

ACÚSTICA DE LA CRIPTA DE LA CATEDRAL DE CÁDIZ

A. Colomo-Gragera¹, D. Espinosa-Corbellini¹, T. Zamarreño-García², S. Girón-Borrero²

¹Universidad de Cádiz, Depto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Tecnología Electrónica y Electrónica, CASEM, Campus de Puerto Real, 11510 Puerto Real, Cádiz, España, Tel.+34 956 016123, Fax: +34 956 016126

²Universidad de Sevilla, Depto. de Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC, Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España. Tel. + 34 95 4556612, Fax: +34 95 4557892

{e-mails: acgragera@gmail.com, daniel.espinosa@uca.es, teofilo@us.es, sgiron@us.es}

Resumen

La cripta de la Catedral de Cádiz, es un espacio arquitectónico singular situado bajo su altar mayor y por debajo del nivel del mar. Su emplazamiento, formas, y la piedra de sus acabados la dotan de una acústica peculiar y compleja que resulta de especial interés en celebraciones y actos religiosos y musicales. En este trabajo se ha realizado un análisis preliminar de su comportamiento acústico a partir de las respuestas al impulso medidas in situ para dos posiciones de la fuente. Se ha creado un modelo 3D digital del espacio para simulación con el software CATT-TUCT, que ha permitido discutir su conducta acústica en términos de las fuentes imagen. Esta comunicación se enmarca dentro de un proyecto de investigación interdisciplinar que pretende incorporar los aspectos acústicos de las catedrales andaluzas como un valor relevante de su patrimonio intangible.

Palabras-clave: acústica de catedrales, patrimonio inmaterial, simulación acústica.

Abstract

The crypt of the Cathedral of Cadiz (Spain) is a unique architectural space situated beneath the high altar and below sea level. Its location, shape, and stone finishes provide a distinctive and complex sound which is of particular interest in ceremonies and religious and musical events. In this work, a preliminary analysis of its acoustic behaviour is carried out from the impulse responses measured on site for two source positions. A 3D digital model of the space is created for a simulation with CATT-TUCT software, which enables its acoustic behaviour to be discussed in terms of the image sources. This paper is framed within an interdisciplinary research project which aims to incorporate the acoustic aspects of the cathedrals of Andalusia as a significant feature of their intangible heritage.

Keywords: acoustics of cathedrals, intangible heritage, acoustic simulation.

PACS no. 45.55.Gx, 43.55.Ka

1 Introducción

Aunque la propagación del sonido en los recintos 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 se centra tanto en los edificios

contemporáneos de culto, en los que se cuida la inteligibilidad del mensaje oral [3], y que han sido concebidos con un cierto carácter multifuncional, como en el conocimiento y análisis de la acústica de los espacios existentes clásicos, de gran valor histórico y patrimonial [4], ya que éstos se renuevan con fines culturales que comparten a veces con usos litúrgicos. En este campo del conocimiento destacan las singulares características acústicas de los enormes y complejos espacios reverberantes como son las catedrales, y que pueden dar lugar a estudios de problemas acústicos avanzados: estudio de patrones de reflexiones iniciales en función de la distancia fuente-receptor [5, 6], existencia de subespacios acoplados [7, 8] o ajustes de acústica variable [9], son algunos ejemplos.

Los métodos de simulación acústica aplicados a lugares de culto permiten disponer de modelos fiables para simular con suficiente precisión el campo acústico interior [10], tanto en términos del comportamiento espectral y distribución espacial de los parámetros acústicos habituales, como, incluso para utilizar las respuestas al impulso simuladas para implementar auralizaciones con fines de evaluación subjetiva, reconstrucción del patrimonio inmaterial acústico asociado, o recreación previa del comportamiento ante posibles intervenciones permanentes o efímeras.

Se analizará el comportamiento de la cripta de la catedral de Cádiz a partir de las respuestas al impulso medidas in situ así como utilizando el modelo acústico digital preliminar implementado, que una vez depurado y ampliado, se espera pueda dar cobertura a los objetivos antes mencionados.

La cripta de la Catedral de Cádiz, como parte del conjunto de la catedral, surge de la necesidad de un edificio de culto grande y suntuoso con el advenimiento de un gran desarrollo económico en el siglo XVIII en la ciudad, motivado en parte por el traslado del Consulado de Cargadores de Indias y la Casa de Contratación de Sevilla a Cádiz en 1717. Así en 1722 se coloca la primera piedra de esta monumental obra, proyectada inicialmente por el arquitecto Vicente de Acero y financiada, regular y mayoritariamente, con el dinero procedente de los galeones de las Indias y la aportación del comercio de Cádiz y su diócesis. Pero la construcción de este templo no siguió una trayectoria homogénea, pues tardó 116 años en concluirse con la aportación y mezclas de diversos estilos arquitectónicos, desde su inicio, en estilo barroco, hasta su terminación neoclásica, pasando por el rococó. El motivo es la influencia de hasta 7 arquitectos en la dirección de las obras a lo largo del tiempo de su construcción: Vicente de Acero dimite en 1739 dando paso a los arquitectos Gaspar y Torcuato Cayón hasta 1783, sucedidos por Miguel Olivares y José Prat hasta 1790, fecha en que toma las riendas Manuel Machuca. Desde 1832 hasta su finalización en 1838 es Juan Daura quien concluye la dirección de los trabajos arquitectónicos [11].

1.1 Descripción de la cripta y su entorno

El exterior de la catedral cuenta con una fachada principal con tres pórticos, el central está constituido por un primer cuerpo con columnas corintias y estriadas y un segundo cuerpo con un ventanal. Los dos pórticos laterales que restan en la fachada principal están terminados por frontones ampliamente ornamentados y están flanqueados por dos torres, de estilo neoclásico de tres cuerpos y planta octogonal, con función de campanario (Figura 1).

