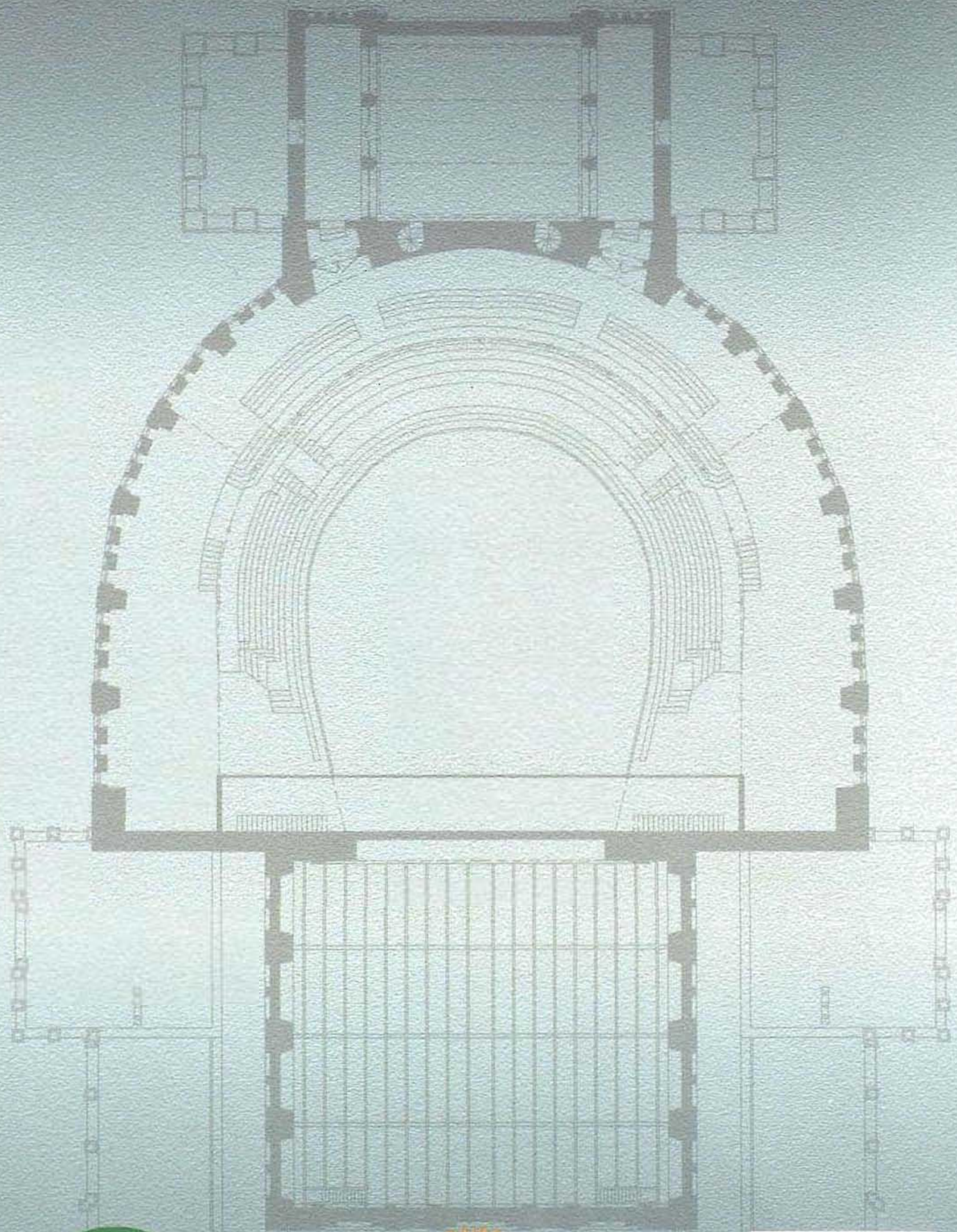
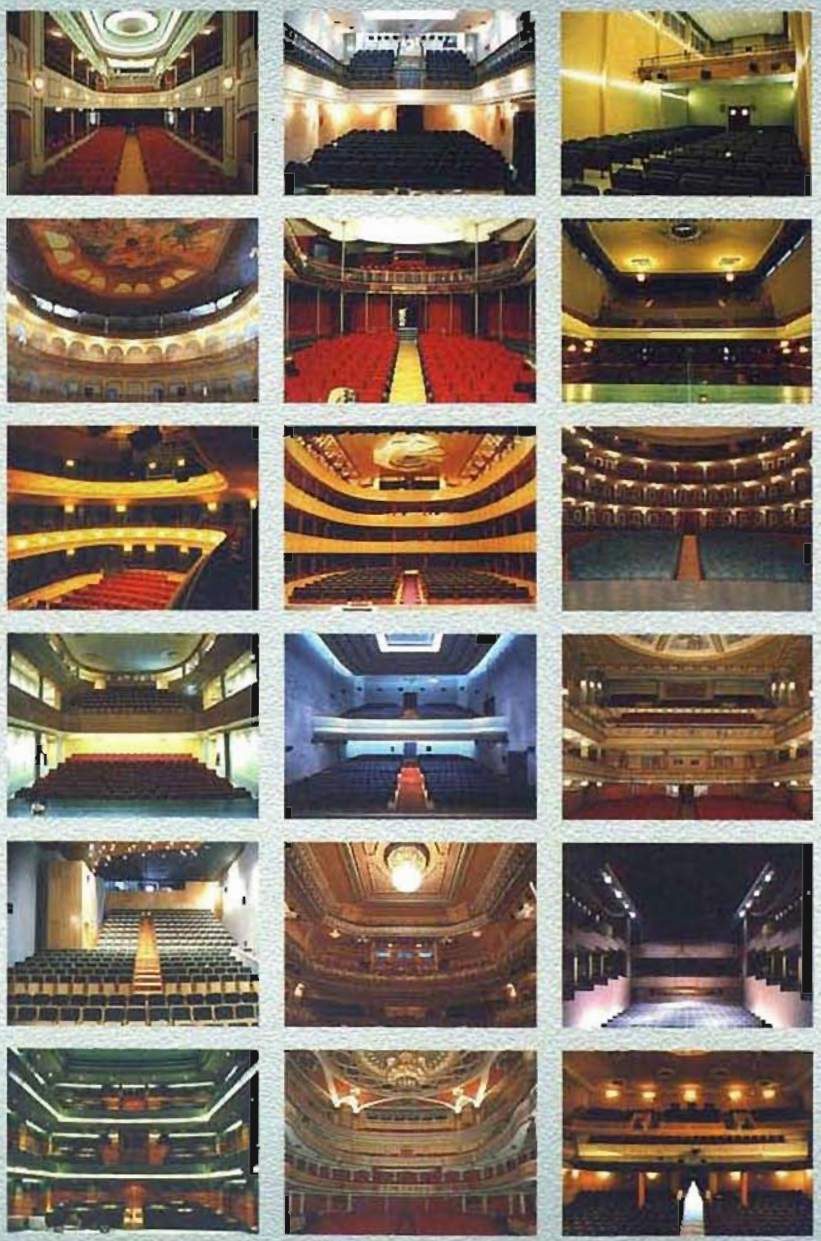


JUNTA DE ANDALUCIA

SECRETARIADO DE PUBLICACIONES

ISBN 978-84-8095-451-8

ACÚSTICA Y REHABILITACIÓN EN TEATROS DE ANDALUCÍA



ÁNGEL LUIS LEÓN RODRÍGUEZ
JUAN JOSÉ SENDRA SALAS
JAIME NAVARRO CASAS
TEÓFILO ZAMARREÑO GARCÍA

Ángel Luis León Rodríguez nació en Sevilla en 1971. Es doctor arquitecto y profesor de Acondicionamiento e Instalaciones en la E.T.S. de Arquitectura de Sevilla desde 1996, año en el que finalizó sus estudios. Es componente del Grupo de Investigación de *Iluminación, Acústica y Rehabilitación* del Plan Andaluz de Investigación y ha participado en distintos proyectos de investigación, tanto nacionales como internacionales. Desde 1996 ha trabajado en el acondicionamiento acústico de los teatros del Plan de Rehabilitación de Teatros de Andalucía, en colaboración con el resto de los autores, así como en otros tipos de salas y recintos. Es autor de diversas publicaciones en el campo de la acústica de salas.

Juan José Sendra Salas es doctor arquitecto y catedrático de Construcciones Arquitectónicas desde 1995. Ha sido Subdirector General de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. En la actualidad es Director de Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción (IUCC) de la Universidad de Sevilla, además de miembro de la Comisión de Investigación de dicha Universidad. Coordina, junto al profesor Navarro, el Programa de Doctorado "Teoría y Práctica de la Rehabilitación Arquitectónica y Urbana", programa que ha obtenido la Mención de Calidad del Ministerio de Educación para el curso 2004-05. Fue responsable, junto al profesor Navarro, del equipo que realizó las labores de consultoría acústica del Plan de Rehabilitación de Teatros de Andalucía. En la actualidad dirige, junto al profesor Navarro, los trabajos en las líneas de investigación sobre acústica e iluminación del IUCC.

Jaime Navarro Casas es doctor arquitecto y catedrático de Construcciones Arquitectónicas desde 1987. Ha sido Director del Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción (I.U.C.C.) de la Universidad de Sevilla, además de miembro de la Comisión de Investigación de dicha Universidad. En la actualidad es Director de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. Coordina, junto al profesor Sendra, el Programa de Doctorado "Teoría y Práctica de la Rehabilitación Arquitectónica y Urbana", programa que ha obtenido la Mención de Calidad del Ministerio de Educación para el curso 2004-05. Fue responsable, junto al profesor Sendra, del equipo que realizó las labores de consultoría acústica del Plan de Rehabilitación de Teatros de Andalucía. En la actualidad dirige, junto al profesor Sendra, los trabajos en las líneas de investigación sobre acústica e iluminación del IUCC.

Teófilo Zamarreño García es doctor en Física y Profesor Titular de Física Aplicada desde 1989. Ha sido director del departamento de Física Aplicada de la Universidad de Sevilla. Ha trabajado en Simulación de Circuitos Electrónicos, Mecánica Analítica y, posteriormente, en Acústica Arquitectónica. Ha actuado como responsable de la unidad de laboratorio y medidas en el Programa de Rehabilitación de Teatros antes mencionado. En la actualidad las líneas de trabajo se centran en la caracterización teórica y experimental del campo acústico en función de la tipología del recinto, técnicas de simulación aplicadas a la acústica de salas, evaluación *in situ* de propiedades acústicas de materiales y aplicación de técnicas intensimétricas en la edificación. Es autor de diversas publicaciones sobre acústica de salas en revistas nacionales e internacionales especializadas y vocal del Consejo Rector de la Sociedad Española de Acústica.

ACÚSTICA Y REHABILITACIÓN EN TEATROS DE ANDALUCÍA

ÁNGEL LUIS LEÓN RODRÍGUEZ
JUAN JOSÉ SENDRA SALAS
JAIME NAVARRO CASAS
TEÓFILO ZAMARREÑO GARCÍA

JUNTA DE ANDALUCIA
CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES
Dirección General de Planificación
SEVILLA

ACÚSTICA Y REHABILITACIÓN EN TEATROS DE ANDALUCÍA

JUNTA DE ANDALUCIA
Consejería de Obras Públicas y Transportes

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
SECRETARIADO DE PUBLICACIONES

Sevilla, 2007

Serie: Arquitectura
Núm.: 27

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito del Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla y de la Consejería de Obras Públicas y Transportes.

León Rodríguez, Ángel Luis

Acústica y rehabilitación en teatros de Andalucía / Ángel Luis León Rodríguez [... et al.].- Sevilla : Consejería de Obras Públicas y Transportes; Universidad de Sevilla, 2007
208 p. : il. fot. col. ; 30 cm
(Arquitectura, 27)

ISBN 978-84-8095-451-8
ISBN 978-84-472-0867-8

1. Teatros-Andalucía-España
2. Arquitectura-Conservación, Restauración, Rehabilitación-Andalucía-España
3. Acústica arquitectónica
4. Edificios para el Ocio-Andalucía-España

I. Sendra Salas, Juan José
II. Navarro Casas, Jaime
III. Zamarreño García, Teófilo

IV. Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transportes
V. Universidad de Sevilla. Secretariado de Publicaciones

Motivo de cubierta: Interiores de los teatros andaluces.

© SECRETARIADO DE PUBLICACIONES
DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA. 2007
Porvenir, 27 - 41013 Sevilla
Tlfs.: 954 487 447 - 954 487 452; Fax: 954 487 443
Correo electrónico: secpub4@us.es
http://www.us.es/publius
© CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES
DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA. 2007
Avda. Diego Martínez Barrio, 10
Tlfs.: 955 058 321 - 955 058 318 - 955 058 322
Correo electrónico: publicaciones.copt@juntadeandalucia.es
http://www.juntadeandalucia.es/obraspublicasytransportes
© ÁNGEL LUIS LEÓN RODRÍGUEZ, JUAN JOSÉ SENDRA SALAS, JAIME NAVARRO CASAS,
TEÓFILO ZAMARREÑO GARCÍA. 2007

Printed in Spain. Impreso en España
ISBN del Secretariado de Publicaciones: 978-84-472-0867-8
ISBN de la Consejería de Obras Públicas y Transportes: 978-84-8095-451-8
Depósito Legal: M-15.617-2007
Imprime: Pedro Cid, S. A.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Dirección General de Arquitectura y Vivienda de la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, promotores del Plan de Rehabilitación de Teatros de Andalucía, la ayuda prestada para la realización de este estudio, la documentación y planimetría facilitada, así como la contribución a la financiación del mismo. Este trabajo ha sido también financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, proyecto BIA2003-09306-CO4-02.

ÍNDICE

PRÓLOGO 11

INTRODUCCIÓN 13

1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS 15

1.1. La arquitectura teatral 17

1.2. La acústica arquitectónica 31

1.3. Estudios más relevantes sobre la acústica de un conjunto de salas 37

2. EXTENSIÓN Y METODOLOGÍA DEL ESTUDIO 47

2.1. Plan de rehabilitación de teatros de Andalucía 49

2.2. Teatros estudiados 53

2.3. Metodología del análisis acústico 61

3. LA ACÚSTICA DEL PATRIMONIO TEATRAL ANDALUZ 67

3.1. Datos de las salas estudiadas. Análisis individual: fichas 69

3.2. Valoración acústica del conjunto 143

4. APÉNDICES 167

4.1. Conceptos de acústica de salas 169

4.2. Equipos de medida e instrumentación 199

BIBLIOGRAFÍA 203

PRÓLOGO

A principios de los ochenta, el entonces denominado Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo del Gobierno de España inició un programa de rehabilitación de teatros de titularidad pública a través de su Dirección General de Arquitectura. Teatros andaluces como el Falla de Cádiz, el Cervantes de Málaga, el Gran Teatro de Córdoba o el Lope de Vega de Sevilla formaron parte de la selección de actuaciones de una programación que, una vez tuvo lugar la transferencia de competencias a la Junta de Andalucía, iba a verse ampliada de forma espectacular en el número de teatros a rehabilitar, y extendiéndose las obras a numerosas poblaciones de las ocho provincias de la comunidad autónoma.

Con el tiempo, el programa de rehabilitación de teatros de Andalucía cumplía con creces el que estaba destinado a ser no sólo uno de los capítulos más importantes de la revaloración del patrimonio edificado de nuestras ciudades, sino la estrategia esencial en la activación de los espacios escénicos, más allá de la mera función originaria para la representación teatral, disponiéndolos para otras muchas ocasiones tanto de difusión cultural como de acción social.

Ni a los que se encontraban en mejor estado les bastó una mera restauración, pues todos ellos exigieron proyectos de intervención con notables transformaciones con vistas a una adecuada configuración de los espacios y tecnologías de escena, la confortabilidad de las salas de espectadores y la optimización de su disposición para la sociabilidad que estos edificios deben facilitar ampliamente, cuando son abiertos al uso y disfrute de la ciudadanía, en la medida en que sus dependencias lo permitían o eran viables las ampliaciones.

