



## EL SONIDO VIRTUAL DEL PANTEÓN DE ROMA

**F. J. López-Martín, L. Álvarez-Morales, T. Zamarreño-García, S. Girón-Borrero.**

Universidad de Sevilla, Dpto. de Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC, Av. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España. Tel. + 34 95 4556612, Fax: +34 95 4557892  
{e-mails: [fclopmar@gmail.com](mailto:fclopmar@gmail.com), [calvarez6@us.es](mailto:calvarez6@us.es), [teofilo@us.es](mailto:teofilo@us.es), [sgiron@us.es](mailto:sgiron@us.es)}

### Resumen

El Panteón fue ordenado construir por Agripa en el año 27 A. C. como templo consagrado a las divinidades romanas, formando parte de las actuaciones de urbanización del *Campo Marzio* en tiempos del emperador Augusto. A comienzos del siglo II D.C. el edificio se encontraba en ruinas y sobre éstas se erigió en el año 120 el edificio actual bajo el mandato de Adriano. Se consagra como iglesia católica en el año 609 bajo la advocación de Santa María de los Mártires. El Panteón de Adriano es considerado una de las mejores herencias arquitectónicas de la Antigüedad exhibiendo planta circular de 43 m de diámetro y una altura idéntica hasta su gran óculo cenital. En él se utiliza la mayor innovación tecnológica de la época adquiriendo su equilibrio y durabilidad por el procedimiento de aligerar la construcción sin reducir la resistencia de la estructura.

En este trabajo se ha creado un modelo digital 3D del espacio y se ha realizado una simulación acústica mediante el software CATT-Acoustic. El estudio pretende analizar con esta técnica la incidencia del diseño arquitectónico de la *rotonda* y la cúpula en la conducta acústica de este gran y emblemático espacio, que ha inspirado múltiples obras arquitectónicas en todo el mundo a lo largo de la historia.

**Palabras-clave:** patrimonio arquitectónico, simulación acústica, arquitectura romana.

### Abstract

The Pantheon was commissioned by Agrippa in 27 B.C. as a temple for the Roman deities and as part of the urbanization of the *Campo Marzio* under Emperor Augustus. At the beginning of the second century the building was in ruins upon which the current building was erected in the year 120 A.D. under the rule of Hadrian. It was consecrated in 609 as a Catholic church dedicated to St. Mary and the Martyrs. Hadrian's Pantheon is considered one of the major architectural inheritances of Antiquity and features a circular plan of 43 m in diameter and an identical height up to its large zenithal oculus. It was built by employing the greatest technological innovation of the time, and acquired balance and durability through the procedure of lightening the construction without reducing the resistance of the structure.

In this work, a 3D digital model of the space is created and an acoustic simulation by using CATT-Acoustic software is performed. With this technique, the study strives to analyse the incidence of the architectural design of the *rotunda* and the dome on the acoustic behaviour of this great and emblematic space, which, throughout history, has inspired numerous works of architecture worldwide.

**Keywords:** architectural heritage, acoustic simulation, Roman architecture.

**PACS no. 45.55.Gx, 43.55.Ka**

## 1 Introducción

Las técnicas de predicción basadas en la simulación numérica y que se fundamentan en la acústica geométrica, tienen en cuenta la geometría y la distribución real de la absorción-difusión sonora de los materiales de acabado, así como la ubicación y naturaleza de la fuente sonora para los usos posibles del recinto, y las posiciones de los receptores. Estos modelos digitales proporcionan la respuesta al impulso (RI) en cada receptor, monaurales, binaurales e incluso en formato B-format, que permiten la implementación de auralizaciones de alta calidad, y contienen toda la información acerca de las condiciones acústicas de la sala en tiempo, nivel, espectro y dirección de incidencia. A partir de la obtención de la respuesta al impulso simulada es posible deducir los parámetros acústicos más relevantes del campo sonoro en diferentes entornos arquitectónicos [1-5], utilizar estos modelos virtuales con variados propósitos de investigación [6, 7], así como la generación de muestras de señales de audio que pueden usarse en valoraciones subjetivas o auralizaciones [8]. 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 [9].

En recintos de especial valor patrimonial, escénicos [10], religiosos [11], o culturales [12], el procedimiento puede ser usado además para realizar *arqueología acústica*: reconstrucción virtual de la acústica de épocas pasadas o emular la acústica de edificios singulares desaparecidos (e. g. teatros romanos), lo que posibilita incorporar en estos espacios de gran valor cultural, las características acústicas como otro importante aspecto de su patrimonio inmaterial. En este contexto, este trabajo analiza el proceso de creación y ajuste de un modelo acústico digital de una obra maestra de la arquitectura romana y que ha llegado a nuestros días en un excelente estado de conservación, El Panteón de Adriano en Roma. En el modelo se han recreado las modificaciones del campo sonoro debido a la presencia de público en condiciones de ceremonias y de visita turística y se han implementado auralizaciones en varias localizaciones para percibir la influencia de la *rotonda* y la cúpula en la acústica del espacio.

El presente estudio ha sido presentado por el primer autor, estudiante del último curso de arquitectura, como trabajo docente de carácter práctico, en una materia formativa de acústica avanzada de su titulación.

## 2 El Panteón: descripción y reseña histórica

En el mundo antiguo son muy pocos los arquitectos conocidos y menos las obras de las que se conoce su autor, ya que generalmente se atribuían a su promotor, así en casi todos los edificios del mundo romano aparecen inscripciones que reconocen el valor de quien decidió y pagó la construcción. Sin embargo, en la arquitectura de Adriano encontramos un caso singular, su anonimato, debido al perfil intelectual del emperador. En las obras que dependieron de él no intentó manifestar claramente la autoría imperial, en ninguno de los edificios puso su nombre, lo que en casos como el Panteón ha supuesto un considerable conflicto y el que se haya atribuido durante siglos a Agripa, bajo el periodo de Augusto, habiendo existido ambos como dos edificios completamente distintos.

