

ACÚSTICA VIRTUAL DE LA IGLESIA DE SAN LORENZO DE SEVILLA

PACS: 43.55.Ka

César Carmona¹; Teófilo Zamarreño²; Sara Girón²; Miguel Galindo²

¹dBA Previsiones y Certificaciones Acústicas S.L., C/ Charlie Rivel, 9; 18194 Churriana de la Vega, Granada, España, Tel: +34 902 198153, E-Mail: ccarmona@dba-acustica.com

²Universidad de Sevilla, Depto. Física Aplicada II ETS Arquitectura, IUACC, Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España. Tel. + 34 95 4556612 Fax: +34 95 4557892, E-Mail: teofilo@us.es; sgiron@us.es; mgalindo@us.es.

ABSTRACT

The church belongs to the Sevillian Mudejar-Gothic typology although several restorations carried out in the XVIII and XIX centuries have substantially altered its configuration. By means of CATT-Acoustic software, a prediction-simulation of the acoustic field has been undertaken in this worship place. The model has been calibrated using an iterative process to adjust simulated reverberation times that differ no more than 5% of those measured. The results of the simulated acoustic descriptors of acoustic quality, both to qualify the speech intelligibility and the musical perception, have been compared with the real experimental parameters in terms of their spectral behaviour and spatial distribution, in which experimental measures have been obtained by maximum-length-sequence signals (MLS). Finally, recreations have been achieved of the modifications of the sound field with the presence of the public and with a possible restoration which consists of changing the finishing of certain walls to improve their acoustic behaviour.

RESUMEN

El templo analizado pertenece al tipo Gótico-Mudéjar sevillano pero sucesivas reformas en los siglos XVIII y XIX han alterado sustancialmente su configuración. Mediante la herramienta informática CATT-Acoustic se ha realizado una simulación-predicción del campo sonoro de este espacio eclesial. El modelo se ha calibrado, usando un procedimiento iterativo, de modo que los tiempos de reverberación simulados no difieran de los medidos en más de un 5%. Los resultados de los parámetros descriptores de la calidad acústica, tanto para la inteligibilidad de la palabra como para la audición musical, se han contrastado, tanto en su comportamiento espectral como su distribución espacial, con los resultados experimentales obtenidos mediante la técnica de señales de secuencias de máxima longitud (MLS). Finalmente se han recreado las modificaciones del campo sonoro debido a la presencia de público y a una intervención de rehabilitación consistente en cambiar el acabado de ciertas paredes de la iglesia con objeto de mejorar su comportamiento acústico.

INTRODUCCIÓN

El estudio del campo sonoro de los lugares de culto, en todos sus tipos, países y creencias, ha suscitado recientemente gran interés dentro del campo general de la acústica arquitectónica¹⁻³.

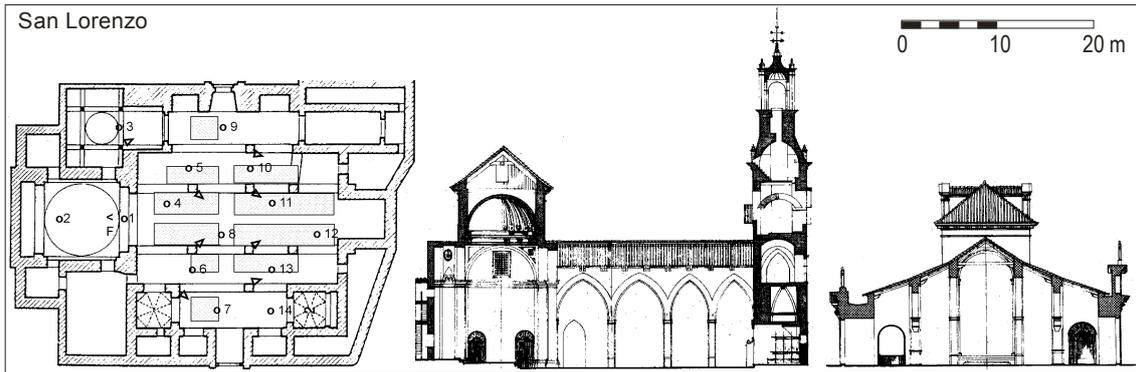


Figura 1. Planta con la ubicación de los receptores y la fuente F, y secciones longitudinal y transversal de la Iglesia de San Lorenzo.