Esta fachada principal usa mármol y piedra caliza de Manilva en su primer cuerpo y piedra caliza de Mijas en el segundo. Las fachadas laterales son idénticas con uso de mármol y jaspé y puertas de orden corintio. Las cubiertas son bóvedas con abundante decoración clásica destacando en el crucero una cúpula semiesférica sobre tambor, obra del arquitecto Juan de Daura recubierta exteriormente de una llamativa cerámica amarilla visible a gran distancia desde el mar.



Figura 1 - Fachada principal y vista del presbiterio de la Catedral de Cádiz.

El interior es de planta de cruz latina y tres naves entorno a un primer cuerpo de amplias columnas corintias estriadas, rematadas en un friso decorado de rocallas con una serpenteante cornisa; todo ello recubierto de mármoles. El segundo cuerpo usa pilastras adosadas de piedra caliza de Mijas. También destaca una amplia girola, con bóvedas triangulares y cuadradas, y un total de 16 capillas distribuidas a lo largo de las naves laterales. El coro se sitúa en el segundo tramo de la nave central y cuenta con un primer cuerpo, con 40 asientos de respaldo alto con tallado de figuras de santos, y un segundo cuerpo con 25 asientos más sencillos. En el presbiterio (Figura 1) se eleva un templete de planta circular sostenido por columnas pareadas corintias de mármol de Carrara gris, jaspes rojos y capiteles de bronce, construido según proyecto del arquitecto Manuel Machuca. En su interior se aloja el sagrario de estilo renacentista tallado en bronce y plata por Juan Rosado a finales del siglo XIX [11].

La exposición a los vientos salinos y la humedad adversa del mar cercano, causan la cristalización de sales solubles en el interior de los materiales pétreos. Esto produce un continuo proceso de desintegración de la ornamentación y una visible degradación de la piedra, provocando desprendimientos de escamas y cascotes de hasta 7 centímetros, lo que obligó a cierres temporales desde 1967 y a la instalación y mantenimiento de una red protectora en el interior del templo.

Pero quizás lo más llamativo, desde el punto de vista acústico-arquitectónico, para el correcto entendimiento de este singular espacio catedralicio es la descripción de la Cripta que se encuentra bajo el altar mayor. La cripta es obra del proyectista original Vicente de Acero y, según los archivos catedralicios, se construye entre 1722 y 1730 [11]. El acceso al recinto se hace mediante escaleras gemelas a sendos lados del altar mayor, accesibles desde la girola exterior, que llevan a un vestíbulo presidido por la obra maestra arquitectónica de la misma: la bóveda vaída de la rotonda central que sirve de soporte al presbiterio y al templete (Figura 2). Está inspirada en la de El Escorial y es muestra del profundo dominio técnico del citado arquitecto. Su peculiar forma, prácticamente plana, los accesos y los respiraderos, de sección rectangular, practicados en la periferia, dan lugar a diversos efectos acústicos singulares que ejercen un anecdótico reclamo como “galería de susurros” dentro de la visita turística de la Catedral y su uso para diversas actividades litúrgicas y musicales en fechas señaladas del calendario religioso.



Figura 2 - Vista interior de algunas galerías y de la bóveda de la cripta de la Catedral de Cádiz, tomada durante la campaña de medidas.

Frente a esta bóveda se distribuyen cinco galerías en las que destacan los techos planos de las capillas que rematan al final cada una de ellas. Tras ella se encuentra una capilla, con un altar de piedra, encima del cual se encuentra una imagen de la Virgen del Rosario esculpida en mármol italiano, obra de Alejandro Algardi. Al fondo de la galería central se encuentra la capilla de los Obispos, un recinto custodiado por rejas, de un volumen ligeramente mayor al del resto de las galerías, que alberga un altar presidido por una figura del Cristo de Aguiniga traído de América a principios del siglo XVII. Una de las galerías laterales de la bóveda principal es ligeramente distinta al resto. Se encuentra a un nivel más bajo, tras descender unos escalones, y está revestida parcialmente en chapa de acero negro para decorar las tumbas del músico Manuel de Falla y el poeta José María Pemán, ambos gaditanos (ver Figuras 3 y 4).

El material con el que está ejecutado este sobrio recinto es mayoritariamente la popular piedra ostionera de Cádiz y la piedra gris de Tarifa, colocada en el suelo. La primera, es una piedra conchífera, propia del lugar, que soporta mejor el clima marino gaditano y tiene sus propias características acústicas debidas a la forma y composición de la misma (Figura 2).

La existencia de los peculiares materiales de esta cripta, su ornamentación y la compleja geometría de galerías, respiraderos, escaleras, bóvedas y cúpulas originan campos sonoros de una complejidad extraordinaria, y a pesar de las potentes herramientas de simulación de las que se dispone actualmente no se pueden garantizar su rigurosidad y precisión con total certeza.

