for Acoustical Applications. Determination of Airflow Resistance". Geneva: International Organization for Standardization.
- (ISO 9613-1:1993). "Acoustics Attenuation of Sound During Propagation Outdoors Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere". Geneva: International Organization for Standardization.
- (ISO 354:2003). "Acoustics: Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room". Geneva: International Organization for Standardization.
- (ISO 3382-1:2009). "Acoustics-Measurement of Room Acoustic Parameters. Part1: Performance Rooms". Geneva: International Organization for Standardization.
- (ISO 10140-2:2010). "Acoustics – Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Elements – Part 2: Measurement of Airborne Sound Insulation". Geneva: International Organization for Standardization.
- (Jiménez 1997): Jiménez, A. 1997. "Cartografía de la montaña hueca: notas sobre los planos históricos de la Catedral de Sevilla". Cabildo Metropolitano de la Catedral de Sevilla: Sevilla.

- (Jiménez 2007): Jiménez, A. 2007. "Las fechas de las formas". In: La catedral gótica de Sevilla. Fundación y fábrica de la obra nueva, edited by Vicerrectorado de Investigación, Universidad de Sevilla, 15–113. Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla: Sevilla.
- (Jordan. 1981): Jordan, V., L. 1981. A group of objective acoustical criteria for concert halls. *Applied Acoustics* 14 (1):253-266.
- (Jungmann 1951): Jungmann, J. A. 1951. "The mass of the Roman rite: Its origins and development (*Missarum Solemnia*)". Benziger Brothers, Inc:New York.
- (Kaehler 1972): Kaehler, H. 1972. "Die frühe Kirche". Kult und Kultraum: Berlin.
- (Karabiber 2000): Karabiber, Z.2000. "A new approach to an ancient subject: CAHRISMA project, on de CD –ROM: Garmisch-Partenkirchen". Seventh International Congress on Sound and Vibration, July 4-7, Germany.
- (Keet 1968): Keet W. 1968. "The influence of early lateral reflections on spatial impression". In: Proc. 6th Int. Congress on Acoustics, 53-56, August 21-28; Japan, Tokyo.
- (Keibs and Kuhl 1959): Keibs, L., Kuhl, W. 1959. "Akustics der Thomaskirche in Leipzig". *Acustica* 9: 365–370.
- (Kenji et al. 2004): Kenji, F., Takuya, H., Kosuke, K., Ryota, S., Yosuke, O., Yukio, S. and Ando, Y. 2004. "Spatial Distribution of acoustical parameters in concert halls: comparison of different scattered reflections". *Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment* 4 (1): 59-68.
- (Klepper 1996): Klepper, D. L. 1996. "The distributed column sound system at Holy Cross Cathedral, Boston, the reconciliation of speech and music". *Journal of Acoustical Society America* 99:417–425.
- (Kleiner et al. 1993): Kleiner, M., Dalenbäck, B. I., Svensson, P. 1993. "Auralization – an overview". *Journal of Audio Engineering Society* 41 (11): 861-875.
- (Knight 2010): Knight, D.J. 2010. "The Archaeoacoustics of San Vitale". Ravenna, PhD Thesis, University of Southampton, School of Humanities Archaeology.
- (Kosala and Engel 2013): Kosala, K., Engel, Z. W. 2013. "Assessing the acoustic properties of Roman Catholic churches: A new approach". *Applied Acoustics*. 74: 1144-1152.
- (Koutsoudis et al. 2013): Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., Chamzas, C. 2013. "Multi-image 3D reconstruction data evaluation". *Journal of Cultural Heritage* 15(1): 73–79.

- (Krautheimer 1965): Krautheimer, R. 1965. "Early christian and Byzantine architecture". Penguin Books: Baltimore.
- (Kurtovic 1975): Kurtovic, H. 1975. "The influence of reflected sound upon speech intelligibility". *Acustica* 33, 32–39.
- (Kuttruff 2000): Kuttruff, H. 2000. "Room Acoustics". 4th ed. Spon Press: London.
- (Kürer 1969): Kürer, R. 1969. "Acustica" 21, 370.
- (Landrieu et al. 2011): Landrieu, J., Père, C., Rollier, J., Castandet, S., Schotte, G. 2011. "Digital rebirth of the greatest church of Cluny Major Ecclesia: from optronic surveys to real time use of the digital model". International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume 38, ISPRS Workshop, March 2-4, Trento, Italy.
- (Leishman et al. 2006): Leishman, T. W., Rollins, S., Smith, H. M. 2006. "An Experimental Evaluation of Regular Polyhedron Loudspeakers as Omnidirectional Sources of Sound". *Journal of the Acoustical Society of America* 120 (3): 1411–1422.
- (Lewers and Anderson 1985): Lewers, T. H., Anderson, J. S. 1985. "Some Acoustical Properties of St. Paul Cathedral, London". *Journal of Sound and Vibration* 92 (2): 285–297.
- (López-Calo y Villanueva 2001): López-Calo, J., Villanueva, C. 2001. "El Codex Calixtinus y la música de su tiempo". In: Symposium Proceedings, Santiago de Compostela, September 20–23, Fundación Pedro Barrié de la Maza: A Coruña.
- (Lu et al. 2016): Lu, S., Yan, X., Xu, W., Chen, Y., Liu, J. 2016. "Improving auditorium designs with rapid feedback by integrating parametric models and acoustic simulation". *Building Simulation* 9 (3): 235–250.
- (Lubman and Wetherill 1998): Lubman, D. Wetherill, E. A. (eds.). 1998. "Acoustics of worship spaces". Acoustical Society of America: New York.
- (Luizard et al. 2014): Luizard, P., Polack, J. D., Katz, B. F. G. 2014. "Sound Energy Decay in Coupled Spaces Using a Parametric Analytical Solution of a Diffusion Equation". *Journal of the Acoustical Society of America* 135: 2765–2776.
- (Magrini and Ricciardi 2002): Magrini, A.; Ricciardi, P. 2002. "An experimental study of acoustical parameters in churches". *International J. Acoustics and Vibration*, 7(3):177–183.

- (Margrini and Ricciardi 2003): Magrini, A., Ricciardi, P. 2003. "Churches as auditoria: Analysis of acoustical parameters for a better understanding of sound quality". *Building Acoust.* 10:135–158.
- (Mahdavi et al. 2008): Mahdavi, A., Lechleitner, J., Pak, J. 2008. "Measurements and Predictions of Room Acoustics in Atria". *J. of Build. Perform. Simulation* 1 (2): 67–74.
- (Mansi 1960): Mansi, J. D. 1960. "Sacrorum conciliorum nova et amplissima collection". (Ed. Facsimile). Verlag: Gratz.
- (Marshal and Barron 2001): Marshal A. H., Barron, M. 2001. "Spatial responsiveness in concert halls and the origins of spatial impression". *Applied Acoustics* 62:91-108..
- (Martellotta 2008a): Martellotta, F. 2008. "Subjective Study of Preferred Listening Conditions in Italian Catholic Churches". *Journal of Sound and Vibration* 317 (1–2): 378–399.
- (Martellotta et al. 2008b): Martellotta, F., Cirillo, E., Carbonari, A., Ricciardi, P. 2008. "Guidelines for acoustical measurements in churches". *Applied Acoustics* 70: 378–388.
- (Martellotta et al. 2008c): Martellotta, F., E. Cirillo, M. D'Alba, E. Gasparini, D. Prezioso. 2008. "Acoustical reconstruction of San Petronio Basilica in Bologna during the Baroque Period: The Effect of Festive Decorations". Paper presented at the Acousticso8, Paris, July 29– 4.
- (Martellotta 2009): Martellotta, F. 2009. "Identifying Acoustical Coupling by Measurements and Prediction-Models for St. Peter's Basilica in Rome". *Journal of the Acoustical Society of America* 126 (3): 1175–1186.
- (Martellotta 2010): Martellotta, F. 2010. "The Just Noticeable Difference of Center Time and Clarity Index in Large Reverberant Spaces". *Journal of the Acoustical Society of America* 128 (2): 654–663.
- (Martellotta and Castiglione 2011): Martellotta, F., Castiglione, M. L. 2011. "On the Use of Paintings and Tapestries as Sound Absorbing Materials". In: *Proceedings of the Forum Acusticum 2011, Paper 00078, 27 June–1 July 2011, Aalborg.*
- (Martellotta et al. 2011): Martellotta, F., Della Crociata, S., D'Alba, M. 2011. "On Site Validation of Sound Absorption Measurements of Occupied Pews". *Applied Acoustics* 72 (12): 923–933.
- (Martellotta 2013): Martellotta, F. 2013. "Optimizing Stepwise Rotation of Dodecahedron Sound Source to Improve the Accuracy of Room Acoustic Measure". *Journal of the Acoustical Society of America* 134 (3): 2037–2048.

- (Masiero and Fels 2011): Masiero, B. Fels, J. 2011. "*Perceptually Robust Headphone Equalization for Binaural Reproduction*". In: Proceedings of 13th Convention Audio Engineering Society, May 13-16. London, UK.
- (Meyer 2003): Meyer, J. 2003. "*Kirchenakustik*". Ed. Bochinsky, Verlag: München.
- (Miles 1984): Miles, R. N. 1984. "*Sound field in a rectangular enclosures with diffusely reflecting boundaries*". Journal of Sound and Vibration 92, 203-226.
- (Moller et al. 1996): Moller, H. Sorensen, M. F. Jensen, C. B., Hammershoi, D. 1996. "*Binaural Technique: Do we need Individual Recordings?*". Journal Audio Engineering Society 44 (6):451-69.
- (Mommertz 1995): Mommertz E. 1995. "*Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique*". Applied Acoustics 46:251-263.
- (Müller-Trapet and Vorländer 2015): Müller-Trapet, M., Vorländer, M. 2015. "*Uncertainty Analysis of Standardized Measurements of Random-Incidence Absorption and Scattering Coefficients*". Journal of the Acoustical Society of America 137 (1): 63–74.
- (Navarro y Sendra 1996): Navarro, J., Sendra, J. J. 1996. "*La iglesia como lugar de la música*". Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Septiembre 19-21. Madrid.
- (Navarro et al. 2009): Navarro, J., Sendra, J. J., Muñoz, S. 2009. "*The Western Latin Church as a Place for Music and Preaching: An Acoustic Assessment*". Applied Acoustic 70 (6): 781–789.
- (Navascués 1998): Navascués P. 1998. "*Teoría del coro en las catedrales españolas*". Real Academia de Bellas Artes de San Fernando: Madrid.
- (Navascués 2004): Navascués, P. 2004. "*La catedral en España: arquitectura y liturgia*". Lunweg: Barcelona.
- (Ognedal 2005): Ognedal, M. 2005. "*Sound Absorption in Freely Suspended Textile Banners*". MSc thesis, NTNU, Department of Civil and Transport Engineering, Trondheim, Norway.
- (Okano et al. 1998): Okano T., Beranek L.L., Hidaka, T. 1998. "*Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls*". Journal of Acoustical Society 104 (1):255-65.

- (Ortiz de Zuñiga 1988): Ortiz de Zúñiga, D. 1988. "*Anales eclesiásticos y seculares de la muy noble y muy leal ciudad de Sevilla, metrópoli de Andalucía (1633–1680)*". Guadalquivir: Sevilla.
- (Palazzo 2010): Palazzo, E. 2010. "*Art, liturgy and the five senses in the early Middle Ages*". *Viator* 41:25-56.
- (Parkin and Taylor 1952): Parkin, P. H., Taylor, J. H. 1952. "*Speech Reinforcement in St. Paul's Cathedral – Experimental System Using Line- Source Loudspeakers and Time Delays*". *Wireless World* 58 (2): 54–57.
- (Pedrero et al. 2013): Pedrero, A., Pollow, M., Dietrich, P., Behler, G., Vorlander, M., Diaz, C., Diaz, A. 2013. "*Mozarabic Chant anechoic recordings for auralization purposes*". In: *Proceedings of Tecniacustica 2013*, October, 2-4, Valladolid .
- (Pedrero et al. 2014): Pedrero, A., R. Ruiz, A. Díaz-Chyla and C. Díaz. 2014. "*Acoustical study of Toledo Cathedral according to its liturgical uses*". *Applied Acoustics* 87: 23-33.
- (Pelzer and Vorländer 2010): Pelzer, S. Vorländer, M. 2010. "*Frequency and Time dependent Geometry for Real- time Auralizations*". In: *Proceedings 20th International Congress on Acoustics (ICA 2010)*, August 23-27, Sydney, Australia.
- (Pelzer and Vorländer 2013): Pelzer, S., Vorländer, M. 2013. "*Inversion of a Room Acoustics Model for the Determination of Acoustical Surface Properties in Enclosed Spaces*". In: *Proceedings of the Meeting on Acoustics 19*: 015-115.
- (Pérez-Vidal et al. 2013): Pérez-Vidal C., Cerdá S., Montell R., Cibrián R., Segura J.; Barba A., Querol L., Giménez A. 2013. "*Metodología para medidas de absorción acústica in-situ mediante sensores de presión y velocidad*". In: *Proceedings of Tecniacustica 2013* 1366- 374, October 2-4, Valladolid.
- (Praticoa et al. 2014). Praticò F.G., Vaianab R., Fedelea R. 2014. "*A study on the dependence of PEMs acoustic properties on incidence angle*". *IntJ Pav Eng*.
- (Queiroz-de Sant'Ana and Trombetta-Zanning 2011): Queiroz-de Sant'Ana, D., Trombetta-Zannin, P. H. 2011. "*Acoustic evaluation of a contemporary church based on in situ measurements of reverberation time, definition, and computer-predicted speech transmission index*". *Building and Environment*. 46: 511–517.
- (Raes and Sacerdote 1953): Raes, A. C., Sacerdote, G. 1953. "*Measurement of the acoustical properties of two Roman basilicas*". *Journal of Acoustical Society of America* 25: 925–961.

- (Randall 2004): Randall, T. 2004. "Alleluia (1899–1984)". Sung by St. Olaf Cantorei. Anechoic Choral Recordings provided by Wenger Corporation. Audio CD and Data DVD.
- (Rasmussen 1964): Rasmussen, S. E. 1964. "Experiencing architecture". MIT Press: Cambridge.
- (Righetti 1964): Righetti, M. 1964. "Manuale di storia liturgica". Vol I. Ancora: Milano.
- (Rindel 2010): Rindel, J. H. 2000. "The use of computer modelling in room acoustics". Journal of Vibration Engineering 3:219-224.
- (Rindel et al. 2002): Rindel, J., Christensen, C., Gade, A. 2002. "The acoustical history of Hagia Sophia Re-vived through computer simulation". In: Proceedings of the Forum Acousticum, Sevilla September 16–20, Sociedad Española de Acústica, Madrid.
- (Rollier-Hanselmann et al. 2011): Rollier-Hanselmann, J., Schotté, G., Landrieu, J., Poupart, N., Perrot, F., Maurice-Chabard, B. 2011. "La reconstitution 3D du chevet de Cluny III: clôture de chœur, stalles, pavement, peintures murales et vitraux. Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre". BUCEMA 15: 183-201.
- (Rutherford 2001): Rutherford A. 2001. "Introducing ANOVA and ANCOVA: A GLM Approach". SAGE Publications: London.
- (Ryu and Jeon 2008): Ryu, J. K., Jeon, J. K. 2008. "Subjective and Objective Evaluations of a Scattered Sound Field in a Scale Model Opera House". Journal of the Acoustical Society of America 124 (3): 1538–1549.
- (Santos-Gómez and San Andrés-Moya 2004). Santos-Gómez, S., San Andrés-Moya, M. 2004. "La Pintura De Sargas". Archivo Español de Arte 77 (305): 59–74.
- (Savioja and Svensson 2015): Savioja, L., Svensson, U. P. 2015. "Overview of geometrical room acoustic modelling techniques". Journal of the Acoustical Society of America 138 (2): 708-730.
- (Scarre and Graeme 2006): Scarre, C., Graeme, L. (ed.). 2006. "Archaeoacoustics". McDonald Institute for Archaeological Research: Cambridge.
- (Schoebelen 1969): Schoebelen, A. 1969. "Performance Practices at San Petronio in the Baroque". Acta Musicologica 41 (1/2): 37–55.
- (Schroeder et al. 1962): Schroeder, M. R., Atal, B. S., Bird, C. 1962. "Digital computers in room acoustics". In: Proceedings of 4th International Congress on Acoustics ICA, Copenhagen.