Este interés surge, por un lado, desde una perspectiva práctica, conectada con la creciente demanda de confort acústico en lugares públicos donde se transmite un mensaje oral, musical litúrgico^{4,5} u otro tipo de manifestación cultural; pero también, por otro lado, el interés es fundamental, ya que la investigación en la acústica de estos complejos y heterogéneos espacios ayuda a la comprensión general de la acústica de salas^{6,7}. En muchos casos el estudio acústico de estos recintos, de gran valor cultural, supone un valor añadido a su carácter patrimonial⁸.

La iglesia de San Lorenzo⁹ está ubicada en Sevilla, en la plaza del mismo nombre, desde la cual tiene su acceso principal. El templo fue originalmente del tipo mudéjar sevillano, pero las reformas de los siglos XVIII y XIX alteraron sustancialmente el conjunto. A la obra primitiva corresponde la portada de cantería, oculta por la tribuna del órgano, y las ménsulas que reciben el vuelo de los arcos del último tramo de la nave central. La capilla mayor y las ubicadas a sus lados se proyectaron a principios del siglo XVII por Diego López Bueno, encargándose de su construcción, a partir de 1615, Andrés de Oviedo. El muro de los pies está concebido como una torre-fachada y aloja en el cuerpo inferior una portada de estructura ojival. Fue construida ya avanzado el siglo XV y rematada con un campanario barroco en 1757. La planta del templo tiene forma muy irregular (Figura 1) lo que prueba que no fue erigido en un programa constructivo único, sino que es el resultado de un largo proceso en el que a un núcleo básico se fueron añadiendo cuerpos y volúmenes hasta configurar su aspecto actual. Está formada por cinco naves, la central y las dos laterales adyacentes de cuatro tramos, y las dos laterales más alejadas de dos tramos. En total son ocho los pilares rectangulares que separan las naves. Los de la nave central apean arcos apuntados de desigual anchura. En las naves laterales los arcos son de medio punto, con luces también diferentes. A los pies de la nave central se aloja el coro con sillería de maderas nobles y encima el órgano. El presbiterio, en la cabecera de la nave central, se cubre con una bóveda semiesférica (Figuras 1 y 2).

Las cubiertas de las naves son de madera, con armadura de tres paños con tirantes en la nave central y de colgadizo en todas las laterales. Se ilumina fundamentalmente por vidrieras dispuestas en las dos puertas de acceso. Las paredes son de fábrica de ladrillo enfoscado y/o enlucida y, posteriormente, pintada. Están muy ornamentadas con pinturas, altares, tallas, hornacinas con retablos, coro, órgano, y presentan un zócalo de azulejos de 1.5 m incluso en la base de los pilares. La capilla mayor se encuentra recorrida por un zócalo de azulejo sevillano de 2 m y dos grandes cuadros a ambos lados del altar mayor. Además existen varias capillas laterales con una decoración profusa.



Figura 2. Vistas interiores de la iglesia: (a) hacia el presbiterio y (b) hacia el fondo con el órgano.

El suelo es de mármol en toda la iglesia y el mobiliario está constituido por bancos de madera ubicados en la nave central y algunos asientos en las laterales adyacentes a ella (Figuras 1 y 2).

TÉCNICA EXPERIMENTAL

La respuesta al impulso (RI) en la iglesia se ha obtenido mediante señales de Secuencias de Máxima Longitud (MLS), generadas y analizadas por el analizador MLSSA¹⁰, y emitidas al recinto por la fuente omnidireccional Brüel&Kjaer 4296, que se situó en el altar mayor (Figura 1) a 1.70 m del suelo. El micrófono

(omnidireccional B&K 4190 de ½ pulgada o multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5) se colocó a 1.20 m del suelo en las 14 posiciones mostradas en la Figura 1, distribuidas en la nave central y en las laterales. Los valores del parámetro RASTI se han obtenido en este trabajo usando el equipo B&K 3361, que usa la técnica de ruido estacionario modulado.

Se obtuvieron las RI monoaurales y otras respuestas a señales estacionarias para determinar los siguientes parámetros para las bandas de octava comprendidas entre 125-4000 Hz en todas las posiciones del receptor: tiempo de reverberación (T); fuerza acústica (G); tiempo central (T_s); claridad (C_{80}) y definición (D_{50}), como parámetros basados en la energía acústica relativos a la razón energía inicial-final o energía inicial-total, la fracción de energía lateral inicial (LF) con objeto de estudiar los fenómenos de impresión espacial en la iglesia y finalmente el índice $RASTI$, para evaluar la inteligibilidad de la palabra a partir de la degradación de la función de transferencia de modulación.

