

Investigación acústica y recuperación del patrimonio arquitectónico de las catedrales andaluzas

T. Zamarreño

J.J. Sendra

S. Girón

M. Galindo

R. Suárez

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC). Universidad de Sevilla.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha puesto de manifiesto la creciente importancia del patrimonio cultural, dentro de una gestión integral del mismo, reflejada en los programas de recuperación que pretenden mantener, utilizar y conservar el legado histórico, y en concreto con la puesta en valor de iglesias y otros espacios de culto. Probablemente nuestras catedrales constituyen la herencia patrimonial más importante a nivel nacional, como demuestra la existencia del Plan Nacional de Catedrales del Ministerio de Cultura. Si atendemos al concepto originario de iglesia como un lugar de reunión de fieles dispuestos a escuchar la palabra de Dios pronunciada por el celebrante, las condiciones acústicas en su interior debieron ser primordiales para cumplir esta función principal como observan Sendra *et al.* (1999) [14]. No obstante, a lo largo de la historia de la arquitectura eclesial, éstas han quedado relegadas a un papel secundario, cuando no ignoradas, frente a criterios artísticos o arquitectónicos-formales, Sendra *et al.* (1997). Hay que tener en cuenta, además, que hasta que empiezan a surgir los auditorios, en el mundo occidental las iglesias ocupan el lugar más destacado, entre los diferentes modelos de edificios, como lugar que ve nacer y acoge, temporalmente, a la música, según Navarro *et al.* (2009). Durante muchos siglos, la producción musical de Occidente fue concebida para ser interpretada y oída en las iglesias. Merece, al respecto, especial mención la adaptación de

una iglesia gótico-tardía al rito luterano: la *Thomaskirche*, en Leipzig, de la que fue maestro de capilla J. S. Bach y donde tenían lugar tanto misas en latín como cantatas germánicas. Para esta iglesia, Bach compuso gran parte de su obra coral y dos de sus obras maestras religiosas: *La Pasión según San Mateo* y *Misa en si Menor*, Bagenal y Bursar (1930), y Keibs y Kuhl (1959).

Esta aparente despreocupación por las condiciones acústicas de los espacios de culto ha cambiado drásticamente en las últimas décadas. La profundización en el conocimiento de nuestro patrimonio arquitectónico ha dado lugar a una profusa labor en lo que se refiere al estudio y conocimiento de la acústica de espacios existentes, a veces rehabilitados o reutilizados con fines culturales. Las administraciones públicas, en el marco de los programas de conservación y recuperación del patrimonio, han acometido en múltiples ocasiones proyectos de rehabilitación de espacios eclesiales con nuevos usos, o compartidos con el uso religioso.

En este contexto, en la pasada convocatoria de 2010, se ha propuesto al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación de un proyecto I+D, con un claro carácter interdisciplinar, titulado “La acústica de las catedrales: una aportación científica para la recuperación del patrimonio cultural”, finalmente concedida (ref. BIA2010/20523), a realizar en el trienio 2011-2013.

Sobre la base de un equipo de investigación del Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla, consolidado en acústica de salas y especializado en la acústica de lugares de culto, compuesto por físicos y arquitectos de los grupos TEP-132 y TEP-130 del Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI), se han incorporado también dos investigadores del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE), dependiente del Ministerio de Cultura: el arquitecto responsable del Plan Nacional de Catedrales y la antropóloga responsable del Plan Nacional del Patrimonio Inmaterial, así como una especialista en organería catedralicia.

Se pretende caracterizar el comportamiento acústico de las principales catedrales andaluzas (Cádiz, Córdoba, Granada, Jaén, Málaga y Sevilla) mostradas en la Figura 1, lo que implica describir su campo acústico mediante la distribución espacio-temporal de la

energía sonora, obtenida a partir del registro tridimensional de las respuestas al impulso (RI) en su interior. A partir de estos registros experimentales se estudiará la implementación de un modelo analítico capaz de describir ese campo acústico. En todos los casos se generará una ficha completa con los principales parámetros acústicos descriptores de cada catedral. Así mismo se levantarán modelos informáticos 3D para simular este campo sonoro.