La construcción del Panteón de Adriano, sobre el lugar del anterior de Agripa, se planteó con el mismo concepto del originario, pero el edificio anterior se consideró muerto. Sólo permanecieron sus valores simbólicos, subrayados por la reposición de la inscripción que existía en el antiguo Panteón de Agripa en el nuevo pórtico [13]. El Panteón de Agripa se construyó en el año 25 A.C., en el marco de

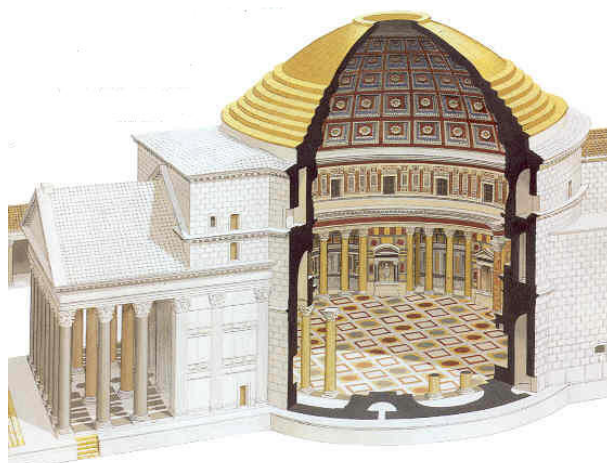


Figura 1 – Perspectiva con corte para vista interior del Panteón de Adriano.

las actuaciones de urbanización del Campo de Marte, con planta rectangular según muestran los restos aparecidos bajo el pórtico de acceso del actual. El edificio sufrió daños por un incendio en el año 80, de los que fue reparado por Domiciano, padeciendo una nueva destrucción en tiempos de Trajano. Los restos descubiertos a finales del siglo XIX nos permiten saber que el templo original guardaba ciertas semejanzas con el actual. Lo que hoy es un pórtico de entrada fue la fachada de un templo *períptero*. La primitiva entrada se efectuaba por el lado opuesto, hacia el sur, ya que en la rotonda actual había una plaza circular porticada. Al otro lado de esa plaza se encontraba la basílica de Neptuno.

La construcción del segundo Panteón debió corresponder a la primera mitad del periodo de Adriano y se realizó en dos fases: en la primera se acometió la *rotonda* y el espacio interior y en la segunda se levantaron el pórtico de acceso y la plaza perimetral de cierre. Se cambió la orientación respecto del panteón precedente, colocando la fachada principal hacia el norte. El edificio quedó compuesto por una columnata a modo de *pronaos*, una amplia *cella* circular y una estructura prismática intermedia. El gran *pronaos* y la estructura de unión con la *cella* ocuparon por completo el espacio del templo anterior, mientras que la *rotonda* fue construida sobre el espacio de la plaza augustea que separaba el panteón de la basílica de Neptuno.

El espacio interior de la *rotonda* está constituido por un cilindro cubierto por una semiesfera. El cilindro tiene una altura igual al radio, y la altura total es igual al diámetro, por lo que se puede inscribir una esfera completa en el espacio interior (ver Figuras 1 y 2). El diámetro de la cúpula es de 43,44 m, lo que la convierte en la mayor cúpula de hormigón en masa de la historia.

El *pronaos octóstilo*, con ocho columnas en la fachada, y cuatro en los laterales, mide 34,20×15,62 m, y se eleva 1,32 m sobre la plaza. La altura total es de 14,15 m y los fustes tienen un diámetro de 1,48 m en la base. El friso contiene la inscripción de Agripa en letras de bronce, y en el arquitrabe se grabó posteriormente una segunda inscripción relativa a la restauración acometida en tiempos de Septimio Severo. Al interior, dos filas de cuatro columnas dividen el espacio en tres naves, la central, y más amplia, conduce a la gran puerta de acceso a la *cella*, mientras las dos laterales terminan en dos amplios nichos. La cubierta a dos aguas está soportada por cerchas de madera apoyadas sobre una estructura de muros que apoya por medio de arcos en las columnas. El cuerpo intermedio que conecta el *pronaos* con la *cella* está construido en *opera latericia* (hormigón con ladrillo), y consta de dos grandes machones adosados a la *cella*. Al exterior, la estructura tiene la misma altura del cilindro de la *rotonda*. Sobre este cuerpo existe un segundo frontón de ladrillo, de una altura mayor. Esta diferencia de nivel ha hecho suponer que el *pronaos* estaba previsto de mayores dimensiones, (Figuras 1 y 2).

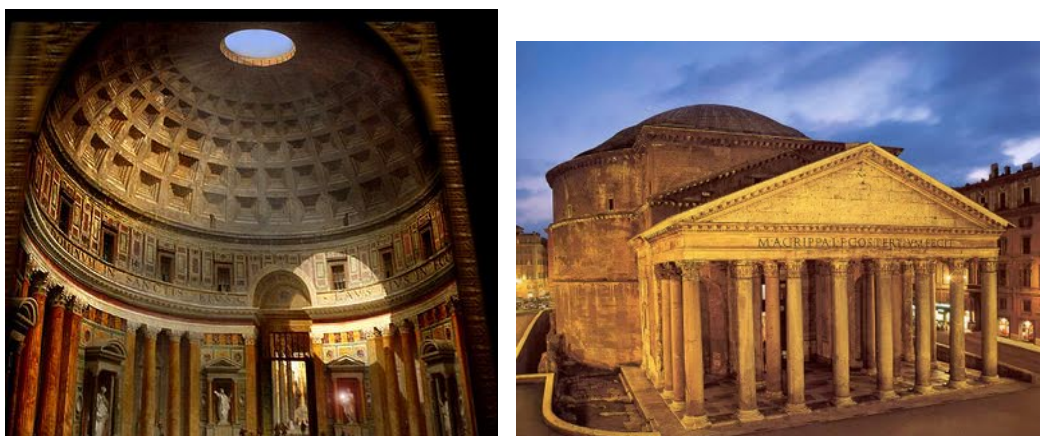


Figura 2 - Vista interior y exterior del Panteón.