2 El método experimental

Dentro de una campaña de medidas que incluye todo el complejo catedralicio, en la cripta se han obtenido las respuestas impulsivas monoaurales, binaurales y B-format (que no serán objeto de nuestra atención aquí) excitando el recinto colocando la fuente omnidireccional en 2 posiciones que coinciden con la ubicación del celebrante en los actos litúrgicos, F1, y la de los intérpretes en actos culturales, F2. Como señal de excitación se han utilizado barridos sinusoidales exponenciales de 21,8 s de duración y se han usando 13 posiciones de micrófono (receptores) situados a una altura de 1,2 metros del suelo (Figura 3). El rango de frecuencias del barrido se ajustó para cubrir las bandas de octava comprendidas entre 63 Hz y 16000 Hz, utilizando un subwoofer para extender la respuesta en baja

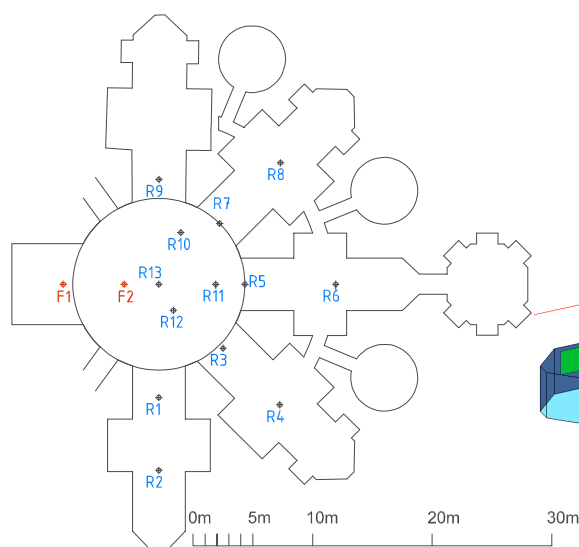


Figura 3 – Plano de planta con las posiciones de la fuente y los receptores.

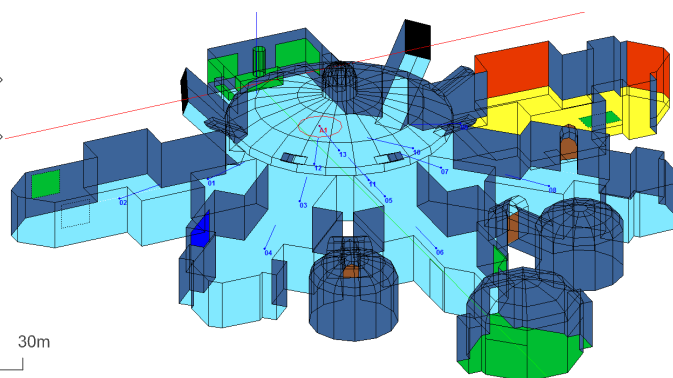


Figura 4 – Modelo 3D de la cripta implementado para la simulación acústica.

frecuencia. La duración del barrido aseguraba conseguir una relación impulsiva señal-ruido superior a 45 dB para las octavas de interés. Las medidas se llevaron a cabo en horario nocturno, lo que aseguraba un bajo ruido de fondo, en ausencia de público, y siguiendo el procedimiento establecido en la UNE-EN ISO 3382-1 [12]. Para el registro, generación y análisis de la señal y medida del ruido de fondo se usó el siguiente material de medida:

- Ordenador portátil Acer con el software EASERA y SvanPC++.
- Dispositivo de sonido USB Edirol UA 101.
- Etapa de potencia B&K 2734.
- Subwoofer Beringer Eurolive B1800D-Pro auto-amplificado.
- Fuente dodecaédrica omnidireccional AVM DO-12.
- Preamplificador de micrófono Soundfield SMP200 para micrófono Audiotechnica.
- 2 micrófonos Audiotechnica AT4050/CM5 (conmutables figura en ocho y omnidireccional).
- Cabeza Binaural Head Acoustic tipo HMU-III.
- Termohigrómetro de precisión.
- Svan 958 de Svantek.

El nivel de ruido de fondo se registró promediando durante un periodo de 5 minutos con el analizador Svan 958. El nivel sonoro continuo equivalente fue de 26,6 dBA. A lo largo del proceso de medida, la temperatura osciló entre 19,9 °C y 20,3 °C y la humedad relativa entre 71 y 78%.

Ante la complejidad del recinto por la presencia de múltiples espacios acoplados, lo que provoca procesos no lineales de extinción en términos de niveles acústicos, con múltiples pendientes, las señales han sido procesadas con varios sistemas para analizar los resultados utilizando diferentes algoritmos de truncado y compensación del ruido de fondo de las RI.

3 Simulación acústica

Siendo conscientes de la complejidad del espacio, y por ello de las limitaciones de los modelos geométricos, se ha implementado un modelo 3D (Figura 4) para simulación sólo de la cripta, que ha

Tabla 1 – Coeficientes de absorción (fila superior), y dispersión (fila inferior) en %, por bandas de octava, de los materiales del modelo 3D.

Material	Área [m ²]	Área [%]	Banda de octava (Hz)						Color (Fig. 4)	Descripción
			125	250	500	1 k	2 k	4 k		
Huecos	11,5	0,4	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9		
Mueble ¹	7,7	0,3	15	15	15	15	15	15		Vidrio
			10	5	4	3	3	3		
Nichos y tumbas ¹	109,0	4,0	25	30	25	20	20	20		Mármol
			1	1	1	2	2	2		
Paredes y techos ²	1887,9	68,5	5	5	5	8	14	20		Piedra ostionera
			15	15	15	15	15	15		
Pared metal ²	51,9	1,9	5	4	3	2	1	1		Chapa metal
			15	15	15	15	15	15		
Puerta ¹	12,8	0,5	4	10	6	8	10	10		Madera
			15	15	15	15	15	15		
Suelo y zócalos ¹	102,8	3,7	2	2	3	4	5	5		Granito
			15	15	15	15	15	15		
Suelo ¹	573,9	20,8	2	2	3	4	5	5		Losa de Tarifa
			15	15	15	15	15	15		

Fuentes bibliográficas de los datos acústicos de los materiales: (1) Ref. [13] y (2) estimados a partir de Ref. [14].

resultado útil para la interpretación cualitativa de las primeras reflexiones. El modelo está compuesto por 560 planos y tiene un volumen de unos 3032 m³. Para realizar la simulación acústica se ha utilizado el software CATT-Acoustic v.9.0 con el motor de cálculo TUCT (*The Universal Cone Tracer*) v.1.0 [15]. Inicialmente se ha considerado oportuno utilizar el algoritmo 1 con *max split order* 1. Tanto el número de rayos como el tiempo de truncado se fijaron de forma manual unas cinco veces superiores a los estimados por el propio programa: 500000 rayos y 6 s respectivamente.