Para realizar la simulación acústica se ha hecho uso de la herramienta de simulación de acústica de salas Catt-Acoustic¹¹. En la Figura 3 se muestra la planta, las secciones, y el modelo 3D creado de la iglesia, tras suprimir salas anexas y sacristía.

SIMULACIÓN ACÚSTICA

Una vez implementada la geometría básica del recinto se han realizado las modificaciones pertinentes para llevar a cabo tres simulaciones diferentes: en primer lugar se simuló las condiciones en las que se realizaron las mediciones in situ (iglesia vacía). Así se ha podido calibrar el modelo ajustando los valores medidos y simulados del tiempo de reverberación de tal forma que no difieran en más de un 5%. Este proceso de ajuste se consigue adecuando los coeficientes de absorción y dispersión

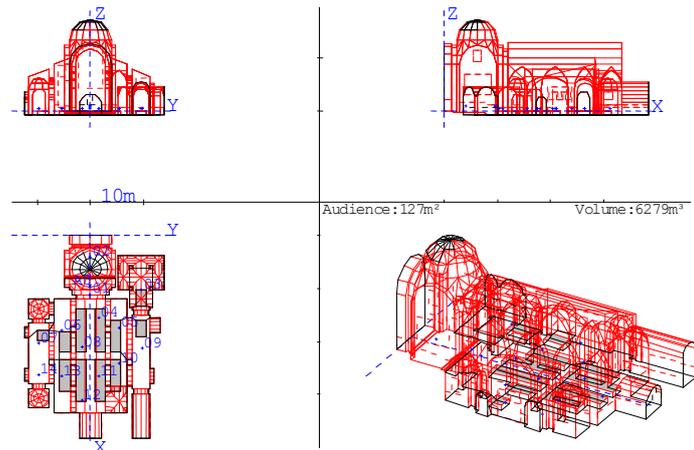


Figura 3. Modelo informático generado para simular el campo acústico en la iglesia mediante el programa Catt Acoustic: secciones transversal y longitudinal, planta y perspectiva 3D.

Tabla 1. Coeficientes de absorción (fila superior) y de dispersión (fila inferior) por bandas de octava utilizados en la simulación.

Superficie	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Zócalo de azulejos	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Paredes lisas	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.10
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20
Mármol	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Cubierta de madera	0.29	0.29	0.24	0.21	0.20	0.21
	0.50	0.60	0.70	0.70	0.80	0.80
Bancos de madera	0.17	0.18	0.19	0.18	0.17	0.16
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Pared adornada	0.18	0.16	0.18	0.18	0.18	0.20
	0.20	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65
Coro de madera	0.17	0.18	0.19	0.18	0.17	0.16
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Vidrio	0.13	0.12	0.08	0.07	0.06	0.04
	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Puerta de madera	0.3	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Órgano	0.12	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16
	0.20	0.30	0.30	0.40	0.50	0.60
Terciopelo	0.10	0.14	0.15	0.18	0.30	0.38
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20
Lienzo	0.15	0.15	0.18	0.21	0.27	0.35
	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Bancos ocupados	0.27	0.37	0.42	0.45	0.48	0.38
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Trasdoso acústico	0.62	0.6	0.72	0.74	0.58	0.53
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20

de los materiales que son más desconocidos en la literatura (los conocidos se exponen en la Tabla 1) y para los cuales no es fácil obtener valores experimentales pero que, por otra parte, resultan primordiales en la descripción de sus parámetros desde el punto de vista acústico, como por ejemplo las paredes verticales perimetrales de las naves de la iglesia. En la segunda simulación se incorpora la presencia del público en la zona de bancos de la iglesia, simulando las condiciones normales para los actos litúrgicos en las condiciones actuales. Finalmente, se implementa y analiza la incidencia de una posible rehabilitación acústica que consiste en un tratamiento absorbente de parte de los cerramientos, con la condición de que éste sea formalmente respetuoso con el espacio eclesial.