En el nivel inferior de la *rotonda* se abren ocho amplias exedras de planta trapezoidal y semicircular alternativamente (ver Figura 3). Los nichos están enmarcados por un orden de pilastras y de columnas, con un entablamento corrido en todo el perímetro, excepto en las exedras del eje principal (Figura 2). En éstas, cubiertas mediante bóvedas, el entablamento se interrumpe ya que las columnas intermedias no son necesarias. Entre las exedras, en los paños de muro intermedios, aparecen edículos con capialzados triangulares y circulares alternados (Figuras 1-3). En un segundo nivel, desde el entablamento hasta la imposta de la bóveda, hay una fila de ventanas, alineadas en vertical con los nichos y los edículos, que abren a una galería superior. La decoración romana original fue sustituida en el siglo XVIII por la que se puede ver actualmente. El sector sudoccidental ha sufrido varias restauraciones, no del todo apropiadas, que han alterado el aspecto inicial. El pavimento de mármol de la *rotonda* es ligeramente convexo, con la parte central 30 cm más alta que el perímetro, para evacuar la lluvia que entre por el óculo hacia el canal perimetral. El revestimiento es de baldosas con un diseño de cuadrados en los que se inscriben alternativamente cuadrados y círculos más pequeños.

La cúpula está formada en el interior con cinco filas de casetones, que decrecen en tamaño hacia el centro, donde está perforada por un óculo abierto de 9 m de diámetro. El óculo estaba rodeado por una cornisa de bronce fijada a la cúpula en la última fila de casetones. Las oquedades en la fábrica sugieren que tanto los casetones como el espacio intermedio estaban forrados de bronce. Al exterior, la cúpula arranca de una sobreelevación del muro, a 8,40 m por encima del arranque interior de la bóveda. Se encuentra articulada por medio de siete anillos superpuestos, el inferior de los cuales conserva todavía el revestimiento de mármol. El resto se encontraba cubierto por planchas de bronce dorado, hoy perdido a excepción del perímetro del óculo.

Los principales materiales de acabado del espacio son por tanto el hormigón aligerado en la parte superior de la cúpula y pesado en la inferior, el mármol pintado dispuesto en la pared cilíndrica de la *rotonda* y pulido en suelo y columnas (ver Tabla 1).

Desde la inauguración del Panteón por Adriano, se sabe de una reparación realizada por Antonino Pío en el año 140. Por otra parte, una inscripción recuerda otra restauración a cargo de Septimio Severo en 202. En el siglo IV, con la caída del imperio romano, la ciudad de Roma inicia su decadencia y en el año 399 el Panteón fue cerrado al culto. El edificio se salvó de la destrucción al principio de la Edad Media porque en el año 608 fue donado por el emperador Bizantino Foca al papa Bonifacio IV. En el año 609, el papa lo consagró pasando a denominarse Santa María de los Mártires. En años posteriores,

el edificio sufrió expolios en el revestimiento de bronce de su cúpula y se realizaron una serie de modificaciones en la zona del ábside del lado sur con la construcción de un pasadizo. A partir del año 663, se comenzó a denominar Santa María Rotonda y durante siglos fue la única iglesia de la zona oriental del centro de la ciudad.

Entre los siglos VII a XII se restaura la cubierta de plomo de la cúpula y la imagen de Roma se identifica con diversos edificios, entre ellos el Panteón, a la vez que se proyecta la construcción de un palacio pontificio adosado. En el siglo XIII se añade un pequeño campanario en el vértice del tejado del frontón del pórtico, formando parte de la imagen del Panteón durante todo el Renacimiento. En el siglo XV se pone en valor la recuperación de lo antiguo, y el Panteón es enriquecido con frescos: el más notable el de *La Anunciación* de Melozzo da Forlì, en la primera capilla a la derecha de la entrada. La elección de Rafael como lugar de ubicación de su tumba (1520) hacer pensar sobre el pleno reconocimiento que alcanzó el edificio, trascendiendo en su dimensión urbana, y comenzando a ser valorado en su esencia. En 1576 se urbanizó la plaza frente al Panteón, y en 1632 se ordenó el proyecto de los campanarios simétricos en sustitución del preexistente.

En el siglo XVIII se sistematizan las tareas de mantenimiento, restauración e investigación del Panteón. En 1740 se modifica el aspecto original del cuerpo intermedio del interior del Panteón dotando a los huecos del mismo de un frontón que no poseía en su estado original y se eliminó la decoración de los espacios entre dichos huecos. En 1823 el papa Pío IX ordena la restauración de su pavimento interior y se inicia la liberación del Panteón de las construcciones adosadas, que se culmina en 1898, coincidiendo con la demolición de los dos campanarios. Con estas operaciones el edificio se monumentalizó y se erigió en protagonista de su entorno urbano. A finales del siglo XIX se instalan las tumbas de los reyes de la dinastía de Saboya Víctor Manuel II, y Humberto I en dos exedras opuestas. En 1993 comienzan las tareas de limpieza y restauración del interior del Panteón con la intención de recobrar el aspecto original del edificio bajo el interés cromático por los materiales con los que se construyó.