Debido a la complejidad del espacio, en el que se han obtenido experimentalmente variaciones notables del tiempo de reverberación en los distintos receptores y según la posición de la fuente, no se presentan resultados de la simulación completa del espacio, pues el modelo sólo es parcial al no incluir el complejo volumen acoplado de la catedral y no reproducir el comportamiento medido. Sin embargo se han utilizado los resultados del algoritmo de las fuentes imagen para comparar las reflexiones que reciben los receptores bajo la bóveda y los de las galerías. En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de absorción asociados a los materiales y el porcentaje relativo de superficie de cada uno de ellos.

4 Resultados y discusión

El acoplamiento presente en el recinto es realmente complejo: por un lado, la rotonda está conectada al volumen principal de la catedral a través de las escaleras de acceso y de los respiraderos que se abren en los límites de la bóveda rebajada; por otro, las galerías se conectan a la rotonda y, en algunas ocasiones, también entre ellas. En la Figura 5 se muestran los resultados espectrales para T_{30} correspondientes a un ensayo en el que se situó la fuente, sucesivamente, en la cripta (F1) y en el púlpito del lado del evangelio en la catedral; para cada una de ellas, simultáneamente, se registraron las RI en un punto de la cripta (R12) y otro representativo de la catedral. Podemos ver que los valores en este caso son muy similares, salvo cuando emisor y receptor se encuentran en la cripta.

Centrándonos en la cripta, en la Figura 6 se muestra las respuestas al impulso medidas (parte inicial) y las curvas de caída de Schroeder para el receptor R4, situado a la mitad de la segunda galería,

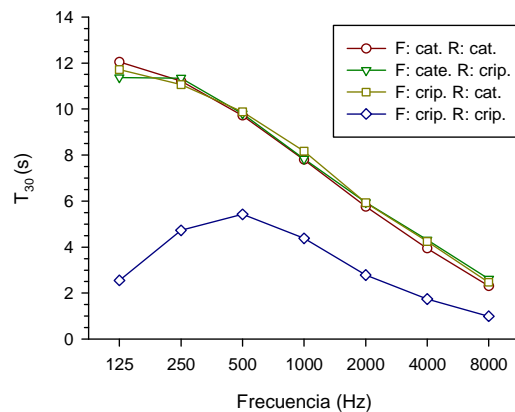


Figura 5 – Valores de T_{30} a partir de registros simultáneos en la catedral y en la cripta cuando la fuente emite, sucesivamente, desde uno y otro espacio.

correspondientes a las dos posiciones de la fuente a 500 Hz. En ambos casos hay visibilidad de las fuentes desde el receptor y se observa una extinción no lineal, con un comportamiento de doble pendiente, como consecuencia del acoplamiento con la catedral y la rotonda. Este comportamiento es más complejo y con una caída más lenta cuando la fuente se sitúa en la rotonda (F2).

Desde una perspectiva puramente estadística de los campos sonoros en los espacios acoplados, se han sugerido en la bibliografía varios cuantificadores numéricos para evaluar el comportamiento de la doble pendiente en el proceso de extinción. De entre ellos, el coeficiente de acoplamiento definido por la razón T_{30}/T_{15} [16], representa una comparación de la primera parte de la extinción y la caída global. Altos valores (mayores que 1) de este coeficiente indican un efecto más significativo del efecto de doble pendiente presente en el proceso de extinción. Una doble pendiente queda unívocamente descrita si se conocen los cuatro parámetros correspondientes a las dos pendientes y las dos ordenadas en el origen de las dos rectas, o lo que es lo mismo, la razón de decrecimiento (DR), expresada por $DR=T_2/T_1$ y la diferencia de ordenadas en el origen $\Delta dB=10 \log (A_1A_2/S^2)$, donde T_1 y T_2 son los tiempos de reverberación para la espacios 1 y 2 sin acoplamiento, y A_1 y A_2 las absorciones totales de los recintos 1 y 2 (incluyendo el área de apertura) y S la superficie del área de apertura [16]. Tratar de determinar estas cantidades a través de una inspección visual puede dar lugar a grandes errores cuando no se tiene un decrecimiento lineal, unido al hecho de que el nivel de ruido de fondo puede alterar la