- (Segura García et al. 2011): Segura García, J., Giménez Pérez, A., Romero Faus, J., Cibrián Ortiz de Anda, R. 2011. "A comparison of different techniques for simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume Basilica in Valencia, Spain". *Acta Acustica united with Acustica*. 97: 155-170.
- (Sendra et al. 1999): Sendra, J. J., Zamarreño, T., Navarro, J. 1999. "Sound Field in Churches". In *Computational Acoustics in Architecture*, edited by J. J. Sendra, 133–177. WIT Press: Southampton.
- (Sendra et al. 1997): Sendra, J. J., Zamarreño, T., Navarro, J., Algaba, J. 1997. "El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación". Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla: Sevilla.
- (Senn 1997): Senn, F. C. 1997. "Christian liturgy". Fortress Press: Minneapolis.
- (Shankland and Shankland 1971): Shankland, R. S., and H. K. Shankland. 1971. "Acoustics of St. Peter's and Patriarchal Basilicas in Rome". *Journal of the Acoustical Society of America* 50 (2): 389–396.
- (Simons 1982): Simons, M. W. 1982. "The Measurement of Airborne Sound Insulation Using Acoustic Scale Models". *Architectural Science Review* 25 (1): 10–15.
- (Soeta and Ando 2015): Soeta, Y., Ando, Y. 2015. "Neurally Based Measurement and Evaluation of Environmental Noise". *Mathematics for Industry* 20, Springer, Japan.
- (Soeta et al. 2012): Soeta, Y., Ito, K., Shimokura, R., Sato, S., Ohsawa, T., Ando, Y. 2012. "Effects of sound source location and direction on acoustic parameters in Japanese churches". *Journal of the Acoustical Society of America* 131: 1206–1220.
- (Soulodre et al. 2003): Soulodre G. A, Lavoie M. C, Norcross, S.G. 2003. "Temporal Aspects of Listener Envelopment in Multichannel Surround Systems". In: *Proceedings of 114th AES Convention*, paper 580. 2003 March 22- 25, The Netherlands, Amsterdam.
- (Steeneken and Houtgast 1980): Steeneken, H. J. M., Houtgast, T. 1980. "A physical method for measuring speech transmission quality". *Journal of Acoustical Society of America*. 67:318–326.
- (Suárez et al. 2004): Suárez, R., Sendra, J. J., Navarro, J., León, A. L. 2004. "The Acoustics of the Cathedral-Mosque of Córdoba. Proposals for Architectural Intervention". *Acta Acustica united with Acustica* 90 (2): 362–375.
- (Suárez et al. 2005): Suárez, R., Sendra, J.J., Navarro, J., León, A.L. 2005. "The sound of the Cathedral-Mosque of Córdoba". *Journal of Cultural Heritage* 6 (4):307–312.

- (Summers, J. E. 2003). "Measurement of Audience Seat Absorption for Use in Geometrical Acoustics Software". *Acoustic Research Letters Online* 4 (3): 77–82.
- (Summers et al. 2005): Summers, J. E., Torres, R. R., Shimizu, Y., Dalenbäck, B. I. 2005. "Adapting a Randomized Beam-Axis-Tracing Algorithm to Modelling of Coupled Rooms Via Late-Part Ray Tracing". *Journal of the Acoustical Society of America* 118: 1491–1502.
- (Svidercoschi 1968): Svidercoschi, G. F. 1968. "Historia del Concilio Vaticano II". Coculsa: Madrid.
- (Thiele 1953): Thiele, R. 1953. "Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen", *Acustica* 3: 291-302
- (Till 2009): Till, R. (Ed.) 2009. "Songs of the stones: the acoustics of Stonehenge". In: Banfield, S. *The Sounds of Stonehenge* 17-39. Archaeopress: Oxford.
- (Torre Farfán 1995): Torre Farfán, F. d. I. (Ed.) 1995. "Fiestas de la Santa Iglesia Metropolitana y Patriarcal de Sevilla al nuevo culto del Sr. Rey San Fernando". Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla: Sevilla .
- (Tzekakis 1979): Tzekakis, E. 1979. "Data on the acoustics of the byzantine churches of Thessaloniki". *Acustica* 43(2), 275-279.
- (Valdivieso 1991): Valdivieso, E. 1991. "Sevilla pintada, 1790–1868". In: *Iconografía de Sevilla: 1790–1868*, edited by S. A. El Viso, 108–141. Fundación Fondo de Cultura de Sevilla: Madrid.
- (Van Dorp Schuitmana 2013): Van Dorp Schuitmana J., De Vries D., Lindau A. 2013. "Deriving content-specific measures of room acoustic perception using a binaural, nonlinear auditory model". *Journal of the Acoustical Society of America* 133 (3), 1572-85.
- (Vecco 2010): Vecco, M. 2010. "A definition of cultural heritage: From the tangible to the intangible". *Journal of Cultural Heritage* 11(3):321-324.
- (Verhoeven et al. 2012): Verhoeven, G., Taelman, D., Vermeulen, F. 2012. "Computer vision-based orthophoto mapping of complex archaeological sites: the ancient quarry of Pitaranha (Portugal-Spain)". *Archaeometry* 54 (6): 1114-1129.
- (Vigeant et al. 2011): Vigeant M., Wang L., Holger Rindel J. 2011. "Objective and subjective evaluations of the multi-channel auralization technique as applied to solo instruments". *Applied Acoustics* 72:311-23.

- (Vörlander 1989): Vorländer, M. 1989. "Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm". *Journal of the Acoustical Society of America* 86:172-178.
- (Vörlander 2013): Vorländer, M. 2013. "Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties". *Journal of Acoustical Society of America* 133, 1203-1213.
- (Vörlander 2008): Vorländer, M. 2008. "Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality". Springer-Verlag: Berlin.
- (Vörlander et al. 2014): Vorländer M., Schrödera, D., Pelzera, S., Wefersa, F. 2014. "Virtual Reality for Architectural Acoustics". *Journal of Building Performance Simulation* 8 (1); 15-25.
- (Wardropper 1967): Wardropper, B. W. 1967. "Introducción al teatro religioso del siglo de oro". Anaya: Madrid.
- (Weigert 2004): Weigert, L. 2004. "Weaving Sacred Stories: French Choir Tapestries and the Performance of Clerical Identity". Cornell University Press: Ithaca.
- (Wenmaekers et al. 2014): Wenmaekers, R. H. C., Hak, C. C. J. M., Hornikx, M. C. J. 2014. "The Effective Air Absorption Coefficient for Predicting Reverberation Time in Full Octave Bands". *Journal of the Acoustical Society of America* 136 (6): 3063–3071.
- (White 1990): White, L. M. 1990. "Building god's house in the Roman world: Architectural adaptation among pagans, jews, and Christians". The Johns Hopkins University Press: Baltimore.
- (Wilson-Dickson 1992): Wilson-Dickson, A. 1992. "The story of christian music". Lion Publishing: Oxford.
- (Wittstock 2014): Wittstock, W. 2014. "Uncertainties for the Determination of the Absorption Coefficient According to ISO 354". In: Proceedings of the Forum Acusticum 2011, 27 June–1 July 2011, Aalborg.
- (Wunderwald and Ruffer 2008): Wunderwald, A., Ruffer, J. 2008. "Die Kathedrale von Santiago de Compostela. Konstruktion–Gestalt–Programm". *Mitteilungen der Carl Justi-Vereinigung* 20:134-138.
- (Zamarreño et al. 2007): Zamarreño, T., Girón, S., Galindo, M. 2007. "Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches". *Journal of Acoustical Society of America* 121: 234-250.

- (Zamarreño et al. 2008): Zamarreño, T., Girón, S., Galindo, M. 2008. "Assessing the intelligibility of speech and singing in Mudejar-Gothic churches". *Applied Acoustics* 69:242–254.
- (Zevi 1993): Zevi, B. 1993. "Architecture as space. How to look at architecture". Da Capo Press: New York.
- (Zwicker and Fastl 1990): Zwicker, E., Fastl, H. 1990. "Psychoacoustics, Facts and Models". Springer-Verlag: Berlin, 11–12.

PÁGINAS WEBS

- Anonymous. Codex Calixtinus (English translation available at), 2013 (accessed on October, 2013) <https://sites.google.com/site/caminodesantiagoproject/>
- Dagenais, J. 2013. "Romanesque Redivivus: a full-scale 3D computer reconstruction of the Medieval Cathedral and town of Santiago de Compostela" (ca.1211), (accessed in October 2013) <http://etc.ucla.edu/research/projects/compostela/>
- ICOMOS. <http://international.icomos.org/en/charters-and-texts>. Accessed 12 Aug. 2015.
- Pedriódico ABC. Edición de Andalucía. 15 de diciembre de 1965. Número 19433. <http://hemeroteca.abc.es/nav/Navigate.exe/hemeroteca/sevilla/abc.sevilla/1965/12/15.html>
- (PTB) database. Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Braunschweig (Germany). <http://www.ptb.de/en/org/1/17/173/datenbank.htm>.

ANEJOS

ANEJO A

OTRAS PUBLICACIONES EN ACTAS DE CONGRESOS

A continuación, se exponen las tres comunicaciones publicadas en los libros de actas de los diferentes congresos, presentándose en una versión maquetada con formato distinto al de la publicación en sí misma. A pesar de no contener resultados de esta tesis doctoral, estas publicaciones también se han desarrollado siguiendo la línea de investigación sobre la acústica de los espacios de culto.

COMUNICACIÓN 6

INITIAL ACOUSTIC MODEL TO SIMULATE THE SOUND FIELD OF THE CATHEDRAL OF SEVILLE.

AUTORES: Álvarez-Morales, L.; **Alonso, A.**; Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S.

CONGRESO: Proceedings of the International Seminar on Virtual Acoustics (2011)
pp. 106-113.



INITIAL ACOUSTIC MODEL TO SIMULATE THE SOUND FIELD OF THE CATHEDRAL OF SEVILLE

Reference PACS: 43.55.Gx, 43.55.Ka

Álvarez, Lidia; Alonso, Alicia; Galindo, Miguel; Zamarreño, Teófilo; Girón, Sara

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Universidad de Sevilla, Avda. Reina Mercedes, 2, E. T. S. de Arquitectura, 41012 Sevilla, SPAIN.

calvarez6@us.es, aliciaalonso@us.es, mgalindo@us.es, teofilo@us.es, sgiron@us.es

ABSTRACT

The cathedral of Seville is one of the most emblematic heritage buildings of the city, world heritage and the largest gothic cathedral in the world. It is divided into 5 naves; the central nave contains the choir and the main chapel, and in the outer naves, chapels open along its entire contour. In this work, a 3D model of this liturgical space has been created in order to simulate the sound field. The virtual model created is calibrated, from experimental measurements of T30, through an iterative process. From this point, the simulated and measured results for the rest of the commonly used acoustic parameters are analysed.

RESUMEN

La catedral de Sevilla es uno de los edificios patrimoniales más emblemáticos de la ciudad, patrimonio de la humanidad, y la mayor catedral gótica del mundo. Se articula en 5 naves; la central alberga el coro y la capilla mayor, y en las exteriores se abren capillas en todo su contorno. En este trabajo se elabora un modelo 3D de este espacio litúrgico para simular el campo sonoro. El modelo virtual creado se calibra, a partir de las medidas experimentales de T30, mediante un proceso iterativo. A partir de ahí se analizan los resultados simulados y medidos del resto de los parámetros acústicos habituales.

INTRODUCCIÓN

Aunque la propagación del sonido en los recintos existentes o concebidos para la presentación de la música sinfónica ha constituido el objetivo primordial de la acústica de salas y de la práctica acústica de las últimas décadas [1], también las propiedades acústicas de los espacios religiosos han recibido gran atención en la comunidad científica internacional [2]. El interés está tanto en los edificios contemporáneos de culto, en los que se cuida la inteligibilidad del mensaje entre celebrante y los fieles [3], y que se han concebido con un cierto carácter multifuncional, como en la acústica de los espacios existentes clásicos, de gran valor histórico y patrimonial [4], ya que éstos se renuevan con fines culturales que comparten con usos litúrgicos.

Sin pretender ser exhaustivos destacan en este ámbito, el pionero trabajo de Raes et al. [5], comparando los tiempos de reverberación de dos basílicas romanas, estructuralmente muy diferentes, también Shankland et al. [6], amplían el estudio anterior incorporando la basílica de San Pedro, Tzekakis, estudia varias iglesias ortodoxas de Tesalónica [7], Fearn et al. algunas iglesias europeas occidentales [8], y Lewers presenta algunas características sonoras de la catedral de San Pablo en Londres [9]. A partir de estos primeros trabajos proliferan otros estudios más avanzados sobre las condiciones acústicas de iglesias en otros países, destacan la recopilación de Desarnaulds et al. de más de 150 iglesias suizas de diferentes épocas, [10], el estudio de iglesias portuguesas llevado a cabo por Carvalho [11], y también los tratamientos de las superficies para mejorar la inteligibilidad de la palabra y el apoyo electroacústico en mezquitas, con las contribuciones de Hammad [12], y Adel [13], entre otros.



Figura 1. Imagen interior de la Catedral de Sevilla.

La complejidad y características del campo sonoro de los espacios litúrgicos interesan asimismo al equipo investigador italiano liderado por E. Cirillo, al estudiar una tipología de iglesias italianas (iglesias románicas de la región de Apulia) [14], cuyos resultados extienden a otros espacios eclesiales de diferentes tipologías y volúmenes [15]. Los esfuerzos de este grupo en relación a la acústica de espacios religiosos católicos han abarcado múltiples aspectos: teóricos objetivos [16], subjetivos [17], y prácticos [18].

Las singulares características acústicas de los enormes y complejos espacios reverberantes como son las catedrales, han suscitado en estos años también el interés de los investigadores: existencia de espacios acoplados en la catedral de San Pablo (Londres) [19]; también la identificación de volúmenes acoplados en la basílica de San Pedro (Roma) [20]; y ajustes de acústica variable en la catedral de Boston (Estados Unidos) [21]; son algunos ejemplos.

Más recientemente, la fascinación por las capacidades de predicción de los modelos de simulación digital basados en la acústica geométrica ha alcanzado también a los recintos de culto [22, 23]. Estas poderosas herramientas de simulación permiten estudiar virtualmente el comportamiento acústico del espacio a futuro, antes de construirlo, y producir señales audio del mismo a partir de las respuestas al impulso binaurales sintéticas. También con estas técnicas de predicción resulta plausible controlar los experimentos de manera más enfocada, reduciendo el número de variables implicadas, lo que permite desentrañar las causas de los fenómenos, y ayudar a corroborar ciertas hipótesis [20]. Las posibilidades de recreación de situaciones acústicas pasadas permiten también llevar a cabo lo que se llama arqueología acústica, y posibilita incorporar en los grandes lugares de culto, de gran valor patrimonial, las características acústicas como otro importante aspecto de su patrimonio intangible.

En este trabajo se analiza el proceso de creación, ajuste, y validación del modelo computacional 3D de la catedral de Sevilla, teniendo en cuenta una única posición de la fuente de todas las consideradas en los ensayos experimentales, y analizando exclusivamente los resultados de los parámetros acústicos monaurales. Estos resultados constituyen el comienzo de un ambicioso trabajo sobre este espacio catedralicio que pretende incorporar la simulación de las respuestas al impulso binaurales y tridimensionales, y la implementación de auralizaciones, para recrear el comportamiento acústico del espacio y para su posible utilización en la valoración subjetiva de la percepción acústica del mismo.