El programa nos permite ver la importancia de cada uno de los planos en las simulaciones, observando el porcentaje de impactos sobre cada una de las superficies. Los resultados muestran que las contribuciones más significativas en esta iglesia se corresponden al suelo, techo, paredes laterales y pared del fondo.

Para simular la segunda propuesta se cambió el coeficiente de absorción de los bancos de madera a los valores que se exhiben al final de Tabla 1.

Puesto que, incluso con la iglesia ocupada, los valores de los parámetros acústicos están lejos de los valores deseables, parece necesario abordar algún tipo de rehabilitación acústica para mejorar el acondicionamiento de este recinto de culto. El principal y primer problema a resolver lo constituyen los altos valores del tiempo de reverberación existente, como se discutirá en la siguiente sección (ver Figura 6 (a)). Para atajar este problema se propone una mejora consistente en un tratamiento superficial mediante un recubrimiento de placa de yeso perforada, trasdosada con una manta de lana mineral, y terminada con enlucido microporoso sobre velo acústico de lana de vidrio, soportada por una estructura de perfiles anclados a la pared. En la Figura 4 se muestran fotos de una muestra del material, siendo su apariencia final muy similar a las terminaciones enlucidas. Las superficies a tratar mediante este material en la iglesia se muestran en color verde en la Figura 5 y sus coeficientes de absorción y dispersión para la recreación virtual aparecen reflejados al final de la Tabla 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el conjunto de Figuras 6 (a)-(f) se muestra el comportamiento espectral por bandas de octava de los parámetros acústicos, tiempo de reverberación, fuerza acústica, definición, claridad, tiempo central y fracción de energía lateral inicial, respectivamente, medidos¹² y simulados en los diferentes supuestos. Así mismo se han dibujado barras de error que dan cuenta de la dispersión espacial sobre los diferentes receptores mediante el error estándar. Para valorar la dispersión espacial, no se ha considerado el receptor 1 (demasiado cerca de la fuente) ni el 3 (no llega sonido directo). En la Figura 6 (a) se detallan, además de los resultados medidos y



Figura. 4. Panel de yeso laminado perforado propuesto para la rehabilitación (Knauf STO).

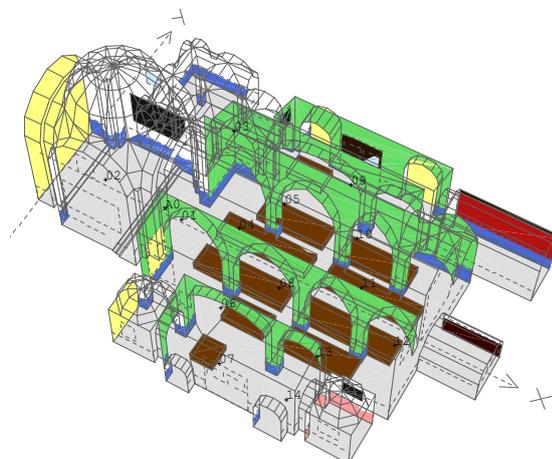


Figura. 5. Modelo de mejora con trasdosado acústico (superficies indicadas en color verde).