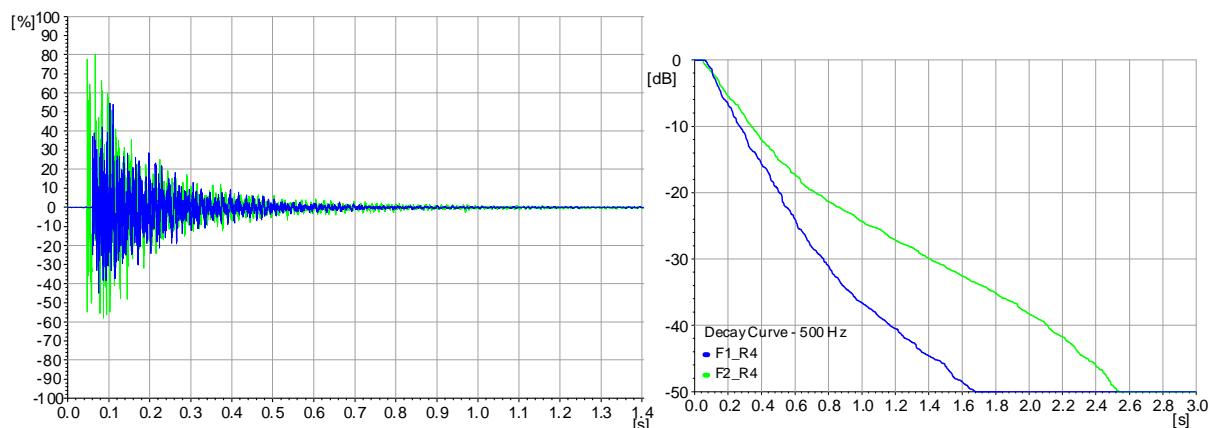


Figura 6 – Parte inicial de la respuesta al impulso y curvas de caída de Schroeder a 500 Hz en el receptor R4 para las dos posiciones de la fuente.

forma de la curva de Schroeder. Se impone por tanto un método analítico tal como el algoritmo desarrollado por Xiang *et al.* [17] basado en análisis bayesiano.

Como consecuencia de lo indicado, en este contexto sólo haremos una primera aproximación al problema. Por ello, aunque la razón T_{30}/T_{15} no es el índice que mayor capacidad de discriminación presenta [16], su cálculo es muy sencillo. En el caso del receptor R4 citado (ver Figura 3), al que

Tabla 2 – Valores del coeficiente T_{30}/T_{15} para valoración de doble pendiente de las curvas de caída para las diferentes zonas y para las bandas de octava de 500 y 1000 Hz.

Receptores	Octava 500 Hz		Octava 1 kHz	
	Fuente F1	Fuente F2	Fuente F1	Fuente F2
R1-R9	1,12	1,70	1,10	1,68
R10-R13	1,69	1,14	1,67	1,08

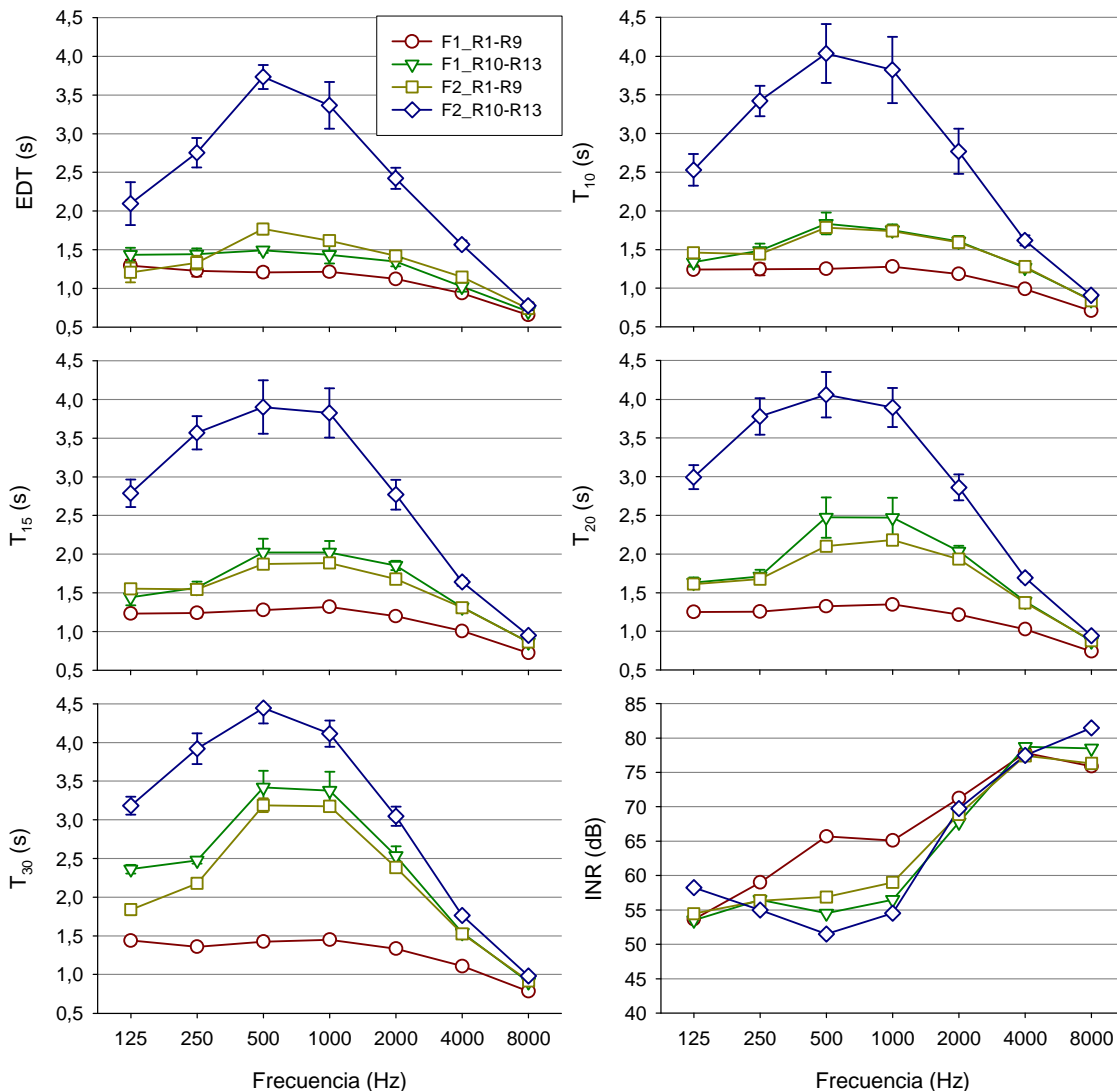


Figura 7 – Resultados de varios parámetros temporales y relación señal-ruido impulsiva, promediados espacialmente en los dos grupos de receptores (R1-R9 en las galerías y R10-R13 en la rotonda), en bandas de octava, para las dos posiciones de la fuente.