FIGURA 1: Fuentes: Cádiz (firmada por José Guerrero) <http://elyuyu.wordpress.com/2006/08/22/7/>, Córdoba (firmada por Liliana Pena) <http://picasaweb.google.com/pena.liliana2010/NoTodoEsTrabajoFindeEnCordoba#>, Granada (bajo licencia Creative Commons) http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Granada_cathedral_-_capilla_mayor.jpg, Jaén (firmada por J. Almagro) <http://www.ojodigital.com/foro/urbanas-arquitectura-interiores-y-escultura/150787-catedral-de-jaen-interior.html>, Málaga <http://objetivomalaga.diariosur.es/fotos-FOTOMOLA/panoramica-interior-catedral-malaga.-538587.html>, Sevilla http://es.123rf.com/photo_7211104_interior-de-la-catedral-de-sevilla-andaluc-a-esp-a.html; Nota pie de figura: Vista interior de las seis catedrales.

Este trabajo de investigación supondrá, pues, una nueva aportación a la riqueza patrimonial del recinto, al incorporar al mismo una original forma de identificación a partir de la visión espacio-funcional: la valoración acústica, frente a la óptica tradicional estilístico-formal de estos espacios, lo que supondrá una contribución al conocimiento y difusión de su patrimonio inmaterial. No se ha producido un estudio similar hasta la fecha en España ni, con un alcance parecido, en la Unión Europea.

Para entender el comportamiento acústico de cada una de las catedrales estudiadas, resultará del máximo interés llevar a cabo una investigación de carácter histórico sobre la aparición y evolución de los elementos arquitectónicos que han ido condicionando la acústica del recinto (coro, púlpitos, órganos,...), Figura 2, y de los diferentes eventos y montajes efímeros que se han venido desarrollando en su interior (Figura 3), con diferentes exigencias acústicas (palabra, música), a lo largo de su historia: coronaciones, bodas, defunciones, sínodos, magnos conciertos, etc.



FIGURA 2: Fuentes: Órgano (bajo licencia Creative Commons) http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Catedral_de_Sevilla_Espa%C3%B1a_2.JPG, púlpito, <http://huidadelmundanalruido.zoomblog.com/archivo/2010/07/25/la-Catedral-De-Granada-.html>, coro, <http://guiamlg.com/la-catedral-de-malaga/>; Nota pie de figura: Órgano de la catedral de Sevilla, púlpito de la catedral de Granada y coro de la catedral de Málaga.



FIGURA 3: Fuente: <http://liturgia.mforos.com/1699073/8030237-altar-de-octavas-catedral-de-sevilla/>; Nota pie de figura: Montaje efímero para el Corpus en la catedral de Sevilla (1833).

FIGURA 4: Fuente: Centro de Iniciativas Culturales de la Universidad de Sevilla (CICUS); Nota pie de figura: Concierto de la Orquesta Barroca de Sevilla en la Iglesia de la Anunciación de la Universidad de Sevilla.

En el contexto del Patrimonio Inmaterial, el proyecto se relaciona con una de la acciones culturales y de investigación desarrolladas

por el Proyecto Atalaya, que está siendo llevado a cabo por la Orquesta Barroca de Sevilla (Figura 4), con un ambicioso plan de recuperación del patrimonio musical en Andalucía, asociado a sus catedrales, proyecto en el que intervienen las universidades públicas de Andalucía y que está financiado por la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía. De hecho, la Orquesta Barroca de Sevilla, así como los cabildos de las catedrales implicadas, la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía y el Ministerio de Cultura son las Entidades Promotoras y Observadoras del proyecto (EPOs).

2. OBJETIVOS Y MÉTODO

Los objetivos del proyecto de investigación se han formulado en los siguientes términos:

- Caracterizar el comportamiento acústico de las catedrales mediante la adquisición *in situ* de las respuestas al impulso (RI).
- Generar fichas con los descriptores del campo acústico obtenidos a partir de las RI.
- Verificar y/o adaptar el modelo teórico analítico elaborado por nuestro grupo de investigación (modelo μ), generado a partir de los estudios realizados en iglesias de un determinado tipo: las iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla.
- Construir modelos informáticos 3D para simular el comportamiento acústico en el interior de las catedrales.
- Establecer la evolución histórica y espacial de elementos determinantes de la acústica (púlpito, coro, órgano,...). Analizar la relación de esa evolución, y del modo de su ocupación, con la acústica mediante la ayuda de los modelos 3D.
- Realizar grabaciones binaurales *in situ* para producir una valoración acústica subjetiva de los recintos en condiciones de laboratorio, con el fin de conocer la percepción acústica y el estado de confort acústico que de estos espacios tendrían sus ocupantes.
- Recuperar el patrimonio funcional (coronaciones, bodas, defunciones, sínodos, magnos conciertos) de las catedrales y analizarlo con la necesaria perspectiva acústica con la ayuda de los modelos 3D.