No sería posible terminar esta breve reseña sin hacer referencia a la enorme trascendencia que el Panteón ha tenido en la arquitectura occidental. Durante el Renacimiento, los artistas y arquitectos que volvieron los ojos hacia la antigüedad clásica no podían pasar por alto uno de los edificios más bellos y mejor conservados de Roma. Brunelleschi estudió el Panteón para la construcción de la cúpula del Duomo de Florencia, punto de partida de la arquitectura renacentista. Bramante y Miguel Ángel lo

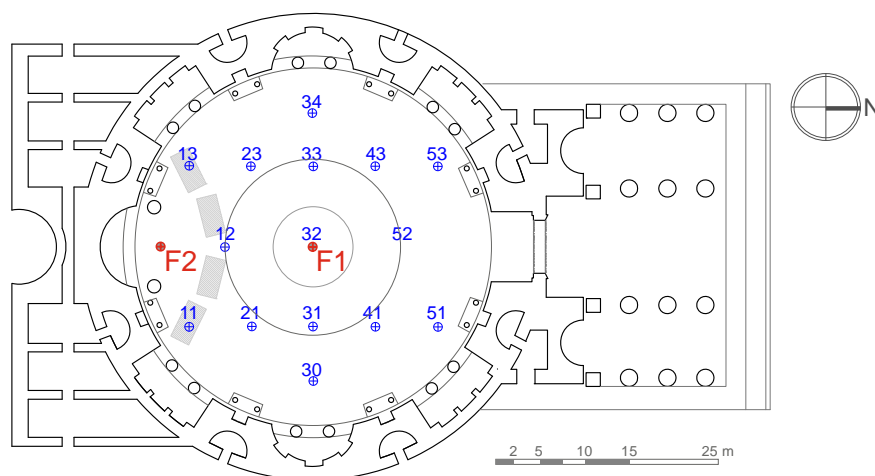


Figura 3 – Plano de planta con las posiciones de la fuente (F), de los receptores y la zona de bancos sombreada en gris.

recrearon en obras como el Templete de San Pietro en Montorio o la Basílica de San Pedro. Durante el neoclasicismo italiano, Antonio Canova proyectó un templo en Possagno, basándose en el diseño del Panteón. Su influencia se deja notar en Inglaterra y América del Norte, gracias a Andrea Palladio, que fue muy imitado hasta el siglo XIX. Muchas salas cívicas, universidades y bibliotecas reutilizan la forma de cúpula con pórtico: la iglesia del cementerio monumental de Staglieno, la Iglesia de San Francisco de Paula en Nápoles, la villa Capra de Vicenza, la *rotonda* de Thomas Jefferson de la Universidad de Virginia, la biblioteca de la Universidad de Columbia, el edificio principal de la National Gallery de Washington o la Biblioteca del Estado de Victoria en Melbourne son algunos destacados ejemplos.

### 3 Simulación Acústica

El software utilizado para la simulación es CATT-Acoustic, en su versión 9.0, con el motor de cálculo TUCT (The Universal Cone Tracer) versión 1.0 utilizando los algoritmos E y h, desarrollados por CATT para la simulación acústica y auralización de recintos. El programa fundamenta su método híbrido en un trazado de conos que incorpora un proceso aleatorio de corrección de la cola reverberante (*randomized tail-corrected cone-tracing, RTC*), combinando en él características del trazado de conos con reflexiones especulares (*specular cone-tracing*), el trazado de rayos convencional (*standard ray-tracing*) y el modelo de las fuentes imagen (*image source model, ISM*). La aplicación informática ha demostrado ser robusta para la predicción de los valores de los diferentes parámetros acústicos, así como para la creación de respuestas al impulso binaurales que puedan ser usadas en auralizaciones.

El modelo 3D del recinto (Figura 4) consta de 568 planos y tiene un volumen de 49.172 m<sup>3</sup>. En él se han utilizado dos posiciones de la fuente omnidireccional y 15 posiciones de recepción (ver Figura 3). Asimismo los materiales del recinto con sus correspondientes coeficientes de absorción y dispersión introducidos en el modelo, se han detallado en la Tabla 1.

En consonancia con el carácter académico original del trabajo, la simulación acústica se ha iniciado con el ensayo de la convergencia de la misma en función del número de rayos lanzados y el tiempo de truncado, con este fin se han estudiado cuatro simulaciones analizando los resultados de los parámetros acústicos  $T_{30}$ ,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ ,  $G$  y  $J_{LF}$ , definidos en [14], en tres de los receptores (11, 32, y 53), y posición de la fuente F1, utilizando el motor TUCT algoritmo 1 (*split-order 0*) bajo 300.000, 500.000, 1.000.000 y 2.000.000 rayos, en todos los casos con un tiempo de truncado de 18 s y considerando la absorción del aire del recinto. Las mayores diferencias de los resultados corresponden al parámetro  $J_{LF}$  y se ha constatado que el valor óptimo que incluye compromisos de estabilidad, precisión y economía de tiempo de cálculo corresponde a realizar la simulación con 500.000 rayos.

A continuación, se han analizado las diferencias encontradas utilizando la herramienta CATT y los algoritmos 1 y 2 de TUCT. Con este fin, se han calculado los valores de los parámetros citados anteriormente en los mismos receptores (11, 32, y 53) con la fuente F1, y se estudiaron sus diferencias. Los resultados obtenidos muestran que las únicas diferencias significativas (>1 JND) tuvieron lugar en el parámetro  $J_{LF}$ . Estas valoraciones han sugerido llevar a cabo el estudio con el algoritmo 1 TUCT (E) para la obtención de los parámetros acústicos omnidireccionales y TUCT (h) para los direccionales y binaurales, respectivamente.

Finalmente, en este contexto académico, se estudió la influencia de la absorción de la energía sonora por el aire en este gran recinto reverberante, que se pone de manifiesto en casi todos los parámetros

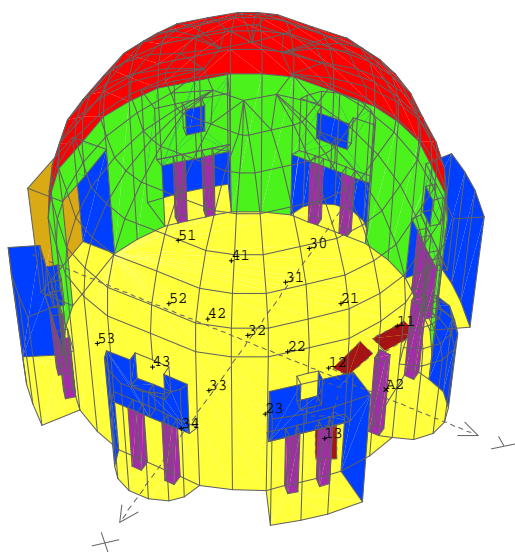


Figura 4 – Modelo 3D creado para la simulación acústica del Panteón de Roma.