DESCRIPCIÓN DE LA CATEDRAL

La catedral gótica cristiana de Sevilla, también conocida como “Santa María de la Sede”, se sitúa al sur del centro histórico de la ciudad andaluza. El solar en el que se encuentra estaba ocupado por una antigua mezquita aljama, la cual, tras la conquista, fue cristianizada y posteriormente derribada con el fin de construir el edificio gótico en la misma superficie rectangular de 116 metros de largo por 76 metros de ancho [24]. Ciertos historiadores datan el inicio de las obras en 1401, sin embargo, no existe testimonio escrito hasta 1433 [25]. El proceso constructivo, iniciado desde el trascoro hasta la cabecera, fue dirigido por diferentes maestros a lo largo de los años.

El espacio interior del templo gótico, se articula en cinco naves orientadas al este, siendo las más altas la nave del crucero y la nave central, llegando casi a los 40 metros de altura libre. Su estructura cuenta con 60 pilares de mampostería revestidos de piedra, 32 de ellos exentos,

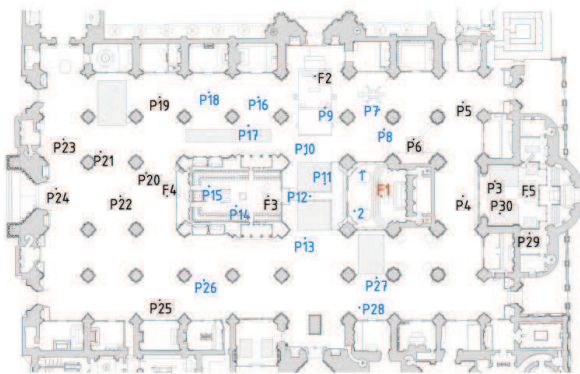


Figura 2. Plano de planta de la catedral mostrando las posiciones de fuente (F) y los puntos receptores (P).

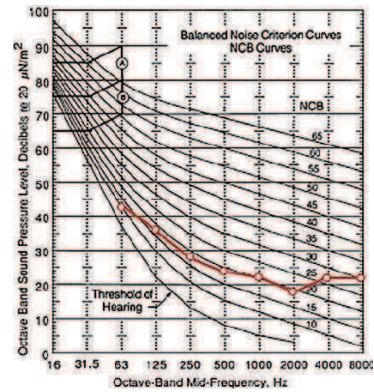


Figura 3. Espectro de ruido medido valorado sobre las curvas NCB.

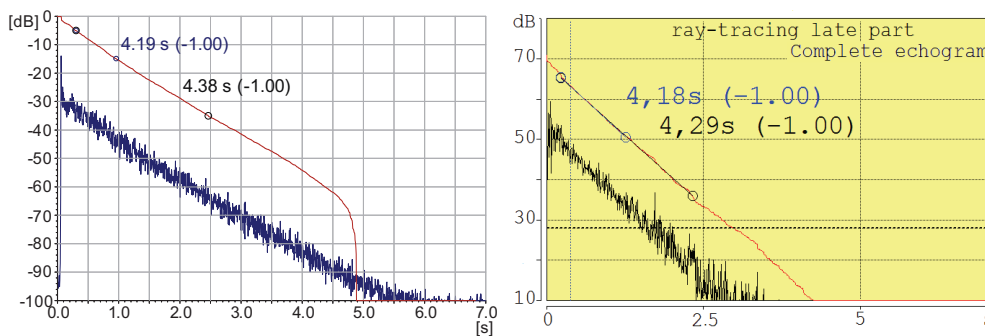


Figura 4. Curva de energía e integral de Schroeder, medidas (izquierda) y simuladas (derecha) para el punto 13 filtradas a 1 kHz.

sobre los cuales descansan las 68 bóvedas de crucería que cubren las diversas naves. La catedral presenta solería de mármol blanco y azul grisáceo. Ver Figura 1.

El coro, situado en la nave central, cuenta con una sillería de madera tallada por diversos artistas. Su entrada está delimitada por una gran reja renacentista, y los tres lados restantes están cerrados por muros de cantería, en los que se localizan cuatro capillas de alabastro abiertas a las naves laterales. El órgano está formado por dos grandes cajas situadas sobre los muros laterales, a ambos lados del coro. En la cabecera del templo se sitúa la Capilla Real, donde se celebra diariamente la liturgia. Forma un amplio, recinto cerrado por un ábside semicircular y cubierto por una solemne cúpula. Una gran reja cubierta con densas cortinas delimita la entrada a la misma.

En definitiva, la catedral se convierte en un lugar de culto y oración en el que en ciertas ocasiones se llevan a cabo grandes ceremonias y festividades que la transforman en un gran teatro sacro.

TÉCNICA EXPERIMENTAL

Las respuestas impulsivas (RI) se han obtenido siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010 [26]. Se han considerado 5 posiciones de fuente diferentes, que se corresponden con las ubicaciones habituales de los principales focos sonoros en las diferentes celebraciones que tienen lugar en el templo. Se fijaron un total de 28 posiciones de micrófonos distribuidas por toda la zona de audiencia, aprovechando la simetría del recinto (ver Figura 2), se han dispuesto 24 receptores en la parte de la izquierda y 4 en la derecha para que actúen como controladores. Se presenta aquí el estudio realizado para la posición de la fuente F1, ubicada en el altar mayor a 1,50 metros sobre el suelo.

Para cada posición de la fuente se han estudiado las posiciones del micrófono en el conjunto de puntos recepción en los que se recibe sonido directo. En cada punto de recepción, situado a 1,20 metros del suelo, se registraron las respuestas al impulso a partir de barridos de señales sinusoidales, en las que la frecuencia incrementa exponencialmente con el tiempo. El rango de frecuencias se ajustó para cubrir las bandas de octava comprendidas entre 63 y 16.000 Hz, así como la duración del barrido, para conseguir una relación señal-ruido superior a 45 dB para las bandas de octava de interés.

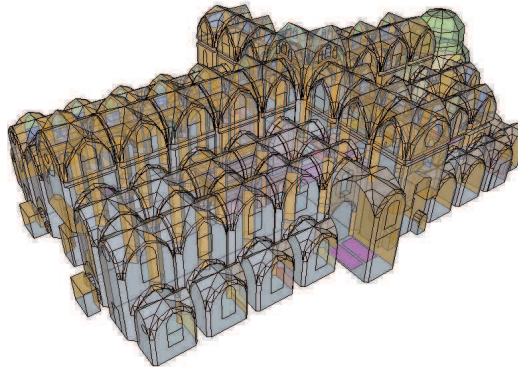


Figura 5. Modelo geométrico 3D de la Catedral de Sevilla.

Todos los ensayos experimentales se realizaron con el templo desocupado, en periodo nocturno. La temperatura y la humedad relativa variaron entre 25 y 25,5 °C y 55 y 58 %, respectivamente. El nivel del ruido de fondo se registró promediando durante 4 minutos con el analizador SVAN 958, de SVANTEK. El nivel sonoro continuo equivalente registrado fue de 30,7 dBA. En todo caso la relación señal-ruido se mantuvo muy por encima de 45 dB en todas las frecuencias de interés, valor mínimo requerido para medir con fiabilidad T30. En la Figura 3 se representa el espectro medido del ruido de fondo sobre las curvas NBC, que se puede valorar como NCB-30.

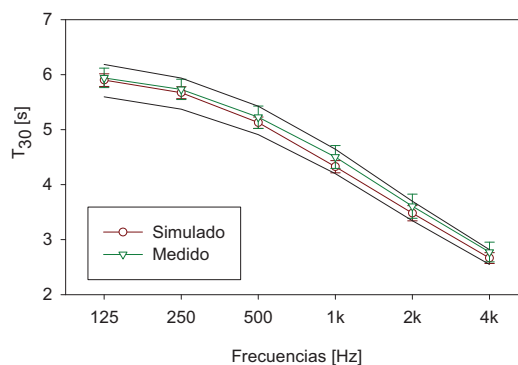


Figura 6. Tiempo de reverberación medido y simulado promediado espacialmente y dispersión espacial valorada por la desviación estándar asociada (barras verticales).

A modo de ejemplo en la Figura 4 se muestra la curva de energía y la integral de Schroeder, filtradas para la octava de 1 kHz, calculadas a partir de la RI medida en el punto 13, excitando la sala con la fuente situada en la posición F1. A partir de estas RI se derivan los valores de los principales parámetros acústicos: tiempo de reverberación (T30), tiempo de reverberación inicial (EDT), tiempo central (TS), definición (D50), claridad (C80), fuerza sonora (G), fracción de energía lateral precoz (JLF) e índice de transmisión de la palabra (STI).

El proceso de generación, adquisición y análisis de la señal se llevó a cabo con el programa WinMLS2004 mediante una tarjeta de sonido EDIROL UA-101. La señal barrido en frecuencia se reprodujo en el recinto usando una fuente omnidireccional AVM DO-12, siendo previamente amplificada con un amplificador de potencia B&K type 2734. La respuesta al impulso se capturó con un micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional (figura de ocho), conectado a la fuente de polarización Earthworks-LAB 1.

SIMULACIÓN ACÚSTICA

Se ha creado un modelo geométrico virtual simplificado de la catedral de Sevilla para simular su comportamiento acústico, mostrado en la Figura 5. Dicho modelo está compuesto por 7.516 planos y tiene un volumen de 216.192 m³.

El modelo se ha calibrado siguiendo un proceso iterativo mediante el cual se ajustan los coeficientes de absorción de los materiales menos conocidos hasta conseguir que el tiempo de reverberación simulado promediado espacialmente para cada una de las bandas de octavas

Tabla 1. Coeficientes de absorción acústica asociados a los principales materiales utilizados en la simulación.

Material	Área [%]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Sillería*	65,1	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Mármol Suelo	14,5	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Molduras*	5,3	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Sillería Capilla*	2,8	0,10	0,10	0,10	0,12	0,14	0,14
Vidrieras	2,1	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04
Retablos Madera	1,9	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Órgano	1,4	0,12	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16
Madera Coro	1,1	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18

* Materiales usados para calibrar el modelo.

consideradas no difiera en más de 1 JND, just noticeable difference (5% para T) [26], del valor promedio medido experimentalmente. Aunque el JND tiene validez para los valores promedios de los parámetros, hemos aceptado dicho valor para cada banda de octava.

En la Figura 6 se representa el promedio espacial del T₃₀, tanto medido como simulado, con su desviación estándar correspondiente obtenida para cada banda de octava, así como los límites aceptados aplicando el criterio de 1 JND.

En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de absorción asociados a los materiales cuyo porcentaje relativo de superficie es mayor al 1%. Los coeficientes de dispersión de estos materiales varían según sea el grado de irregularidades que presenta cada superficie, de modo que los materiales de superficie lisa tienen un coeficiente de scattering asociado que varía de 0,12 en la banda de 125 Hz a 0,17 en la de 4 kHz aumentando 0,01 en cada banda. Los de decoración moderada pasa de 0,20 en 125 Hz hasta 0,45 a 4 kHz aumentando 0,05 en cada banda, y en los más irregulares varía de 0,30 en la banda de 125 Hz a 0,80 en la de 4 kHz aumentando 0,10 en cada banda [20].

El software utilizado para realizar la simulación acústica ha sido CATT-Acoustic v8k. Se ha utilizado el modo "cálculo detallado completo" basado en el Randomized Tail-corrected Cone-tracing, un método híbrido desarrollado a partir de algoritmos de predicción basados en los métodos de fuentes imagen, trazado de rayos y trazado de conos. Tanto el número de rayos como el tiempo de truncado empleados en la simulación se determinaron de forma manual, siendo 300.000 rayos y 7 s respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fijando la atención en las diferencias entre los valores promediados espacial y espectralmente, medidos y simulados, en términos de sus JND [20], [26], y recogidos en la Tabla 2, se aprecia como para la mayoría de los parámetros dichas diferencias son inferiores a 1 JND, y en ningún caso superan los 3 JNDs, lo que es un indicativo del buen funcionamiento del modelo. Los parámetros energéticos son los que presentan las diferencias más significativas.

Tabla 2. Valor promediado espacial y espectralmente de los parámetros acústicos estudiados, y diferencias JND.

Parámetros	Simulados	Medidos	JND
T ₃₀ [s]	4,73	4,86	0,56
EDT [s]	4,15	4,06	0,41
T _s [ms]	227,89	272,86	1,94
D ₅₀	0,37	0,26	2,28
C ₆₀ [dB]	-1,18	-3,63	1,64
J _{LF}	0,09	0,12	0,67
G [dB]	0,30	1,23	0,92
STI	0,52	0,48	-

En la Figura 7 se representan los valores medidos y simulados promediados espacialmente de los parámetros acústicos estudiados. Las barras de error muestran la dispersión espacial calculada a partir de la desviación estándar para cada banda de octava. Si se observan los valores medios del tiempo de reverberación inicial, puede comprobarse que, el comportamiento espectral del valor medido y simulado es muy similar, siguiendo la tendencia en frecuencia esperada, es decir, el EDT disminuye a medida que aumenta la frecuencia, sobre todo a partir de 2 kHz, donde se hace notoria la absorción del aire. En el resto de los parámetros, a nivel general, se obtienen valores simulados promediados espacialmente muy coincidentes con los medidos en medias y, especialmente, en altas frecuencias. Más deficientes resultados se obtienen para las bajas frecuencias, en especial para la banda de octava de 250 Hz. La fuerza sonora simulada, por ejemplo, difiere hasta en 5 dB de la medida experimental. En el caso de la fracción de energía lateral precoz las diferencias son aceptables en todas las bandas de octava. Además, las tendencias en frecuencia de los valores medidos y simulados son muy parecidas en todos los parámetros acústicos analizados.

Se observa también, que los valores de las desviaciones correspondientes a las simulaciones son del mismo orden, o menores, que las encontradas en las medidas experimentales. La mayoría de las desviaciones superan, para cada parámetro, frecuencia, fuente, medida in situ y simulado, un JND, por lo que en diferentes zonas de la catedral la sensación percibida será diferente.

Con objeto de verificar la validez de la simulación, punto a punto y por frecuencias en la Figura 8 se representa el porcentaje de puntos de medida cuyas diferencias, expresadas en términos de JND, entre los valores medidos y simulados de cada parámetro, se encuentran por debajo de cierto umbral. Cuando se fija por debajo de 2 JNDs, valor normalmente considerado como aceptable para la simulación, vemos que, para la mayoría de los parámetros y a excepción de la banda de 250 Hz, más del 50% de los puntos se sitúan dentro de este rango. Teniendo en cuenta las grandes dimensiones del recinto y su complejidad arquitectónica, consideramos aceptable una diferencia de hasta 3 JNDs, y en este caso el número de puntos bajo dichas condiciones crece al 70%, llegando en algunos casos hasta el 100%. Esto pone de manifiesto que con el modelo 3D creado se reproducen de una manera bastante aproximada las características del campo acústico creado en el recinto ubicando una fuente sonora en la posición F1. Respecto a la inteligibilidad, medida con el índice STI, cabe destacar que los valores medidos y simulados son muy aproximados en la mayoría de los puntos receptores. El STI es aceptable cuando la distancia emisor-receptor es pequeña, donde la relación señal ruido es mayor, pero como es de esperar, va decayendo conforme aumenta dicha distancia, ver Figura 9.