- Recrear la acústica de épocas pasadas mediante procedimientos de auralización, utilizando técnicas informáticas.
- Ampliar el concepto y atributos del carácter patrimonial de las catedrales andaluzas, incorporando los aspectos acústicos como contribución a su patrimonio inmaterial.
- Sugerir modos de intervención acústica, permanentes o efímeros, considerados como pautas, relaciones y formas de intervención, compatibles y respetuosas con el valor patrimonial de los edificios.

La metodología y el plan de trabajo para alcanzar estos objetivos supone la realización de las siguientes tareas fundamentales, convenientemente programadas en el tiempo:

1. Caracterizar el campo acústico de cada recinto a partir de las medidas registradas *in situ*. Los procedimientos de las medidas experimentales se realizarán en general de acuerdo a las propuestas establecidas en la norma AENOR UNE-EN-ISO 3382-1 (2010) para salas de espectáculos, pero, dada la singularidad y complejidad espacial y acústica de estos recintos, que no pueden ser considerados como salas de espectáculos, y con el fin adicional de que puedan llevarse a cabo comparaciones con otros edificios de culto, se han de adoptar determinadas decisiones no estandarizadas, formuladas por Martellotta *et al.* (2008), como fijar las posiciones de las fuentes (altar mayor, púlpito, órgano, coro, capillas laterales, etc.) o de los micrófonos (zonas de posible ubicación de la audiencia o de los fieles). Todo ello exige un minucioso análisis previo a la realización de las medidas *in situ*, con objeto de optimizar el limitado tiempo disponible para realizarlas, dado el alto grado de ocupación y uso de estos emblemáticos espacios. Ha sido, por tanto, necesaria la adquisición y puesta a punto de un sistema de medida para registros tridimensionales de las RI que utiliza la tecnología B-format.
2. Recopilar la información histórica de las catedrales, con el fin de documentar el proceso de construcción, transformación y ocupación de los espacios, así como la aparición de elementos significativos desde un punto de vista acústico: púlpitos, coros y órganos, principalmente (Figura 2). También se recogerá información histórica sobre las decoraciones usuales de

estos templos, así como los principales montajes efímeros con motivos de grandes celebraciones, festivas (bodas, coronaciones, exaltaciones) o funerarias que haya tenido lugar en la catedral, dada la repercusión que estas decoraciones o montajes pueden tener en su acústica.

3. A partir de la información histórica, gráfica y tectónica de cada catedral, se realizará su análisis arquitectónico, teniendo en cuenta sus condiciones históricas, tipológicas, constructivas y compositivas, con el fin de adquirir un adecuado conocimiento de las relaciones entre espacio, forma y función. Esta información será de utilidad para la elaboración de los distintos modelos 3D que servirán de base para las simulaciones acústicas que se efectuarán con la ayuda de un software de contrastada validez científica (CATT-Acoustic).
4. Procesado y análisis en laboratorio de las RI registradas *in situ* para obtener los parámetros acústicos de cada una de las catedrales. Dichos parámetros serán los propuestos en la citada norma UNE-EN-ISO 3382-1. Tras la obtención de los resultados experimentales, se procederá a un pormenorizado análisis tanto espectral (en función de la frecuencia) como espacial (fundamentalmente en función de la distancia fuente-receptor).
5. Calibración de los modelos de simulación acústica a partir de las mediciones realizadas *in situ*. Validación o modificación del modelo energético (modelo μ).
6. Propuestas o sugerencias de intervención que mejoren la acústica de las catedrales, bien de carácter permanente, aunque siempre compatibles con el valor patrimonial del edificio, bien de carácter efímero ante determinadas celebraciones, principalmente conciertos u otros eventos musicales.
7. Realización de auralizaciones virtuales y de modelos de realidad aumentada de determinados eventos musicales que puedan ser celebrados en las catedrales en su estado actual o mediante la adición de elementos efímeros, tanto a partir de las RI medidas como de las simuladas.
8. Realización de auralizaciones virtuales y de modelos construidos con ayuda de técnicas de realidad aumentada de determinados eventos musicales, o de otra índole, celebrados en las catedrales en determinadas épocas pasadas (recreación del ambiente sonoro).