Este ciclo ha significado para la arquitectura un salto no sólo cuantitativo, máxime cuando se ha visto acompañado de la realización de un amplio conjunto de teatros de nueva planta. Antes de los ochenta, la experiencia relativa al proyecto de arquitectura teatral era prácticamente nula entre los arquitectos españoles. Veinte años después, numerosos profesionales han podido desarrollar esta experiencia, y la tarea de diversos especialistas se ha consolidado en aspectos cruciales, como las tecnologías de la tramoya y de la representación, y la acústica, tanto natural del espacio teatral como su desarrollo sonoro artificial, ha contado con oportunidades desconocidas en España hasta las últimas décadas del siglo XX.

Hay que recordar que el precedente estaba en las salas de conciertos, pues los auditorios musicales venían siendo un objetivo específico de la administración cultural. Dotar a las principales ciudades españolas de edificios de esas características había tenido su precedente en Granada, con el Auditorio Manuel de Falla, obra extraordinaria del arquitecto José María García de Paredes, que desde entonces vería reconocida su capacidad para este tipo de edificios, tanto por la belleza de sus salas como por sus cualidades acústicas, en lo que, sin duda, tuvo mucho que ver, tal como siempre reconoció el arquitecto, la colaboración del especialista L. Cremer, pero, por encima de todo, su pasión musical en la que el vínculo familiar con la familia Falla fue decisivo.

Musical o teatral, la estimación del hecho acústico como sustantivo en la consideración del confort de los espectadores no debe parecer a nadie una cuestión menor. El mobiliario o la climatización constituyen otras dos coordenadas importantes para ese propósito, y más aún hoy en día, pero no son esos atributos los que se ofrecen cuando visitamos Epidauro y, en el ejemplo paradigmático del teatro clásico griego, la plenitud de la percepción sonora hace justicia a la fascinante belleza paisajística elegida para el mítico origen del espacio teatral.

Las condiciones acústicas acompañaron toda la vicisitud histórica de la arquitectura teatral. El cierre edilicio del teatro romano contribuye a su carácter urbano y regulariza sus virtudes funcionales, también acústicas. Tras la acogida de las iglesias y sus pórticos, al superarse la exclusividad de los textos de or-

den sagrado, renacerá el gusto por la comedia en los espacios prestados de los corrales, antes de que el teatro renacentista sea capaz de desencadenar un proceso tipológico específico que ya no tendrá solución de continuidad.

Los autores aciertan a precisar bien esta vicisitud histórica en el primer capítulo de su libro, observando detenidamente los atributos sonoros de esa evolución, por más que moderen ese aspecto al hablar de los casos españoles y andaluces. Con similar propósito desarrollan e integran en el segundo tanto las nociones básicas como los fundamentos científicos en que se fundamenta su investigación, expresando las cualidades acústicas de una selección muy oportuna de algunos de entre los más relevantes ejemplos de edificios teatrales recientes.

El libro tiene su cuerpo y aportación principal en los resultados de un largo proceso de estudio realizado por los autores, en su condición de profesores investigadores del Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, en los Departamentos de Construcciones Arquitectónicas I y Física Aplicada II de la Escuela T.S. de Arquitectura de la Universidad de Sevilla, gracias al convenio suscrito en 1988, renovado posteriormente, para el asesoramiento acústico de los proyectos de intervención del referido Plan de Rehabilitación de Teatros de Andalucía o su precedente ministerial.

De una treintena de teatros analizados se ha decantado una presentación pormenorizada de dieciocho casos, que resulta suficientemente expresiva de las cualidades sonoras del parque teatral andaluz, mediante las mediciones e interpretaciones realizadas de los ocho parámetros de cualificación acústica considerados: calidez, brillo, claridad de la voz, claridad musical, definición, fuerza acústica, eficiencia lateral y coeficiente de correlación cruzada inter-aural, así como del ruido de fondo.

Este libro rinde cuentas de un esfuerzo investigador aplicado, día a día, a los objetivos prácticos de optimización de la arquitectura al servicio de la sociedad andaluza. Es una contribución de particular relevancia en su género en el panorama nacional e internacional, y viene a sumarse a los trabajos que los autores habían desarrollado anteriormente en el ámbito de la arquitectura eclesiástica.

Sevilla, noviembre de 2005.

Víctor Pérez Escolano

INTRODUCCIÓN

En los últimos veinticinco años se ha producido en nuestro país un espectacular salto cuantitativo y cualitativo en la dotación de teatros. No sólo se han recuperado y actualizado la inmensa mayoría de los teatros existentes, sino que se ha levantado un gran número de teatros de nueva planta por toda la geografía española. La actividad teatral, que durante lustros estuvo prácticamente confinada en unas pocas grandes capitales, se ha generalizado a la práctica totalidad de ciudades del país. Se está produciendo así un interesante fenómeno de difusión cultural todavía no analizado suficientemente.

Pero este asunto ha tenido también consecuencia en otros ámbitos. Uno de ellos es, sin duda, el de la arquitectura, ámbito desde el que se ha tenido que dar respuesta en un breve espacio de tiempo a una producción elevada de edificios con unas exigencias funcionales y tecnológicas ciertamente notables. En dicho tiempo, un elevado número de arquitectos ha debido afrontar el reto de desarrollar proyectos de teatros, contando con todo un conjunto de inconvenientes serios: falta de experiencia propia, ausencia de referencias y pautas a seguir, práctica inexistencia de una "industria" mínimamente desarrollada, especialistas, equipos e instaladores...

De manera que, en cierto modo, podemos decir que se ha dado un paso de gigante en este sentido, ya que la situación resulta hoy incomparablemente más esperanzadora que hace veinticinco años. Algunas industrias auxiliares, como la del mobiliario de teatros, ha propiciado fabricantes que se han convertido en grandes competidores en el mercado internacional. Algunos teatros se han erigido también en referentes arquitectónicos en el panorama internacional. El "know how" de un buen número de empresas y arquitectos ha crecido y se ha generalizado de forma llamativa, y se han conformado equipos de especialistas y consultores.

Dentro del ámbito de la arquitectura teatral, uno de los asuntos que más ha preocupado a promotores y arquitectos es el de la atención a las condiciones acústicas de las salas que se iban a poner en uso. En algunas autonomías, como en Andalucía, la sensibilidad de las autoridades regionales hacia esta cuestión ha llevado a la elaboración de programas de asesoramiento y apoyo de especialistas en acústica a los arquitectos encargados de proyectos de teatro, con la intención de evitar que algunas intervenciones quedaran malogradas por falta de atención a este importante aspecto.

En particular, la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía puso en marcha un programa de rehabilitación de teatros, extendido a toda la comunidad autónoma, gracias al cual se han rehabilitado más de treinta y cinco teatros. Casi desde el inicio del plan, se estableció un convenio con especialistas de la Escuela de Arquitectura de Sevilla para dar apoyo y asesoramiento sobre la acústica de las salas. Un equipo interdisciplinar del Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla, formado por arquitectos y físicos, ha estado trabajando más de quince años en la labor de consultoría acústica a los arquitectos autores de los proyectos de rehabilitación pertenecientes al mencionado plan, al mismo tiempo que ha presentado los resultados de sus investigaciones en la acústica de los teatros andaluces en numerosas publicaciones y comunicaciones en congresos, nacionales e internacionales.

Tanto por el número de salas estudiadas, como por la importancia arquitectónica de muchas de ellas, la experiencia ha tenido una gran trascendencia. En el panorama internacional no existen antecedentes de una operación similar y la oportunidad que se ha tenido, por parte de un grupo de especialistas, de acceder al estudio, seguimiento y comprobación del comportamiento acústico de un número tan importante de salas no ha tenido más que consecuencias beneficiosas.

En efecto, cuando los especialistas de acústica de salas han querido poner en manos de los arquitectos orientaciones y criterios de diseño de carácter general, lo han hecho extrayendo éstos del conocimiento

actual de esta disciplina científica, de experiencias propias individuales, o de otras de conjunto a las que han tenido acceso. Además, sólo un grupo reducido de ellos ha ofrecido publicaciones que valoren el comportamiento acústico de un conjunto significativo de salas. Por esto resulta relevante la presente obra, ya que se propone divulgar las más importantes conclusiones que se pueden derivar para la acústica de salas, en general, y la teatral, en particular, de un estudio tan amplio como el citado. Se pretende así contribuir a la difusión del conocimiento en este campo científico, además de ofrecer, especialmente a arquitectos, pautas de diseño que les permitan predecir la conducta acústica de las salas que proyectan.

Conocer mejor la acústica de un teatro es un gran paso en el reconocimiento de una importante parcela del patrimonio arquitectónico como es la arquitectura teatral. De esta manera se reivindica la necesidad de abordar el conocimiento y el proyecto arquitectónico de los teatros de una manera integral, tomando en consideración este aspecto tan decisivo en unos edificios destinados al uso de la palabra y en ocasiones de la música. Confiamos en que esta experiencia andaluza tenga réplica en otras regiones para así avanzar en el conocimiento de nuestro patrimonio, su actualización y adecuación bajo las nuevas perspectivas de la acústica de salas.

1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

1.1. LA ARQUITECTURA TEATRAL

INTRODUCCIÓN

Según el físico inglés Hope Bagenal, estudioso de la acústica arquitectónica, los auditorios se pueden dividir en dos grandes grupos: aquellos con la acústica de una cueva y los de acústica al aire libre[1]. Del primero, donde tuvo origen la música, se desarrolló la sala de conciertos; del segundo, donde comenzaron las voces habladas, se originó el teatro (Fig. 1).

En nuestro recorrido a lo largo de la historia, nos proponemos realizar un análisis sobre el comportamiento acústico de este último grupo. Podremos observar cómo las características arquitectónicas de los teatros van desarrollándose y evolucionando, en muchos casos condicionadas por cuestiones de carácter acústico.

EL TEATRO EN LA ANTIGÜEDAD

El análisis histórico de lo que hoy conocemos como acústica teatral arquitectónica lo iniciamos en los teatros de la antigua Grecia. Éstos, en su origen, apenas tienen importancia. Sin embargo, en tiempos de Temístocles cada ciudad tenía su teatro, destacándose el construido en la vertiente sur de la Acrópolis de Atenas: Teatro de Dionisos (480 a.C.), con una capacidad para 30.000 espectadores.

Parece aceptado que la forma de estas construcciones venía condicionada, en gran parte, por cuestiones de tipo acústico. Su asentamiento se llevaba a cabo en las laderas de las colinas (Fig. 2); la razón de esta determinación consistía no sólo en permitir una buena visión de la escena, sino también en reducir el ruido de fondo e impedir sombras acústicas del sonido directo entre los espectadores. En cuanto a su estructura, uno de los aspectos más destacados es la introducción de la pared de fondo sobre el *koilon*, que además de disminuir la inmisión de ruidos exteriores y eliminar vistas perturbadoras, hacía que el sonido procedente de los actores, tras reflejarse en ella, se dirigiese hacia el público, reforzando así la presencia de reflexiones cortas que amplificaban el sonido directo de la emisión de la voz de los actores, sin apenas producir enmascaramiento.

Los teatros griegos debían permitir la comprensión de las oraciones pronunciadas desde la escena para sus tragedias y comedias. Esto dependía de varios aspectos: en primer lugar de la calidad de la voz

Figura 1. Clasificación de los auditorios de Hope Bagenal.

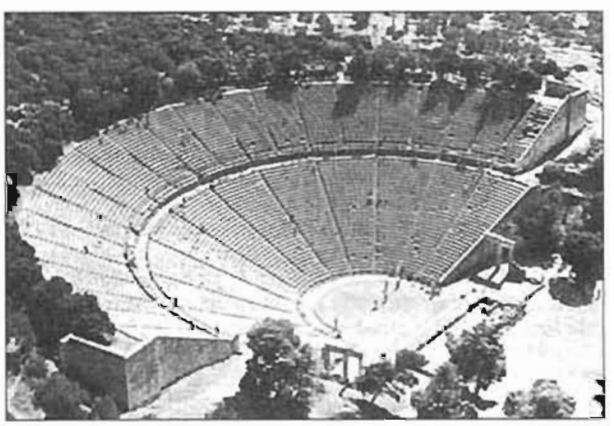


Figura 2. Teatro griego de Epidauro. 330 a.C.

[1] Forsyth, M. (1985). *Buildings for music*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 3.

emitida, intensidad y articulación de los actores; en segundo lugar, de la ausencia de ruido del exterior (ruido de fondo) y de ecos en el recinto.

Para mejorar estas cualidades, es bien conocido que los actores utilizaban máscaras de madera o corcho: *calcophone* (recubiertas interiormente de placas de bronce o piedra), que además de acentuar las facciones de la cara, funcionaban como auténticos megáfonos amplificadores del sonido.

Para las representaciones musicales, donde las exigencias acústicas son algo diferentes (acústica de la cueva), se levantaban los llamados odeones (del griego: *odeîon*, de *odé*, canto). Estos edificios, de dimensiones más reducidas y cubierta de madera, eran más adecuados que los teatros para la audición de la música de la época.

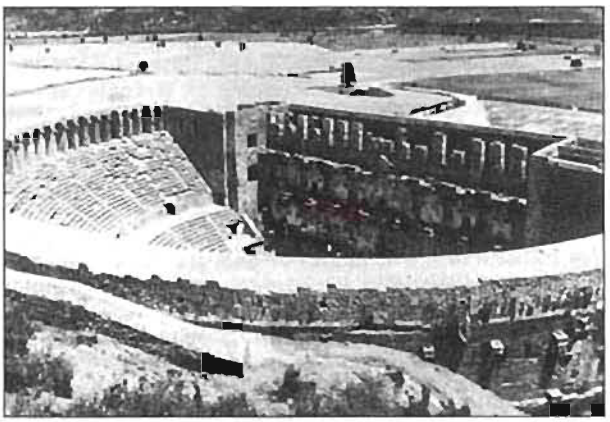


Figura 3. Anfiteatro romano de Orange.

Los teatros de la antigüedad romana gozaron de una grandeza y suntuosidad superior a los de Grecia. Entre las diferencias con el teatro griego destacamos que la preponderancia de los coros en las actuaciones hacía que la *orchestra*, de forma circular o de herradura, tuviera unas dimensiones superiores a las del teatro griego. Allí se acomodaron los asientos de senadores, tribunos, ediles, etc. Otra variante era que la escena en Roma, además de ser más profunda, estaba más construida y elaborada que en Grecia (Fig. 3).

Algunas de estas diferencias tenían cierta repercusión en la acústica. Las construcciones teatrales romanas tendían a "envolver" al público con su forma. Este aspecto se conseguía aumentando las pendientes de las gradas y levantando un muro posterior a la escena, a la misma altura que la del peristilo que remataba el graderío. De esta manera se generaba la cávea, que se estructuraba en tres partes según su altura: *ima cavea, media* y *summa*. Este cambio en la forma conllevaba también nuevos cambios en lo referente a las condiciones acústicas, unos convenientes y otros inconvenientes. Entre los primeros destaca el aumento que posiblemente se produciría en la sensación de espacialidad del sonido, debido a la aparición de nuevas reflexiones del sonido en los paramentos. Entre los segundos estaba la inconveniencia de que algunos de éstos probablemente generara reflexiones largas y tardías que no contribuyesen a mejorar la acústica de estos espacios, e incluso pudieran dar lugar a la aparición de ecos.

Es de destacar que la afinidad en la manera de construir los teatros antiguos se debe, en gran medida, a la existencia de unas normas de construcción claras y precisas. En *Los diez libros de Arquitectura* de Marco Lucio Vitruvio (20 a.C.), no sólo se hace referencia al método geométrico de determinación de la forma de los teatros, sino también a aspectos directamente relacionados con la acústica.

Vitruvio, en su Libro V, clasificaba los teatros en cuatro grupos según sus propiedades acústicas: disonantes, circunsonantes, resonantes y consonantes, siendo este último tipo, el ideal desde el punto de vista acústico. Los recintos consonantes son aquellos en los que la voz, definida por Vitruvio como una corriente que fluye en ondas circulares, alcanza los puntos más altos de las gradas sin encontrar obstáculos que impidan su propagación o produzcan reflexiones inconvenientes.