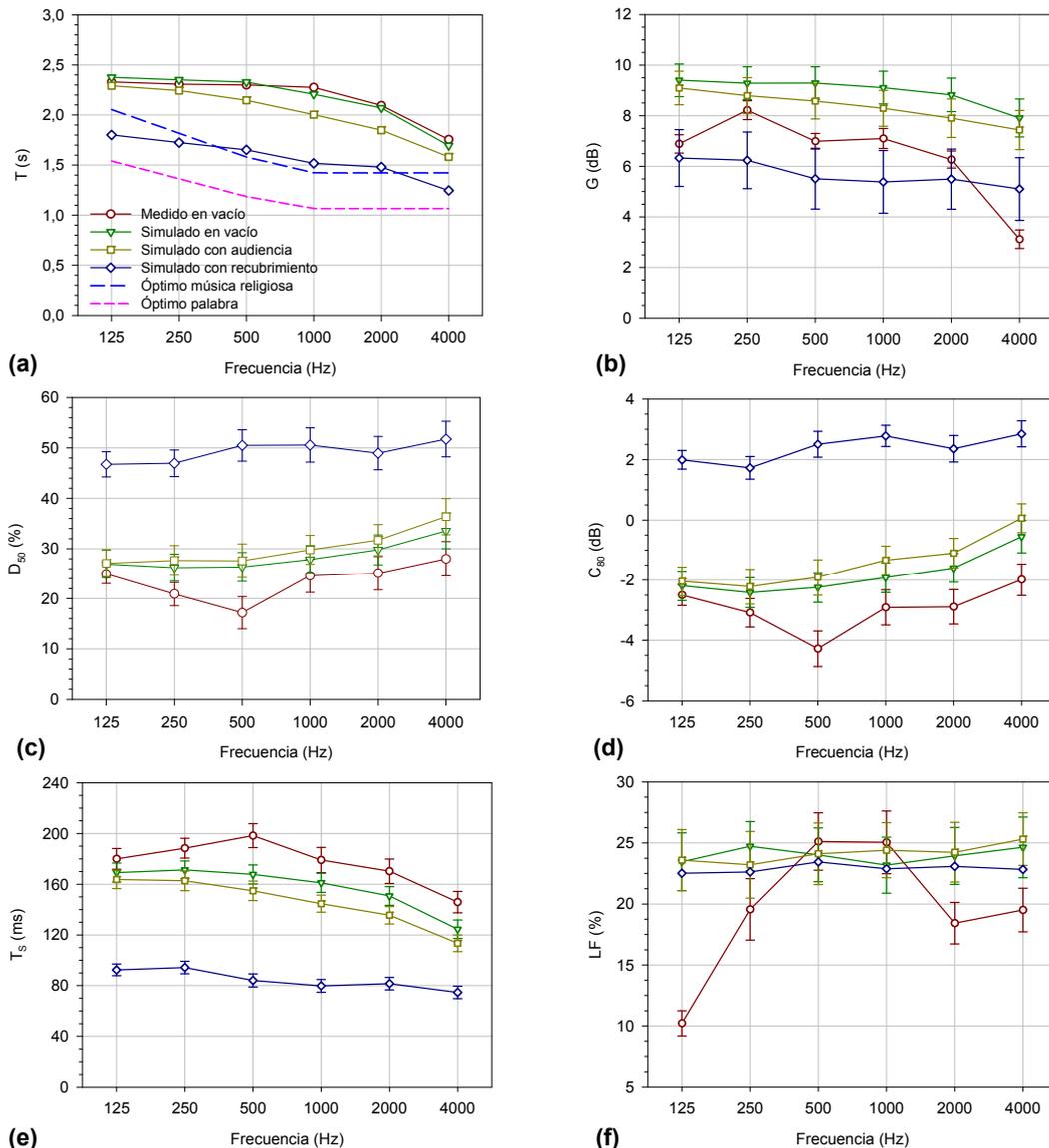


Figura 6. Valores de los parámetros acústicos medidos y simulados, frente a la frecuencia, en bandas de octava: (a) tiempos de reverberación; (b) fuerza acústica; (c) definición; (d) claridad musical; (e) tiempo central y (f) fracción de energía lateral.

simulados, los valores óptimos del tiempo de reverberación para la palabra y la música eclesial aportados por Knudsen *et al*¹³, donde cabe destacar la excelente concordancia entre los valores experimentales medidos in situ en la iglesia vacía de público y la simulación equivalente que ha servido para la calibración del modelo informático, indicando que éstos difieren en menos del 5% fijado de tolerancia. Se observa un ligero descenso de la curva tonal a todas las frecuencias en la simulación con la presencia de público, y el notable descenso con la incorporación del trasdosado en las paredes verticales señaladas. Con esta intervención el tiempo de reverberación se aproxima a la banda óptima, más aún si incorporamos la presencia de público cuando se realice el tratamiento.

Para la fuerza acústica aparecen ligeras discrepancias entre los resultados experimentales y los simulados, para las distintas frecuencias, en las mismas condiciones (iglesia vacía), con diferencias en promedio de unos 2 dB. La incorporación de público no supone un cambio sustancial con respecto a la simulación real y solo el tratamiento absorbente de las paredes verticales tiene una influencia significativa en la disminución de la energía inicial y final reflejada en la iglesia. Como norma general común en los parámetros energéticos (definición, claridad y tiempo central) cabe señalar que existe una buena aproximación entre los valores medidos in situ y simulados sin público, también que existe muy poca diferencia en los resultados de la

simulación con público y sin público en la iglesia y que el tratamiento de las paredes propuestas supone un incremento de un 20% en la definición, en la claridad de unos 4 dB, y una disminución del tiempo central de unos 80 ms, por término medio, en todas las frecuencias. En cuanto a la fracción de energía lateral inicial cabe destacar que presenta un comportamiento similar en todos los casos simulados, mostrando éstos solo una variación notable con los valores medidos a 125 Hz.