3. RESULTADOS

Los resultados del proyecto están por alcanzar tras su realización, ya que estamos al inicio del mismo. No obstante por parte de miembros del grupo de investigación se han realizado ya estudios previos de la acústica de tres de las seis catedrales que forman parte de la muestra: las catedrales de Sevilla, Córdoba y Málaga.

La acústica de la catedral de Sevilla fue parcialmente estudiada por miembros del grupo de investigación, Zamarreño y Algaba (1992), con la labor de consultoría acústica que se realizó por encargo del Cabildo Metropolitano para la celebración de la *Magna Hispalensis*, uno de los grandes acontecimientos culturales que se programaron con ocasión de la Exposición Universal, celebrada en Sevilla en 1992, y para el XLV Congreso Eucarístico Internacional que tuvo lugar en esa catedral en 1993. La Figura 5 muestra los valores del tiempo de reverberación medidos entonces y la Tabla 1 los resultados del índice RASTI para evaluar la inteligibilidad y la calificación de la misma.

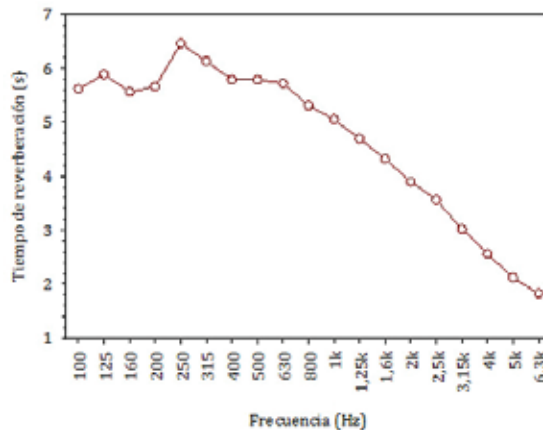


FIGURA 5: Fuente: elaboración propia; Nota pie de figura: Tiempo de reverberación de la catedral de Sevilla medido en bandas de 1/3 de octava.

Distancia (m)	8 m				14 m							19 m	
Receptor	1	2	3	4	6	6	7	8	9	10	11	12	13
RASTI	0,72	0,66	0,65	0,64	0,51	0,51	0,50	0,49	0,49	0,49	0,46	0,42	0,38
Calificación	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	P	P

M: mala (0-0,3); P: pobre (0,3-0,45); A: aceptable (0,45-0,60); B: buena (0,60-0,75); E: excelente (0,75-1,0)

Tabla 1.- Inteligibilidad valorada mediante el índice RASTI en la catedral de Sevilla.

La acústica de la Catedral de Córdoba fue objeto de la tesis doctoral de un miembro del grupo, R. Suárez, que estudió las singulares conductas acústicas que se producen en un espacio catedralicio de gran volumen que a su vez está insertado en un volumen mucho mayor: el espacio horizontal de la mezquita musulmana, Suárez *et al.* (2005). Estos dos modelos tipológicos, claramente definidos, generan una nueva unidad arquitectónica dotada de una acústica propia y diferenciada, Suárez *et al.* (2004). En la Figura 6 se muestra el tiempo de reverberación medido, promediado espacialmente, para tres de los subespacios significativos del recinto. A partir de este conocimiento, se emplea el proyecto arquitectónico como procedimiento acústico capaz de formular propuestas de intervención en la catedral para adaptarla a las necesidades tanto litúrgicas como culturales.

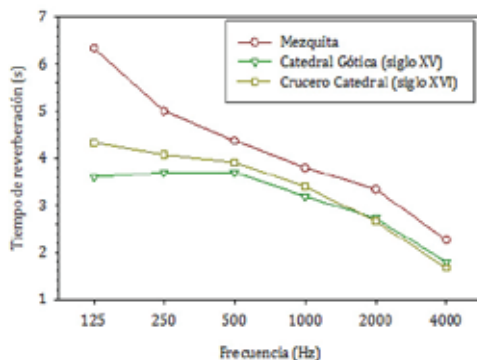


FIGURA 6: Fuente: elaboración propia; Nota pie de figura: Valores del tiempo de reverberación de la mezquita-catedral de Córdoba.