Otra recomendación de Vitruvio era la de colocar vasos de bronce (o barro cuando el presupuesto lo impedía) en los teatros construidos en piedra o mármol. Estos elementos se disponían, en consonancia con la magnitud del teatro y con arreglo a las leyes de la ciencia armónica, en nichos abiertos entre los asientos de las gradas, de tal forma que dejasen un espacio suficiente alrededor y no tocasen las paredes de los mismos. El objeto de tal medida era que actuasen como resonadores (Fig. 4).

Posteriormente, la experiencia del Odeón, así como las operaciones de cobertura parcial de algunos teatros, marcan una tendencia hacia el recinto cerrado como el lugar idóneo para mejorar la acústica y la inteligibilidad (Fig. 5).

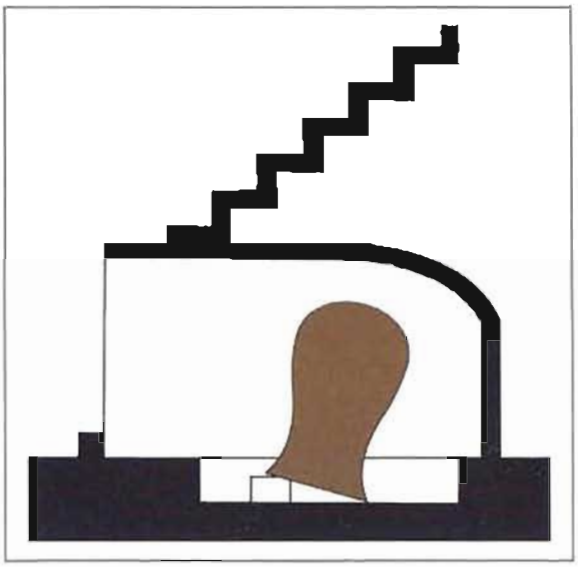


Figura 4. Vaso de bronce en nicho.

Figura 5. Odeón de Paphos (Chipre), siglo II d.C.

EL TEATRO EN EL MEDIOEVO

En este período el teatro cambia sus fundamentos, olvidando los temas clásicos, y toma como base del drama el tema religioso (las escenificaciones estaban claramente influenciadas por el cristianismo). En un primer instante, el drama se asienta en las iglesias, con condiciones acústicas generalmente deficientes[2]. Exceptuando la preocupación de algunas órdenes mendicantes, principalmente franciscanos y dominicos, y de movimientos reformistas protestantes, hay que esperar hasta la segunda mitad del siglo XVI, tras el concilio de Trento, para que la Iglesia preste atención a la acústica de sus templos[3].

En la baja Edad Media el teatro se traslada al aire libre. En este momento son frecuentes los espectáculos de juglares y bufones (que suponen la aparición de varios tipos de géneros: sátira, farsa...), carretas de cómicos y, en el mundo de la nobleza, los torneos de caballeros. Uno de los aspectos más destacables de este cambio es la nueva localización de las representaciones teatrales, que pasan del recinto al lugar, es decir, mientras que en el teatro griego y romano se disponía de un tipo arquitectónico claro y definido, ahora las representaciones suceden, en la mayoría de los casos, en lugares donde el espacio teatral lo configura el público por un lado y el espectáculo por otro. Es entonces cuando se origina el teatro urbano: el teatro de la ciudad y de las plazas públicas.

Como consecuencia de la falta de construcciones destinadas a fines teatrales, las preocupaciones acústicas de esta época se puede decir que prácticamente desaparecen. Éstas se reducen a las propias de las actuaciones urbanas, es decir, al igual que ocurría en los teatros antiguos, el silencio del público era condición fundamental para la comprensión de las palabras. No obstante, en este tipo de representaciones existía un conocimiento de los argumentos por parte del público que contribuía al entendimiento de lo expresado por los oradores.

EL TEATRO CLÁSICO

Es precisamente en el Renacimiento cuando el mundo teatral empieza a adquirir un auge considerable. La importancia de esta etapa es tal que algunos autores, como Pevsner[4], escriben que un análisis histórico de teatros debe empezar en el Renacimiento italiano, cuando las representaciones teatrales urbanas

[2] Sendra, J. J. y Navarro, J. (2000). *La acústica de las iglesias medievales*. En: Graciani, A., editor. *La técnica de la arquitectura medieval*. Sevilla: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.

[3] Sendra, J. J. y Navarro, J. (1997). *La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias: del Paleocristiano al Tardobarroco*. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

[4] Pevsner, N. (1979). *Historia de las tipologías arquitectónicas*. Barcelona: Gustavo Gili.

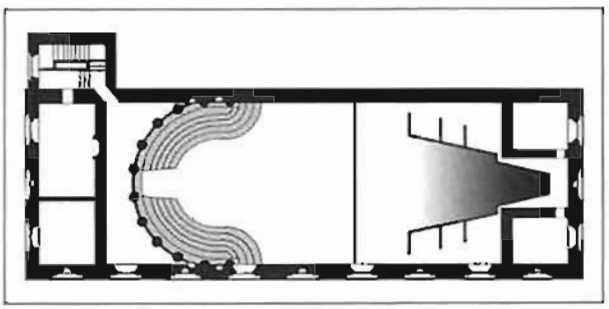


Figura 6. Teatro de Sabbioneta (1588-1590). Planta. Vincenzo Scamozzi.

cambian su localización trasladándose de las plazas y calles a los palacios y villas, y de los escenarios múltiples al escenario único y fijo.

El conocimiento que se tenía en esta época de los antiguos teatros romanos procedía de *Los diez libros de Arquitectura* de Vitruvio, concretamente el Libro V, así como de algunos tratados más que se publicaron en ese momento, como los de Alberti, Serlio o Filarete. La forma clásica que describía Vitruvio para los teatros era la semicircular con una columnata sobre el coronamiento. Muchas de sus propuestas se adoptaron en este tiempo.

Una de las novedades más destacables que se produce en el Renacimiento, también desde el punto de vista acústico, es consecuencia directa del cambio de ubicación que experimentan las representaciones teatrales: de espacios abiertos se pasa a recintos cerrados. Este tránsito tiene como resultado, además de mejoras del confort en general, la aparición de los fenómenos de reverberación derivados de las reflexiones de las ondas sonoras en las superficies interiores, que refuerzan el sonido directo. Esto, unido a la reducción de tamaño que presentan los nuevos teatros, en comparación con los de la época romana, con una clara disminución de distancias entre los actores y la audiencia, permite que los oyentes perciban mayores niveles sonoros, con una distribución sonora en la sala, además, mucho más homogénea. No obstante, muchas veces una reverberación excesiva, a pesar de la gran absorción sonora que produce el público, daba lugar a una inteligibilidad deficiente.

En cuanto a la escena, podemos destacar que sus dimensiones se reducen lateralmente en comparación con la de los teatros antiguos. Este cambio de tamaño provoca, en general, una mejor amplificación del sonido por parte de los actores, con una mayor presencia de reflexiones cortas beneficiosas desde el punto de vista acústico.

No obstante, también en el Renacimiento, tuvo lugar el gran desarrollo de la perspectiva, y el mundo teatral no fue ajeno a tal circunstancia. Artistas como Peruzzi y Scamozzi (Fig. 6) proyectaron escenarios con calles y plazas que dieron una mayor profundidad al volumen escénico, provocando bellas perspectivas arquitectónicas. Posiblemente, esta disgregación del escenario fuese en detrimento de la acústica, como consecuencia de la dispersión sonora que podría generarse a través de estos caminos de propagación del sonido. A pesar de ello, es factible que los *periacti*[5] dispuestos en los laterales de la escena contribuyesen a mejorar algo la energía sonora inicial procedente de la misma, al comportase como difusores, a pesar de su escasa superficie de incidencia.

Uno de los mejores ejemplos teatrales de ese momento es el Teatro Olímpico de Vicenza (1580-84), de Andrea Palladio (Figs. 7 y 8), que fue uno de los primeros teatros estables cubiertos hasta entonces. En este edificio Palladio mantiene la estructura básica interior del teatro romano, aunque con algunas particularidades. En primer lugar, la zona del graderío no es semicircular sino semielíptica. La escena, proyectada por Vincenzo Scamozzi, presenta un conjunto de calles que se prolongan hacia el fondo del escenario, así como hacia los laterales. La configuración de este nuevo recinto, todo de madera[6], hacía posible una mejora del acondicionamiento acústico.

Por último, y paralelamente en el tiempo, en este período en el que la música empieza a valorarse, tiene lugar otro tipo de representaciones teatrales y musicales localizadas esta vez en los salones de la corte, en los palacios y en recintos colindantes a los mismos. Este tipo de actuaciones posiblemente se llevasen a cabo con aceptables condiciones acústicas, debido principalmente a que eran espacios cubiertos.

[5] Prismas giratorios triangulares de gran altura que tenían en cada una de sus caras una escena diferente.

[6] Ackerman, J. S. (1980). *Palladio*. Madrid: Xarait Ediciones, p. 138.

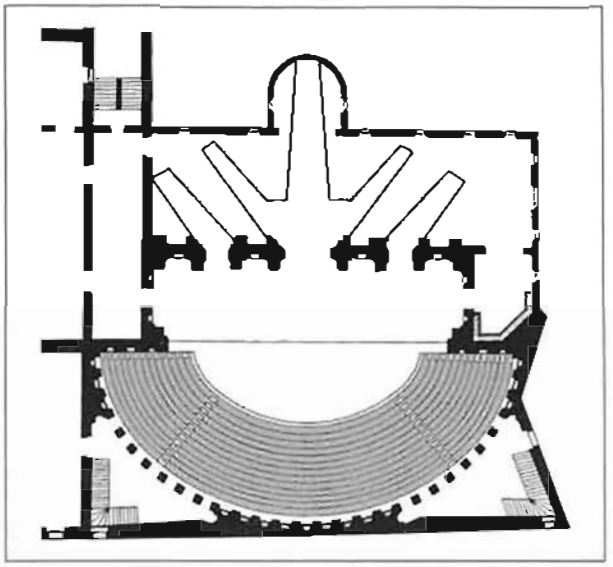


Figura 7. Teatro Olímpico de Vicenza. Planta.

Figura 8. Teatro Olímpico (Vicenza).

sus superficies (tanto techos como paredes) estaban profusamente decoradas, y además el volumen de las mismas no debía de ser excesivamente alto, aspecto este último, directamente relacionado con el tiempo de reverberación y el desfase temporal del sonido reflejado respecto del sonido directo, facilitando la presencia de reflexiones iniciales beneficiosas frente a las reflexiones tardías perjudiciales.

Es en el Barroco cuando la música, representada en los teatros de ópera, alcanza su mayor auge. Los primeros de estos teatros barrocos todavía recrearon las formas y principios de la arquitectura griega y romana. Este es el caso del Teatro Farnese en Parma (1617-28), de Giovanni Battista Aleotti (Fig. 9), cuyo anfiteatro de forma alargada dejaba un espacio central, que se usaba a menudo durante la acción como una prolongación del escenario.

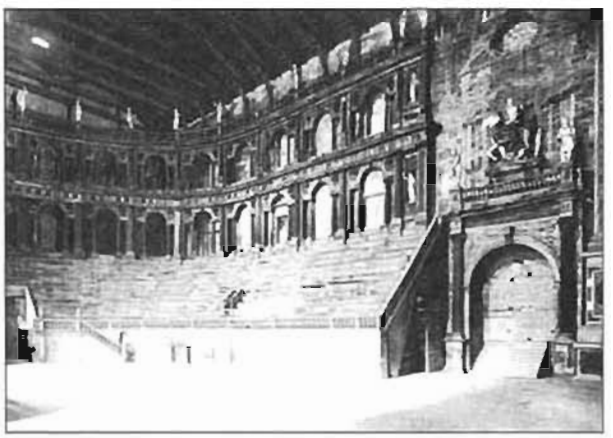


Figura 9. Teatro Farnese de Parma. Giovanni B. Aleotti.

En los teatros de ópera barrocos, a diferencia de sus antecesores renacentistas, se va definiendo un espacio destinado exclusivamente a la orquesta (foso), consecuencia del papel esencial que juega la música en la representación de los dramas. Con el paso de los años, las proporciones de los teatros van variando haciéndose más largos que anchos, al tiempo que los techos y las paredes de las salas adquieren importancia como elementos reflectantes del sonido, aunque a veces generaban reflexiones tardías, inconvenientes para la acústica de la sala, principalmente aquellas que se producían en las paredes del fondo del teatro.

Uno de los teatros de ópera barrocos más notable fue el Teatro SS. Giovanni e Paolo de Venecia, remodelado específicamente para ópera en 1654 por Carlo Fontana. El edificio de Fontana es importante por ser el primero de los teatros italianos de ópera barrocos que desarrolló completamente la forma de herradura. Las plantas en forma de U y de herradura derivaron de la planta semicircular del anfiteatro romano, adoptado por Andrea Palladio para el Teatro Olímpico de Vicenza.

Junto a estas formas, otra planta teatral barroca fue la oval. El Teatro Tordinona en Roma (1666-70), también de Carlo Fontana, tenía una elegante planta de este tipo. En este caso, la elección de la forma se debía a la unidad visual que se conseguía. No obstante, hubo un número significativo de escritos en este período que abundaron sobre las propiedades acústicas de la forma oval. Destacamos entre ellos los

descubrimientos de J. Kepler (1604) sobre la elipse, y los trabajos de Athanasius Kircher sobre el comportamiento de los rayos sonoros tras su reflexión en una bóveda con directriz elipsoidal[7].

Figura 10. Teatro Argentina. Óleo de Giovanni Paolo Panini (1729).

Los teatros de ópera en el siglo XVIII fueron construidos específicamente para la música de sus contemporáneos (las grandes óperas de Gluck, Haydn y Mozart), de modo que se pueden establecer paralelismos entre el estilo arquitectónico y la música del momento.

Según Forsyth[8], el atributo más importante de la ópera de estilo italiano es su claridad acústica, permitiendo al oyente oír la articulación de palabras y el detalle musical de pasajes cantados muy rápidos (como sucede con los trabalenguas de las arias de Mozart). Esta claridad era realzada por la gran cantidad de material absorbente existente cuando la audiencia, sin quitarse los trajes, se congregaba en los palcos y en el patio de butacas, todo en un espacio relativamente pequeño (Fig. 10). El techo de los teatros era generalmente plano, y esto evitaba los posibles problemas de focalización sonora que producen normalmente las cúpulas y bóvedas cóncavas.

Otra cualidad acústica destacable de los teatros de ópera del Barroco era que propiciaban la difusión sonora en un amplio rango de frecuencias. Los palcos y las plateas actuaban como difusores de los sonidos graves, mientras que las butacas y la decoración de los paramentos contribuían a la difusión de los sonidos de frecuencias medias y agudas, respectivamente.

Para conseguir unas buenas condiciones acústicas en las salas, se valoraban dos aspectos importantes. El primero era la correcta elección de los materiales de revestimiento: para llegar a tener claridad en los teatros, se debían utilizar superficies absorbentes. Los autores de la época, recomendaban la utilización de la madera con cámara de aire para el revestimiento de paredes y techos. Ambas soluciones permiten obtener buenos resultados, aunque los escritores de la época tenían un concepto inexacto sobre el comportamiento acústico de tales elementos, ya que pensaban que actuaban, no por absorción, sino por reflexión y/o resonancia del sonido, aumentando los niveles de presión sonora. El segundo aspecto a considerar, y que produjo algunos problemas en las óperas del siglo XVIII, era el conseguir un adecuado equilibrio orquestal. Para obtener brillo y claridad con recursos limitados, una solución simple y efectiva fue situar la orquesta totalmente visible para la audiencia, de forma que los oyentes recibían más sonido directo que reflejado. El equilibrio se ajustaba variando el número de músicos que interpretaban los diferentes instrumentos.