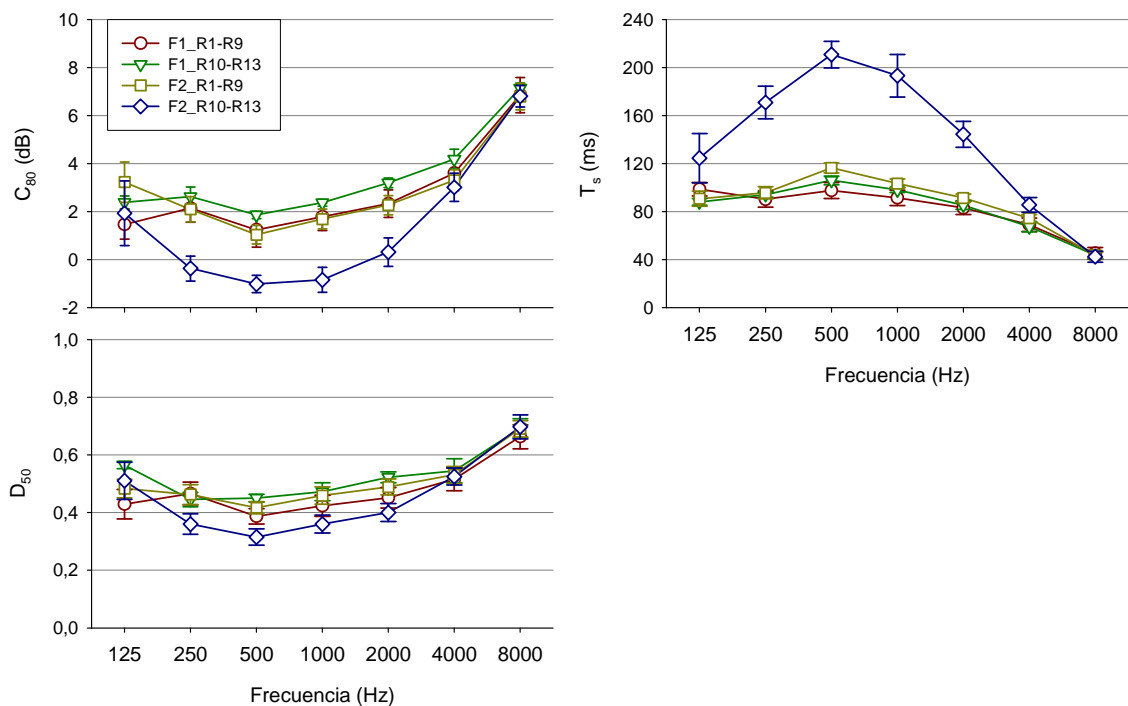


Figura 8 – Resultados de los parámetros energéticos, promediados espacialmente en los dos grupos de receptores (R1-R9 en las galerías y R10-R13 en la rotonda), en bandas de octava, para las dos posiciones de la fuente.

corresponden los registros de la Figura 6, esta razón vale 1,03 para la fuente F1 y 1,88 para F2. En la Tabla 2 se muestran los valores de T_{30}/T_{15} , para las bandas de octava de 500 y 1000 Hz, calculados a partir de los valores promediados sobre los dos conjuntos de receptores: por un lado los situados en las galerías y por otro los de la rotonda. Podemos observar que para F1 los valores de la rotonda son superiores a los de las galerías, y muy similares para ambas bandas de octava. Este comportamiento se invierte cuando la fuente se ubica en F2 con valores de los respectivos índices muy similares.

Planteado el problema en estos términos, se realiza un análisis de detalle de las curvas de extinción. En la Figura 7 se muestran los valores de diversos parámetros que evalúan el ritmo de caída de la energía acústica, diferenciando, tanto la posición de la fuente, como el agrupamiento de los receptores para promediar espacialmente. Así mismo se ha representado la relación señal/ruido impulsiva como indicador de la validez del rango máximo evaluado.

A tenor de ello cabe comentar en primer lugar, que las medidas de las respuestas al impulso se registraron con relaciones señal-ruido impulsivas por encima de los 50 dB en todas las bandas de octava de interés y receptores, lo que minimiza el efecto del ruido de fondo en la integración inversa de las curvas de decaimiento para los intervalos máximos evaluados.