La acústica de la catedral de Málaga ha sido objeto de un estudio reciente por parte de otro miembro de nuestro grupo, L. Álvarez,

presentado como Trabajo Fin de Máster del Máster Interuniversitario de Ingeniería Acústica (Universidades de Granada, Cádiz y Huelva), coordinado por la Universidad de Cádiz, bajo la dirección del investigador principal de este proyecto. Este estudio incluye una primera valoración de la acústica de esta catedral basada en medidas experimentales (en la Figura 7 se muestra la respuesta al impulso para un punto situado en el coro cuando la fuente se ubica en el presbiterio) y simulación informática (en la Figura 8 se muestra el modelo 3D generado para la simulación), siguiendo una metodología ya utilizada en otros trabajos del grupo, Galindo *et al.* (2009). Los resultados del trabajo de simulación se van a presentar en el Forum Acusticum 2011, Álvarez *et al.* (2011).

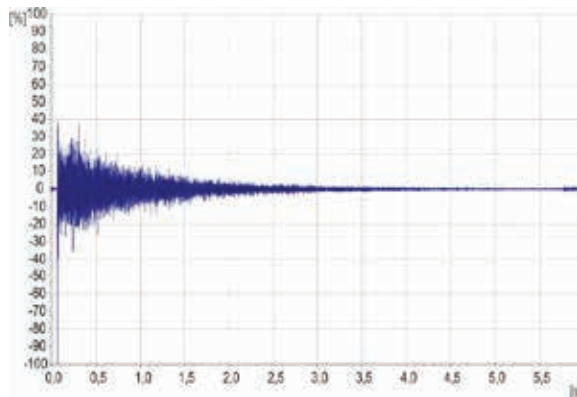


FIGURA 7: Fuente: elaboración propia; Nota pie de figura: Respuesta al impulso medida en la catedral de Málaga con la fuente en el presbiterio y el receptor en el coro.

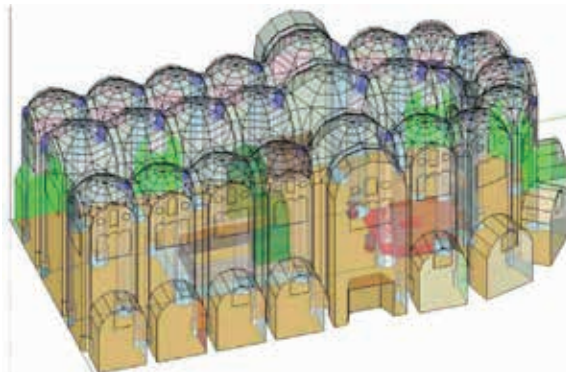


FIGURA 8: Fuente: elaboración propia; Nota pie de figura: Modelo 3D de la catedral de Málaga implementado para la simulación.

Además de estos estudios específicos sobre la acústica de tres de las catedrales, se han realizado en los últimos años otros trabajos cuyas conclusiones van a ser utilizadas para la ejecución de este proyecto de investigación. Para llevar a cabo las medidas experimentales, recientemente se ha realizado una puesta a punto, a partir de la metodología utilizada por el grupo, del equipo de medida para la adquisición de RI tridimensionales, Serrat *et al.* (2010), utilizando el formato B-format mediante un micrófono y procesador digital de la señal Soundfield.

Para analizar el comportamiento de la energía sonora en el interior de las catedrales, se pretende adaptar el modelo energético, al que denominaremos “modelo μ ”, Zamarreño *et al.* (2007), desarrollado a partir de la tesis doctoral de uno de los miembros del grupo de investigación, M. Galindo. Este modelo es alternativo al utilizado para teatros y salas de concierto, Barron y Lee (1988). Aunque ha surgido de una determinada tipología eclesial, las iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla, Sendra *et al.* (1999) [15] y Galindo *et al.* (2005), ha demostrado ser un modelo más versátil, aplicable a otras tipologías eclesiales, como ha puesto de manifiesto el propio grupo, Galindo *et al.* (2007), y más recientemente otro grupo de investigación italiano, Berardi *et al.* (2009), al aplicarlo a diferentes iglesias pertenecientes a diversos estilos arquitectónicos, volúmenes y acabados interiores.