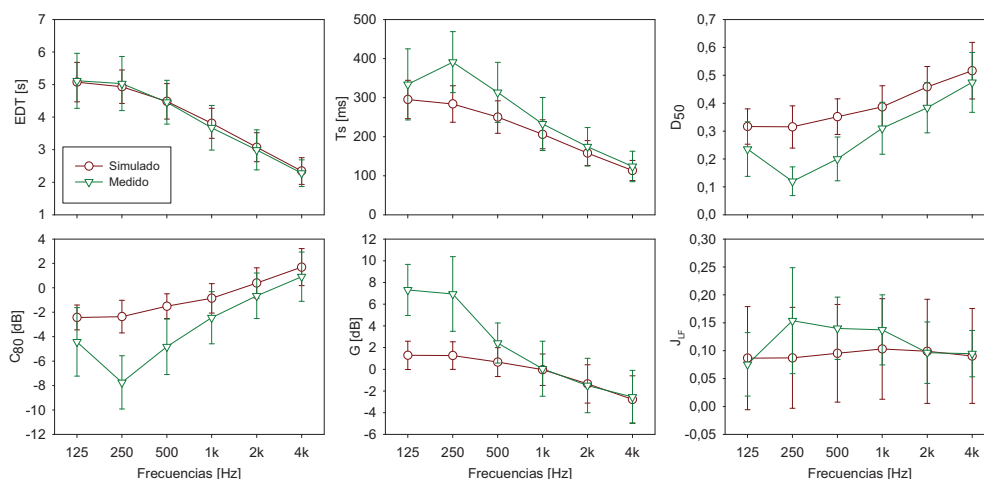


Figura 7. Comportamiento espectral simulado y medido de los parámetros acústicos estudiados, promediados espacialmente y su desviación estándar.

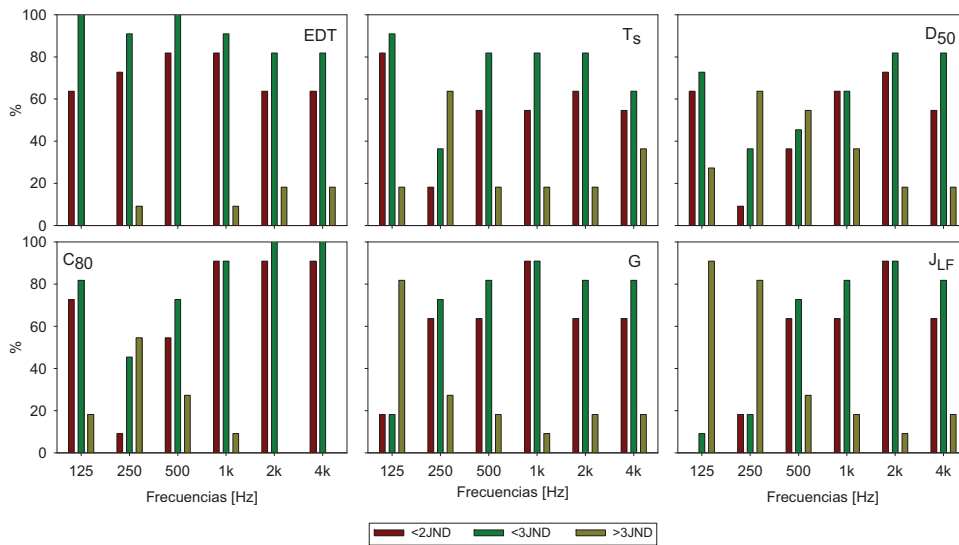


Figura 8. Porcentaje de puntos de medida cuyas diferencias JND entre los valores medidos y simulados se encuentran dentro de cada rango, para cada parámetro.

CONCLUSIONES

Se ha generado y calibrado un modelo de la catedral de Sevilla, patrimonio de la humanidad y la mayor catedral gótica del mundo, con objeto de simular el comportamiento del campo sonoro en su interior. La calibración se basa en un ajuste de los coeficientes de absorción de los materiales menos conocidos, hasta conseguir que el tiempo de reverberación simulado promediado espacialmente para cada una de las bandas de octavas consideradas no difiera en más de 1 JND del valor promedio medido experimentalmente.

Cuando se evalúa el valor medio en frecuencia de cada parámetro los resultados obtenidos son altamente satisfactorios. Al estudiar sus valores promediados espacialmente en cada banda de octava, se observa que la aproximación entre los valores medidos y simulados es, en general, bastante aceptable, presentando menores similitudes a bajas frecuencias. Por último, las diferencias entre valores medidos y simulados en cada punto receptor expresadas en términos del JND para cada banda de octava, se encuentran por debajo del umbral admitido para este espacio, 3 JND. Por lo tanto, puede aceptarse como buena la simulación implementada del campo acústico del templo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren expresar su más sincero agradecimiento al Deán y al arquitecto conservador de la catedral de Sevilla, por facilitarnos el acceso para la realización de las medidas. También agradecen a J. R. Barroso Morales la valiosa ayuda prestada en las medidas acústicas y a J. A. Garrido Alcázar su disponibilidad, colaboración, y su cuidada labor fotográfica de este espacio. Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER a través del I+D+I concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. BIA2010-20523).

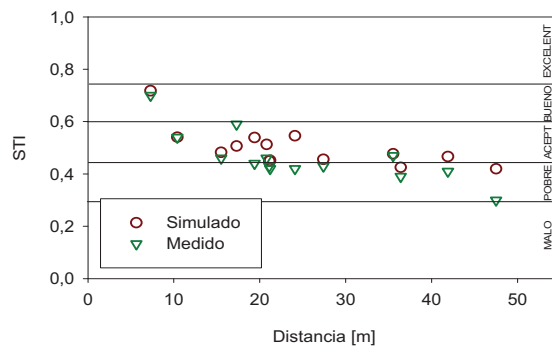


Figura 9. Variación del STI simulado y medido en función de la distancia a la fuente.

REFERENCIAS

- [1] L.L. Beranek, "Concert hall acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.* 92(1), 1-39 (1992).
- [2] E. Cirillo, F. Martellotta, "Worship, Acoustics and Architecture," Multiscience, Brentwood UK, (2006).
- [3] M. K. Abdelazeed, R. N. Hammad, A. A. Mustafa, "Acoustics of King Abdullah mosque," *J. Acoust. Soc. Am.* 90(3), 1441-1445 (1991).
- [4] Z. Karabiber, "A new approach to an ancient subject: CAHRISMA project," on de CD – ROM: Garmisch-Partenkirchen, July 4-7, Seventh International Congress on Sound and Vibration, Germany (2000).
- [5] A. C. Raes, G. Sacerdote, "Measurement of the acoustical properties of two Roman basilicas," *J. Acoust. Soc. Am.* 25(5), 925-961 (1953).
- [6] R. S. Shankland, H. K. Shankland, "Acoustics of St. Peter's and patriarchal basilicas in Rome," *J. Acoust. Soc. Am.* 50(2), 389-396 (1971).
- [7] E. Tzekakis "Data on the acoustics of the byzantine churches of Thessaloniki," *Acustica* 43(2), 275-279 (1979).
- [8] R. Fearn, "Reverberation in Spanish, English, and French churches," *J. Sound Vib.* 43(3), 562-567 (1975).
- [9] T. H. Lewers, J. S. Anderson, "Some acoustical properties of St. Paul's cathedral, London," *J. Sound Vib.* 92(2), 285-297 (1984).
- [10] V. Desarnoulds, K. Eggenschwiler, S. Bossoney, "Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen" ("Acoustic study of Swiss churches"), Proceedings of DAGA, Zürich, 710-711 (1998).
- [11] A. P. O Carvalho, "Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches," *Appl. Acoust.* 58(1), 33-49 (1999).
- [12] R. N. Hammad, "RASTI measurements of mosques in Amman, Jordan," *Appl. Acoust.* 30(4), 335-345 (1990).
- [13] A. A. Adel, "Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia," *J. Acoust. Soc. Am.* 113(3), 1505-1517 (2003).
- [14] E. Cirillo, F. Martellotta, "An improved model to predict energy-based acoustic parameters in Apulian-Romanesque churches," *Appl. Acoust.* 64(1), 1-23 (2002).
- [15] E. Cirillo, F. Martellotta, "Sound propagation and energy relations in churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 118(1), 232-248 (2005).
- [16] F. Martellotta, "A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 125(3), 1281-1284 (2009).
- [17] F. Martellotta, "The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces," *J. Acoust. Soc. Am.* 128(2), 654-663 (2010).
- [18] F. Martellotta, M. D'Alba, "On site validation of sound absorption measurements of occupied pews," *Appl. Acoust.* 72(12), 923-933 (2011).
- [19] J. S. Anderson, M. Bratos-Anderson "Acoustic coupling effects in St Paul's Cathedral, London," *J. Sound Vib.* 236(2), 209-225 (2000).
- [20] F. Martellotta, "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome," *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 1175-1186 (2009).
- [21] D. L. Klepper, "The distributed column sound system at Holy Cross Cathedral, Boston, the reconciliation of speech and music," *J. Acoust. Soc. Am.* 99(1), 417-425 (1996).
- [22] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 1207-1218 (2009).
- [23] J. Segura, A. Giménez, J. Romero, S. Cerdá, "A comparison of different techniques for simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume Basilica in Valencia, Spain," *Acta Acustica-Acustica* 97(1), 155-170 (2011).
- [24] D. A. Cardoso, "Sevilla, el casco antiguo. Historia, arte y urbanismo," Ediciones Guadalquivir (2006).
- [25] A. Jiménez, "Cartografía de la montaña hueca: notas sobre los planos históricos de la Catedral de Sevilla," Cabildo Metropolitano de la Catedral de Sevilla, (1997).
- [26] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, (2010).

COMUNICACIÓN 7

MODELO ACÚSTICO VIRTUAL DE LA CATEDRAL RENACENTISTA DE JAÉN.

AUTORES: Álvarez-Morales, L.; Franco, A.; **Alonso, A.**; Girón, S.; Galindo, M.; Zamarreño, T.

CONGRESO: Proceedings of Tecniacustica (2013) pp. 1456-1463.



**44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO**

**MODELO ACÚSTICO VIRTUAL DE LA CATEDRAL
RENACENTISTA DE JAÉN**

PACS: 43.55.Ka

Álvarez-Morales, L.; Franco, A.J.; Alonso, A.; Girón, S.; Galindo, M.; Zamarreño, T.
Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC
Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, Spain. Tel.: + 34 954555979. Fax: +34 954557892.
E-Mail: calvarez6@us.es, artfracui@us.es, aliciaalonso@us.es, sgiron@us.es,
mgalindo@us.es, teofilo@us.es

ABSTRACT

The Cathedral of Jaen is one of the gems of Spanish Renaissance architecture, which served as a model for the construction of other cathedrals in Spain and America. Its experimental acoustic parameters have been determined, and employed to adjust a 3D model in order to virtually recreate its current acoustic behaviour. This model provides a basis for the analysis of acoustics of historical events and of possible future interventions. In this paper, the results of this adjustment process are presented and the acoustic behaviour of the space is analysed in terms of the values of measured and simulated parameters for the preeminent position of the source: the high altar.

RESUMEN

La catedral de Jaén es una de las joyas arquitectónicas del renacimiento español, que sirvió de modelo para la construcción de otras catedrales en España y América. Se han determinado experimentalmente los parámetros acústicos en su interior, y se han utilizado para ajustar un modelo 3D con el fin de recrear virtualmente su comportamiento acústico actual, el cual servirá de base para analizar comportamientos pretéritos o valorar posibles intervenciones futuras. En este trabajo se presentan los resultados de este proceso de ajuste y se analiza el comportamiento acústico del espacio, en términos de los valores de los parámetros medidos y simulados, para la posición preeminente de la fuente: el altar mayor.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el campo de la acústica virtual integra un conjunto de técnicas de modelado acústico, simulación computacional, y de presentación audible del campo sonoro en entornos interiores y exteriores, capaces de proporcionar descriptores paramétricos o recreaciones virtuales de los mismos con diferentes propósitos. El modelado computacional se ha convertido en una herramienta imprescindible de la ingeniería aplicada al estudio de fenómenos sonoros complejos y en una parte integral del proceso de diseño acústico. Los modelos computaciona-



44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

les crean una representación matemática del entorno acústico basada en descripciones geométricas, analíticas, numéricas, estadísticas, o combinaciones de ellas, del fenómeno físico a considerar, implicando en el proceso operaciones matemáticas muy extensas que son realizadas por los ordenadores. En los modelos acústicos computacionales, el objetivo final es, en el caso de recintos cerrados, conseguir la respuesta al impulso (RI) en una localización específica de fuente-receptor a partir de la cual se pueden obtener los datos relativos al tiempo, frecuencia y dirección de la energía sonora que alcanza al receptor.

Los modelos geométricos computacionales en acústica de salas fueron introducidos por Schroeder *et al.* en 1962 [1], y las primeras implementaciones, un poco más tarde, por Krokstad *et al.* [2]. Los algoritmos de los programas informáticos estándares están basados en la acústica geométrica y han sido utilizados profusamente, como herramientas de diseño y evaluación, en teatros y salas de conciertos. En estas aproximaciones, los fenómenos ondulatorios en la descripción de los campos sonoros degeneran en entes puramente geométricos: rayos sonoros que se propagan desde la fuente hasta el receptor directamente o tras reflejarse en los confines del recinto. En este contexto no se consideran los efectos de fase en la propagación de la energía acústica. Las predicciones correspondientes solo son válidas para frecuencias superiores a la frecuencia de Schroeder de la sala que se puede expresar en función del tiempo de reverberación (T , en s) y del volumen de la sala (V , en m^3): $f_s = 2000\sqrt{T/V}$ (Hz).

Otro aspecto clave en la acústica geométrica es el tipo de reflexiones que pueden ser manipuladas. Los modelos iniciales de acústica de salas más comunes, trazados de rayos/haces [2, 3], de las fuentes imagen [4], o combinaciones de ambos [5], estaban basados en reflexiones puramente especulares; otros modelos menos usuales asumían las reflexiones como puramente difusas [6]. En una superficie real, la reflexión es una mezcla de estos dos extremos, por lo que varios autores han presentado modelos híbridos en esta dirección [7], capaces de predecir fenómenos complejos como el eco flotante [8]. Algunos de los algoritmos de acústica geométrica se han modificado para incorporar el tratamiento de alguno de los fenómenos típicamente ondulatorios como el scattering o la difracción en los bordes [7, 9]. El siguiente paso adelante en la mejora de los algoritmos de cálculo, sobre todo en el caso en que el carácter ondulatorio sea determinante, especialmente en el rango de bajas frecuencias, son los modelos computacionales basados en la ecuación general de ondas. Su resolución pasa por la caracterización de los cerramientos, en términos de su impedancia acústica, y la aplicación de los métodos numéricos (elementos finitos, de contorno, diferencias finitas,...).

Otra importante contribución en las técnicas de simulación lo constituyen las técnicas de auralización en tiempo real, integradas en sistemas de realidad virtual, que proporcionan condiciones visuales y de escucha muy realistas, con posibilidades de variados propósitos: tests psicoacústicos multisensoriales [10], usos en arqueología acústica para recrear escenarios arquitectónicos desaparecidos o para la incorporación de los aspectos acústicos, como patrimonio inmaterial, a recintos de gran valor cultural y patrimonial, son algunos ejemplos.

En este trabajo se analiza el proceso de creación, ajuste y validación del modelo geométrico computacional 3D de la catedral de Jaén. Se centrará la atención en una única posición de la fuente, de todas las consideradas en los ensayos experimentales, y se analizarán exclusivamente los resultados de los parámetros acústicos monaurales. Estos resultados constituyen el inicio de un programa de trabajo sobre este espacio catedralicio, que pretende incorporar la simulación de las respuestas al impulso binaurales y tridimensionales, y la implementación de auralizaciones.