Por otra parte resulta llamativo los cambios de comportamiento de los tiempos de reverberación inicial, y los valorados en los diferentes intervalos de caída T_{10} , T_{15} , T_{20} y T_{30} en las diferentes zonas de recepción y según se calculen con una posición u otra de la fuente. En el caso de situar la fuente en la posición F1, la zona de las galerías presenta los valores más bajos, prácticamente constantes en todos los intervalos de caída y un comportamiento muy plano a las diferentes frecuencias, indicando por tanto absorción moderada y uniforme (campo difuso) y no intercambio de energía sonora con la

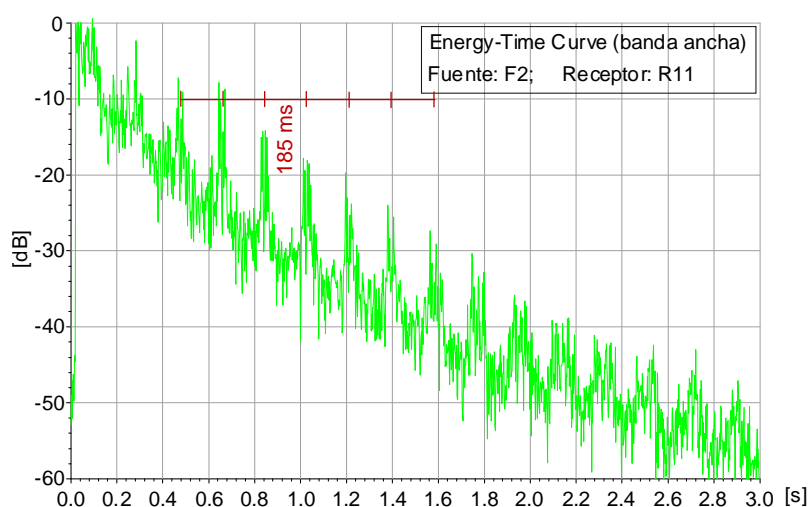


Figura 9 – Curva energía-tiempo para las posiciones de fuente y receptor indicadas en la que se aprecia un patrón de reflexiones repetitivo con intervalos de unos 185 ms.

rotonda y/o la catedral. Para estos mismos receptores de las galerías, al desplazar la fuente más cerca del centro de la rotonda (F2), es mucho más patente el efecto de acoplamiento de la energía sonora que procede de la catedral, intercambiada a través de los respiraderos y escaleras de acceso al espacio, como se ha comentado anteriormente a través de las curvas de decaimiento en un receptor de la galería (ver Figura 6).

En cuanto a los receptores de la rotonda, cuando la fuente se sitúa en el altar, F1, la influencia del acoplamiento con la catedral es notoria con claras variaciones de los tiempos iniciales y los calculados en otros intervalos de caída. Pero el hecho más llamativo corresponde al notable incremento de los resultados de los tiempos de reverberación inicial en los receptores de la rotonda cuando la fuente se posiciona en F2, así como la modificación del comportamiento espectral de los valores de la reverberación inicial, en especial a las frecuencias medias. Estos hechos parecen venir asociados por un lado al acoplamiento con el volumen de la catedral (que también existía con F1) más las contribuciones de la energía reflejada, procedente del fondo de la galería, en los receptores de la rotonda, debido ahora a la mayor incidencia de la simetría radial en los receptores, y que traen como consecuencia un cambio del tiempo de reverberación.

Como podemos observar en la Figura 8, los parámetros relacionados con la relación energía precoz/tardía, tiempo central y claridad, también muestran un alejamiento y singularidad de los valores de los parámetros para los receptores de la rotonda cuando la fuente se sitúa en F2, en particular a las frecuencias medias, y que sitúan a los puntos de la rotonda como los receptores más desfavorables para la audición de la música frente a los de las galerías. De hecho, en el uso cultural del espacio la audiencia se ubica en la primera mitad de las galerías y los intérpretes en la rotonda, cerca del altar.

Los valores de D_{50} indican que la inteligibilidad de la palabra es *aceptable-pobre* viéndose más perjudicadas las bandas más esenciales para la palabra en todas las zonas de la cripta, y con valores similares del parámetro en la rotonda y las galerías cuando el celebrante se sitúa en la posición F1.

Para terminar este análisis inicial del peculiar y complejo comportamiento del campo acústico de este espacio, en la Figura 9 presentamos la curva energía tiempo para el receptor R11 cuando la fuente emite en F2, ambos situados aproximadamente en el eje longitudinal de la cripta. En ella observamos un aparente patrón repetitivo de reflexiones con un intervalo de unos 185 ms, lo que representa una