Bajo la hipótesis de campo sonoro difuso, el modelo propone una expresión para la densidad de energía reflejada normalizada instantánea que depende de la distancia fuente-receptor y de un parámetro m , dependiente de la tipología, con una discontinuidad a los 80 ms de la llegada del sonido inicial (Figura 9). Es por tanto un modelo que tiene en cuenta el comportamiento de la “estructura fina” de la energía en los primeros 80 ms desde la llegada al receptor del sonido directo.

El valor de μ se obtiene, por regresión no lineal, a partir de los valores experimentales de la claridad (C_{80}), un parámetro acústico muy dependiente de la distancia emisor-receptor y que está relacionado con la sensación subjetiva de claridad con la que el oyente percibe la música. Este patrón de energía ha demostrado ser un predictor adecuado de la tendencia de los principales parámetros acústicos

de salas en función de la distancia fuente-receptor, Zamarreño *et al.* (2008) y Girón *et al.* (2008). Los resultados experimentales y teóricos han sido corroborados satisfactoriamente mediante simulaciones acústicas por ordenador, (Figura 10).

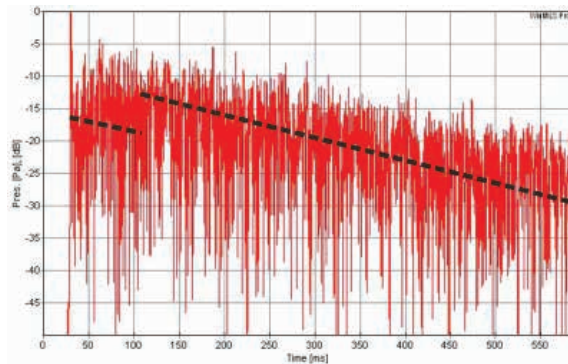


FIGURA 9: Fuente: elaboración propia; Nota pie de figura: Curva energía-tiempo en un receptor de la iglesia gótico-mudéjar de San Pedro (Sevilla) y comportamiento teórico del modelo μ (línea de trazos).

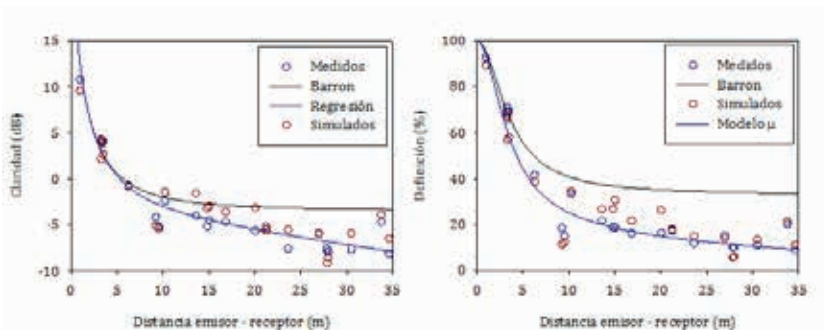


FIGURA 10: Fuente: elaboración propia; Nota pie de figura: Iglesia de Santa Marina: a la izquierda, regresión sobre los valores de la claridad (C_{90}) para obtener el parámetro μ y a la derecha valores previstos de la definición (D_{50}). Aparecen los valores medidos y los simulados por ordenador.

La comprobación de la posible existencia de espacios acoplados en estos recintos, acústicamente complejos, obligará a la implementación de métodos matemáticos avanzados para el análisis de las caídas múltiples en la extinción sonora y en las curvas de energía direccionales, Xiang y Jasa (2006). A partir de todos estos resultados, se pretende la creación de un modelo informático 3D de cada una de las catedrales que permita realizar

la simulación de su campo acústico, previa calibración del mismo a partir de las medidas *in situ* que se realicen en cada una de ellas.

La creación de este modelo permitirá analizar, de forma eficiente y rápida, el impacto que, desde un punto de vista acústico, pueden tener posibles intervenciones permanentes o efímeras en el recinto, antes de actuar físicamente en estos espacios con tan fuerte carácter patrimonial. Así mismo permitirá implementar auralizaciones (recreaciones acústicas de realidad virtual) tanto de situaciones actuales como pasadas o futuras, simplemente incorporando al modelo las modificaciones pertinentes. Ello, unido a otros modelos que se pretenden generar de realidad aumentada, contribuirá a la difusión del conocimiento del patrimonio inmaterial acústico de las catedrales andaluzas.