DESCRIPCIÓN DE LA CATEDRAL DE JAÉN

La Santa Iglesia Catedral de la Asunción de Jaén, de estilo renacentista, se ubica en la plaza de Santa María de la ciudad andaluza. La extensa duración del proceso constructivo, así como la intervención de múltiples directores de obras, supuso la coexistencia de diferentes estilos arquitectónicos. Al igual que en otros casos, el solar del templo estaba ocupado en su origen por

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

la Mezquita Mayor de la ciudad musulmana, que fue consagrada en 1246 como templo cristiano tras una primera conquista. Un incendio producido en 1368 a raíz de la reinvasión árabe, genera grandes desperfectos y destruye los restos del templo, por lo que se decide construir una iglesia de nueva planta, proyectada en estilo gótico y con cubierta de madera, ésta contaba con cinco naves y un claustro situado hacia el lado norte. La deficiente construcción de este templo angosto y mal iluminado supone una amenaza de ruina, por lo que se decide demoler la capilla mayor y el crucero con el objetivo de emprender una nueva construcción, proyecto potenciado principalmente por el derrumbe del cimborrio en 1525 [11]. La construcción de la nueva catedral renacentista estuvo dirigida por varios arquitectos, de entre los cuales cabe destacar la labor de Andrés de Vandelvira, quien dirigió personalmente las obras de diversas dependencias. El proceso constructivo del templo, iniciado en el segundo tercio del siglo XVI, se prolongará durante algo más de dos centurias, hasta mediados del siglo XVIII, en el que se llevará a cabo el cerramiento de las bóvedas y capillas de la nave norte [12].

Con unas dimensiones de aproximadamente 70 m de ancha y 100 m de larga, la planta, tipo salón, define el templo, en el que conviven diferentes estilos: renacentista, barroco, churrigueresco y neoclásico. La cabecera es rectangular y el templo se estructura en tres naves longitudinales divididas por pilares cruciformes corintios, coronados por arcos de medio punto que sustentan la techumbre conformada por bóvedas vaídas. En la intersección de la nave central con el crucero se ubica una gran cúpula semiesférica de 12,5 metros de diámetro que alcanza una altura libre de casi 50 metros. A lo largo del perímetro se localizan las capillas laterales, cuyas obras no se concluyeron hasta el siglo XVIII. Entre el crucero y la Capilla Mayor se ubica el presbiterio (Figura 1), un amplio espacio abierto en sus cuatro lados y elevado una altura de cinco peldaños.

El coro, situado en el centro de la planta, es uno de los más grandes y altos de España. Cuenta con un total de 69 sitiales en el nivel superior y 53 en el inferior. La sillería es de madera de nogal y fue tallada en el siglo XVI por diferentes artistas. El órgano ubicado sobre los muros de cantería del espacio coral (Figura 1), fue creado en 1660 y posteriormente reparado en 1705. Su caja, que aún perdura, fue tallada en 1780 en sus dos fachadas. Un nuevo órgano fue realizado en 1790, que posteriormente sería sustituido por otro elaborado en 1941.

En 1733, el maestro mayor José Gallego delineó el alzado del trascoro, una obra que se concluye en el año 1791 [13]. El conjunto alterna paños anchos y rectos con otros cortos y cóncavos. Se articula en un solo piso con pilastras corintias menos esbeltas que las de las naves.

MÉTODO EXPERIMENTAL

El ambiente sonoro se describe a partir de las respuestas al impulso medidas, atendiendo a los diferentes usos que tienen lugar en la catedral (litúrgicos, musicales, culturales, etc.), donde la



Figura 1. Vista del órgano (izquierda) y del altar mayor y crucero (derecha) de la Catedral de Jaén.

percepción sonora juega un papel muy importante. La presencia de fieles o público en general, estará asociada a dichos usos, existiendo, además, una lógica interdependencia entre las diferentes zonas y la posición de la fuente sonora.

Aunque se han medido las RIs considerando diferentes posiciones de la fuente sonora y un conjunto de receptores asociado a cada una de ellas (Figura 2), el presente estudio se centra en los resultados de la fuente F1, ubicada en el altar mayor y asociada con las principales celebraciones litúrgicas y algunas actividades culturales, y los 21 receptores distribuidos por las zonas laterales del altar mayor, el transepto y el coro, todas ellas ocupadas por bancos de madera. Las medidas se llevaron a cabo con el templo vacío. Se monitorizaron las condiciones ambientales midiendo la temperatura y la humedad relativa y se siguieron las recomendaciones de la UNE-EN-ISO 3382 [14] y otras específicamente relacionadas con los recintos de culto [15].

El proceso de generación de la señal de barrido exponencial en frecuencia para excitar el recinto, la adquisición y el análisis de las respuestas al impulso se realizaron con el programa WinMLS2004 a través de la tarjeta de sonido Edirol UA-101. La señal generada fue emitida por una fuente dodecaédrica AVM DO-12 con un amplificador de potencia B&K 2734 y un subwoofer Beringher Eurolive B1800D-Pro autoamplificado, incorporado con el fin de mejorar la relación señal-ruido impulsiva a bajas frecuencias. En cada punto de recepción se recogieron las RIs monoaurales usando un micrófono multipatrón (omnidireccional y figura de ocho) Audio-Technica AT4050/CM5 conectado a una fuente de polarización Sound Field SMP200 de 4 canales. Las RIs binaurales se obtuvieron con un simulador de torso Head Acoustics HMS III (Code 1323) y el acondicionador de señal B&K-2829.

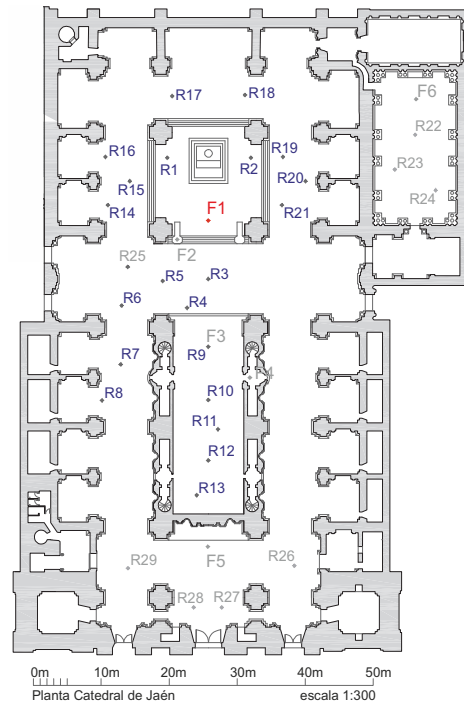


Figura 2. Planta de la catedral de Jaén con indicación de las posiciones de fuentes y receptores. En rojo la fuente y en azul los receptores utilizados en esta comunicación.

SIMULACIÓN

La simulación acústica se llevó a cabo utilizando el programa CATT-Acoustic v9 [9], basado en algoritmos de acústica geométrica. Para ello se creó un modelo geométrico simplificado compuesto de 1837 planos y un volumen aproximado de 85100 m³ (Figura 3). Para adecuar las condiciones acústicas de simulación con las de la situación real, el modelo ha pasado por un proceso iterativo de sintonización en el que se ajustan los coeficientes de absorción de las columnas y muros de piedra de la catedral. El proceso se da por concluido cuando los tiempos de reverberación simulados, en cada banda de octava, promediados espacialmente, no difieran en más de un JND (5%) de los correspondientes valores medidos *in situ*. El resultado del proceso se muestra en la Tabla 1.

En la Tabla 2 aparecen los coeficientes de absorción asociados a los materiales cuya superficie relativa es mayor de 0,4%, junto con los colores asociados en la Figura 3 y sus referencias bi-

Tabla 1. Valores del tiempo de reverberación medidos y simulados tras el proceso de ajuste.

	125	250	500	1k	2k	4k
T medido	9,09	9,58	8,51	7,19	5,40	3,64
T simulado	9,34	9,42	8,65	7,49	5,57	3,81
Diferencia (%)	2,71	1,72	1,67	4,07	3,23	4,76

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

bliográficas. También se asignan los coeficientes de dispersión con estos criterios: 0,1 en todas las bandas de octava a las superficies lisas; a las superficies escasamente decoradas se asignan valores que varían desde 0,12 para 125 Hz, hasta 0,17 para 4 kHz, aumentando 0,01 en cada banda; las superficies decoradas, con poca profundidad, se asignan valores que varían linealmente de 0,20 para 125 Hz, hasta 0,45 para 4 kHz, aumentando 0,05 en cada banda; finalmente, para bancos, esculturas y bóvedas, la variación va desde 0,30 para 125 Hz, hasta 0,80 para 4 kHz, aumentando 0,10 en cada banda [16]. En el modelo 3D de la Figura 3 los materiales que tienen el mismo coeficiente de absorción, pero diferentes coeficientes de dispersión están representados en la misma gama de color.

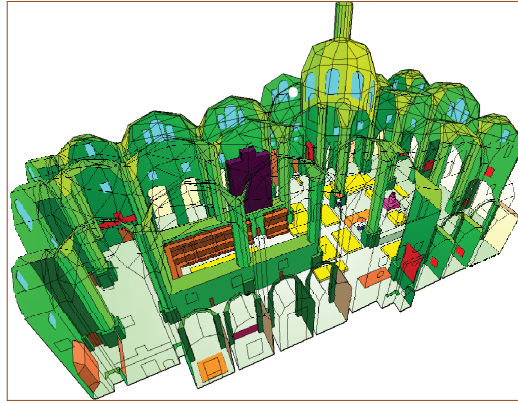


Figura 3. Modelo 3D de la catedral de Jaén utilizado en la simulación acústica.

Los cálculos se obtuvieron con el motor TUCT v1.0h (The Universal Cone Tracer), el cual calcula los parámetros acústicos a partir de los ecogramas de energía (E) y/o de las respuestas al impulso (h). En concreto se optó por el algoritmo para recintos cerrados (cálculo corto), auralización básica con un orden máximo de *split* 0. El número de rayos se obtuvo manualmente hasta lograr la convergencia, determinándose en 300000 rayos y la respuesta al impulso se truncaba a los 9 segundos.











Los cálculos se obtuvieron con el motor TUCT v1.0h (The Universal Cone Tracer), el cual calcula los parámetros acústicos a partir de los ecogramas de energía (E) y/o de las respuestas al impulso (h). En concreto se optó por el algoritmo para recintos cerrados (cálculo corto), auralización básica con un orden máximo de *split* 0. El número de rayos se obtuvo manualmente hasta lograr la convergencia, determinándose en 300000 rayos y la respuesta al impulso se truncaba a los 9 segundos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se representan los valores medidos y simulados promediados espacialmente de cuatro parámetros acústicos estudiados: tiempo de reverberación inicial (EDT), tiempo central (T_s), claridad (C_{80}) y fracción de energía lateral precoz (J_{LF}). Las barras de error muestran la dispersión espacial calculada a partir de la desviación estándar para cada banda de octava.

Atendiendo a los valores medidos, encontramos las características acústicas esperadas para este tipo de espacios, de gran volumen y con materiales de baja absorción sonora: una elevada reverberación percibida y una baja claridad del sonido, especialmente a bajas y medias frecuencias. La alta absorción del aire a altas frecuencias suaviza estas malas condiciones sonoras subjetivas del oyente. No obstante los valores de espacialidad relacionados con la anchura percibida de la fuente se encuentran dentro del rango típico para salas de concierto y salas polivalentes vacías de hasta 25000 m³ [14].

Tabla 2. Áreas y coeficientes de absorción, por bandas de octava, de los materiales para la simulación.

Superficie, referencia,	Área (m ²)	Área (%)	Color (Fig. 3)	Coeficientes de absorción					
				125	250	500	1k	2k	4k
Paramentos piedra*	12939,4	58,7		0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,04
Madera tallada [16]	1827,9	8,3		0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Columnas piedra*	2217,9	10		0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17
Mármol, [17]	3414,3	15,5		0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Madera puertas, [18]	89	0,4		0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Bancos Mad.-cuero, [19]	82,3	0,4		0,20	0,25	0,29	0,31	0,29	0,25
Bancos Madera, [17]	526,9	2,4		0,10	0,15	0,18	0,20	0,20	0,20
Vidrieras, [18]	402,8	1,8		0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Órgano, [20]	292,5	1,3		0,12	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16
Cuadros**	161	0,7		0,15	0,18	0,10	0,10	0,08	0,06

(*) Ajustados en la iteración. (**) Estimados por los autores.

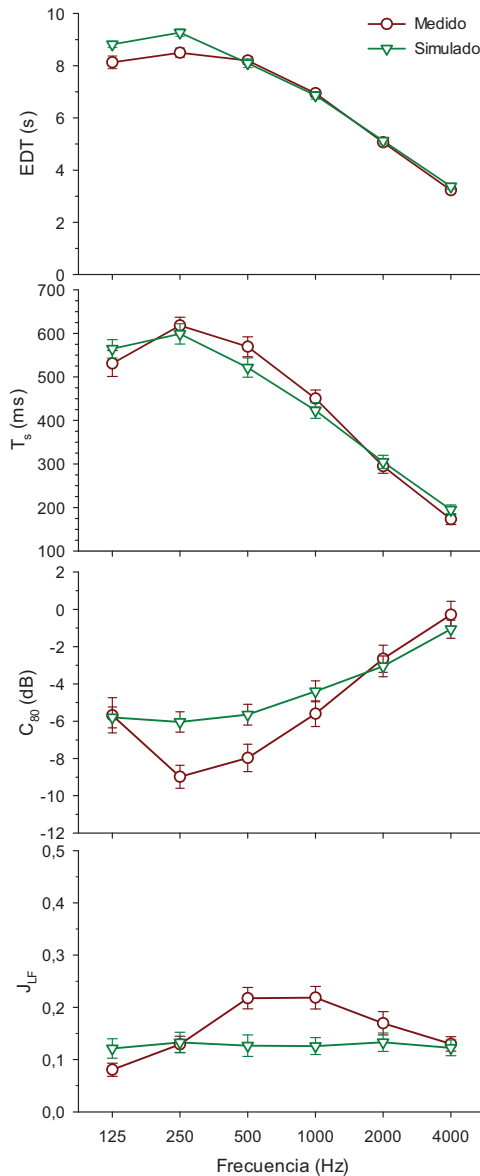


Figura 4. Valores promedio espacial de los valores medidos y simulados.

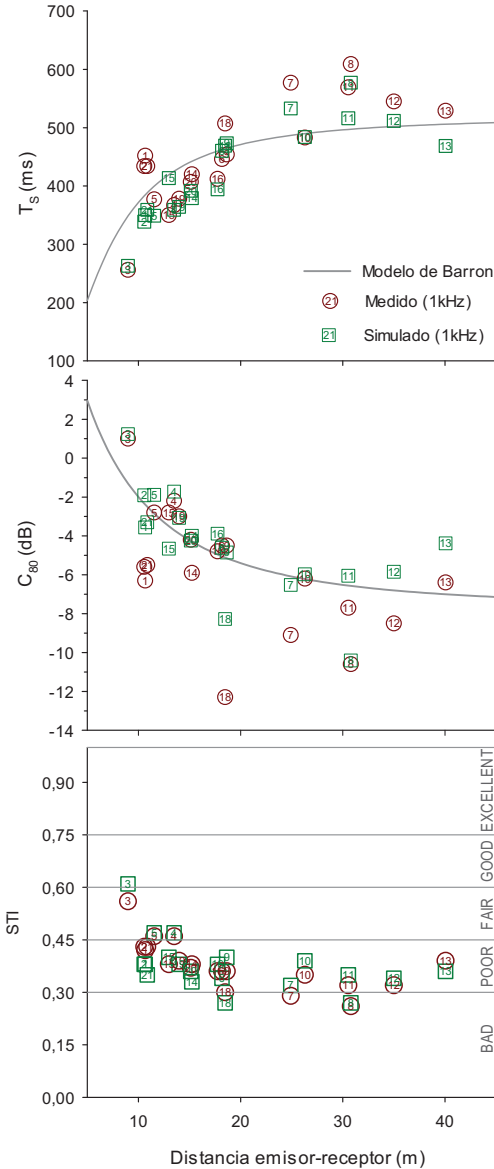


Figura 5. Representación de los valores medidos y simulados frente a la distancia emisor-receptor.

En todos los parámetros se comprueba que, el comportamiento espectral de los valores medidos y simulados es muy similar. La mayoría de las diferencias entre valores simulados y medidos, para cada parámetro y cada banda de octava no superan un JND. Además los valores de las desviaciones estándar correspondientes a las simulaciones son del mismo orden que las encontradas en las medidas experimentales, por lo que la dispersión espacial es similar hasta el punto que este parámetro puede valorar.

