



## **SIMULACIÓN ACÚSTICA DE AUDITORIOS Y EDIFICIOS PATRIMONIALES. INTEGRACIÓN CON ENTORNOS DE REALIDAD VIRTUAL**

Reference PACS: 43.55.Ka

**Montell, Radha<sup>1</sup>; Segura, Jaume<sup>2</sup>; Planells, Ana<sup>1</sup>; Barba, Arturo<sup>1</sup>; Cerdá, Salvador<sup>3</sup>;  
Cibrián, Rosa<sup>4</sup>; Lacatis, Radu<sup>1</sup>; Giménez, Alicia<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> E.T.S.I. Industriales, Univ. Politécnica de Valencia (UPV), Camino de Vera s/n, Valencia -SPAIN  
[radmonse@upvnet.es](mailto:radmonse@upvnet.es), [agimenez@fis.upv.es](mailto:agimenez@fis.upv.es), [arturo@arturobarba.com](mailto:arturo@arturobarba.com), [rala1@doctor.upv.es](mailto:rala1@doctor.upv.es)

<sup>2</sup> IRTIC, Universitat de València, Polígon de la Coma s/n, Valencia, SPAIN [jsegura@uv.es](mailto:jsegura@uv.es)

<sup>3</sup> Departamento Matemática Aplicada, UPV, [salcerjo@mat.upv.es](mailto:salcerjo@mat.upv.es)

<sup>4</sup> Facultad de Medicina, Universitat de València, [rosa.m.cibrian@uv.es](mailto:rosa.m.cibrian@uv.es)

### **ABSTRACT**

The binding of the concepts of virtual reality and acoustics simulation has generated, in recent years, a rather broad field of work. In this direction, we present the research that we are developing in the framework of the project R&D&I BIA2008-05485. Graphic and acoustic simulations have been computed from several specific environments grouped according to their characteristics as Auditoriums and Patrimonial Buildings. A prototype for the navigation of virtual environments has been tested with the graphical and acoustical models in two different virtual reality environments to obtain a set of subjective assessments.

### **RESUMEN**

La unión de los conceptos de realidad virtual y simulación acústica ha generado en los últimos años un amplio campo de trabajo. En esta línea, presentamos la investigación que estamos desarrollando en el marco del proyecto de investigación (I+D+I), BIA2008-05485. Se ha realizado la simulación visual y acústica de diferentes entornos que por sus diferentes características hemos agrupado en Auditorios y Edificios Patrimoniales. Con el modelo gráfico visual y acústico se ha testado un prototipo de navegación de entornos virtuales para la obtención de respuestas subjetivas en diferentes tecnologías inmersivas.

### **1. INTRODUCCIÓN**

El concepto de simulación acústica apareció ya en los tempranos años 30. Spandöck [1] creó el primer sistema de modelado del campo sonoro, basado en señales ultrasónicas, en un modelo a escala y un equipo de grabación. Desde estos primeros experimentos, hasta los modernos programas de auralización que se utilizan hoy en día, numerosos investigadores han trabajado con la idea de capturar la respuesta sonora de un entorno y extraer de ella los parámetros esenciales que permitan conocer la descripción numérica del entorno y cómo podría percibirse la señal sonora en cualquier punto del recinto.

El trabajo que aquí se expone se enmarca en el proyecto BIA2008-05485, en el cual se plantea el estudio acústico de edificios históricos y patrimoniales en los que la calidad de audición es un factor preferente, añadido a su valor histórico. Este trabajo se basa en la utilización de la metodología creada en el proyecto anterior (BIA2003-09306-C04) pero introduciendo la aplicación de técnicas de realidad virtual y auralización.

En el proyecto mencionado se elaboró una metodología de estudio objetivo-subjetivo en salas de concierto, en la cual se obtuvo el diseño y se comprobó la fiabilidad y validez de una

encuesta para recoger las muestras subjetivas [2]. La motivación para aplicar técnicas de simulación y de realidad virtual parte de la idea de poder recoger las muestras subjetivas en un entorno controlado. Además, el trabajo se basa en la premisa de que, en el proceso de diseño, mejora o rehabilitación de un edificio destinado a la audición musical o del habla, resulta de vital importancia poder conocer la respuesta final del oyente antes de realizar la obra misma, es decir, que un edificio reúna las condiciones exigibles por la audiencia para la actividad a desarrollar [3].