Como acabamos de decir, el proyecto de investigación va incluso más allá de la valoración acústica del estado actual de las catedrales o de posibles intervenciones futuras. La utilización de los modelos 3D informáticos permitirá obtener los datos necesarios para recrear mediante auralización la acústica de esas catedrales en épocas pretéritas, analizar la repercusión acústica de su evolución espacial, constructiva y decorativa a lo largo de su historia desde el momento que fueron construidas y, en definitiva, desvelar y recrear el sonido de su pasado, lo que sin duda completará los estudios realizados sobre su patrimonio inmaterial.

4. DIFUSIÓN Y EXPLOTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Se pretende poner los resultados del proyecto a disposición de los responsables de las catedrales incluidas en el estudio, de la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía y del Ministerio de Cultura, en general, y de los del Plan Nacional de Catedrales y del Plan Nacional del Patrimonio Inmaterial, en particular. Con ello esperamos realizar una aportación científica que contribuya a incrementar su riqueza patrimonial.

En la convocatoria de 2011 de incentivos a los Agentes del Sistema Andaluz del Conocimiento, el mismo equipo investigador ha solicitado un proyecto de investigación, complementario del

concedido por el Plan Nacional, pendiente de resolución, con dos fines principales: extender el estudio a dos catedrales andaluzas más, las de Almería y Guadix, y, sobre todo, aumentar la capacidad de transferencia de los resultados del proyecto al tejido social y empresarial. Para lograr esto último, se ha presentado como proyecto motriz, modalidad contemplada en la convocatoria, que exige que, de ser concedido, el 15% del total adjudicado al proyecto debe subcontratarse a una empresa privada. En este caso se ha buscado una empresa especializada en tecnologías de realidad aumentada y con experiencia previa de aplicación de estas técnicas en aspectos patrimoniales y su difusión en el ámbito de la industria turística. La empresa elegida ha sido una spin-off de la Universidad de Málaga: Arpa Solutions.

Mediante el desarrollo de una solución basada en su plataforma DARAM® de Realidad Aumentada, se pretende generar un catálogo virtual con modelos tridimensionales de algunas de las catedrales andaluzas. Acompañando a cada modelo, se reproducirá un “audio aumentado”, obtenido mediante técnicas de auralización por el equipo de investigación del proyecto, que rememore el patrimonio acústico de esas catedrales, en función de la época histórica simulada, la efemérides auralizada y sus características arquitectónicas.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo expone los objetivos y la metodología a utilizar en el desarrollo del proyecto de investigación del Plan Nacional I+D+i sobre la acústica de las catedrales, así como los primeros resultados alcanzados, al tiempo que destaca la importancia del mismo, que ya se ha iniciado y que se va a realizar en el trienio 2011-2013, para el conocimiento, recuperación y difusión del patrimonio cultural, principalmente asociado a las catedrales andaluzas.

Los resultados previos obtenidos por el grupo de investigación en tres de las seis catedrales y, principalmente, los estudios realizados sobre modelos energéticos acústicos en espacios eclesiales, avalados por la comunidad científica, son un buen punto de partida para lograr los fines principales del proyecto: caracterizar la

acústica de las catedrales en su estado actual, construir modelos informáticos que permitan la simulación y la valoración del impacto acústico de intervenciones arquitectónicas o decorativas, permanentes o efímeras, que se planteen en un futuro, e incluso recrear el sonido de las catedrales en épocas pasadas.

La utilización de las técnicas de auralización y de realidad aumentada, tanto para el pasado, el presente y el futuro de las catedrales, además de contribuir al enriquecimiento de su patrimonio inmaterial, ha de suponer, necesariamente, una mejor y mayor explotación de los resultados al transferirlos al tejido social y empresarial, aspectos que se consideran esenciales en este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a los cabildos de las catedrales andaluzas implicadas en el estudio, por su interés en colaborar para la realización del proyecto, así como a la Orquesta Barroca de Sevilla, a la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía y al Ministerio de Cultura por el interés mostrado en los resultados del mismo. Este trabajo está financiado con fondos FEDER y por el Ministerio de Ciencia e Innovación (referencia BIA2010-20523).