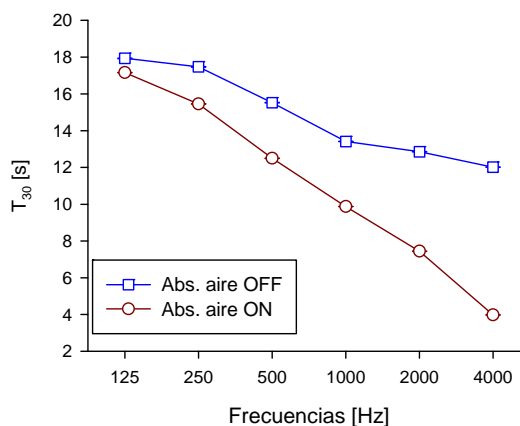


Figura 5 – Valores espectrales en bandas de octava de  $T_{30}$ , promediados espacialmente, para la fuente F1 sin considerar y considerando la absorción del aire.

acústicos, en especial a medias y altas frecuencias. Como indicador de este efecto se muestra en la Figura 5 los resultados correspondientes al tiempo de reverberación.

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

Material	Área [m <sup>2</sup> ]	Área [%]	Banda de octava (Hz)						Color (Fig. 4)
			125	250	500	1 k	2 k	4 k	
Puerta de bronce	151,8	1,6	15	11	10	7	6	6	Brown
			12	12	12	12	12	12	
Cúpula de hormigón	1742,1	18,3	6	6	7	8	9	10	Red
			20	30	40	50	50	50	
Cúpula de hormigón aligerado	673,0	7,1	6	6	7	8	9	12	Orange
			20	30	40	50	50	50	
Columnas de mármol	655,6	6,9	1	1	1	2	2	2	Purple
			20	30	40	50	55	60	
Paredes <i>rotonda</i> de mármol pintado	1883,0	19,8	1	1	1	2	2	2	Green
			15	20	25	30	30	30	
Suelo de mármol	1531,0	16,1	1	1	1	2	2	2	Yellow
			15	20	25	30	30	30	
Audiencia para visita turística	1531,0	16,1	10	21	41	65	75	71	Light Green
			30	40	50	60	70	70	
Nichos pintados	2778,9	29,2	8	9	11	12	12	12	Blue
			15	15	15	15	15	15	
Óculo	50,4	0,5	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	Black
Zona de bancos desocupado*	39,0	0,4	16	18	18	17	17	16	Dark Red
			30	40	50	60	70	80	
Zona de bancos ocupados*	39,0	0,4	19	21	30	50	60	70	Red
			30	40	50	60	70	80	

Datos de los materiales procedentes de Ref. [15] y los marcados con\* Ref. [16].

## 4 Resultados y Discusión

Se ha realizado la simulación con dos posiciones de la fuente, F1 localizada en el centro de la *rotonda* (coincidente con el receptor 32), y F2 en el extremo sur del edificio, diametralmente opuesto a la puerta de acceso a la *rotonda*, y que según la información disponible corresponde a la posición donde se sitúa el orador para ceremonias religiosas y civiles que tienen lugar en el espacio, y próxima a una reducida zona de bancos (Figura 3).

El estudio espectral de los parámetros acústicos  $T_{30}$ , EDT,  $T_S$ ,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ ,  $J_{LF}$ ,  $G$  e  $IACC_E$ , se ha realizado para las dos posiciones de la fuente mencionadas, en la situación de espacio desocupado y con ocupación turística (la audiencia ocupa toda la plana, ver Tabla 1). Además, con la fuente en posición F2, se ha considerado un tercer grado de ocupación que corresponde a la presencia de público sólo en la zona de bancos (zona sombreada en la Figura 3). Los resultados obtenidos para la configuración de la fuente en F1 no se han mostrado, si bien cabe destacar que no existen diferencias significativas en cuanto al comportamiento en frecuencia y magnitud de los mostrados en la Figura 6 para la fuente F2, a excepción de los parámetros  $J_{LF}$  e  $IACC_E$ ; diferencias éstas que analizaremos más abajo en términos de los resultados obtenidos promediados en frecuencia, en los diferentes receptores. También en relación a los resultados obtenidos con la fuente F1 se aprecia una menor dispersión espacial de los valores de los parámetros, valorada en términos del error estándar, que en el caso de F2, y un cambio de los resultados similar al obtenido con F2 cuando se considera que la audiencia ocupa toda la planta.

Con objeto de cuantificar estas diferencias en los valores de los parámetros acústicos con el grado de ocupación en las dos posiciones de la fuente, en la Tabla 2 se presentan los valores medios de las diferencias en todos los receptores y el error estándar asociado de cada parámetro (promediados espectralmente de acuerdo con ISO [14]), valorados en términos de los valores umbrales de discriminación subjetiva (JND de cada parámetro según indica ISO [14] y Martellotta [17] para  $C_{80}$  y  $T_S$  en grandes espacios reverberantes). Los datos exponen que la influencia de la presencia del público es notable en el espacio, en particular para los parámetros temporales y con escasa dispersión espacial. No se presentan las diferencias obtenidas para el supuesto de ocupación de bancos debido a que apenas existen variaciones entre estos y los valores medios de los parámetros obtenidos con el templo desocupado (ver Figura 6).