En Italia, resulta destacable la labor de una familia de arquitectos especialistas en el diseño de teatros, cuyas importantes aportaciones, tanto acústicas como formales, al mundo de la ópera se prolongaron durante varias generaciones. Son los Galli, pero fueron conocidos como los Galli-Bibiena por su lugar de origen cerca de Bolonia. Ellos propusieron para los teatros las plantas con forma de campana por motivos acústicos. Los primeros arquitectos de la familia fueron dos hermanos: Fernandino (1657-1743) y Francesco (1659-1739). El Teatro Communale de Bolonia (1763) es un buen ejemplo de la obra de uno de estos arquitectos[9]. La sala se mostraba interiormente como la fachada de un edificio construido en piedra. Los palcos estaban formados por hileras de columnas y arcos que terminaban en un techo oval con lunetas (Fig. 11). La causa de que la acústica de este recinto fuese deficiente se debió a la elección de la piedra como material de revestimiento (posiblemente por su resistencia al fuego), material muy reflectante a

[7] Athanasius Kircher (1673). *Phonurgia Nova*. Yale University Library, p. 99 (en Gómez de Liaño, I. [1986]. *Athanasius Kircher. Itinerario del éxtasis o las imágenes de un saber*. Tomo II. Madrid: Ediciones Siruela).

[8] Forsyth, M. (1985). *Opus cit.*, p. 94.

[9] El Teatro Communale fue la obra principal de Antonio, cuarto hijo de Fernandino Galli-Bibiena.

Figura 11. Teatro Communale de Bolonia.

diferencia de los delgados paneles de lana usados en la mayoría de las primeras óperas. No obstante, la acústica del Communale fue la excepción más que la regla, pues casi todas esas óperas tempranas estaban bien adaptadas a la música de los compositores contemporáneos.

En esa época se utilizaban también otros recursos acústicos, en muchos casos de dudosa eficacia, para resaltar el sonido de la orquesta. Forsyth narra que, tanto Patte como Saunders, describen que una característica común en muchos teatros italianos era la de realizar un "hoyo acústico" bajo el suelo de madera del foso de la orquesta, para reforzar el sonido de la misma[10]. En otras ocasiones se construían fosos que se llenaban de agua para aprovechar sus cualidades reflectantes. Éste es el caso del Teatro Argentina de Roma donde se llevaron a cabo reformas con el objeto de construir un recinto de ladrillo, bajo el patio de butacas, que iba desde el escenario hasta la parte trasera del teatro. Éste fue llenado de agua para formar un canal, partiendo de la base de que el agua es un buen reflector de sonido: la música estaría dirigida a los asientos de la parte trasera, emergiendo a través de las parrillas del suelo.

En definitiva, podemos decir que las propiedades acústicas de los teatros de ópera eran, en general, bastante aceptables, aunque muchos de estos resultados se obtenían mediante una combinación de intuición, experiencia y también algo de fortuna.

HACIA EL TEATRO CONTEMPORÁNEO

A finales del siglo XVIII, en Italia se construyeron algunos de los teatros más importantes de aquel momento: el Teatro alla Scala de Milán (1778) (Fig. 12), punto culminante en la construcción de óperas italianas y recientemente rehabilitado, o La Fenice de Venecia (1792) (Fig. 13), son claros ejemplos de ello.

En muchos de estos míticos teatros, su fama ayudaba a tolerar ciertas deficiencias funcionales. Este es el caso de La Scala, donde las condiciones visuales y acústicas de los palcos, excepto para los situados en

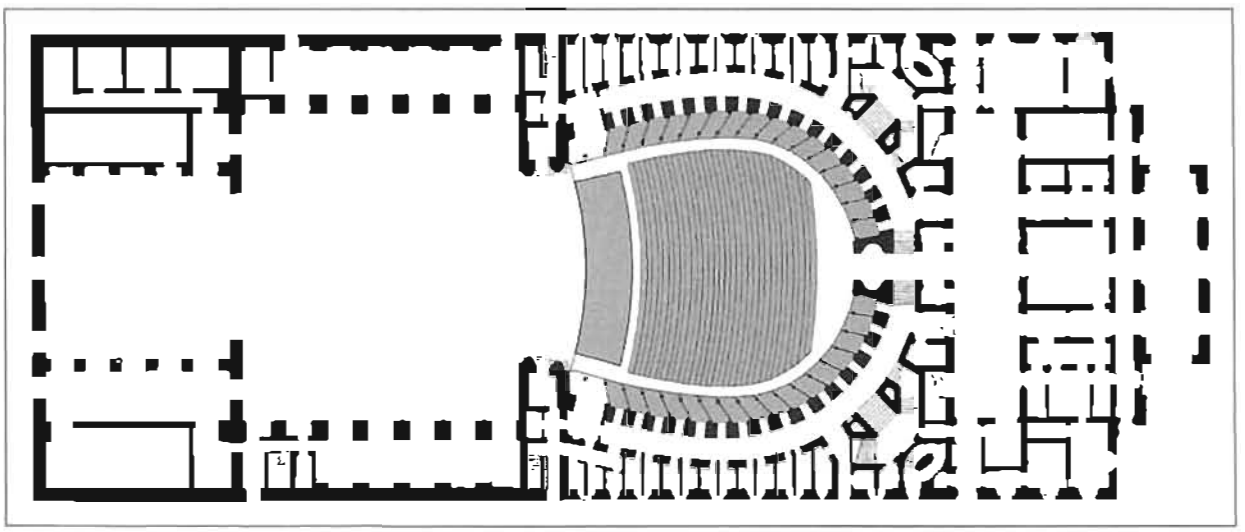


Figura 12. La Scala de Milán. Planta.

[10] Forsyth, M. (1985). *Opus cit.*, p. 95.

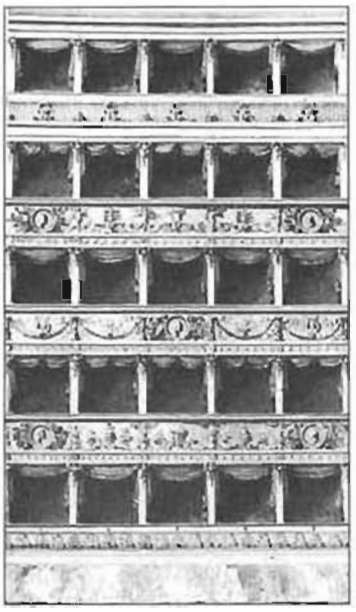


Figura 13. La Fenice de Venecia (detalle).

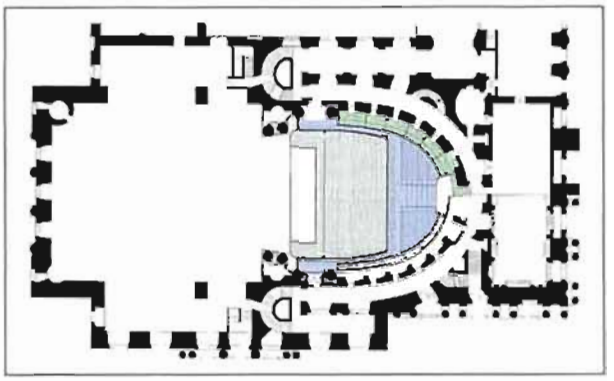


Figura 14. Ópera de Versalles (1768-70), de Ange-Jacques Gabriel.

la parte delantera, dejaban mucho que desear. El motivo de tales carencias se debía a la escasa apertura de los palcos, unido a la profusa decoración y abundancia de superficies absorbentes[11], que daba lugar a la percepción de bajos niveles de presión sonora por parte de los oyentes allí situados. Sin embargo, esta disposición beneficiaba acústicamente a los espectadores sentados en el patio de butacas, ya que éstos disponían de una gran superficie difusora en los laterales de la sala, en determinadas frecuencias del sonido, que provocaba reflexiones cortas que reforzaban el sonido directo, sin producir una merma sensible de la inteligibilidad.

Pero es precisamente en la Francia de mitad del siglo XVIII, donde se produce el desarrollo más importante de proyectos de teatros de ópera del período Neoclásico. Un ejemplo de ello lo encontramos en la Ópera de Versalles (1768-70) de A. J. Gabriel. El proyecto de dicho arquitecto fue brillante tanto espacial como acústicamente. Las razones de este buen comportamiento sonoro son, entre otras, el tamaño dado a la sala (más bien mediano) y el empleo de materiales adecuados (paneles de madera pintados). El edificio tenía planta ovalada (Fig. 14).

Precisamente en esa época, un significativo tratadista francés, Pierre Patte, propone la forma oval para los teatros en su obra *Essai sur l'architecture théatrale* (1774), considerándola como la ideal para la acústica de estos espacios, debido al recorrido que siguen las reflexiones que se producen cuando la fuente sonora se sitúa en unos de sus focos, tal y como había expuesto Kepler a principios del siglo XVIII. En la Ilustración española, Benito Bails hace suyas estas propuestas de Patte (Fig. 15), en su obra *Elementos de Matemáticas* (Tomo IX dedicado a la Arquitectura Civil). Tal y como ha señalado acertadamente Gentil[12], posteriormente, muchas de esas reglas tuvieron influencia en la formación de las salas de asambleas, fruto del nuevo espíritu que aconteció tras la Revolución Francesa.

El motivo de tal error se debía a la consideración, por entonces, de que las superficies cóncavas son mejores acústicamente que las formas convexas, ya que las primeras concentran y "guardan" el sonido, mientras que las segundas lo dispersan. Sin embargo, los malos resultados acústicos previsibles con la forma oval, en la práctica no tuvieron mucha repercusión, ya que en la mayoría de estos teatros las filas de palcos, junto con los paramentos laterales altamente decorados, reducían sensiblemente el efecto focalizador.

En la École des Beaux Arts de París, las óperas se convirtieron en el edificio favorito para emplear el estilo Neoclásico. Los cambios que tuvieron lugar en los teatros de esa época fueron, en gran me-

[11] Saunders señaló en su tratado que los palcos se encontraban "empapelados, y con festones de seda y damasco, como estaba de moda".

[12] Gentil Baldrich, J. M. (1988). La tipología arquitectónica de las salas parlamentarias doceañistas: una hipótesis de origen y significación. (en: *Materiales para el estudio de la Constitución de 1812*). Madrid: Ed. Tecnos, pp. 334 y ss.

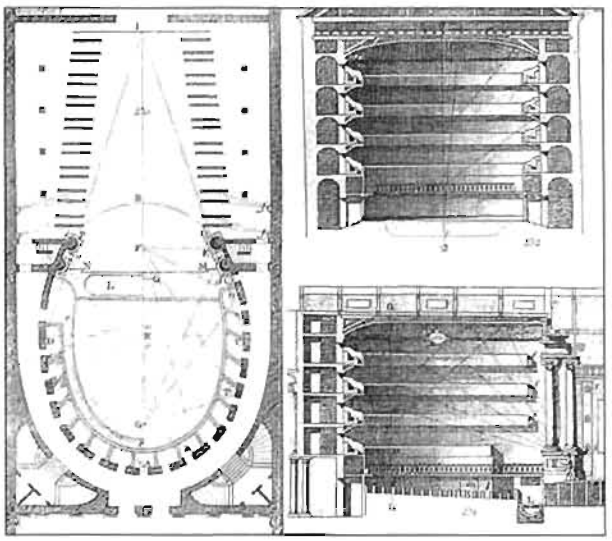


Figura 15. Modelo teatral de P. Patte tomado por B. Bails.

dida, consecuencia del pensamiento ilustrado. Una de las principales transformaciones fue el deseo de abandonar el sistema segregado de palcos y galerías en favor del clásico anfiteatro. Los arquitectos neoclásicos incluso fueron mas allá del mundo antiguo, para crear obras primitivas de mayor severidad y riguroso formalismo, basadas en la geometría pura del cubo y la esfera. La mayoría de estos radicales proyectos no se construyeron. Un ejemplo significativo es el proyecto para una sala de conciertos con un auditorio semicircular de Gabriel Pierre Martin Dumont[13]. Otro destacable proyecto de ópera no construido fue el de Étienne-Louis Boullée. El proyecto de Boullée era un gran teatro de ópera semicircular con media cúpula artesonada como techo.

De haberse construido, tanto en el proyecto de Dumont como en el de Boullée las condiciones acústicas hubiesen sido probablemente deficientes, debido a la acusada focalización del sonido que producirían las formas cóncavas de su planta y su cúpula. En el caso del techo de la ópera de Boullée se añadía, además, la incidencia negativa de su gran volumen, que muy probablemente hubiese dado lugar a reflexiones muy largas (perjudiciales para la acústica), cuando no a la formación de ecos.

Uno de los proyectos de teatro que sí llegó a realizarse fue el Teatro de Besançon (1789) de Claude-Nicolas Ledoux (1736-1806). El edificio, de planta semicircular, carecía de palcos, ya que éstos fueron sustituidos por un anfiteatro. Disponía de un foso hundido para la orquesta bajo el cual se realizó un hoyo acústico con paredes semicilíndricas, probablemente para actuar como reflector de sonido, aunque, en opinión de Forsyth[14], eso debía de producir un extraño efecto acústico para los músicos.

También resulta destacable en esta época el trabajo publicado por George Saunders: *Treatise on Theatres* (1790), en el que recomendaba la utilización de la planta de forma circular, truncada por razones acústicas y de visión (Fig. 16). Aunque Saunders nunca construyó un teatro de ópera, el Teatro Real Drury Lane en Inglaterra (Fig. 17), de Benjamin Wyatt (1746-1813), fue construido a partir de la propuesta de Saunders. Precisamente el teatro fue remodelado posteriormente a causa de los problemas de visión y de acústica. Las líneas de visión habían sido resueltas sólo aproximadamente por Saunders, y la forma circular truncada producía, al igual que la forma oval propuesta por Patte, el problema ya mencionado de la focalización del sonido.

Destacamos en este período dos teatros: el Teatro Nacional (1818-21) de Schinkel, en Berlín, y la Ópera de París de Charles Garnier (1875). Con este último, el teatro de ópera alcanza su cumbre más alta. Su forma es la tradicional de herradura y tiene cuatro hileras de palcos. El gran volumen de la sala (algo más de once mil metros cúbicos) obligaba a utilizar una decoración interna, mobiliario, etc., suficientemente absorbente para no generar un aumento excesivo de los tiempos de reverberación. Estas propiedades se lograban gracias a la alta absorción que proporcionaban los asistentes, las gruesas tapicerías del mobiliario y, fundamentalmente, por medio de cortinas y tapices pesados, así como grandes telones y alfombras.

En el siglo XIX las salas de conciertos llegaron a ser más grandes y, consecuentemente, más reverberantes. Para conservar la definición, claridad e impresión espacial, debían ser suficientemente estrechas con el fin de obtener reflexiones cortas procedentes de los paramentos laterales.

[13] Gabriel P. Martin Dumont (1720-1790) publicó este proyecto en su libro *Parallèle de plans des plus belles salles de spectacles d'Italie et de France, avec des détails des machines theatrales* (1764).

[14] Forsyth, M. (1985). *Opus cit.*, p. 112.