El principal objetivo planteado en este trabajo es obtener una integración de auralización y simulación gráfica mediante la cual, con la utilización de un entorno de realidad virtual inmersivo, se crea una plataforma de recogida de información subjetiva donde la característica básica es el control sobre el entorno y la reproducibilidad. Los recintos estudiados se pueden dividir en dos tipos: auditorios y edificios patrimoniales. La motivación para estudiar estos tipos de entornos proviene de sus marcadas diferencias tanto en su finalidad de uso como en su geometría o características arquitectónicas y, por consiguiente, su comportamiento acústico. Dentro del primer grupo, se presenta el estudio con las salas: Auditorio de Torrent, Auditorio de Castellón y Palau de les Arts Reina Sofia. Y en el segundo grupo se presenta: la Capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia y la Lonja de los Mercaderes de Valencia.

## 2. METODOLOGÍA

El trabajo realizado puede dividirse en tres líneas diferenciadas: la toma de medidas acústicas en el entorno a estudiar, la simulación acústica, para la cual se utilizan los resultados obtenidos en las medidas *in situ*, y la simulación visual. Estas fases pueden apreciarse en el esquema mostrado en la Figura 1.

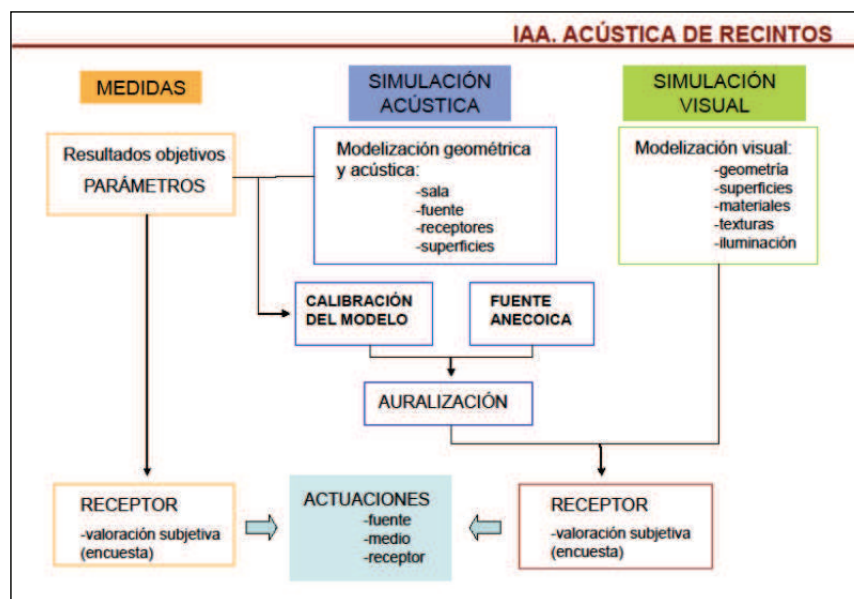


Figura 1. Esquema de las fases del trabajo.

Las medidas se realizaron siguiendo la norma ISO 3382 [4] [5] y el protocolo validado. Cabe destacar que el número de posiciones se sobremuestreó para obtener medidas más fiables y una base de datos más amplia. Asimismo, se establecieron diferentes posiciones de fuente emulando los posibles orígenes sonoros.

Para realizar la simulación acústica, se parte de un modelo geométrico de la sala, construido a partir de los planos arquitectónicos de la sala y siguiendo los requerimientos necesarios para que esta simulación sea válida. Entre éstos podemos encontrar: modelar solo las superficies que puedan ser accesibles por el modelo, tener en cuenta el orden de las normales para designar la cara visible, definir las intersecciones vértices-aristas para evitar dejar huecos y evitar modelar detalles que puedan ser emulados con el ajuste de la difusión. El modelo geométrico se ha calibrado ajustando los coeficientes de absorción y de difusión a partir de los

valores  $T_{30}$  promediados espacialmente y manteniendo el criterio que los valores simulados y los medidos no difieran más de 1 JND (*Just Noticeable Difference*). A partir del modelo calibrado, se ha calculado la respuesta impulsiva de la sala (RIR) en las posiciones elegidas para realizar el estudio subjetivo y, convolucionando ésta con una señal anecoica, hemos obtenido las diferentes auralizaciones de la sala. Para el cálculo de las respuestas impulsivas y la auralización se ha utilizado el programa *CATT-Acoustics* [6].