Finalmente en la Figura 7 se representan los valores del índice RASTI en todos los puntos de recepción en la iglesia;

la concordancia entre los resultados medidos y simulados son excelentes lo que corrobora la bondad del software y del procedimiento implementado. Es de destacar cómo la incorporación del trasdosado en las paredes verticales supone un salto en la calificación de la iglesia de pobre al límite superior de la zona aceptable en todos sus puntos.

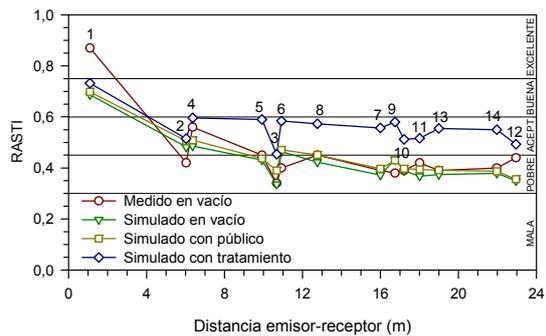


Figura. 7. Índice RASTI frente a la distancia emisor-receptor, medido y simulado en los diferentes supuestos.

CONCLUSIONES

Se ha creado un modelo computacional 3D geométrico y acústico de la iglesia de San Lorenzo en Sevilla. Este modelo se ha calibrado utilizando un procedimiento iterativo en el que se ajustan los coeficientes de absorción de las paredes perimetrales verticales de la iglesia, de tal forma que los tiempos de reverberación simulados en las condiciones reales de la misma no difieran de los medidos in situ en más de un 5%. La comparación de los resultados simulados con los medidos da garantías e idoneidad del software y del procedimiento implementado para poder aceptar los resultados de la recreaciones estudiadas: incorporar público en la zona de bancos y la intervención con tratamiento absorbente de ciertas paredes de la iglesia, que siendo respetuoso con las formas y el acabado original de la misma, mejora sustancialmente sus condiciones acústicas, como evidencian los resultados virtuales de los parámetros descriptores de calidad acústica obtenidos.

REFERENCIAS

- ¹ R. Fearn, "Reverberation in Spanish, English, and French churches," *J. Sound Vib.* **43**, 562-567 (1975).
- ² T. H. Lewers, J. S. Anderson, "Some acoustical properties of St. Paul's Cathedral, London," *J. Sound Vib.* **92**, 285-297 (1984).
- ³ A. A. Adel, "Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia," *J. Acoust. Soc. Am.* **113**, 1505-1517 (2003).
- ⁴ 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).
- ⁵ A. P. O Carvalho, "Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches," *Appl. Acoust.*, **58**, 33-49 (1999).
- ⁶ E. Cirillo, F. Martellota, "An improved model to predict energy-based acoustic parameters in Apulian-Romanesque churches," *Appl. Acoust.*, **64**, 1-23 (2002).
- ⁷ T. Zamarreño, S. Girón, M. Galindo, "Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches," *J. Acoust. Soc. Am.* **121**(1), 234-250 (2007).
- ⁸ Z. Karabiber, "A new approach to an ancient subject: CAHRISMA project," on CD-ROM: Garmisch-Partenkirchen, July 4-7, Seventh International Congress on Sound and Vibration, Germany (2000).
- ⁹ A. J. Morales, *La iglesia de San Lorenzo de Sevilla*. Sever-Cuesta, Sevilla, (1981).
- ¹⁰ MLSSA reference manual v. 10W. *Maximum-Length-Sequence System Analyzer*. DRA laboratories, 1987-1998.
- ¹¹ CATT-Acoustic v8h, user's manual. *Room acoustics prediction and walkthrough auralization*. CATT, Gothenburg, (Sweden), 2008.
- ¹² M. Galindo, *La acústica en espacios religiosos católicos: iglesias Gótico-Mudéjares*. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, (2003).
- ¹³ V. O. Knudsen, C. M. Harris, *Acoustical Design in Architecture*. 5th Ed. Acoustical Society of America, New York, (1988).