En cuanto a los resultados de la Figura 6 (simulados con F2), se muestra el comportamiento espectral de los parámetros estudiados correspondiente a tres situaciones: desocupado, ocupación total de la planta (turística) y ocupación parcial (solo los bancos). Nótese cómo la ocupación de la escasa zona de bancos no supone un cambio sustancial en las propiedades acústicas del espacio con respecto al estado desocupado.

También en relación a la Figura 6 cabe destacar cómo los parámetros omnidireccionales presentan muy escasa dispersión espacial (análogos resultados se han obtenido en F1, no mostrados), en especial para los omnidireccionales temporales,  $T_{30}$ , EDT,  $T_S$ , siendo en particular para  $T_{30}$  la dispersión del orden del milisegundo. Las mayores dispersiones espaciales en los parámetros omnidireccionales se

Tabla 2. Diferencias medias en términos de JND para cada parámetro, entre espacio desocupado y con ocupación turística.

		$T_{30}$	EDT	$T_S$	$C_{80}$	$D_{50}$	$J_{LF}$	$G$	$IACC_E$
F1	Media	10,17	9,80	6,19	2,12	2,44	0,50	3,96	1,04
	Err. std.	0,01	0,06	0,07	0,07	0,15	0,12	0,08	0,18
F2	Media	10,21	9,94	5,97	1,77	1,62	0,48	3,80	0,69
	Err. std.	0,01	0,03	0,09	0,10	0,21	0,10	0,11	0,13



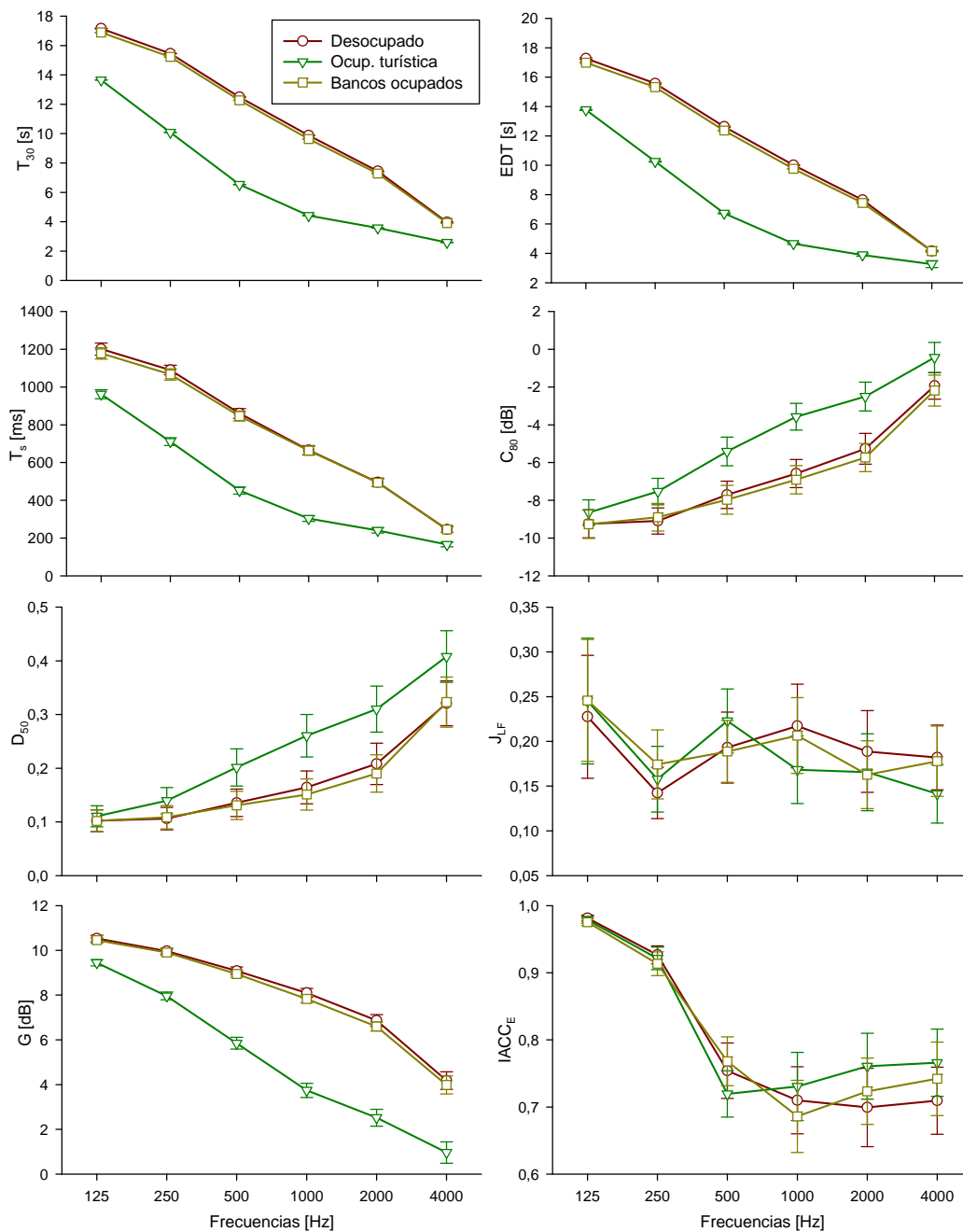


Figura 6 – Valores espectrales de los diferentes parámetros acústicos estudiados, para la posición de fuente F2, con los diferentes grados de ocupación.

alcanzan para  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ . Merece la pena resaltar los bajos valores del parámetro relacionado con la inteligibilidad de la palabra  $D_{50}$  en el estado desocupado, con valor único en el espacio 0,12 (inteligibilidad *mala*) y que con la ocupación pasar a ser 0,22 (inteligibilidad *pobre*). Aunque la simulación proporciona resultados del parámetro STI no se han aportado al no tener datos experimentales del ruido de fondo en el espacio.