Paralelamente, se ha realizado el modelo gráfico visual a partir de planos arquitectónicos (estructura de la sala) y visitas a las salas (detalles y texturización). En este caso, se ha intentado modelar tantos detalles como fuera posible para obtener una representación lo más ajustada a la realidad. Sobre el modelo, se han aplicado las texturas, creadas previamente a partir de fotografías realizadas en la sala y post-procesadas. Éstas, permiten darle un aspecto realista a las superficies del entorno y recrear aquellos detalles que no han podido ser modelados geoméricamente. Finalmente, se ha ajustado la iluminación obteniendo el efecto deseado.

El producto obtenido en las dos últimas líneas, las auralizaciones y el modelo gráfico se combinan mediante la utilización de una herramienta desarrollada que permite la navegación por el entorno virtual y la reproducción sonora correspondiente a la posición. Este trabajo se presentó en [7].

Para proporcionar al usuario una sensación de inmersión, las pruebas se han realizado en entornos de realidad virtual inmersivos. Las instalaciones utilizadas en el estudio han sido el CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) de la Universitat de València y la Powerwall de la Universitat Politècnica de València. El CAVE es un espacio compuesto por cuatro superficies retroproyectadas (tres paredes y suelo). En éstas, se proyectan imágenes estereoscópicas que, con la ayuda de unas gafas polarizadas sincronizadas con los proyectores, son percibidas como 3D. Además de las gafas, el usuario lleva unos sensores que captan sus movimientos en la sala y permiten al ordenador actualizar la imagen proyectada de acuerdo al nuevo punto de vista. En esta entorno inmersivo, el sonido se reproduce mediante auriculares. Por otro lado, la Powerwall consiste en una gran pantalla retroproyectada de alta definición (2x5 metros) que, al igual que el CAVE, emite imágenes estereoscópicas que se visualizan con la ayuda de gafas polarizadas sincronizadas con los proyectores. La Powerwall se encuentra en una sala con capacidad para 25 personas situadas en una grada de 4 filas. Actualmente, ésta dispone de un sistema de altavoces 5.1 para emitir sonido espacial, aunque está prevista la migración a auriculares para minimizar el efecto de la sala sobre el sonido reproducido y reducir problemas de aislamiento.

### 3. ENTORNOS

En este apartado se presentan los productos generados en cada una de las fases de la metodología. En primer lugar, se realiza una breve descripción de las principales características de las salas diferenciándolas en dos grupos según su finalidad de uso: Auditorios y Edificios Patrimoniales. En segundo lugar, se presentan los detalles técnicos de los entornos junto con sus planimetrías. Seguidamente, se muestran los modelos geoméricos tanto visuales como acústicos y su texturización. Finalmente, se presentan imágenes de los entornos de realidad virtual dónde se han realizado los ensayos de recogida de muestras subjetivas de los entornos presentados.

#### 3.1. Auditorios

Este grupo de entornos se caracteriza principalmente por tener un diseño orientado a la audición. En la mayoría de casos, contando con un diseño acústico previo a su construcción.

Comparando las características de los modelos construidos, este grupo se caracteriza por tener, generalmente, una geometría más simple. Suelen ser de más reciente construcción por lo que la definición de los materiales del modelo acústico conlleva menos trabajo. En estos entornos, los materiales de construcción son conocidos, por lo que los valores reflejados en las tablas de materiales encontrados en la literatura suelen producir resultados bastante ajustados.

En este grupo de entornos se hace patente la utilidad de las técnicas de simulación acústica ya que permiten realizar cambios en el modelo simulado y conocer su resultado antes de su realización.

Los entornos presentados correspondientes a este grupo son: el auditorio de Castellón, el auditorio de Torrent y el Palau de les Arts Reina Sofía.

### 3.2. Edificios patrimoniales

Este segundo grupo de entornos difiere principalmente con el anterior en su finalidad de uso. Mientras que el primer grupo de salas son entornos donde prima la comunicación y por tanto es necesaria una buena audición, en este segundo grupo, la finalidad de uso que podemos encontrar es variada. Actualmente, la motivación para estudiar la acústica en estos recintos proviene del creciente interés en aprovechar éstos para múltiples actividades, entre las cuales se encuentran los conciertos.