Con objeto de dar una estimación del comportamiento con la distancia fuente-receptor para la claridad del sonido percibida y la inteligibilidad de la palabra, junto con una evaluación punto a punto de los valores medidos y simulados, en la Figura 5 se muestra la dependencia de los valores promediados de T_s y C_{80} para las bandas de octava recomendadas [14], junto con el índice de transmisión de la palabra (STI). Además, a modo de referencia, se incorpora el valor teó-

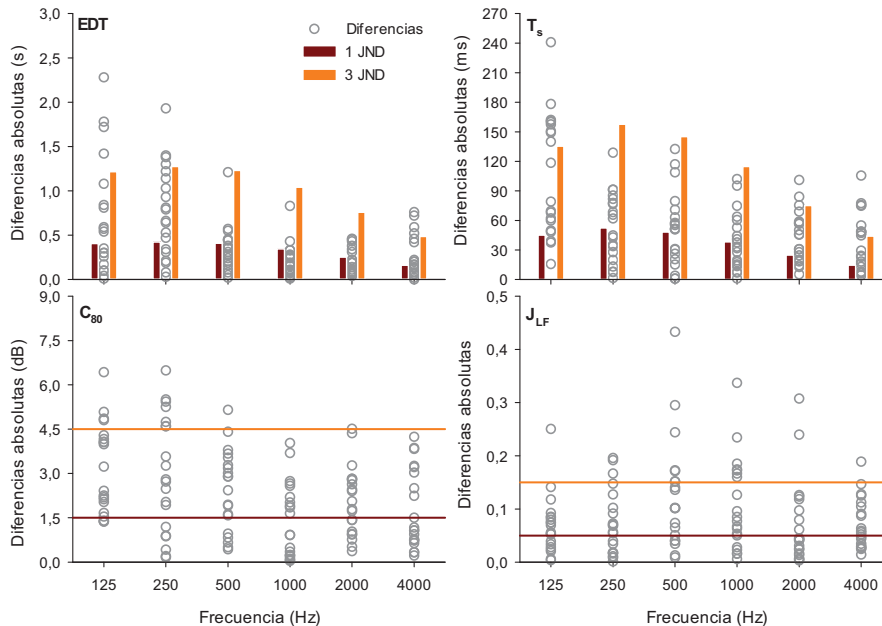


Figura 6. Diferencias punto a punto en valor absoluto entre los valores medidos y simulados para las diferentes bandas de octava. Se indican los valores de 1 y 3 JND para valorar esas diferencias.

rico del modelo de Barron [21]. A nivel general las tendencias de los valores medidos y simulados son parecidas entre sí, con mayores diferencias para C_{80} . En ambos casos queda de manifiesto la pérdida de claridad musical y de inteligibilidad conforme nos alejamos de la fuente sonora. El parámetro STI confirma que la inteligibilidad de la palabra en todo el recinto podría calificarse como *pobre*.

Para cuantificar objetivamente la validez de la simulación en la Figura 6 se presentan las diferencias absolutas, punto a punto y para cada banda de octava, entre los valores medidos y simulados de cada parámetro, valoradas en términos de los JND respectivos [14, 22]. Cuando se fija por debajo de 2 JNDs, valor normalmente considerado como aceptable para la simulación, vemos que, para la mayoría de los parámetros y bandas de octava, la gran mayoría de los puntos se sitúan dentro de este rango, llegando en algunos casos hasta el 100%. Teniendo en cuenta las grandes dimensiones del recinto y su complejidad arquitectónica, consideramos aceptable una diferencia de hasta 3 JNDs, y en este caso casi la totalidad de los valores permanece en este rango. Esto pone de manifiesto que con el modelo 3D creado se reproducen de una manera suficientemente válida las características del campo acústico creado en el recinto cuando la fuente sonora se ubica en el altar (F1).

CONCLUSIONES

Se ha generado y ajustado un modelo virtual de la catedral de Jaén, considerada una joya arquitectónica del renacimiento español, con objeto de simular el comportamiento del campo sonoro en su interior. La sintonización inicial se basa en un ajuste de los coeficientes de absorción de los materiales más singulares del espacio, y por consiguiente menos conocidos, hasta conseguir que el tiempo de reverberación simulado, promediado espacialmente para cada una de las bandas de octavas consideradas, no difiera en más de 1 JND del valor promedio medido experimentalmente.

Al evaluar sus valores promediados espacialmente en cada banda de octava, se observa una buena aproximación entre el comportamiento de los parámetros acústicos medidos y simulados. También se observan tendencias y valores similares al evaluar el comportamiento de los



44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA

EAA SIMPOSIO EUROPEO DE ACÚSTICA AMBIENTAL Y MAPAS DE RUIDO

parámetros promediados en frecuencia frente a la distancia fuente-receptor. Por último, las diferencias entre los valores medidos y simulados en cada punto receptor, comparadas en términos del JND para cada banda de octava, se encuentran por debajo del umbral admisible para este tipo de espacios, 2-3 JND. Por lo tanto, se puede aceptar la fiabilidad de la simulación implementada del campo acústico del templo. En un futuro próximo se extenderá el estudio al resto de las posiciones de la fuente en concordancia con la campaña experimental completa y las respuestas al impulso espaciales y binaurales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren expresar su más sincero agradecimiento al Deán de la catedral y a todo el personal que nos atendió durante la realización de las medidas por las facilidades brindadas y el buen trato recibido. También agradecer a J. A. Garrido su esmerado reportaje fotográfico del espacio. Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER y por el proyecto I+D+I concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. BIA2010-20523).

REFERENCIAS

- [1] M. R. Schroeder, B. S. Atal, C. Bird. "Digital computers in room acoustics". En Proceedings of 4th International Congress on Acoustics ICA, Copenhagen (1962), p. M21.
- [2] A. Krokstad, S. Strøm S. Sørsdal. "Calculating the acoustic room response by the use of a ray tracing technique". J. Sound Vib. 8, 118 (1968).
- [3] T. Lewers. "A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics." Appl. Acoust. 38 161-178 (1993).
- [4] H. Lee, B. H. Lee. "An efficient algorithm for the image source technique". Appl. Acoust. 24, 87-115 (1988).
- [5] M. Vörlander. "Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image source algorithm". J. Acoust. Soc. Am. 86, 172-178 (1989).
- [6] R. N. Miles. "Sound field in a rectangular enclosures with diffusely reflecting boundaries." J. Sound Vib. 92, 203-226 (1984).
- [7] B. I. Dalenbäck. "Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection." J. Acoust. Soc. Am. 100, 899-909 (1996).
- [8] G. I. Koutsouris, J. Brunskog, C.-H. Jeong, F. Jacobsen. "Combination of acoustical radiosity and the image source method". J. Acoust. Soc. Am. 133, 3963-3974 (2013).
- [9] B.-I.L. Dalenbäck. CATT-Acoustic v9 powered by TUCT use manuals. Computer Aided Theatre Technique; Gothenburg (Sweden), 2011.
- [10] M. Vorländer. "Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties". J. Acoust. Soc. Am. 133, 1203-1213 (2013).
- [11] P. A. Galera-Andreu. "La Catedral de Jaén". León: Everest, 1983.
- [12] J. Higuera-Maldonado. "La catedral de Jaén: su construcción renacentista (S. XVII-XVIII)". Jaén: Publicaciones de la Universidad de Jaén, 2009.
- [13] A. Ortega-Suca. "La Catedral de Jaén: unidad en el tiempo". Jaén: Colegio Oficial de Arquitectos de Andalucía Oriental, Delegación de Jaén, 1991.
- [14] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010.
- [15] F. Martellotta, E. Cirillo, A. Carbonari, P. Ricciardi. "Guidelines for acoustical measurements in churches". Appl. Acoust. 70, 378-388 (2008).
- [16] F. Martellotta. "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome". J. Acoust. Soc. Am. 126, 1175-1186 (2009).
- [17] M. Vorländer: "Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality". Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [18] T. J. Cox, P. D'Antonio. "Acoustic absorber and diffusers, theory, design and application". London: Spon, 2004.
- [19] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, line 514. <http://www.ptb.de/en/org/1/17/172/datenbank.htm> (visitada 05/07/2013).
- [20] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón. "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches". J. Acoust. Soc. Am. 126, 1207-1218 (2009).
- [21] M. Barron, L.-J. Lee. "Energy relations in concert auditoria I". J. Acoust. Soc. Am. 84, 618-628 (1988).
- [22] F. Martellotta. "The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces". J. Acoust. Soc. Am. 128, 654-663 (2010).

COMUNICACIÓN 8

ABSORCIÓN ACÚSTICA DE MATERIALES TEXTILES EN RECINTOS DE CULTO.

AUTORES: Álvarez-Morales, L.; **Alonso, A.**; Girón, S.; Galindo, M.; Suárez, R.; Sendra, J.J.;
Giménez, A.

CONGRESO: Actas de Tecniacústica (2015) pp. 1-8.



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS**

ABSORCIÓN ACÚSTICA DE MATERIALES TEXTILES EN RECINTOS DE CULTO

PACS: 43.55.Ev

Álvarez-Morales, L.¹; Alonso, A.¹; Girón, S.¹; Galindo, M.¹; Suárez, R.¹; Sendra, J.J.¹; Giménez, A.²

¹Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC), Universidad de Sevilla. Av. Reina Mercedes 2, 41012 - Sevilla, Tel: +34954555979, Fax: +34954557892; e-mails: calvarez6@us.es; aliciaalonso@us.es; sgiron@us.es; mgalindo@us.es; rsuarez@us.es; jsendra@us.es

²Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 - Valencia, Tel: +34 963877000, ext: 85240; e-mail: agimenez@fis.upv.es

ABSTRACT

For the great festivities, worship venues are mainly decorated by incorporating textiles, ephemeral solutions which change the acoustic behaviour of these spaces. The aim of this work is the acoustical characterisation of some of these textile decorations by measuring in situ their absorption coefficient, considering different configurations. Two commercial measuring tools have been used in order to determine the absorption coefficient. These systems are based on two calculation methods: subtraction technique and the measurement of both sound pressure and velocity particles.

RESUMEN

Los recintos eclesiales se ornamentan para las grandes festividades principalmente mediante la incorporación de materiales textiles, soluciones efímeras que pueden modificar el comportamiento acústico de estos espacios. El objetivo de este trabajo es caracterizar acústicamente algunas de estas decoraciones textiles, mediante la medición in situ de su coeficiente de absorción, adoptando diferentes configuraciones. Se han usado dos equipos comerciales de medida que permiten determinar el coeficiente de absorción. Estos equipos se basan en dos métodos de cálculo: técnica de sustracción, y la medida de la presión sonora y la velocidad de las partículas.

INTRODUCCIÓN

Los recintos de culto de grandes dimensiones suelen tener elevados tiempos de reverberación [1-3] debido a una escasez de absorción de los materiales que los conforman, especialmente a bajas y medias frecuencias. El marcado carácter patrimonial de estos espacios dificulta la posibilidad de intervenir acústicamente sobre ellos, limitándose prácticamente a la búsqueda de soluciones efímeras que aparecen asociadas con frecuencia a diferentes actividades, ritos y festividades religiosas [4].



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS**

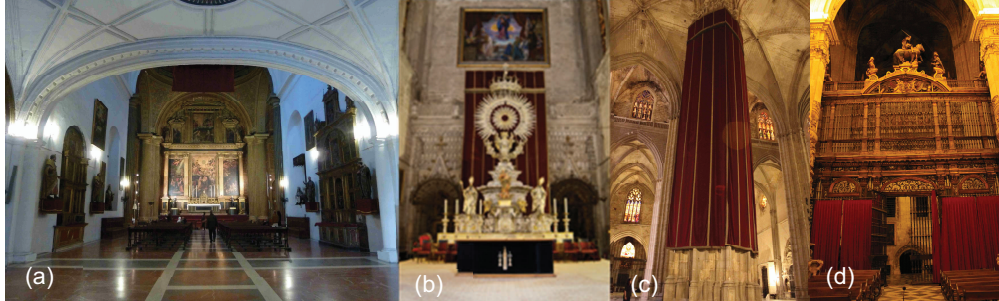


Figura 1. (a) Vista interior de la iglesia de la Anunciación. Diferentes textiles usados en la Catedral de Sevilla: (b) Altar de plata con dosel posterior de terciopelo; (c) disposición de textil pesado sobre columna; y (d) cortina pesada a la entrada de la Capilla Real.

Dentro de la arquitectura efímera, históricamente uno de los recursos más habituales es la utilización de elementos textiles [5], que estratégicamente colocados, desde un punto de vista acústico, y en función de su densidad y disposición, pueden ayudar a reducir el exceso de reverberación. Estos elementos frecuentemente se disponen en arcos y capillas con objeto de segregar estos espacios del espacio principal o sobre columnas y paredes con diferentes grados de fruncido. Además, en las iglesias católicas, muchos de estos textiles son pintados y enmarcados a modo de lienzos con temas de carácter religioso (Figura 1).

Una de las principales dificultades es asignar los coeficientes de absorción de estos elementos textiles, existiendo un importante vacío en la literatura científica debido al desconocimiento de las características acústicas de estos materiales en un recinto eclesial. El objetivo del presente trabajo es caracterizar algunos de estos elementos textiles de uso frecuente en las iglesias mediante el cálculo de su coeficiente de absorción a partir de medidas in situ.

MONTAJE EXPERIMENTAL

Las medidas se realizaron usando dos equipos de medida in situ (Figura 2). El primero corresponde a la sonda Zircon (SZ) [6], formada por un altavoz y un micrófono separados una distancia constante (1,25 m). La sonda utiliza la técnica de sustracción de Mommertz [7] y enventanado [8]. Necesita dos señales: la respuesta impulsiva en campo libre y la respuesta impulsiva registrada in situ con el micrófono situado cerca de la muestra (25 cm). La respuesta en campo libre se sustrae de la respuesta in situ, cancelando así la contribución del sonido directo. Las reflexiones indeseadas se eliminan de la respuesta impulsiva aplicando ventanas temporales que aíslan la primera reflexión, permitiendo estimar el coeficiente de reflexión de la muestra, a partir del cual se deduce el de absorción. Este equipo permite evaluar el coeficiente de absorción a diferentes ángulos de incidencia sonora. El segundo equipo corresponde a una sonda de impedancia (SPU) [9] que permite estimar la intensidad, la impedancia, el coeficiente de reflexión y de absorción de un material, aplicando varios métodos de cálculo: *mirror source method*, *plane wave surface impedance method* o *intensity extrapolation method*. En este caso se ha optado por el método *mirror source*, ya que sus resultados no se ven afectados por los efectos de las reflexiones en una sala reverberante [10]. Al igual que la sonda Zircon, la sonda SPU está formada por un altavoz y un sensor separados



Figura 2. Sonda Zircon (derecha) y sonda de impedancia (izquierda).



46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA VIRTUAL Y AMBISONICS

una distancia constante (26 cm) que permite medir la presión y velocidad de las partículas de aire cerca de la muestra (5 mm). También se necesita una señal de referencia en campo libre. En ambos casos se ha optado por considerar una incidencia normal a la muestra. Ambos equipos se controlan mediante un software (Dirac 5 para la SZ; propio para la SPU) instalado a un ordenador portátil que funcionan como generador y analizador de señal, conectado a las sondas vía USB pasando por sendas tarjetas de sonido: USB Audio interface + amplificador de potencia B&K 2734 para SZ; amplificador MFDAQ-2 y un acondicionador de señal MFSC-2 de Microflown para la SPU.

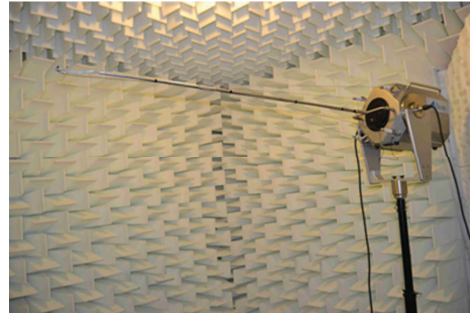


Figura 3. Medida del sonido directo para la calibración de la sonda Zircon.