Se observan notables y perceptibles variaciones espaciales en el parámetro direccional  $J_{LF}$  y el binaural  $IACC_E$  para las dos posiciones de la fuente. Además para la posición central de la fuente (F1) se

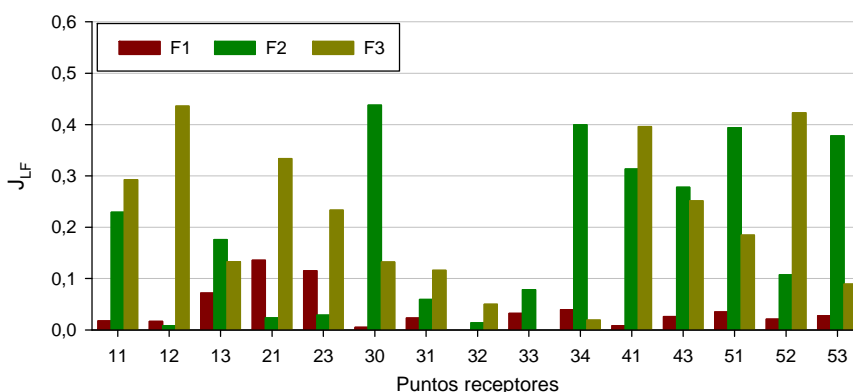


Figura 7 – Valores promedio espectral de  $J_{LF}$  en los diferentes puntos de recepción para las tres posiciones de la fuente en estado desocupado.

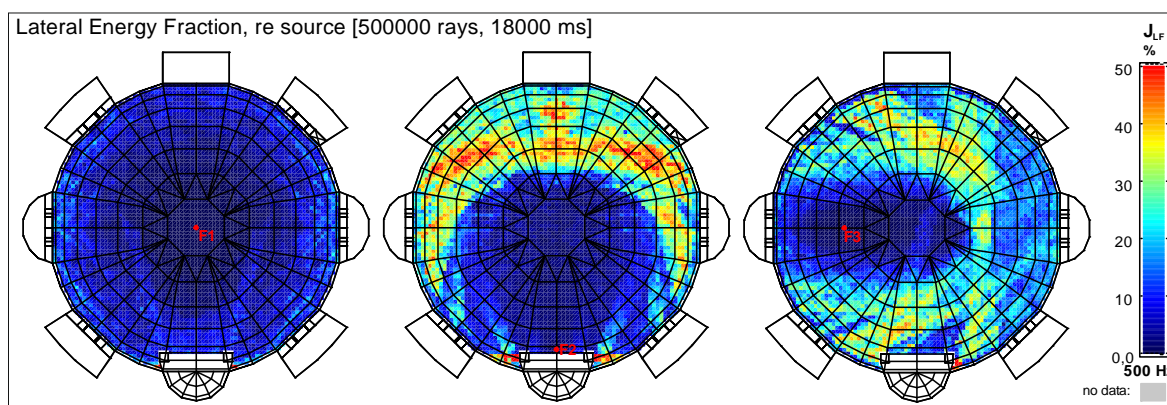


Figura 8 – Mapeados de  $J_{LF}$  a 500 Hz en las tres posiciones de la fuente F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha), en estado desocupado.

observaron valores muy pequeños de  $J_{LF}$  aparentemente relacionados con el hecho de que en esa posición predominan las reflexiones radiales y escasean las laterales cuando los receptores miran a la fuente. Con objeto de poner de manifiesto estos aspectos, se colocó una tercera fuente en la posición del receptor 33 de la Figura 3. En la Figura 7 se muestran los resultados de  $J_{LF}$  (promediados en las bandas de 125-1000 Hz [14]) para las tres posiciones de la fuente. Adviértase como se pone de manifiesto lo que acabamos de comentar respecto a la dispersión y a las reflexiones radiales para F1. En la posición F2 los valores del parámetro se incrementan notablemente, en particular para los receptores próximos a las paredes laterales (11, 13, 30, 34, 41, 43, 51, y 53) pero no en los ubicados en el diámetro donde está la fuente. Este efecto queda corroborado al observar los valores para la posición F3: en esta situación desciende la energía lateral precoz en los receptores 30, 31, 32 y 34, respectivamente alineados en el diámetro de la fuente. Estos efectos también se pueden apreciar al hacer el mapeado del parámetro sobre la zona de audiencia como se muestra en la Figura 8.

Como complemento a todo lo aportado en relación a la simulación realizada en este emblemático espacio arquitectónico, en la Figura 9 se muestran la primera parte (500 ms) de la respuesta al impulso binaural proporcionada por el software en el receptor 52 con la fuente F2, con ocupación turística correspondiente. Esta y otras se han utilizado para recrear la percepción sonora en el recinto mediante auralizaciones de mensajes orales y musicales.

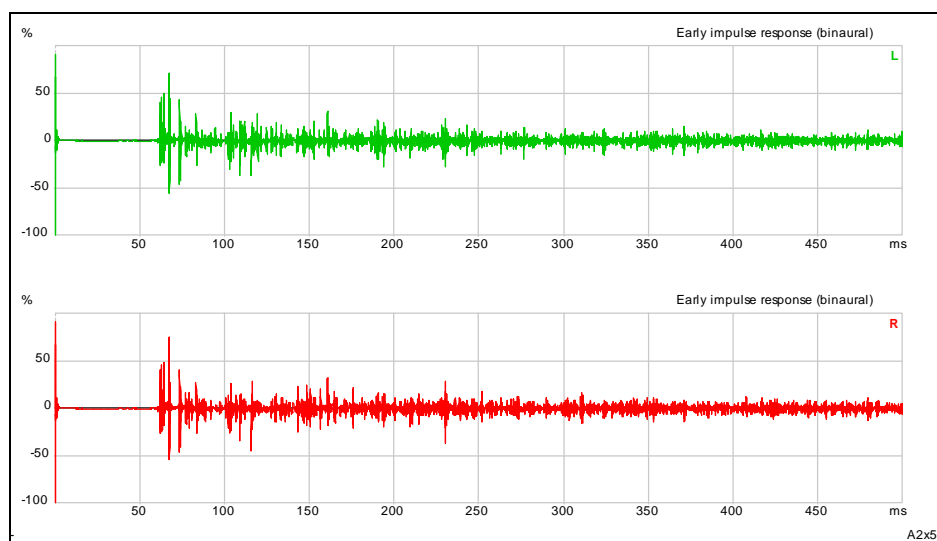


Figura 9 – Parte inicial de la respuesta al impulso binaural para el receptor 52, con la fuente F2 y configuración de ocupación turística.