Respecto a las características geométricas de los modelos construidos, estos suelen tener un mayor número de superficies que los modelos del primer grupo. En cuanto a los materiales, aunque se sabe qué tipo de materiales forman la sala, es una tarea muy difícil obtener los coeficientes de absorción y difusión y, por ello, suelen ser fijados mediante un proceso iterativo con complejidad creciente con el número de materiales.

En este grupo de entornos, las técnicas de simulación tanto acústicas como gráficas junto con un conocimiento histórico de las salas permitirían la retrospección y, de esta forma, conocer y escuchar los sonidos que se escucharían en estos recintos en distintas épocas y fases de su construcción o remodelación.

Los entornos presentados correspondientes a este grupo son: la Capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia y la Lonja de los Mercaderes.

### 3.3. Datos salas

En la Tabla 1 pueden verse las características de los auditorios y los edificios patrimoniales presentados y en la Figura se muestran las características de la forma de las salas mediante las secciones y las plantas, en las que se indican, además, los puntos de medida establecidos en cada sala.

SALA	Año construcción	Volumen	Capacidad (personas)	Num. Receptores medidos	RT
Auditorio Castellón	2004	14850m <sup>3</sup>	1200	51	2.43s
Auditorio Torrent	1997	6430m <sup>3</sup>	606	48	1.87s
Palau de les Arts Reina Sofía	2005	39125m <sup>3</sup>	1.412	151 (47 en platea + 104 en palcos)	2.45s
Capilla Santo Cáliz	1356 - 1369	3205m <sup>3</sup>	150	8	2.47s
Lonja de los Mercaderes	1482 - 1548	13250m <sup>3</sup>	500/600	16	3.1s