Los ensayos se realizaron en la iglesia de la Anunciación de Sevilla (Figura 1 (a)), siguiendo la metodología recomendada para cada equipo [11-14]. Las señales de excitación utilizadas son una señal de barrido exponencial en frecuencia para la SZ y ruido blanco para la SPU. Se controlaron las condiciones de temperatura y humedad relativa para el correcto cálculo de la distancia emisor-receptor. Para la señal de campo libre en la SZ se realizaron medidas en cámara anecoica (Figura 3), para la SPU se tomaron al inicio de cada sesión de medida. Se han analizado tres tipos diferentes de textiles, correspondientes a un tipo de terciopelo ligero (T) de 320 g/m^2 , un damasco bordado (DA) de 227 g/m^2 y un lienzo de algodón (Li).

Los dos primeros textiles, se colgaron sobre una estructura móvil que permite el montaje en dos configuraciones: drapeado y liso (Figura 4(a) y (b)). Además, para comparar diferentes disposiciones, se han ensayado varias distancias de separación entre el textil y la pared de la iglesia, que corresponde a un muro de fábrica de ladrillo, enlucido y pintado. El lienzo de algodón es una pintura al óleo (siglo XVIII) de carácter religioso, de unos 9 m^2 , ubicado en una pared lateral de la iglesia y dispuesta sobre un marco de madera que deja una cámara de aire de unos 5 cm con la pared (Figura 4(c)).

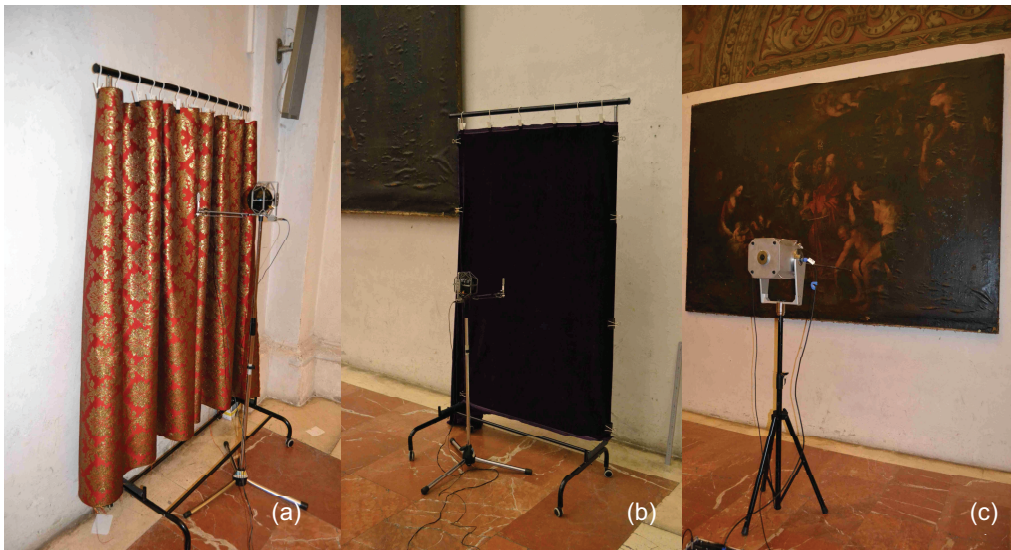


Figura 4. Textiles caracterizados: Damasco bordado dispuesto de forma drapeada (a), terciopelo ligero dispuesto de forma lisa (b) y lienzo (c).



46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS

RESULTADOS

Se han llevado a cabo diversas campañas de medición sobre varios de los elementos decorativos que habitualmente se encuentran en el interior de los espacios eclesiales. La utilización de los dos equipos comerciales ha permitido calcular los coeficientes de absorción, bajo incidencia normal, de estos materiales en función de la configuración adoptada.

Ambos equipos presentan problemas de campo cercano, pues los rangos de trabajo propuestos por los fabricantes son fiables a partir de 200-250 Hz para la SZ y 300 Hz para la SPU. Las características del montaje obligaron a que la altura de la SZ no estuviera suficientemente alejada del suelo, permitiendo que puedan recogerse reflexiones no deseadas. Además, el tamaño de las muestras estaba más comprometido para la SZ, especialmente considerando el ancho, lo que puede introducir efectos de borde. Aunque lo ideal sería comparar los resultados obtenidos con valores contrastados de diversas fuentes y bases de datos, las disponibles no son lo suficientemente explícitas como para señalar conjuntamente el material, su densidad, su disposición lisa o drapeada, el porcentaje de superficie drapeada y la distancia de la muestra a la pared. El terciopelo, aunque ha sido ensayado con más profusión, tampoco ha sido debidamente explicitado en todos los términos anteriormente descritos, si bien es cierto que los valores presentados en forma lisa son notablemente menores a los encontrados en nuestros ensayos.

En la Figura 5 se presentan los valores del coeficiente de absorción, por bandas de octava, medidos con ambos dispositivos para el damasco bordado (DA), instalado de forma lisa (L), y colocado a distintas distancias con respecto a la pared. Para cada material, se representa el valor promedio del coeficiente de absorción medido en varios puntos seleccionados para cubrir correctamente la superficie de la muestra. La variación media entre los puntos de medida del "mallado" es del 3%, siendo inferior al 5% para todas las configuraciones a todas las bandas de frecuencia (los valores más altos en la banda de 125 Hz). Se observa una cierta disparidad entre ambos grupos de resultados, numéricos y de tendencia, especialmente cuando la muestra está muy cerca de la pared o cuando está muy lejos. Ésta es especialmente significativa a bajas frecuencias, bandas en las que los valores del coeficiente de absorción medido con una y otra sonda difieren más del 20%. A medida que aumenta la frecuencia y entramos en el rango adecuado de funcionamiento, los resultados se estabilizan para ambos equipos a medias y altas frecuencias, alcanzando valores entre 0,60 y 1,00 en todas las disposiciones. No obstante, a nivel general los valores de la SZ son menores (aproximadamente un 15%) que los obtenidos con la SPU. Esta sonda, la SPU, será la que utilizaremos para el resto de medidas a raíz de los posibles inconvenientes descritos para la SZ.

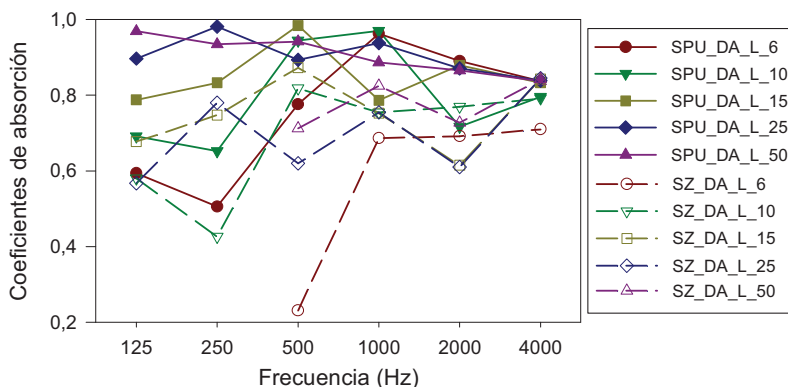


Figura 5. Coeficientes de absorción en bandas de octava obtenidos al medir con la sonda de impedancia (SPU) y la sonda Zircon (SZ) el damasco bordado (DA), instalado de forma lisa (L) y colocado a diferentes distancias con respecto a la pared (6, 10, 15, 25 y 50 cm).

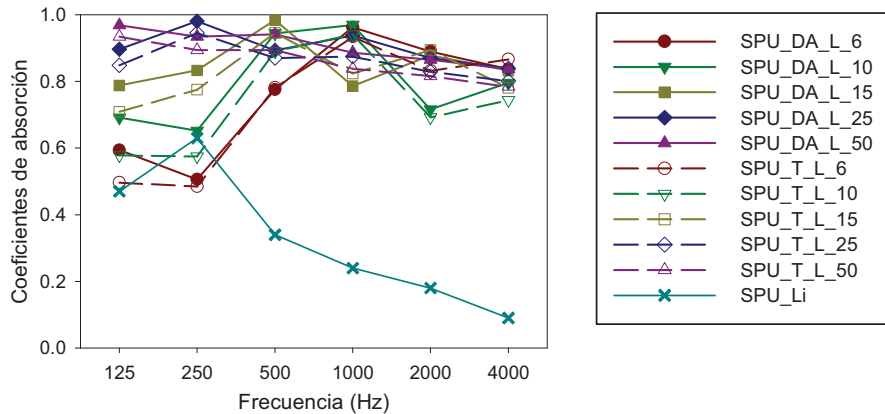


Figura 6. Coeficientes de absorción en bandas de octava obtenidos al medir con la sonda de impedancia (SPU) el damasco bordado (DA), el terciopelo (T) instalados de forma lisa (L) y colocados a diferentes distancias con respecto a la pared, y el lienzo de algodón (Li).

Además, la presencia de superficies reflectantes distantes más de 8 cm de la SPU no interfiere con los resultados [10].

Prestando atención a los resultados obtenidos con la SPU, se representan en la Figura 6 los valores de los coeficientes de absorción obtenidos para el damasco bordado (DA) y el terciopelo (T) en su configuración lisa (L) a varias distancias de la pared, así como los obtenidos para el lienzo (Li). Observamos que el comportamiento de los dos textiles es similar. A medida que aumenta la separación del textil con respecto a la pared, es decir, la cámara de aire detrás del material, aumenta la absorción a bajas frecuencias, mientras que a medias-altas frecuencias se reduce la influencia de la cámara de aire, dando lugar a valores más uniformes. Cabe destacar, que cuando la cámara de aire entre el textil y la pared supera los 25 cm, se obtiene un coeficiente de absorción uniforme superior a 0,8. El lienzo muestra un comportamiento completamente opuesto, ofreciendo la máxima absorción a bajas frecuencias, al actuar como un resonador. En general, a la hora de valorar la influencia de la tipología del material, se obtiene menor absorción para el material de mayor densidad (terciopelo) con respecto al de menor (damasco bordado). La existencia de bordados en toda la superficie duplica las capas del tejido pudiendo aumentar su absorción.

A continuación, analizamos ambos textiles en la configuración drapeada, que corresponde a un 50% de su superficie. Aquí, cobra importancia la colocación de la sonda SPU, que mantiene el micrófono receptor a una distancia de 5 mm de la muestra, de forma que unas veces se enfrenta a salientes y otras a entrantes del material. En primer lugar se plantea un valor promedio de todas las medidas, sin embargo los valores obtenidos no permiten inferir ningún resultado claro, pues los coeficientes de absorción no se corresponden con el comportamiento teórico esperado, ya que su absorción debería ser mayor dada la relación entre el área efectivamente ocupada por la cortina y el área de la cortina estirada, que puede dar lugar a incrementos en el coeficiente de absorción incluso de un 50% [15-16]. Sin embargo, para algunas bandas de frecuencia no solo no queda reflejado este incremento, sino que los coeficientes obtenidos con el material fruncido son menores que los obtenidos con el material estirado. A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 7 los resultados de las diferencias del coeficiente de absorción por bandas de octava, obtenidas para el terciopelo (en donde los valores negativos corresponden a incremento de absorción con la configuración drapeada). Esto lleva a concluir que la técnica de medición utilizada con la sonda SPU parece que no es adecuada para caracterizar materiales plegados si el objetivo es presentar valores del coeficiente de absorción del material al completo.

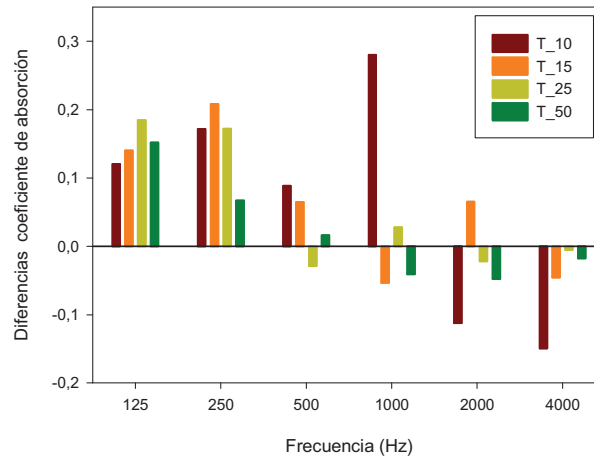


Figura 7. Diferencias obtenidas entre los valores promedio de los coeficientes de absorción medidos con la sonda de intensidad (SPU) para el terciopelo (T) en configuración lisa y drapeada, a varias distancias de la pared.

Por último, se analiza la importancia de las medidas realizadas sobre los salientes y entrantes de cada textil. En la Figura 8(a-b) se muestra el coeficiente de absorción frente a la frecuencia para el DA y T diferenciando las medidas localizadas tanto en entrantes como en salientes. Tal como se podía predecir, se observa un notable contraste entre ambos grupos de puntos, un hecho claramente justificado por las condiciones de cada ubicación, donde la llegada de reflexiones sonoras y la creación de cámaras de aire varían de un caso a otro. Cabe destacar la máxima disparidad cuando la estructura que sustenta el tejido se dispone a 10 y 15 cm de la pared. En el caso de que la cámara sea de 50 cm, dichas variaciones no se perciben (inferiores al 5%), dado que no existe superficie rígida tras el textil en ninguno de los casos.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se ha llevado a cabo un estudio de caracterización acústica de diferentes tipos de textiles utilizados en la decoración festiva de espacios eclesiales, a partir de la obtención de los coeficientes de absorción in situ. Para ello, se han utilizado dos equipos comerciales de medición que se basan en distintas técnicas y métodos de cálculo: la sonda Zircon y la sonda de impedancia.

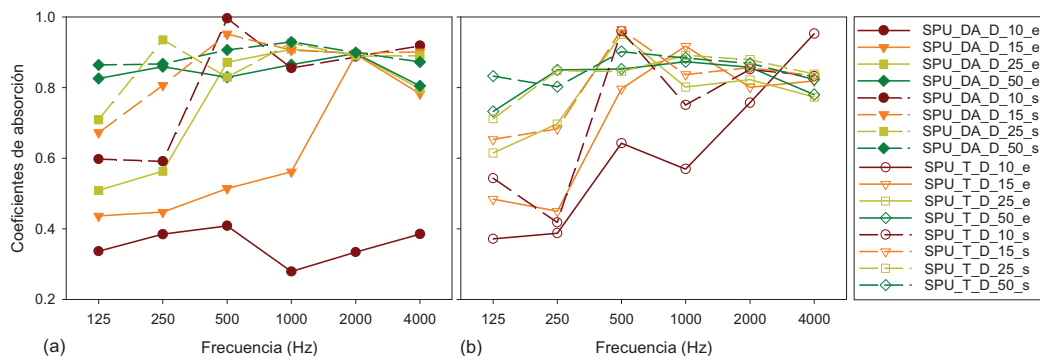


Figura 8. Coeficientes de absorción obtenidos para cada textil: (a) damasco bordado (DA) y (b) terciopelo (T), en la configuración drapeada (D), considerando separadamente entrantes (Línea continua, e) y salientes (Línea discontinua, s).



46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA VIRTUAL Y AMBISONICS

El análisis de los resultados refleja cierta disparidad entre los valores obtenidos por ambos equipos, especialmente a bajas frecuencias, fuera del rango adecuado de funcionamiento. A nivel general, los valores obtenidos con la sonda Zircon son menores que los obtenidos con la sonda de impedancia, sin embargo, las condiciones de medición no se adaptan a las recomendadas por el fabricante de la sonda Zircon, dadas las características de montaje y existencia de superficies reflectantes.

Por otra parte, cuando los materiales se disponen de forma lisa, a medida que se incrementa la cámara de aire, la absorción de ambos materiales aumenta a bajas frecuencias, mientras que a medias-altas frecuencias se mantiene uniforme con valores de absorción superiores a 0.8.