## 5 Conclusiones

Que conozcamos no se han publicado medidas acústicas objetivas en este emblemático espacio y por lo tanto la simulación no ha podido validarse por contraste con resultados reales, no obstante los resultados virtuales alcanzados en este trabajo han puesto de manifiesto comportamientos acústicos esperados del diseño cilíndrico con paredes reflectantes. Los tiempos de reverberación son elevados (a frecuencias medias, del orden de 11 s en estado desocupado, y 5,5 s con ocupación turística) como corresponde a gran volumen en planta circular con cúpula, disminuyendo con el grado de ocupación donde se aprecian disminuciones del orden de diez veces su valor umbral diferencial.

Los parámetros omnidireccionales no muestran variación en magnitud al cambiar la posición de la fuente excepto  $C_{80}$  un leve cambio, como consecuencia de la redistribución de la energía precoz omnidireccional relacionada con la simetría radial y en general hay menos variaciones espaciales en los resultados de los parámetros para la fuente en posición F1 que en F2. Un notable cambio en magnitud si es obtenido en los parámetros direccionales relacionados con la impresión espacial y que valoran la energía lateral precoz, desapareciendo estas aportaciones cuando la fuente se sitúa en el centro de la *rotonda* por la imposibilidad de llegar a los receptores energía acústica lateral precoz como consecuencia de la simetría central. Se han cuantificado las variaciones de los parámetros acústicos con la presencia de público en visita turística respecto al estado desocupado obteniéndose cambios notoriamente perceptibles en todos los parámetros omnidireccionales, si bien en los parámetros direccionales y binaurales este cambio es más moderado.

### Anexo de términos arquitectónicos:

*Períptero*: Se dice del templo clásico rodeado por columnas que deja paso entre estas y el muro.

*Cella*: Espacio interior, que constituye el núcleo de la construcción en los templos griegos y romanos, y comunica por uno de sus lados con el pronaos o pórtico.

*Rotonda*: Templo, edificio o sala de planta circular.

*Pronaos*: En los templos antiguos, pórtico que había delante del santuario o cella.

*Octóstilo*: Que tiene ocho columnas.

*Exedra*: Construcción descubierta, de planta semicircular, con asientos fijos en la parte interior de la curva, y respaldos también permanentes.

*Edículo*: Edificio pequeño. Templete que sirve de tabernáculo, relicario, etc.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado por los autores con el equipo del proyecto BIA2010-20523, financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación español.

## Referencias

- [1] San Martín, R.; Arana, M. Predicted and experimental results of acoustic parameters in the new Symphony Hall in Pamplona, Spain. *Appl. Acoust.* 67, 2006, 1-14.
- [2] Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 126, 2009, 1207-1218.
- [3] Martellotta, F. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *J. Acoust. Soc. Am.* 126, 2009, 1175-1186.
- [4] El Khateeb, A.; Refat, M. Sounds from the past: the acoustics of Sultan Hassan Mosque and Madrasa. *Build. Acoust.* 14, 2007, 109-132.
- [5] Vassilantonopoulos, S. L.; Mourjopoulos, J. N. A study of ancient Greek and Roman theater acoustics. *Acta. Acust. Acust.* 89, 2003, 123-136.
- [6] Martellotta, F.; Della Crociata, S.; D'Alba, M. On site validation of sound absorption measurements of occupied pews. *Appl. Acoust.* 72, 2011, 923-933.
- [7] Summers, J. E.; Torres, R. R.; Shimizu, Y. Statistical-acoustics models of energy decay in systems of coupled rooms and their relation to geometrical acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.* 116(2), 2004, 958-969.
- [8] Martellotta, F. Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches. *J. Sound Vib.* 317, 2008, 378-399.
- [9] Garrido, J. A.; Zamarreño, T.; Girón, S. Virtual models for the prediction of acoustic fields of Manuel de Falla Auditorium in Granada, Spain. *Appl. Acoust.* 73, 2012, 921-935.
- [10] <http://grupo.us.es/gteacus/> (visitada el 10/07/2012).
- [11] <http://institucional.us.es/acuscate/> (visitada el 10/07/2012).
- [12] Giménez, A.; Segura, J.; Cibrián, R.; Cerdá, S.; Barba, A.; Montell, R.; Planells, A.; Navasquillo, J.; Romero, J.; Ponz, S.; Lacatis, R.; Fernández, M.; Miralles, J. L. Estudio acústico de edificios del patrimonio histórico arquitectónico en entornos de realidad virtual. Dificultades y ventajas. *Proceedings of TecniAcústica2011*, Cáceres 26-28 de octubre de 2011, (CD-ROM) ISBN: 978-84-87985- 20-1.
- [13] Montero-Fernández, F. J. *El Panteón: Imagen, tiempo y espacio. Proyecto y patrimonio*, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla, 2004.
- [14] 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.
- [15] Vorländer, M. *Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*, Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [16] Cox, T. J.; D'Antonio, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application*, Spon, London, 2004.
- [17] Martellotta, F. The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *J. Acoust. Soc. Am.* 128(2), 2010, 654-663.