Tabla 1. Características auditorios

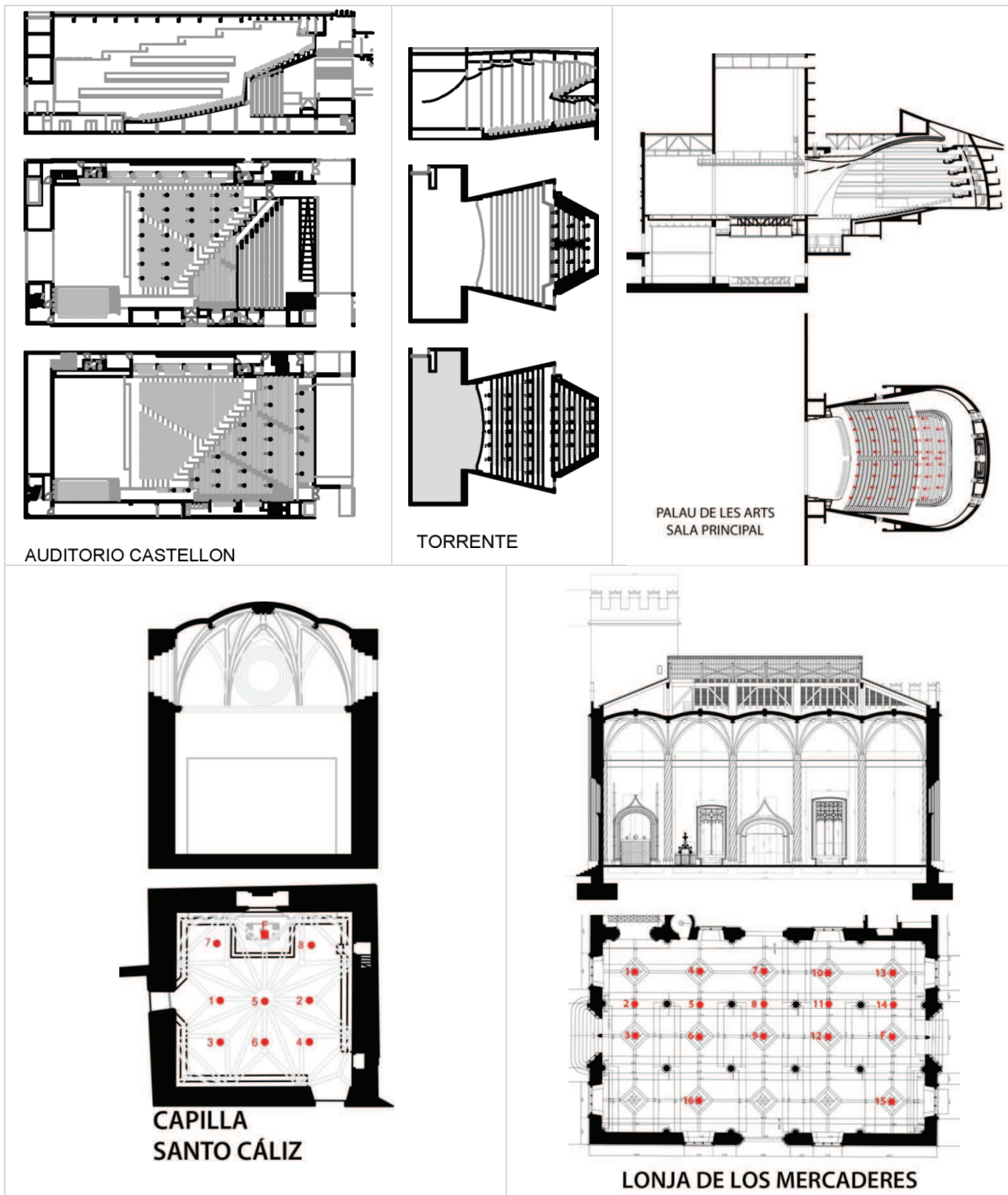


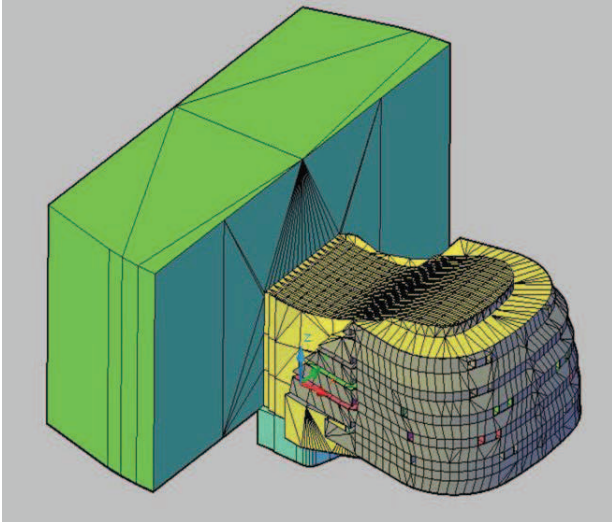
Figura 2. Secciones y plantas con puntos de medida

### 3.4. Modelado geométrico

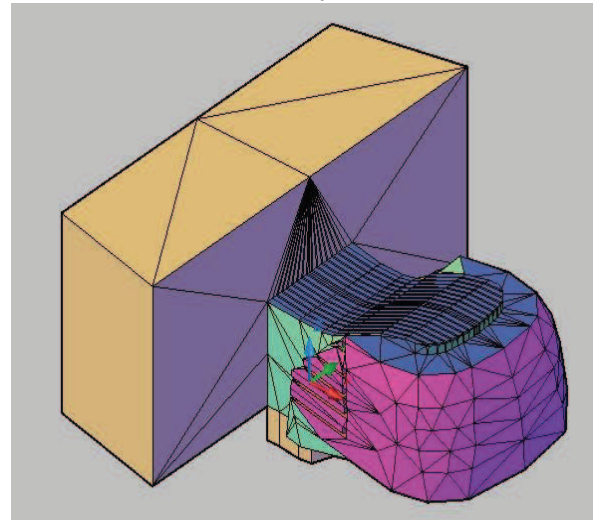
En la Figura 3 se presentan, a modo de ejemplo, las imágenes correspondientes a los modelos geométricos de cada una de las salas presentadas. De cada sala, se muestra el modelo geométrico visual, donde se puede apreciar la complejidad de las formas y que se utilizará posteriormente en la texturización; y el modelo geométrico acústico, donde se han simplificado las formas y se han aplicado los requerimientos que debe tener un modelo acústico. En la Tabla 2, puede observarse el número de polígonos que han sido necesarios en su construcción.