BIBLIOGRAFÍA

AENOR. *Acústica: Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: salas de espectáculos*. UNE-EN-ISO 3382-1:2010. Madrid: AENOR, 2010.

ÁLVAREZ, L.; ALONSO, A.; ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S.; GALINDO, M. "Virtual Acoustics of the Cathedral of Malaga (Spain)" Comunicación aceptada en el Forum Acusticum 2011, Aalborg, Dinamarca, Junio 2011.

BAGENAL, H.; BURSAR, G. "Bach's music and church acoustics". *J. Roy. Inst. Br. Architects*. 1930, p. 154-163.

BARRON, M.; LEE, L. J. "Energy relations in concert auditoriums I". *J. Acoust. Soc. Am.* 1988; vol 84, p. 618-628.

BERARDI, U.; CIRILLO, E.; MARTELOTTA, F. "A comparative analysis of acoustic energy models for churches". *J. Acoust. Soc. Am.* 2009, vol 126(4), p. 1838-1849.

GALINDO, M.; ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S. "Acoustic analysis in Mudejar-Gothic churches: Experimental results". *J. Acoust. Soc. Am.* 2005, vol 117, p. 2873-2888.

GALINDO, M.; ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S. "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches". *J. Acoust. Soc. Am.* 2009, vol 126, p. 1207-1218.

GALINDO, M.; ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S. "Predicted and measured acoustic parameters in churches". En *CD of International Symposium on Room Acoustics Satellite Symposium of the 19th International Congress on Acoustics*, (Seville, 10-12 September 2007).

GIRÓN, S.; GALINDO, M.; ZAMARREÑO, T. "Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches". *J. Sound. Vib.* 2008, vol 315, p. 1125-1142.

KEIBS, L.; KUHL, L. W. "Zur Akustik der Thomaskirche in Leipzig". *Acustica*. 1959, vol 9, p. 365-70.

MARTELOTTA, F.; CIRILLO, E.; CARBONARI, A.; RICCIARDI, P. "Guidelines for acoustical measurements in churches". *Appl. Acoust.* 2008, vol 70, p. 378-388.

NAVARRO, J.; SENDRA, J. J.; MUÑOZ, S. "The Western Latin church as a place for music and preaching: An acoustic assessment". *Appl. Acoust.* 2009, vol 70, p. 781-789.

SENDRA, J. J.; ZAMARREÑO, T.; NAVARRO, J.; ALGABA, J. *El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación*. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 1997.

SENDRA, J. J.; ZAMARREÑO, T.; NAVARRO, J. "Acoustics in churches". En: Sendra, J. J. (ed). *Computational Acoustics in Architecture*. Southampton: Witpress Ed., 1999, p. 133-177.

SENDRA, J. J.; ZAMARREÑO, T.; NAVARRO, J. *La acústica de las iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla*. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 1999.

SERRAT, J.; GALINDO, M.; ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S. "Medida de respuestas impulsivas para la caracterización espacial del campo sonoro en salas". En *CD de TecniAcústica 2010*, (León, 13-15 de Octubre de 2010). Nº especial de la Revista de Acústica, vol 41(3-4).

SUÁREZ, R.; SENDRA, J. J.; NAVARRO, J.; LEÓN, A. L. "The sound of the Cathedral-Mosque of Córdoba". *J. Cultural Heritage*. 2005,

vol 6(4), p. 307-312.

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*. 2004, vol 90(2), p. 362-375.

XIANG, N.; JASA, T. "Evaluation of decay times in coupled spaces: An efficient search algorithm within the Bayesian framework". *J. Acoust. Soc. Am.* 2006, vol 120, p. 3744-3749.

ZAMARREÑO, T.; ALGABA, J. "Parámetros acústicos medidos en la catedral de Sevilla". En *Libro de Actas TecniAcústica 1992*, (Pamplona 17-20 de noviembre de 1992). 1992, p. 117-120.

ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S.; GALINDO, M. "Acoustic energy relations in Mudéjar-Gothic churches". *J. Acoust. Soc. Am.* 2007, vol 121(1), p. 234-250.

ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S.; GALINDO, M. "Assessing the intelligibility of speech and singing in Mudéjar-Gothic churches". *Appl. Acoust.* 2008, vol 69, p. 242-254.