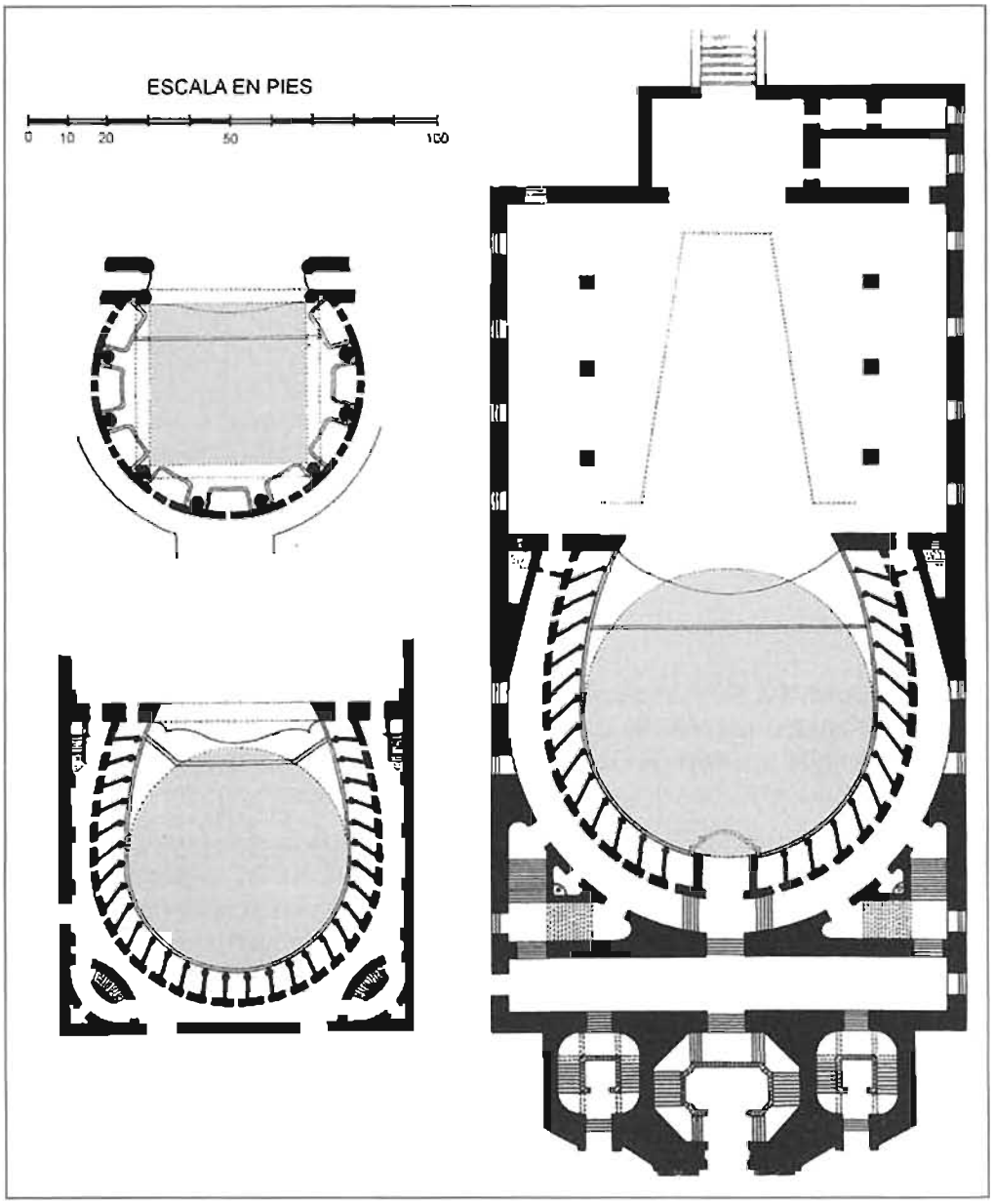


Figura 16. Plano comparativo de tres teatros de ópera. *Treatise on Theatres.* G. Sanders.

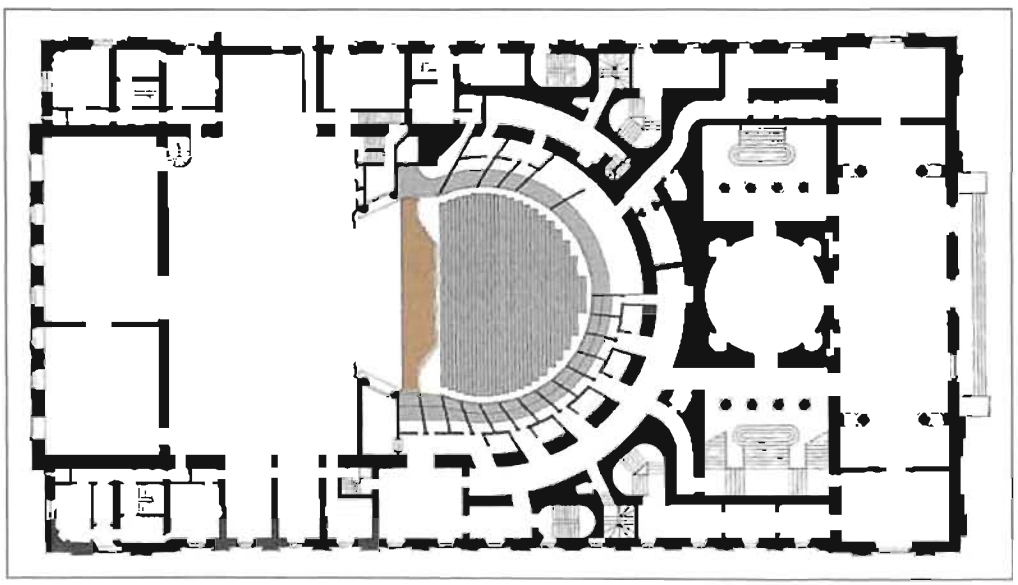


Figura 17. Teatro Real Drury Lane. Planta.

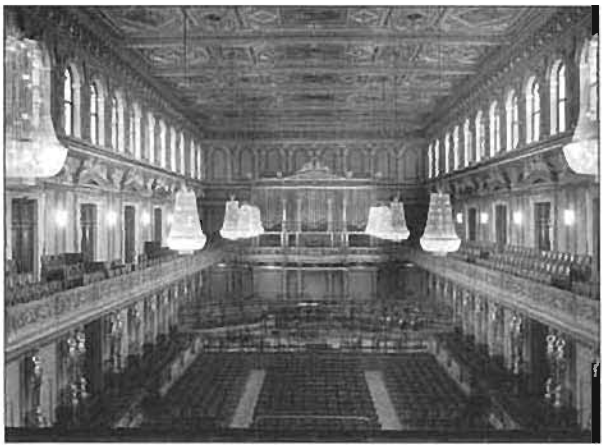


Figura 18. Grosser Musikvereinsaal de Viena, de T. R. von Hansen (1870).

Figura 19. Concertgebouw de Amsterdam, de A. L. van Gendt (1888).

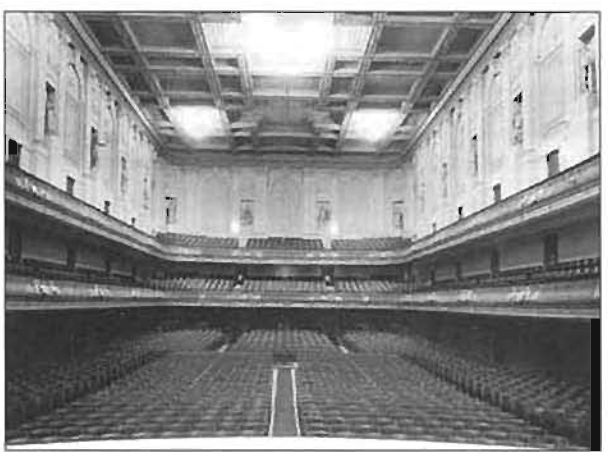


Figura 20. Symphony Hall de Boston, de McKim, Mead y White.

Figura 21. Gewandhaus de Leipzig.

Es en esta época cuando Wagner promueve activamente en Alemania el Bayreuth Festspielhaus (1872-76), obra del arquitecto Otto Brückwald. Fue en esta obra cuando se aceptaron los nuevos principios de Wagner: cávea para la orquesta (a un nivel inferior), asientos dispuestos en anfiteatros, ausencia de palcos y galerías, y un auditorio a oscuras. Los teatros wagnerianos fueron diseñados para ser en cierto modo algo reverberantes y armonizar con los expresivos colores tonales de las óperas del compositor. Con las innovaciones de Wagner, se podría decir que se inicia lo que hoy conocemos como el teatro moderno.

Dos salas construidas en este período: el Grosser Musikvereinsaal de Viena, de T. R. von Hansen (1870) (Fig. 18) y el Concertgebouw de Amsterdam, de A. L. Van Gentl (1888) (Fig. 19), están consideradas hoy en día por la comunidad musical como dos de las tres salas de mejor acústica. La tercera sala, la Symphony Hall de Boston (Fig. 20), construida a principios del siglo XX, está inspirada en otra que tuvo también excelentes condiciones acústicas: la Neues Gewandhaus de Leipzig de M. Gropius y H. Schimieden (1844), tristemente destruida por un bombardeo en 1944 y sustituida por una nueva sala (Fig. 21).

EL TEATRO EN ESPAÑA Y EN ANDALUCÍA

En líneas generales, y con una evolución muy similar, aunque retrasada con respecto a la del resto de Europa, la arquitectura teatral en España la podemos dividir en tres grandes etapas, atendiendo a la

evolución tipológica de la misma[15]. En un primer momento, y sin olvidar los ejemplos de la arquitectura teatral romana que se localizan en nuestro país, el teatro se localiza en la urbe y en asentamientos poco estables (el teatro urbano de la ciudad y de las plazas públicas). El período al que nos referimos abarca desde la época medieval a las primeras implantaciones teatrales renacentistas.

Durante la segunda etapa, desde mediados del siglo XVII a comienzos del XIX, y con las influencias procedentes del teatro clásico italiano, se desarrolla el tipo arquitectónico que hoy en día mejor define a nuestra cultura teatral: el teatro a la italiana. En el edificio teatral a la italiana, específicamente construido para la práctica teatral, se incorporan los conocimientos de la época acerca de las necesidades acústicas y ópticas. El establecimiento de un conjunto de pautas funcionales y estéticas termina por fijarlo, coincidiendo con el rápido desarrollo del drama musical en el siglo XVIII. El modelo por excelencia de este período es La Scala de Milán.

Finalmente, a lo largo del siglo XIX es cuando tiene lugar el nacimiento de la mayor parte de los teatros de nuestro país. En esta tercera etapa, la transformación del tipo arquitectónico derivará en diferentes modelos teatrales generales, consecuencia de la adaptación de lo teatral a los nuevos espectáculos, y que no desaparecerá ni con la incorporación del cinematógrafo desde comienzos del siglo XX.

Desde principios del siglo XIX, y coincidiendo con el período histórico en el que se acota nuestra investigación, en Andalucía es frecuente encontrar estos nuevos modelos derivados, que responden a edificios que se adaptan a una gran diversidad de situaciones.

Según A. L. Fernández[16], en los orígenes de los edificios teatrales de esta etapa histórica, se dan tres formas de aparición vinculadas a diversos modos de resolver la generación de los espacios internos. La primera de ellas es el proyecto de edificios de nueva planta, que suele desarrollarse de acuerdo a los tratados de arquitectura y cuyo análisis se realiza en base a cuestiones inherentes al tipo teatral. El Teatro Olivares Veas de Arcos de la Frontera (Cádiz) es un ejemplo de lo dicho anteriormente, ya que utiliza la forma de la sala para articular los diferentes espacios, en el complejo solar sobre el que se asienta.

Las otras dos formas tienen que ver con propuestas arquitectónicas más complejas y en las que existe una relación con arquitecturas preexistentes. En un primer grupo nos encontramos que a veces los teatros provienen de la desamortización decimonónica de edificios religiosos: el Teatro del Carmen, de Vélez-Málaga es un claro ejemplo; en él pueden apreciarse signos externos del antiguo convento (Fig. 22). Otras, por el contrario, el lugar escogido era un edificio civil: el Teatro Garnelo de Montilla (Fig. 23) se ubica sobre un viejo mercado del que hereda algunas formas.

Figura 22. Teatro del Carmen de Vélez-Málaga.

Figura 23. Teatro Garnelo de Montilla.

[15] Fernández Muñoz, A. L. (1989). *Arquitectura teatral en Madrid: del corral de comedias al cinematógrafo*. Madrid: El Avapiés, S.A., p. 19.

[16] Fernández Muñoz, A. L. (1990). El Teatro. Formas y funciones. (en: *Arquitectura teatral y cinematográfica. Andalucía 1800-1990*). Sevilla: Consejería de Cultura y Medio Ambiente, Junta de Andalucía, p. 36. Autor, p. 36.

Figura 24. Teatro Apolo de Almería.

Figura 25. Teatro Villamarta de Jerez de la Frontera.

En un segundo grupo, los teatros forman parte de un complejo arquitectónico de orden superior, y en los que éstos tienen mayor o menor relevancia. En este grupo destacan las edificaciones teatrales asociadas a operaciones de carácter residencial, normalmente vinculadas a grandes ciudades, donde la necesidad de rentabilidad es mayor. En Sevilla es donde más ejemplos de este tipo podemos encontrar, muchas veces relacionado con la tradición española de los corrales de comedia.

Figura 26. Gran Teatro Falla de Cádiz.

Muchas de las salas teatrales comparten una singularidad de trazado, derivada de los conocimientos y reglas que en la época en que se construyeron se tenía sobre las cuestiones de acústica y visibilidad. No obstante, en muchas ocasiones aparecían dificultades para construir una sala teatral de proporciones adecuadas, acorde a esas exigencias visuales y acústicas. Como ejemplo tenemos el Teatro Apolo de Almería (Fig. 24) o el Teatro Principal de Puerto Real, los dos de proporciones muy alargadas. Otras veces, las salas se verán afectadas por la aparición del cine que, en algunos casos, provocará la supresión de las formas excesivamente elaboradas y su sustitución por otras que concentren toda la atención del espectador sobre la pantalla, generando espacios simples de formas rectangulares.

En cuanto al emplazamiento de la orquesta, sólo en los mayores teatros se ha seguido la tradición teatral de ubicarla en el foso, frente a la corbata. Algunos de los mejores ejemplos andaluces lo constituyen los teatros Villamarta de Jerez de la Frontera (Fig. 25) y Falla de Cádiz (Fig. 26).

1.2. LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

Durante los siglos XVII a XIX una serie de científicos se preocuparon por explicar los fenómenos del sonido, elaborando teorías que sentaron las bases de una nueva disciplina: la física del sonido o la "Acústica". Los trabajos de Huygens (1629-1695), Newton (1642-1724), D'Alembert (1717-1783), Laplace (1749-1827), Chladni (1756-1827), Fourier (1772-1837), Helmholtz (1821-1894) y tantos otros, contribuyeron a elevarla a la categoría de ciencia. Sin embargo, los constructores de salas teatrales o de conciertos no utilizaban otro conocimiento que la experiencia y el oficio, las aproximaciones y el tanteo. El principal instrumento de medida, por no decir el único, era el oído. La acústica de salas era más un arte que una ciencia. Los resultados que se obtienen son muy dispares. Como afirma Forsyth, "la fama generalmente buena de las salas de concierto y teatros de ópera más antiguos que existen en la actualidad ha sido ayudada, indudablemente, por un proceso de selección natural"[1].

Bien entrado el siglo XIX aparecen dos textos que suponen una indudable aportación al desarrollo de esta nueva ciencia. En 1838, John S. Russell publica en Edimburgo su *Treatise on sightlines*[2], en el que proponía un sencillo método, *isacoustic curve* (Fig. 1), para el diseño de auditorios desde un punto de vista acústico, método que fue utilizado por Adler y Sullivan en el gran Auditorium de Chicago, inaugurado en 1889 y que fue el modelo para muchos auditorios americanos del siglo XX. Adler fue el arquitecto responsable de la acústica. Tenía una capacidad total de 4.237 plazas.

El segundo texto es el magnífico tratado *Theory of sound*, publicado en dos volúmenes por Lord Rayleigh (1842-1919), en Inglaterra, en 1877. Además, en ese mismo período se iniciaron los estudios de psicoacústica con los trabajos de Fechner basados en los realizados anteriormente por Weber (1795-1878), que dieron lugar a la publicación de *Elementos de Psicofísica*, en 1860. En esos trabajos Fechner planteaba la relación existente entre la magnitud del estímulo y la sensación sonora (ley de Weber-Fechner).

Por lo que se refiere a acústica de salas, destacamos asimismo tres textos publicados en este siglo XIX escritos por arquitectos europeos: *Ueber theater order bemerkungen über katacoustics* (Fig. 2), publicado por el arquitecto alemán Carl F. Langhans en 1810; *L'acoustique et l'optique des salles de réunions*, publicado por el arquitecto francés T. Lachéz en 1848; y *The Acoustics of public buildings*, escrito por el arquitecto británico T. Roger Smith. El primero de los tres fue publicado en Berlín en 1810 y escrito cuando el autor tenía 28 años. En él se demuestra, utilizando lo que conocemos hoy como acústica de rayos, la no idoneidad de las formas circulares o elípticas para teatros, defendidas por Saunders y Patte, respectivamente, que habían

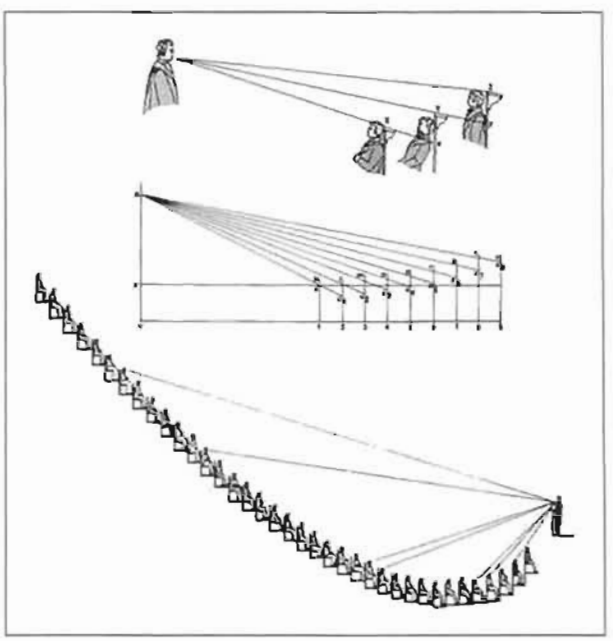


Figura 1. Diagramas explicando el principio de John Scott Russell "isacoustic curve"

[1] Forsyth, M. (1985). *Buildings for music*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 13.
[2] Publicado en *New Philosophical Journal*, 27, 1838.