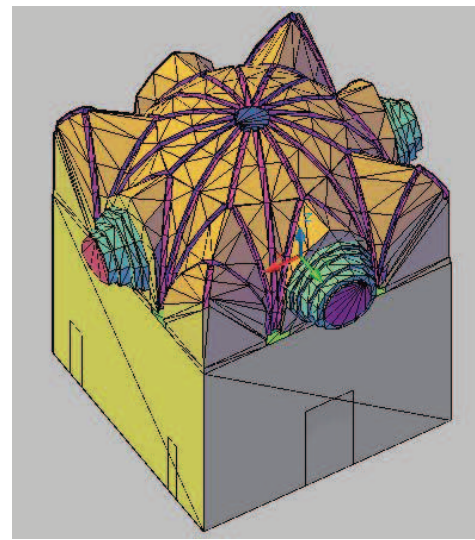
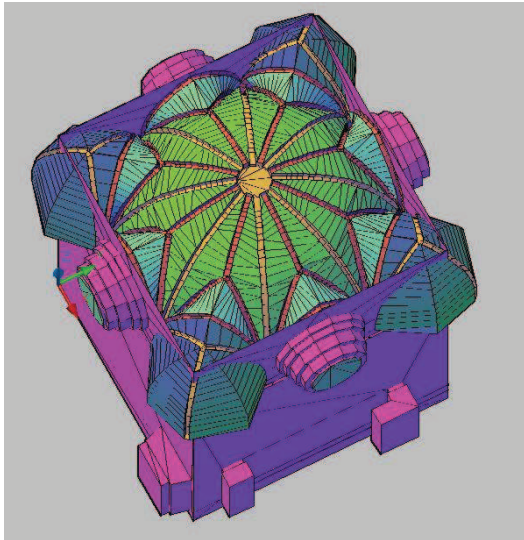
Modelo complejo



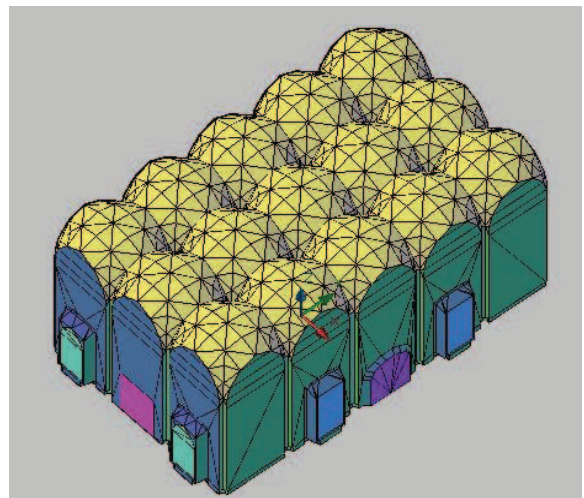
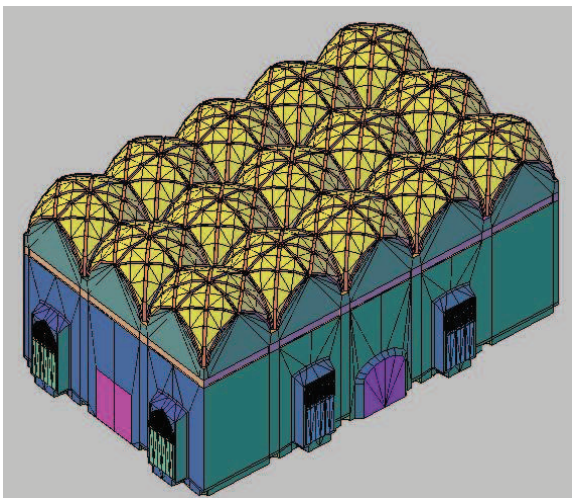
Modelo simplificado



PALAU DE LES ARTS REINA SOFÍA



CAPILLA SANTO CÁLIZ



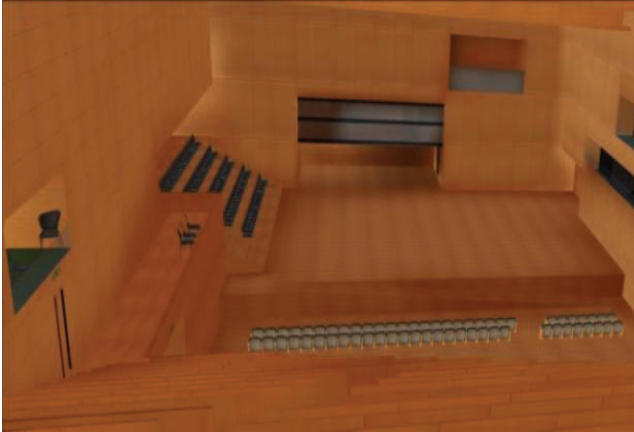
LONJA DE LOS MERCADERES

Figura 3. Modelos geométricos visuales y acústicos de las salas para las cuales se han construido los dos modelos.