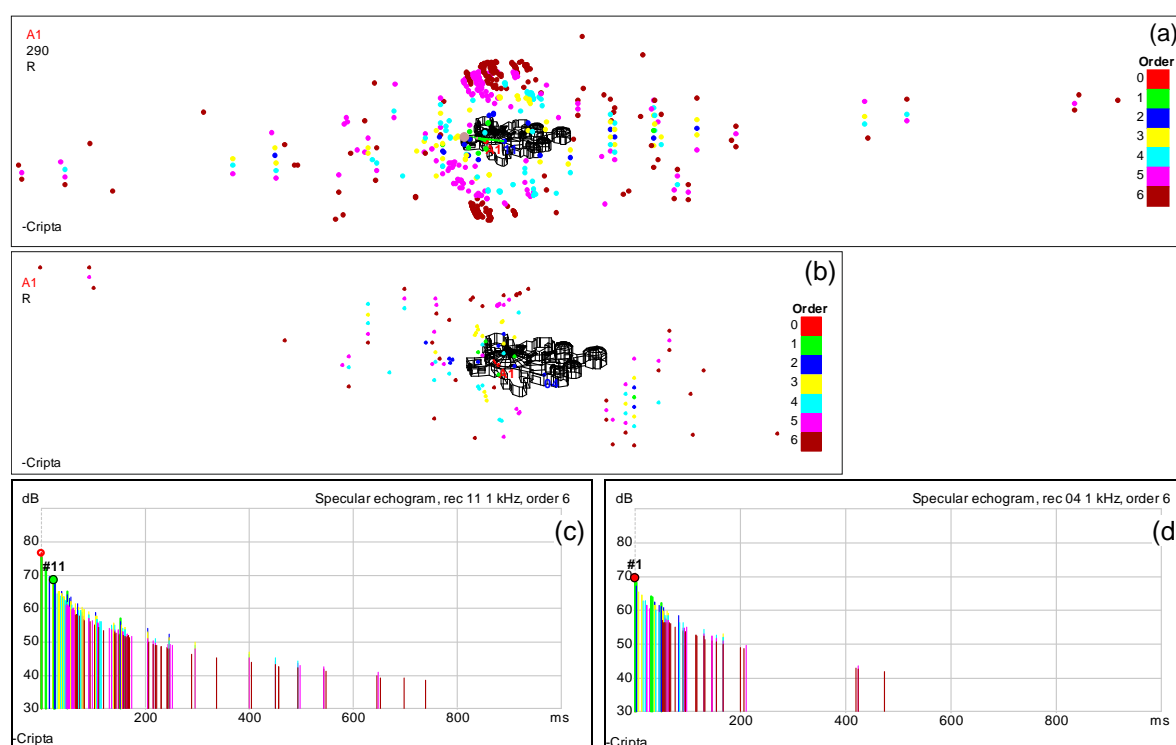


Figura 10 – Espacio de las fuentes imagen para los receptores R11 (a) y el R4 (b) y ecogramas asociados (c) y (d), respectivamente, cuando emite la fuente F2.

distancia de unos 64 m. Aunque es complejo justificar ese comportamiento, en la Figura 10 se comparan los espacios de las fuentes imagen y los ecogramas de las primeras reflexiones asociados, para los receptores R11 y R4 cuando emite F2. Se han considerado reflexiones hasta el orden 6. Las diferencias son evidentes, pero conviene destacar que para R11 se produce una concentración de imágenes por encima de la bóveda y bajo el suelo de la misma, de orden superior (5 y 6) pero con recorridos cortos y producidos por superficies altamente reflectantes, que pueden ser las responsables del comportamiento mostrado en la Figura 9, además de las reflexiones de orden 2 producidas en el fondo de la galería en la que se alinean fuente y receptor.

5 Conclusiones

Dentro de la Catedral de Cádiz se ubica un espacio, la cripta, que presenta un comportamiento acústico singular y complejo, determinado tanto por su propia configuración espacial y las características acústicas de los materiales utilizados, como por su relación formal y funcional con el volumen principal de la catedral. Como consecuencia de todo ello los procesos de extinción no son lineales y aparecen efectos de acoplamiento acústico evidentes. En este trabajo se ha hecho un primer análisis de este comportamiento a partir de las RI adquiridas in situ: se ha destacado la enorme influencia de la ubicación de la fuente sobre el campo acústico interior, se han analizado los procesos de extinción y calculando los factores de acoplamiento T_{30}/T_{15} , se ha destacado algún comportamiento singular en las curvas de energía para posiciones específicas emisor receptor y, finalmente, utilizando un modelo parcial del recinto para simulación con CATT-A, se ha discutido el diferente comportamiento, en términos de las fuentes imagen (primeras reflexiones), de una posición típica de las galerías y otra de la rotonda, lo que nos lleva a suponer que las reflexiones suelo-techo y longitudinales en la galería

donde se alinean el receptor 11 y la fuente F2, determinan el comportamiento observado en la curva energía-tiempo del punto 11.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Deán y al personal de la catedral las facilidades brindadas para la realización de las medidas acústicas. También a L. Álvarez, M. Galindo, y A. Alonso nuestro más sincero agradecimiento por su gran y desinteresada ayuda para la realización de esta comunicación. Este trabajo está financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación Español, dentro del proyecto BIA2010-20523.

Referencias

- [1] Beranek, L.L. Concert hall acoustics-1992. *J. Acoust. Soc. Am.* 92(1), 1992, 1-39.
- [2] Cirillo, E.; Martellotta, F. *Worship, Acoustics and Architecture*. Multiscience, Brentwood UK, 2006.
- [3] Abdelazeed, M.K.; Hammad, R.N.; Mustafa, A.A. Acoustics of King Abdullah mosque. *J. Acoust. Soc. Am.* 90(3), 1991, 1441-1445.
- [4] Karabiber, Z. 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.
- [5] Zamarreño, T.; Girón, S.; Galindo, M. Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 121(1), 2007, 234-250.
- [6] Cirillo, E.; Martellotta, F. Sound propagation and energy relations in churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 118(1), 2005, 232-248.
- [7] Anderson, J.S.; Bratos-Anderson, M. Acoustic coupling effects in St Paul's Cathedral, London. *J. Sound Vib.* 236(2), 2000, 209-225.
- [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, 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(1), 1996, 417-425.
- [10] Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 2009, 1207-1218.
- [11] Antón-Solé, P. *La Catedral de Cádiz. Estudio histórico y artístico de su arquitectura*. Ayuntamiento de Cádiz, Cátedra Municipal de Cultura Adolfo de Castro, 1973.
- [12] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010
- [13] Vorländer, M. *Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*, Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [14] Cox, T.J.; D'Antonio, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application*, Spon, London, 2004.
- [15] Dalenbäck, B-IL. *CATT-Acoustic v9 user's manual*. Computer Aided Theatre Technique; Gothenburg (Sweden), 2011.
- [16] Bradley, D.T.; Wang, L.M. Quantifying the double slope effect in coupled volume room systems. *Building Acoustic.* 16(2), 2009, 105-123.
- [17] Xian, N.; Goggans, P.M. Evaluation of decay times in coupled spaces: Bayesian parameter estimation. *J. Acoust. Soc. Am.* 110(3), 2001, 1415-1420.