A la hora de valorar la influencia de la tipología del material, se obtiene menor absorción para el material de mayor densidad (terciopelo) con respecto al de menor (damasco bordado). La existencia de bordados en toda la superficie duplica las capas del tejido pudiendo aumentar su absorción.

Finalmente, cuando el material se dispone de forma drapeada surge la necesidad de crear un mallado de puntos sobre el material con el fin de analizar la influencia de los entrantes y salientes del tejido. Tras la valoración de los resultados se observa un claro contraste entre ambos grupos de puntos, justificado por las condiciones individuales creadas para cada uno, dada la existencia de reflexiones y la cámara de aire. El promedio de los valores refleja disparidad entre los resultados obtenidos y el comportamiento teórico esperado, con lo cual, ante la imposibilidad de medir el material en su conjunto, se concluye que el equipo no es el adecuado para la caracterización de materiales drapeados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo quieren agradecer a Diego Marín, técnico del CICUS de la Universidad de Sevilla, las facilidades brindadas para la realización de las medidas en la iglesia de la Anunciación. También agradecen al grupo de acústica virtual de la UP de Valencia el préstamo del equipo de medida. Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de referencias CEI 2014/731 y BIA2014-56755-P.

REFERENCIAS

- [1] Lewers T.H., Anderson J. Some acoustical properties of St. Paul's Cathedral, London. *J Sound Vib*, 92 (2), 1984, pp. 285-297.
- [2] Magrini A., Ricciardi P. An experimental study of acoustical parameters in churches. *Int J Acoust Vib*, 7, 2002, pp. 177-83.
- [3] Álvarez, L., Galindo M., Girón S., Zamarreño T. La acústica de las Catedrales Andaluzas. *Proceedings of Tecniacústica2013*, pp. 901-908.
- [4] Alonso A., Suárez R., Sendra J.J., Zamarreño T. Acoustic evaluation of the cathedral of Seville as a concert hall and proposals for improving the acoustic quality perceived by listeners. *J Build Perform Sim*, 7(5), 2014, pp. 360-378.
- [5] Martellotta F., Castiglione M.L. On the use of paintings and tapestries as sound absorbing materials. *Proceedings of the Forum Acusticum 2011*.
- [6] <http://www.acoustics-engineering.com/html/zircon.html>. (Visitada 15/07/2015)
- [7] Mommerz E. Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique. *ApplAcoust*, 46, 1995, pp. 251-263.
- [8] Guidorzi P., Garai M. Signal analysis in the sound absorption measurement procedure: the importance of time subtraction and reference surface corrections. In: *Proceedings of Acoustics 2008 Paris*, pp. 1755–1760.
- [9] <http://www.microflown.com/products/solutions/in-situ-absorption-setup.html>. (Visitada 15/07/2015)



**46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS**

- [10] http://www.microflown.com/files/media/library/books/microflown_ebook/ebook_6_impedanc_e.pdf (Visitada 15/07/2015)
- [11] Praticòia F.G., Vaianab R., Fedelea R. A study on the dependence of PEMs acoustic properties on incidence angle. IntJPavEng, 2014. DOI: 10.1080/10298436.2014.943215
- [12] Haugen S. Master thesis: Sound Reflection from Building Facades. Department of Electronics and Telecommunications. Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- [13] Cats P., Tijs E., Comesana D.F. Exploration of the differences between a pressure-velocity based in situ absorption measurement method and the standardized reverberant room method. Proceeding of Meeting of Acoustics ICA 2013.
- [14] Pérez-Vidal C., Cerdá S., Montell R., Cibrián R., Segura J.; Barba A., Querol L., Giménez A. Metodología para medidas de absorción acústica in-situ mediante sensores de presión y velocidad. Proceedings of TecniAcustica Valladolid 2013, pp. 1366- 374.
- [15] Cox T.J., D'Antonio P. Acoustic absorbers and diffusers. Theory, design and application. 2nd ed. Abingdon, Oxfordshire: Taylor & Francis, 2009.
- [16] Vorländer: M. Auralization, fundamentals of acoustics modeling simulation, algorithms and acoustic virtual reality. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

PARÁMETROS ACÚSTICOS

B.1 Normativa ISO 3382-1

Resulta necesario enunciar y definir los diferentes parámetros acústicos analizados en esta tesis doctoral, que nos han permitido hacer una evaluación sobre las condiciones acústicas de los espacios eclesiales analizados.

Tabla B1. Norma ISO 3382-1. Magnitudes acústicas y sensación subjetiva del oyente

ASPECTO SUBJETIVO DEL OYENTE	MAGNITUD ACÚSTICA	PROMEDIADO EN FRECUENCIA ¹ (Hz)	UMBRAL DIFERENCIAL (JND)	RANGO TÍPICO ²	
Nivel sonoro subjetivo	Fuerza sonora	G (dB)	500 a 1000	1 dB	-2dB;+10dB
Reverberación percibida	Tiempo de reverberación inicial	EDT (s)	500 a 1000	Rel. 5%	1,0 s; 3,0 s
Claridad del sonido percibida	-Claridad	C ₈₀	500 a 1000	1 dB	-5dB;+5dB
	-Definición	D ₅₀	500 a 1000	0,05	0,3; 0,7
	-Tiempo central	Ts (ms)	500 a 1000	10 ms	60 ms; 260 ms
Ancho aparente de la fuente (ASW)	Fracción de energía lateral precoz	J _{LF0} J _{LFc}	125 a 1000	0,05	0,05; 0,35
Envolvente del oyente (LEV)	Nivel sonoro lateral final	L _J	125 a 1000	Desconocido	-14dB;+1dB

¹ El promediado en frecuencia de número único indica la media aritmética para las bandas de octava, excepto para L_J, que se debe promediar energéticamente

² Valores promediados en frecuencia, en posiciones únicas en salas de conciertos y en salas polivalentes de volumen hasta 25.000 m³

En la norma ISO 3382-1 (2010) se señala que se ha demostrado la relación existente entre una serie de magnitudes acústicas y la sensación subjetiva percibida por el oyente a partir de estudios subjetivos realizados. El conjunto de valores obtenidos de dichas magnitudes puede aportar una completa descripción de las condiciones acústicas del recinto estudiado. En la tabla B1, extraída de la citada norma ISO, se establece la existencia de cinco agrupaciones de sensaciones percibidas y sus relaciones con los parámetros acústicos:

Los parámetros con los que vamos a analizar la acústica de los espacios eclesiales son parámetros fundamentalmente concebidos para valorar la acústica de teatros, auditorios y salas de concierto, tipologías muy distintas de los espacios de culto en general y de las catedrales.

B.1.1 Tiempo de reverberación (T_{30})

El tiempo de reverberación T se define como la duración, expresada en segundos, que tarda la energía acústica media en decrecer 60 dB una vez cesa la emisión de la fuente sonora. Si se utilizan valores de decrecimiento entre -5 dB hasta -35 dB, se anota como T_{30} . Este parámetro está más relacionado con las propiedades físicas del espacio evaluado.

La expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística, y sin tener en cuenta la absorción producida por el aire, es la siguiente:

$$T(s) = 0.161 * V/A_t$$

donde V corresponde al volumen de la sala expresado en m^3 , y A_t a la absorción sonora total del recinto expresada en m^2 .

B.1.2 Tiempo de reverberación inicial (EDT)

Según Jordan (1981), el tiempo de reverberación inicial es la duración, en segundos, que tarda el nivel de presión sonora en disminuir 10 dB (entre 0 dB y -10 dB) para un decrecimiento de 60 dB desde su nivel inicial. Los valores de tiempos de caída inicial son parámetros que se encuentran más relacionados con la impresión subjetiva de la reverberación de una sala que con el tiempo de reverberación. En el caso hipotético de que existiera una perfecta difusión del sonido en la sala, obtenida gracias a una geometría regular del recinto y una distribución homogénea y uniforme de los materiales, los valores del tiempo de reverberación y del tiempo de caída inicial coincidirían. Esto resulta usual en teatros y salas de concierto, pero sin embargo es inusual en espacios eclesiales, especialmente en grandes volúmenes, debido a la menor existencia de las primeras reflexiones y a la mayor influencia de la posición relativa entre fuente y receptor.

B.1.3 Claridad (C_{80})

Según Cremer (1982), la claridad es una relación energética que compara la energía recibida durante los primeros 80 ms con la recibida en el resto del proceso de decaimiento del campo sonoro. Carrión Isbert (1998) lo define como el indicador del grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical. El C_{80} se expresa en escala logarítmica (dB) mediante la expresión:

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

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

B.1.4 Definición (D_{50})

Según Thiele (1953), es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo, las primeras reflexiones y la energía total recibida por el mismo). A diferencia de la claridad, la definición relaciona la energía temprana con la energía total de la señal. La expresión para la obtención de D_{50} es la siguiente:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

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

B.1.5 Tiempo central (T_s)

Según Kürer (1969), el tiempo central es indicativo de la "distancia" en milisegundos, desde el origen temporal $t=0$ hasta el "centro de gravedad" del área de la curva de decaimiento. La expresión para la obtención del T_s es la siguiente:

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

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

B.1.6 Fracción de energía lateral precoz (J_{LF})

Tal y como indica la normativa ISO 3382 (2010), la fracción de energía que llega lateralmente dentro de los 80 ms iniciales, se mide a partir de las respuestas impulsivas de un micrófono omnidireccional y de un micrófono bi-direccional de respuesta en ocho, mediante la siguiente expresión:

$$J_{LF} = \frac{\int_{0.05}^{0.08} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}$$

Siendo $p_L(t)$ la presión acústica instantánea impulsiva del espacio de medida con un micrófono bidireccional de respuesta en ocho, y $p(t)$ la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición.

B.1.7 Fuerza sonora (G)

Según indica la normativa ISO 3382 (2010), la fuerza sonora se mide utilizando una fuente omnidireccional calibrada, y es la relación del cociente logarítmico de la energía acústica de la respuesta impulsiva medida en un punto de la sala y la respuesta medida en campo libre a 10 m de la fuente sonora según se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$G = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt}$$

Siendo $p(t)$ la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición, y $p_{10}(t)$ la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida con un micrófono omnidireccional a una distancia de 10 metros en un campo libre.

B.1.8 Nivel sonoro lateral final (L_J)

La normativa ISO 3382 (2010) establece que el nivel relativo de la energía acústica lateral tardía, se mide utilizando una fuente sonora omnidireccional calibrada, a partir de la respuesta impulsiva obtenida en el espacio, por medio de un micrófono bidireccional de respuesta en ocho, mediante la expresión:

$$L_J = 10 \lg \frac{\int_{0.08}^{\infty} p_L^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p_{10}^2(t) dt}$$

Siendo $p_L(t)$ la presión acústica instantánea impulsiva del espacio de medida con un micrófono bidireccional de respuesta en ocho, y $p_{10}(t)$ la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida con un micrófono omnidireccional a una distancia de 10 metros en un campo libre.

B.2 Factores temporales y espaciales

De acuerdo a las investigaciones realizadas por Ando (1998), los parámetros acústicos han establecido vínculos con aspectos subjetivos de la audición humana. Se ha analizado la respuesta del cerebro a los sonidos percibidos mediante el desarrollo de métodos de análisis electro-neuro-fisiológico que condujeron a la definición de un modelo de la audición, desarrollado por el mismo Ando (1998), que se basa en la especialización de procesamiento de la información auditiva por cada hemisferio cerebral. En consecuencia, esta teoría utiliza señales recibidas por el oído izquierdo y derecho para diseñar entornos físicos, procesados a través de operaciones de auto-correlación y correlación cruzada. Es por ello toma en consideración factores temporales (asociados con el hemisferio izquierdo) y espaciales (asociados con el hemisferio derecho) basados en las actividades cerebrales. Esto hace que los parámetros subjetivos no sólo dependan de las características acústicas del recinto, sino también por las capacidades de procesamiento de sonido en el cerebro humano.

La calidad acústica es descrita por los cuatro parámetros ortogonales definidos por Ando:

- Temporales:
 - Retardo de la primera reflexión (Δt_1), definido como el tiempo físico entre el sonido directo que llega al oyente y la primera reflexión.
 - Tiempo de reverberación de la señal tras las primeras reflexiones (T_{sub}), el cual es calculado de acuerdo al procedimiento convencional cuando la energía acústica decrece 60 dB.
- Espaciales:
 - El nivel relativo de presión sonora (LL), el cual coincide con el SPL ponderado.
 - Índice de correlación cruzada interaural (IACC) que mide la similitud de las señales de sonido que llegan a los dos oídos.

B.2.1 Teoría de cálculo de los valores escala (S_i) de preferencia subjetiva

En esta sección se describe brevemente la obtención del valor escala de preferencia subjetiva (linear scale value, S_i). Para mayor detalle, se recomienda consultar la publicación del autor (Ando 1998).

Se ha comprobado por una serie de experimentos que los cuatro factores objetivos actúan de forma independiente al valor escala (S_i), de manera que se pueden añadir valores escala asociados a cada parámetro para obtener el valor total de la escala (Ando, 1983):

$$S = g(x_1) + g(x_2) + g(x_3) + g(x_4) = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$

donde S_i , $i = 1, 2, 3, 4$, es el valor escala obtenido en relación a cada parámetro objetivo. Los resultados del valor escala de la preferencia subjetiva obtenido a partir de las diferentes series de ensayo se calculan de acuerdo a la siguiente expresión:

$$S_i \approx -\alpha_i |X_i|_{\frac{3}{2}} \quad i = 1, 2, 3, 4$$

donde los valores de α_i son coeficientes de ponderación que se enumeran en la Tabla B2. Si α_i es cercano a cero, existirá una menor contribución del factor x .

Tabla C2. Parámetros objetivos y coeficientes para el cálculo del valor escala (Ando 1998)

i	χ^i ^a	α_i	
		$\chi^i > 0$	$\chi^i < 0$
1	$20 \log P - 20 \log [P]_p$ (dB) ^b	0.07	0.04
2	$\log (\Delta t_i / [\Delta t_i]_p)$	1.42	1.11
3	$\log (T_{sub} / [T_{sub}]_p)$	$0.45 + 0.75A$	$2.36 + 0.42A$
4	IACC	1.45	-

^a El factor χ_i está dado por la diferencia de nivel de presión acústica, medida de forma ponderada

^b P and $[P]_p$ being the sound pressure at a specific seat, and the most preferred sound pressure that may be assumed at a particular seat position in the room under investigation

Por lo tanto, los valores de la escala de preferencia se han formulado aproximadamente en términos de la potencia 3/2 de los parámetros objetivos normalizados, expresados en el logaritmo de los parámetros, x_1 , x_2 , y x_3 . El parámetro x_4 binaural espacial se expresa en términos de la potencia 3/2 de sus valores reales, lo que indica una contribución mayor que las de los parámetros temporales. Puesto que los experimentos se llevaron a cabo para encontrar las condiciones óptimas, esta teoría es válida sólo en los intervalos de las condiciones preferidas probados para los cuatro factores.

ANEJO C

RELEVANCIA CIENTÍFICA DE LAS REVISTAS INDEXADAS

Table C1. Scientific relevance of indexed Journals

ISSN	Full Journal Title	Subject Category	IF *	J. Rank *
1940-1493	Journal of Building Performance Simulation	Construction & Building Technology	1,623	Q1 (12/59)
1296-2074	Journal of Cultural Heritage	Material Science	1,568	Q3 (130/260)
1610-1928	Acta Acustica United with Acustica	Acoustics	0.679	Q3 (19/29)

* datos correspondientes al año de publicación.

RELEVANCIA CIENTÍFICA DE LOS CONGRESOS

Table C2. Scientific relevance of conferences

Title	Category	Publication in database
Forum Acusticum	International	Scopus
International Congress on Sound and Vibration	International	Scopus
Tecniacustica	National-Iberoamerican	-