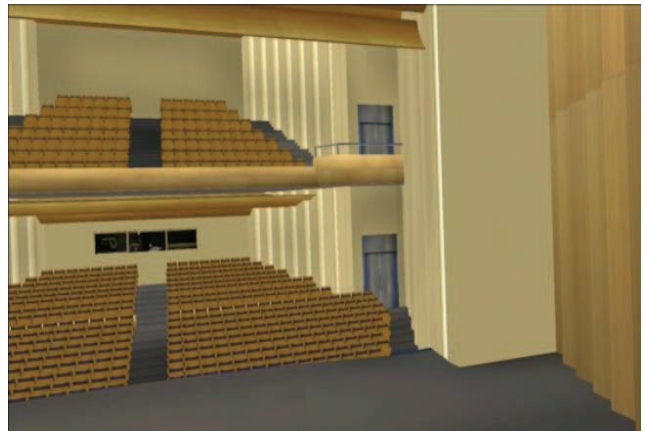
SALA	Núm. polígonos modelo gráfico	Núm. polígonos modelo acústico
Palau de les Arts Reina Sofía	6520	2272
Capilla Santo Cáliz	8669	2372
Lonja de los Mercaderes	18262	3875

Tabla 2. Número de polígonos correspondientes al modelo visual y al modelo acústico

### 3.5. Texturización



AUDITORI DE CASTELLÓ



AUDITORI DE TORRENT



PALAU DE LES ARTS REINA SOFÍA



CAPILLA SANTO CÁLIZ





LONJA

#### 4.6. Entornos de realidad virtual



#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la investigación en desarrollo dentro del marco del proyecto de investigación (I+D+I), BIA2008-05485. Se ha presentado la metodología establecida, dentro de la cual se realiza el modelado gráfico visual y acústico de las salas, la simulación acústica y la auralización. Se ha seleccionado un conjunto de entornos agrupados por sus características



en Auditorios y Edificios Patrimoniales. Se ha testado el prototipo de navegación de entornos virtuales y se ha obtenido un conjunto de respuestas subjetivas que se utilizarán para validar la equivalencia con las obtenidas *in situ*. Se han utilizado diferentes tecnologías inmersivas de realidad virtual: el CAVE y el Powerwall.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el proyecto de investigación BIA2008-05485.

## 6. REFERENCIAS

- [1] F. Spandöck, «Akustische Modellversuche,» *Annalen der Physik*, vol. 412, nº 4, 1934.
- [2] A. Giménez, R. M. Cibrián, S. Girón, T. Zamarreño, J. J. Sendra, A. Vela y F. Daumal, «Questionnaire Survey to Qualify the Acoustics of Spanish Concert Halls». *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, vol. 97, 2011.
- [3] J. Segura, «¿Cómo suena una sala donde se realizan actuaciones musicales?. Acústica virtual: una herramienta de evaluación acústica.,» de *Congreso Internacional de Investigación en Música de Valencia (ISEACV)*, 2010.
- [4] ISO3382-1:2009, *Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part1: Performance spaces.*, 2009.
- [5] ISO3382-2:2008, *Acústica: Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: tiempo de reverberación en recintos ordinarios.*, Asociación Española de Normalización y Certificación (AECOR), 2008.
- [6] CATT. Acoustics, «<http://www.catt.se/>,».
- [7] R. Montell, J. Segura, A. Giménez, A. Planells, A. Barba, S. Cerdá, R. Lacatis, L. Vera y B. Martínez, «Simulación acústica y gráfica. Prototipo de navegación entornos virtuales,» de *Actas del 41º Congreso Nacional de Acústica- 6º Congreso Ibérico de Acústica. Tecniacústica.*, León, 2010.