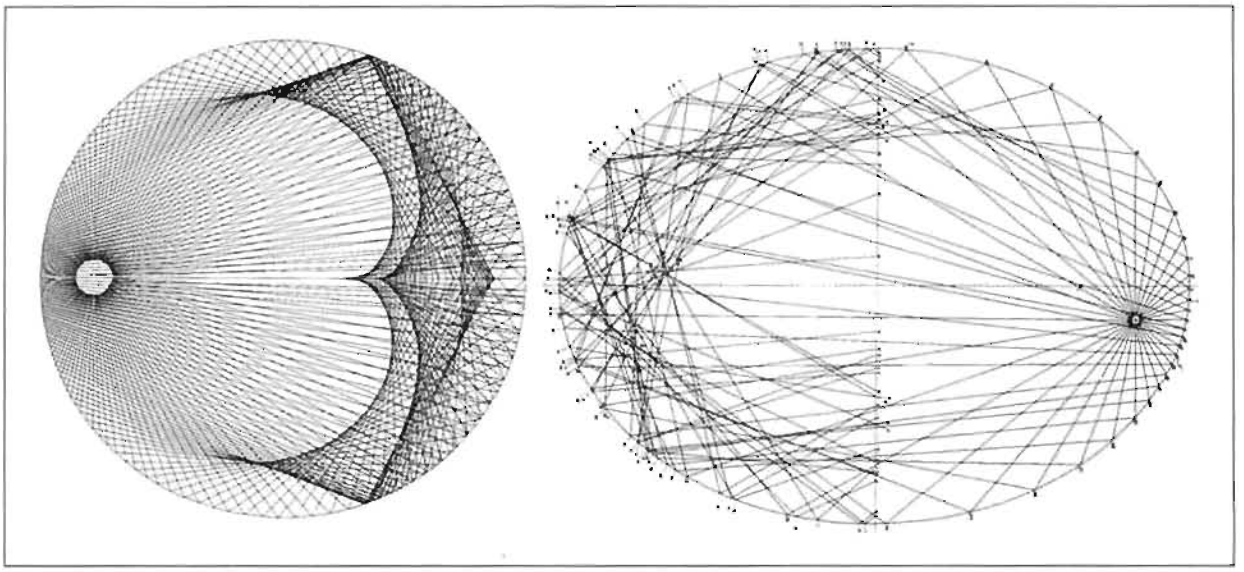


Figura 2. Ilustraciones de *Ueber theater order bemerkungen über katacoustics.*

tenido un gran éxito en el período ilustrado. Para Izenour[1] este texto es el más importante sobre diseño de teatros en general, y sobre acústica de salas en particular, desde que se redescubrió el tratado de Vitruvio hasta los escritos de Sabine.

Pero, para considerar lo que hoy denominamos acústica arquitectónica como una rama científica de la acústica, hay que esperar hasta finales del siglo XIX y principios del siglo XX, cuando se suceden una serie de trabajos realizados en la Universidad de Harvard por el físico W. C. Sabine (1868-1919), que más tarde se reunirían en un texto clásico de referencia: *Collected papers on Acoustics*[2], publicado por Harvard University Press en 1922. La ecuación de Sabine para la obtención del tiempo de reverberación, publicada en su famoso artículo *Reverberation*, ha sido para la acústica arquitectónica, y más concretamente, para la acústica de salas, lo que en su día pudo ser la ley de Ohm para la electricidad o la ley de Hooke para la elasticidad. Esa fórmula es para Frederick V. Hunt, en la introducción que hace en 1964 a la edición de Dover de los citados trabajos de Sabine, "the hard core of the science of sound control in listening rooms". Es más, Leo L. Beranek en el prefacio a la reimpresión de estos trabajos realizada en 1992 por Peninsula Publishing (Los Altos, California), reconoce que la fórmula de Sabine es "the cornerstone of modern acoustics".

La ecuación de Sabine consiguió lo que toda investigación científica debe procurar: el planteamiento de nuevos problemas. Su utilización permitió, por primera vez, el estudio previo (en proyecto) de las cualidades acústicas de una sala, en relación a su tamaño y la naturaleza de los materiales utilizados como revestimientos o acabados, basándose en auténticos criterios científicos. Forsyth[3] relata cómo, en la época de Sabine, era frecuente aplicar soluciones empíricas. Una de las favoritas fue tender hilos metálicos de 4 a 5 millas de longitud a través de espacios interiores de iglesias y teatros, demasiado reverberantes, con la ingenua presunción de que esos hilos absorberían la energía sonora cuando entrasen en vibración, como las cuerdas de un violín.

Tal y como han demostrado investigaciones posteriores, la fórmula para la obtención del tiempo de reverberación propuesta por Sabine tiene importantes limitaciones, aunque hoy, pasados 100 años desde

---

[1] Izenour, G. C. (1996). *Theater design*. New Haven & London: Yale University Press, p. 65.

[2] Se recopilaron 11 artículos más un apéndice. Los títulos de los trabajos son los siguientes: 1. *Reverberation*. 2. *The accuracy of musical taste in regard to Architectural Acoustics. The variation in reverberation with variation in pitch*. 3. *Melody and the origin of the musical scale*. 4. *Effects of air currents and of temperature*. 5. *Sense of loudness*. 6. *The correction of acoustical difficulties*. 7. *Theatre acoustics*. 8. *Building material and musical pitch*. 9. *Architectural Acoustics*. 10. *Insulation sound*. 11. *Whispering galleries*. El apéndice era una serie de notas en francés para una conferencia que Sabine pensaba impartir en la Universidad de la Sorbonne en la primavera de 1917: *Note on measurement of the intensity of sound and on the reaction of the room upon the sound*.

[3] Forsyth, M. (1985). *Opus cit.*, p. 245.

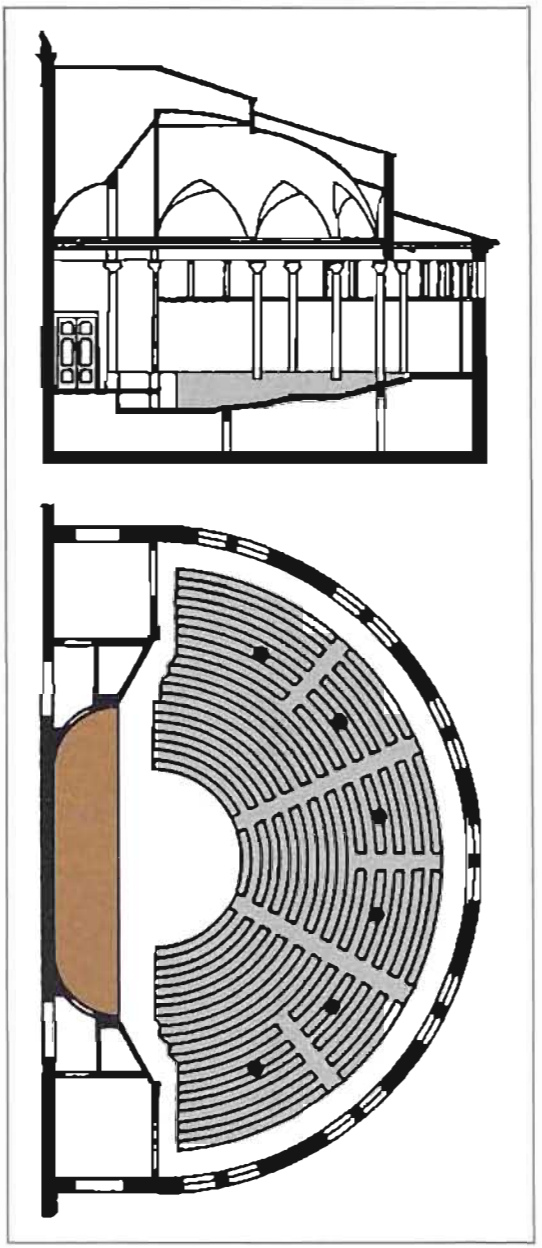


Figura 3. Planta y sección del Fogg Art Museum.

su obtención, sigue siendo aún la más utilizada por los acústicos de salas, que consideran además a esta variable, el tiempo de reverberación, la principal a controlar para lograr unas buenas condiciones acústicas interiores. No es por ello de extrañar que a Sabine se le considere el padre de la acústica arquitectónica: sus estudios fueron el comienzo de otros que han permitido acercarse a los problemas de acondicionamiento acústico de salas con auténticos criterios científicos, lejos ya de los tradicionales tanteos. En sus primeros estudios sobre acústica de salas, Sabine no contó con otro instrumental que un pequeño órgano, un cronómetro y sus oídos. La sofisticación de los equipos e instrumentos de medida acústicos, que ha posibilitado el desarrollo tecnológico posterior, no ha hecho sino confirmar, si no la exactitud, sí la validez de esos estudios.

Sabine no fue desde luego un teórico de la física, más bien todo lo contrario: aplicó sus teorías a su labor como consultor acústico en numerosas obras. De hecho, como relata Izenour[6], Sabine, profesor asistente de la Universidad de Harvard, no había mostrado ninguna predilección por la acústica aplicada hasta que no recibió la orden del rector de la universidad de intentar corregir las graves deficiencias acústicas (una excesiva reverberación) de la sala de conferencias recién terminada, en forma de anfiteatro, del Forgg Art Museum (Fig. 3), según el proyecto del arquitecto Richard M. Hunt, encargo que Sabine realizó con gran profesionalidad y por el que obtuvo un gran éxito. El ya citado artículo *Reverberation* ilustra la importancia que para la acústica de salas tuvo este trabajo de Sabine. El método seguido para la corrección acústica de esta sala consistió en encontrar la relación entre la absorción sonora de los materiales y el tiempo de reverberación, lo cual derivaría en la formulación de su famosa ecuación para la obtención del tiempo de reverberación en 1898.

Sin embargo, la más famosa de todas sus labores como consultor fue el Boston Symphony Hall[7] (Fig. 4), una sala con un aforo de 2.600 personas sentadas, unánimemente considerada entre los tres o cuatro mejores auditorios en el mundo para música sinfónica, aunque no recibió una crítica elogiosa en los primeros años que siguieron a su inauguración[8] el 15 de octubre de 1900.

Pero la mayor aceleración de la acústica arquitectónica se produjo con determinados inventos que dieron lugar a un desarrollo de los instrumentos de medida de la acústica de salas fiables, así como los avances de lo que podríamos denominar la acústica de la comunicación, principalmente con la radiodifusión y el desarrollo de los sistemas de telefonía, a partir de 1920. También con el cine sonoro, que llegaría a ser el más popular de los espectáculos del pasado siglo. Los avances en electroacústica permitieron el desarrollo de los aparatos productores, grabadores y reproductores del sonido.

---

[6] Izenour, G. C. (1996). *Opus cit.*, p. 87.

[7] Denominada inicialmente como Boston Music Hall, tuvo como arquitecto a Charles Follen McKim (1847-1909). En su forma rectangular, preferida por Sabine, se utilizó como referencia, según Forsyth, la vieja Boston Music Hall y la Neues Gewandhaus de Leipzig, de Martin Gropius y Heinrich Schmieden, inaugurada en 1884 (y destruida en la segunda guerra mundial), considerada un excelente modelo de acústica; en Forsyth, M. (1985). *Opus cit.*, p. 250.

[8] Tal y como relata Beranek en el prefacio ya citado a la reedición de *Collected papers on Acoustics*.

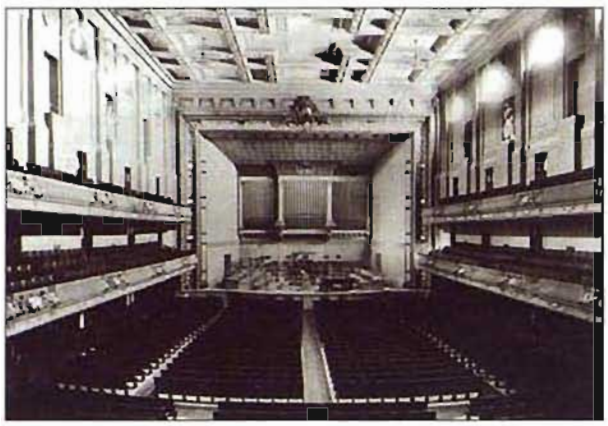


Figura 4. Interior del Symphony Hall, Boston.

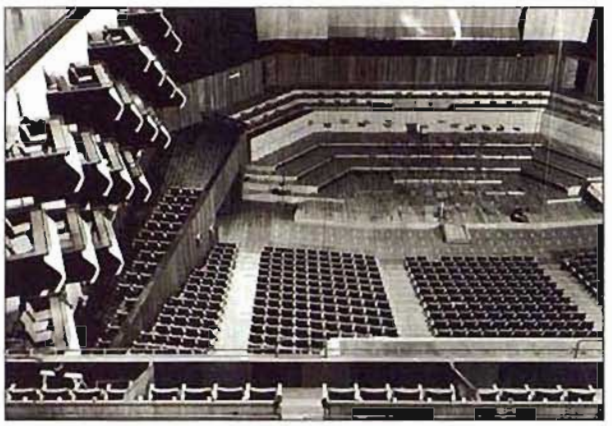


Figura 5. Royal Festival Hall, Londres.

Tal y como afirma L. Beranek, la acústica arquitectónica recibió un empuje en las décadas de los años 30 y 40 del pasado siglo XX, tanto en lo teórico como en lo experimental, a partir de los trabajos desarrollados en diversos centros de investigación universitarios en Estados Unidos (Harvard, MIT, Universidad de California en Los Ángeles) y de Europa, principalmente Inglaterra y Alemania[9]. En este período se explicó con detalle la extinción del sonido en recintos rectangulares[10], se expuso la teoría de los modos propios de vibración en recintos rectangulares[11] y se demostró la eficacia del método de la impedancia acústica de materiales.

En los años 60 del pasado siglo se produjo otro sustancial avance en la acústica de salas con la introducción de sistemas electrónicos para alterar las características reverberantes en salas de conciertos. La utilización de sistemas electroacústicos (principalmente la intervención de micrófonos, altavoces y amplificadores) para amplificación del sonido y refuerzo de los niveles sonoros percibidos en los distintos puntos de un cine o de una sala de conferencias, por ejemplo, ya se había experimentado con éxito desde los años 20, tal y como hemos señalado anteriormente, pero lo que se pretendía con la introducción de esos nuevos sistemas electrónicos eran cosas totalmente diferentes, entre otras, corregir las deficiencias de una sala ya construida, adaptar las condiciones acústicas en una sala polifuncional a sus diferentes usos, e incluso simular las condiciones acústicas de una sala cerrada en teatros y pabellones al aire libre.

Entre esos primeros nuevos sistemas electrónicos destacamos dos de ellos: el utilizado en el *Royal Festival Hall* de Londres (Fig. 5), que Parkin instala en 1964 denominándolo de resonancia asistida, con el fin de corregir las graves deficiencias acústicas; y los sistemas de energía reflejada electrónicamente que Jaffe instala en una serie de actuaciones de la orquesta sinfónica de St. Louis, por un conjunto de plazas y parques alrededor de la ciudad[12].

La introducción de estos nuevos sistemas electrónicos, principalmente en recintos cerrados, produjo una cierta polémica, por la oposición de la comunidad musical a esta nueva tecnología, aunque experimentos psicoacústicos realizados a partir de entonces han demostrado que la mayoría de los oyentes ha sentido la mejora de la calidad de la sensación sonora con la introducción de estos nuevos sistemas en salas acústicamente deficientes. Hoy en día, se puede afirmar[13] que aquella tendencia inicial de rechazo que supuso

[9] Beranek, L. L. (1993). *Acoustics*. Nueva York: Acoustical Society of America, p. 1.

[10] Frederick V. Hunt, el mismo autor de la famosa publicación recientemente reeditada *Origins in Acoustics. The science of sound from antiquity to the age of Newton*. New York: Acoustical Society of America, 1992, perfeccionó un instrumento capaz de trazar las curvas de extinción del sonido en un recinto cerrado cuando la fuente deja de emitir.

[11] En 1936, el investigador del MIT P. M. Morse publicó *Vibration & Sound*, donde desarrolló esta teoría.

[12] Una buena síntesis de las novedades que introducían estos nuevos sistemas electroacústicos la podemos leer en un artículo de Thomas Fisher titulado *Sound tract*, publicado en *Progressive Architecture*, 2, 1983, pp. 129-135.

[13] *Sound tract* (1983). *Opus cit.*, 2, p. 131.

la introducción de dichos sistemas se ha invertido y en la actualidad están perfectamente aceptados. Se atribuye este cambio de opinión a que la educación musical de la mayor parte de las personas que asisten en la actualidad a los conciertos de música, la han adquirido con equipos de reproducción musical en estéreo, y no en actuaciones en directo, de modo que incluso el público, en general, puede preferir las características del sonido producido por los sistemas acústicos electrónicos, por su fidelidad a la música grabada a la que deben su educación musical.

Para el proyecto de teatros y auditorios en estos últimos cien años, se ha recurrido a estudios de simulación del campo sonoro en el interior de recintos, inicialmente mediante diversos tipos de modelos reducidos, hoy en día con la ayuda de potentes programas informáticos que están suponiendo un importante paso en la evolución de esta joven rama de la física aplicada. Sabine fue también pionero en la simulación, al utilizar *spark photo* (foto de chispazo), que son verdaderos gráficos de la evolución del frente de ondas sonoras en modelos a escala reducida de salas. Muchas de estas fotos ilustran uno de sus artículos: *Theatre acoustics*[14].

En los años 60 se utilizaban normalmente para los estudios de acústica de salas mediante modelos reducidos los modelos ópticos y los modelos acústicos. Los ópticos, desarrollados por R. W. Leonard, normalmente eran bidimensionales aunque también, si era necesario, se recurría a modelos tridimensionales. Una fuente de luz se situaba en las localizaciones posibles de la fuente sonora. El contorno de la sala se formaba por franjas de material reflectante a la luz (aluminio, acero). Proporcionaban, con cierta aproximación, información del avance de los frentes de ondas de altas frecuencias y de la influencia del contorno del auditorio en ese avance, tras las reflexiones en paredes y techos. Sin embargo no eran adecuados para las bajas frecuencias (Fig. 6).

En los modelos acústicos, la relación entre la longitud de onda del sonido y las dimensiones del recinto debe ser la misma en el modelo que en la sala, es decir, si se quiere analizar la respuesta de una sala a la frecuencia de 250 Hz, debería usarse una emisión de la fuente en el modelo a 2.500 Hz si ese modelo está a una escala 1/10. De hecho, hubo que desarrollar instrumentación adecuada para emitir y recibir sonidos de muy altas frecuencias para construir modelos más pequeños (escala 1/16 o escala 1/24). Como fuente se usaba una chispa *(spark)* eléctrica que proporciona una señal impulsiva de banda ancha omnidireccional, usando como receptores micrófonos direccionales. La señal del micrófono se filtraba en la banda de frecuencia de interés. De este modo era posible obtener la respuesta al impulso de la sala a bajas, medias y altas frecuencias.

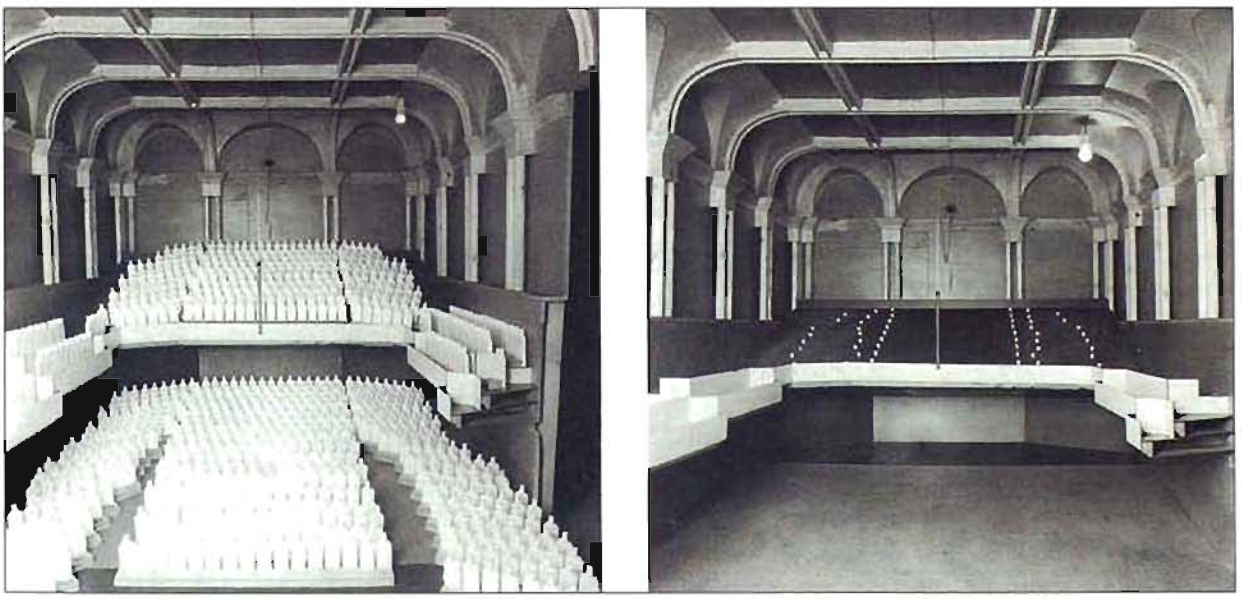


Figura 6. Modelo a escala 1:10 del Dublin Concert Hall (con y sin audiencia).

[14] Sabine, W. C. (1964). *Collected papers on Acoustics*. Los Altos (California): Peninsula Publishing, 1992, pp. 163-197 (edición original en 1924. Massachusetts, Cambridge: Harvard University Press).

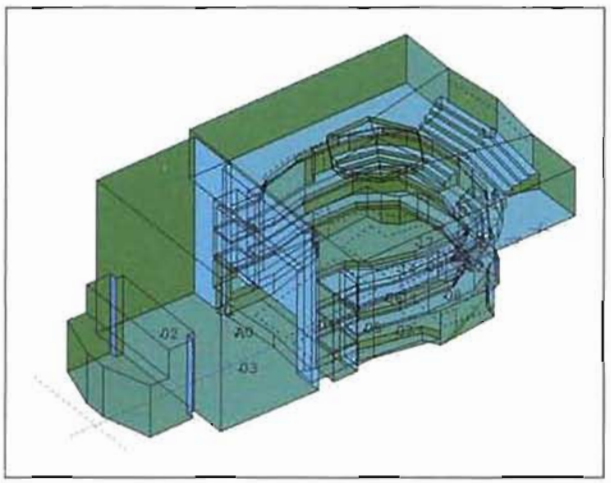


Figura 7. Modelo tridimensional. Teatro Lope de Vega (Sevilla).

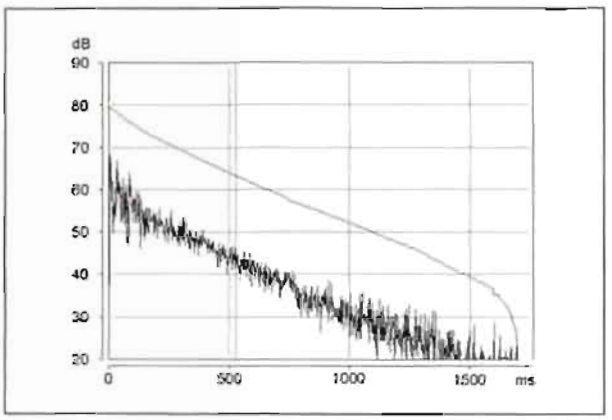


Figura 8. Respuesta al impulso simulada en el interior del Teatro Lope de Vega.

Pero unos y otros han sido superados, a partir de los años 80 del pasado siglo, por los modernos programas informáticos de simulación del campo sonoro en el interior de recintos (Figs. 7 y 8). El paso siguiente en esa evolución ha sido la aparición, en la siguiente década, de los denominados sistemas de generación de sonido virtual, que permiten la simulación de la audición (de palabra o musical), con la ayuda de auriculares conectados a los equipos, en cualquier punto ocupado de un teatro o auditorio antes de que este esté construido (por ejemplo, en fase de proyecto o de rehabilitación), lo que comúnmente se conoce con el nombre de "auralización"[15], una poderosa y novedosa herramienta para el proyecto de salas de buena acústica. Quizás el paso siguiente lo constituyan los denominados sistemas de realidad virtual, que en palabras del profesor Blauert, "proporcionan el potencial para exponer a los seres humanos a un entorno artificial generado por ordenador y/o controlado por ordenador de una manera que sientan y actúen como si estuviesen en un entorno natural"[16].

[15] El término auralización fue introducido, en el año 1990, por Mendel Kleiner, un investigador de la Universidad Tecnológica de Chalmers, en Göteborg (Suecia).

[16] Blauert, J. *Desde la simulación acústica de salas por ordenador a la realidad virtual interactiva*. Conferencia de clausura del Congreso Nacional de Acústica celebrado en Oviedo, TecniAcustica'97, 1997. Publicada en las actas del citado congreso.

1.3. ESTUDIOS MÁS RELEVANTES SOBRE LA ACÚSTICA DE UN CONJUNTO DE SALAS

Durante los últimos 30 años, la investigación sobre acústica de salas ha tenido un progreso considerable, sobre todo en auditorios y salas de concierto. Sin embargo, en este período de tiempo no abundan los estudios que aborden un análisis acústico de conjunto de un grupo de salas, enfocándolo de forma global y con el objetivo de establecer conclusiones genéricas. La mayor parte de las aportaciones relacionadas con este tipo de estudios proceden, normalmente, de las colaboraciones entre expertos y estudiosos en la materia, así como del intercambio de opiniones e información en los congresos y demás reuniones científicas.

Además de esta importante y necesaria línea de investigación, los arquitectos y consultores acústicos precisan del conocimiento que, con carácter general, les permita proyectar teatros y auditorios con auténticos criterios acústicos. En acústica de salas, una de las mejores opciones para lograr ese conocimiento es el análisis de un conjunto de salas existentes, especialmente cuando responden a tamaños y tipos similares. Ese será, pues, uno de los objetivos de este trabajo sobre la acústica de teatros recientemente rehabilitados en la comunidad autónoma de Andalucía.

Presentaremos como antecedentes, expuestos de forma cronológica, algunos de los más importantes estudios de destacados especialistas en acústica de salas, los cuales centraron sus investigaciones en salas de conciertos y teatros de ópera de diversas ciudades de América, Europa y Asia.

J. S. BRADLEY

En 1991, J. S. Bradley presenta un estudio comparativo de tres importantes salas de concierto[1]: el Concertgebouw de Amsterdam (Holanda), el Grosser Musikvereinssaal de Viena (Austria) y el Symphony Hall de Boston (USA). Todas ellas tienen forma prismática rectangular, con anfiteatros laterales y de fondo. Los datos básicos de estas tres salas se presentan en la tabla 1.

En muchas ocasiones, las opiniones acerca de las condiciones acústicas de un sala presentan valoraciones muy diversas y, por tanto, es difícil obtener un acuerdo sobre su calidad acústica. Este es el motivo por el que el autor elige para el análisis, tres salas reconocidas universalmente como las de mejor acústica, para intentar obtener conclusiones al respecto.

Las medidas realizadas, en ausencia de público, se llevaron a cabo con un sistema de medida propio (RAMSoft[2]), usando como fuente una pistola de fogueo calibrada. Los valores de los parámetros, en las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz, eran obtenidos *in situ* en cada uno de los puntos

Tabla 1. Salas de conciertos estudiadas por Bradley (1991)

Salas de concierto	*Fecha*	*Volumen (m^3)*	*Aforo (N)*
Concertgebouw de Amsterdam. Holanda	1888	18.780	2.037
Grosser Musikvereinssaal de Viena. Austria	1870	15.000	1.680
Symphony Hall de Boston. USA	1900	18.750	2.625

[1] Bradley, J. S. (1991). A comparison of three classical concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89, pp. 1176-1192.

[2] Bradley, J. S. y Halliwell, R. E. (1986). New room acoustics measurement software. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Suppl. 1 80, S39.

con la ayuda de un ordenador portátil. Para la transmisión digital al ordenador se utilizaba un analizador en tiempo real.

En cada sala, las medidas fueron realizadas para tres posiciones diferentes de la fuente sonora, y entre 10 y 14 posiciones de los receptores distribuidos sobre las áreas de audiencia.

Se estudiaron cinco parámetros acústicos[3]: tiempo de reverberación RT, tiempo de caída inicial EDT, fuerza acústica G, claridad C_{80} y eficiencia lateral LF. Además de éstos, se midieron otros siete parámetros más (niveles de ruido de fondo, inteligibilidad de la palabra, etc.), cuyos resultados no se publicaron.

En todos los auditorios los asientos estaban ligeramente tapizados, por lo que eran de esperar considerables cambios en los valores con presencia de público. En este trabajo, el autor concede más importancia a los resultados medidos con las salas vacías, ya que la mayor parte de las medidas normalmente se realizan en estas condiciones y, por ello, resulta más interesante a efectos comparativos.

Las medidas de los cinco parámetros se promediaron espacialmente para todas las posiciones de las fuentes sonoras y de los receptores. Los resultados de cada uno de ellos se presentaron en cinco gráficas distintas en función de la frecuencia. Asimismo, se analizaron las variaciones de los parámetros, mediante la desviación estándar de los resultados obtenidos en los diferentes receptores y para las distintas posiciones de la fuente sonora.

La tabla 2 presenta los resultados medios obtenidos, que pueden ser entendidos como el rango de los valores recomendados en salas de concierto de volumen y capacidad similar, para los cinco parámetros que mejor definen su calidad sonora.

Las gráficas del tiempo de reverberación RT y del tiempo de caída inicial EDT mostraron valores muy similares en las tres salas. En cambio, los valores de la fuerza acústica G presentaron una dispersión importante, sobre todo en el Symphony Hall de Boston. Las gráficas de la claridad C_{80} mostraban que en las salas que tenían mayores tiempos de reverberación los valores eran más bajos, es decir, a mayor reverberación menor claridad musical. En cuanto a la eficiencia lateral LF, los resultados no fueron los esperados, ya que en las salas más estrechas se midieron los valores más bajos de LF.

Aunque hubiese sido interesante determinar el efecto de la audiencia, comparando los valores de los parámetros acústicos con las salas ocupadas, las medidas en tales condiciones no llegaron a realizarse.

Los valores del tiempo de reverberación con las salas ocupadas (RT_o), estaban disponibles gracias a diversas mediciones realizadas por distintos autores. Sin embargo, Bradley no daba mucha validez a estos resultados. Por ello, los valores de los cinco parámetros acústicos con las salas ocupadas se estimaron mediante procedimientos analíticos. Los resultados obtenidos tras estas estimaciones mostraron que, en general, las tres salas presentan unas propiedades acústicas muy similares cuando están ocupadas, similitud que no era tan evidente en ausencia de público.

Después de hacer una valoración global, tanto con las salas vacías como ocupadas, Bradley hace un estudio que atiende a las distintas localizaciones de fuentes y receptores con las salas vacías.

Tabla 2. Resultados obtenidos para las tres salas de concierto

Parámetros medidos (salas vacías)	*Rango de valores medios a frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz)*
RT_{mid}	2,40 a 3,10 s
EDT_{mid}	2,35 a 3,00 s
G_{mid}	2,9 a 6,6 dB
C_{80}	−2,3 a −4,0 dB
LF	0,16 a 0,25

[3] En el apéndice 4.1 se definen los principales conceptos de la acústica de salas.

Además de lo anterior, comparó los niveles de presión sonora medidos con los previstos aplicando el modelo clásico y el de Barron[4]. En las tres salas, el primero se consideró inadecuado para predecir resultados, mientras que la teoría revisada de Barron presentaba una aproximación razonable, confirmándose como un procedimiento útil para predecir los niveles sonoros en este tipo de auditorios.

Finalmente, el autor afirmaba que una mejora adicional del procedimiento de predicción requeriría la inclusión de datos geométricos y de materiales de cada una de las salas, así como la utilización de las técnicas de trazados de rayos por ordenador.

MICHAEL BARRON

En 1993, Michael Barron publica la obra *Auditorium acoustics and architectural desing*[5], en la que se realiza un estudio acústico en el que se incluyeron auditorios de todos los tipos existentes en Gran Bretaña: salas de concierto, teatro de drama y ópera y espacios multiusos.

La parte sustancial del trabajo de Barron se centró en salas de concierto, concretamente en doce de ellas. Su estudio se basó en las medidas de determinados parámetros que permitían una valoración objetiva de las condiciones acústicas de dichas salas, así como en los resultados obtenidos en las encuestas que se realizaron tras una serie de actuaciones públicas, con el fin de hacer también una valoración subjetiva de estas condiciones.

En la tabla 3 aparecen los datos básicos de las doce salas de concierto británicas.

Las pruebas subjetivas, efectuadas en 1988, se llevaron a cabo sobre un grupo de veintisiete expertos acústicos, principalmente consultores acústicos. Este grupo de oyentes asistió a los conciertos, intercambiando sus posiciones en los asientos durante los descansos de las representaciones. Posteriormente, reflejaron sus juicios sobre un cuestionario (Fig. 1). Los expertos daban su "impresión general" sobre la acústica de la sala, reflejándola en un grupo de escalas gráficas de distintos parámetros: reverberación, espacialidad, intimidad, etcétera.

Tabla 3. Datos básicos de las salas de concierto británicas estudiadas por M. Barron (1993)

Salas de Concierto	*Fecha*	*Volumen (m^3)*	*Aforo (N)*	*RT_{mid} (s). Ocupado*
Royal Albert Hall, Londres	1871	86.650	5.090	2,4
Usher Hall, Edimburgo	1914	16.000	2.550	1,7
Philharmonic Hall, Liverpool	1939	13.560	1.951	1,6
Town Hall, Watford	1940	11.600	1.586	1,5
Royal Festival Hall, Londres	1951	21.950	2.901	1,7
Colston Hall, Bristol	1951	13.450	2.122	1,7
Free Trade Hall, Manchester	1951	15.430	2.529	1,6
Fairfield Hall, Croydon	1962	15.400	1.789	1,7
Wessex Hall, Poole	1978	12.430	1.593	1,6
Barbican Concert Hall, Londres	1982	17.750	2.026	1,6
St. David's Hall, Cardiff	1982	22.000	1.957	2,0
Royal Concert Hall, Nottingham	1982	17.510	2.501	1,8

[4] Barron, M. y Lee, L.-J. (1988). Energy relations in concert auditoriums. I. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84 (2), pp. 618-628.

[5] Barron, M. (1993). *Auditorium acoustics and architectural design*. Londres: E & FN Spon and imprint of Chapman & Hall, p. 61.

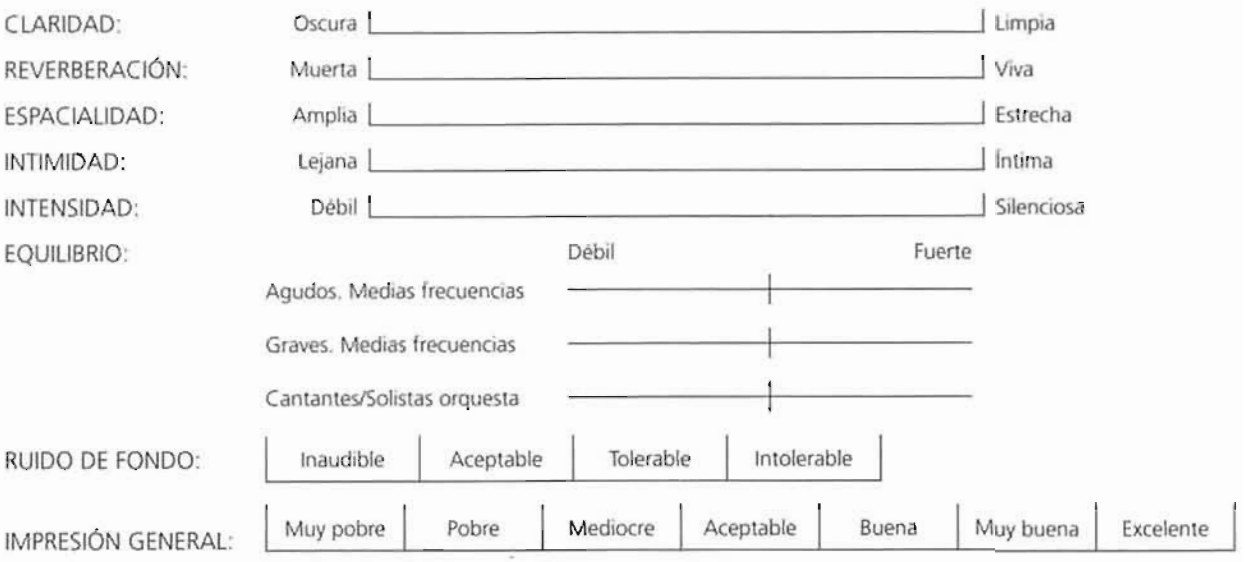


Figura 1. Cuestionario usado por Barron para el estudio subjetivo de salas de concierto británicas.

Los resultados de las encuestas se dividieron en dos grupos: los que preferían la intimidad y los que se inclinaban por las salas reverberantes. Además, los dos grupos juzgaban la espacialidad de forma diferente, el primero la asociaba con la reverberación y el segundo con la intimidad.

En las medidas objetivas se usaron los mismos cinco parámetros que eligió Bradley: tiempo de reverberación (RT), tiempo de caída inicial (EDT), claridad (C_{80}), eficiencia lateral (LF) y fuerza acústica (G).

Como consecuencia de los estudios subjetivos y objetivos realizados en estas salas británicas, Barron propone los siguientes rangos de valores para las salas de concierto (Tabla 4):

Tabla 4. Valores recomendados por Barron para salas de conciertos

Parámetros	*Rango recomendado*
Edt (S)	1,8 A 2,2
C_{80} (dB)	−2 a +2
LF	0,10 a 0,35
G (dB)	> 0

Aunque Barron centró su atención, principalmente, en salas de concierto, también realizó estudios sobre las condiciones acústicas en diferentes tipos de teatros: de proscenio *(proscenium theatres)*, teatros de escenario adelantado *(thrust-stage theatres)*, de escena abierta *(open stage theatres)* y de escenario central *(theatres in the round)* (Fig. 2).

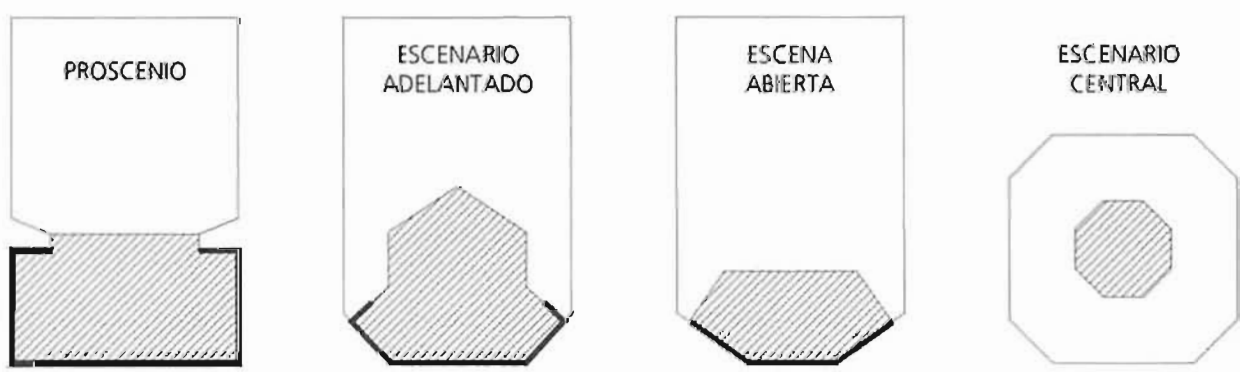


Figura 2. Tipos de teatros estudiados por M. Barron (1993).

Tabla 5. Teatros de proscenio estudiados por M. Barron (1993)

Teatros de Proscenio	*Fecha*	*Volumen (m^3)*	*Aforo (N)*	*RT_{mid} (s). Vacío*
Theatre Royal, Bristol	1766	2.170	638	0,8
Wyndham's Theatre, Londres	1899	2.490	724	0,7
Royal Shakespeare Theatre, Stratford	1932	6.310	1.459	1,0
Arts Theatre, Cambridge	1936	1.576	655	0,7
Lyttelton Theatre, Londres	1976	4.292	890	1,1
Towngate Theatre, Poole	1978	2.433	584	0,9

Los resultados acústicos más relevantes son los correspondientes al primer tipo, es decir, a los teatros de proscenio. Para el estudio de sus condiciones acústicas, Barron realizó mediciones *in situ* en seis de ellos (Tabla 5).

Las mediciones *in situ* se realizaron, para cada teatro, situando una fuente sonora con características direccionales similares a las de la voz humana, en dos posiciones distintas: central C y lateral L, cada una de ellas con orientaciones distintas. Los receptores se situaron entre diez y trece posiciones distintas en una de las mitades de la sala (Fig. 3), puesto que se admitía la simetría del comportamiento acústico en salas de geometría simétrica.

Para la posición lateral de la fuente (L), las condiciones acústicas fueron menos favorables (excepto en los teatros de escenario central, donde la orientación de la fuente en relación al auditorio era irrelevante).

Como consecuencia de su estudio, Barron concluye que, en el análisis acústico de cualquier teatro, deben evaluarse dos parámetros: la fracción de la primera energía *(early energy fraction)*, relacionada con la inteligibilidad de la palabra, y la fuerza acústica *(total speech level)*.

Para obtener una correcta inteligibilidad de la palabra se requieren valores altos de la energía inicial y valores bajos de la energía tardía. Estos últimos, además, son generalmente pequeños cuando los tiempos de reverberación también lo son. Según este investigador[6], el valor recomendado tradicionalmente para el tiempo de reverberación en teatros es de 1 segundo. Valores de 0,7 ó 0,8 segundos producen una buena inteligibilidad. Sin embargo, valores muy bajos del RT, por debajo de 0,5 segundos, no son deseables, ya que darían lugar a salas muy secas, aunque la inteligibilidad sea buena.

Finalmente, los valores propuestos para la fracción de la energía inicial (anterior a 50 ms), según Barron, deben ser superior al 50%, y los valores de la fuerza acústica deben ser mayores a 0 dB.

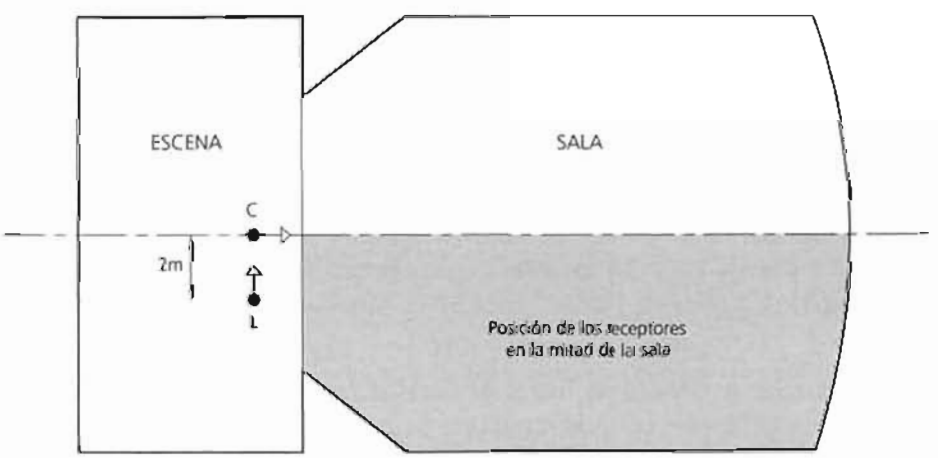


Figura 3. Posición de fuentes y micrófonos en las mediciones de teatros.

[6] Barron, M. (1993). *Opus cit.*, p. 233.

LEO LEROY BERANEK

Uno de los trabajos más importantes en el campo de la acústica de salas, y que ha tenido un gran reconocimiento internacional por parte de los profesionales de la acústica (físicos, arquitectos y músicos), es la obra de Leo L. Beranek *Concert and opera halls: how they sound*, publicada en 1996[7]. En este libro el autor recopila una gran cantidad de atributos arquitectónicos, científicos y musicales sobre un total de 76 edificios (salas de concierto y teatros de ópera), pertenecientes a diversas ciudades del mundo.

Del conjunto de edificios estudiados, Beranek analiza 14 teatros de ópera. La tabla 6 muestra los volúmenes y capacidades de dichos teatros, los cuales se han tomado como referencia en nuestro trabajo de investigación, a efectos comparativos, aunque esos tamaños y aforos superan en mucho a los de los teatros andaluces.

Tabla 6. Teatros de ópera estudiados por Beranek (1996)

Teatros de ópera	*Fecha*	*Volumen (m^3)*	*Aforo (N)*
Indiana University Auditorium. Bloomington, USA	1941	25.545	3.718
Metropolitan Opera House. Nueva York, USA	1966	24.723	3.816
Academy Of Music. Filadelfia, USA	1857	15.095	2.827
Eastman Theatre. Rochester, Nueva York, USA	1923	23.973	3.347
War Memorial Opera House. San Francisco, USA	1932	20.917	3.252
Kennedy Opera House. Washington, USA	1971	13.027	2.142
Teatro Colón. Buenos Aires, Argentina	1908	20.569	2.787
Festspielhaus. Salzburgo, Austria	1960	14.018	2.158
Stattsoper. Viena, Austria	1869	10.665	1.709
Opéra Bastille. París, Francia	1989	21.000	2.700
Opéra Garnier. París, Francia	1875	10.000	2.131
Festspielhaus. Bayreuth, Alemania	1876	10.308	1.800
Royal Opera House. Londres, Gran Bretaña	1958	12.248	2.120
Teatro Alla Scala. Milán, Italia	1778	11.252	2.289

Para realizar el análisis comparativo de esta importante muestra, y extraer las conclusiones oportunas, se llevaron a cabo dos procedimientos. En primer lugar se elabora una base de opinión, tras las consultas realizadas por el propio autor a directores, críticos musicales y especialistas en acústica de salas, y que posteriormente se amplía mediante las respuestas obtenidas en una encuesta escrita, realizada a otros grupos y críticos musicales.

El cuestionario incluía cuestiones acerca de las preferencias musicales sobre salas de concierto, clásicas, de música sinfónica. Se usaba una escala de tres puntos: excelente (1 punto), buena (0,5 puntos) y mediocre (0 puntos). La mayor parte de las salas estaban localizadas en Europa y Norteamérica, y se clasificaron en cuatro tipos según su forma en planta: rectangular, abanico, herradura y geométrica (Fig. 4).

Con las opiniones de los encuestados se elaboró un Índice de Calidad Acústica (AQI) para cada sala, ponderando los valores con el número de respuestas. Los resultados de este estudio permitieron clasificar las salas de concierto analizadas de acuerdo con las siguientes seis categorías (Tabla 7).

[7] Beranek, L. L. (1996). *Concert and opera halls: how they sound*. Nueva York: Acoustical Society of America.

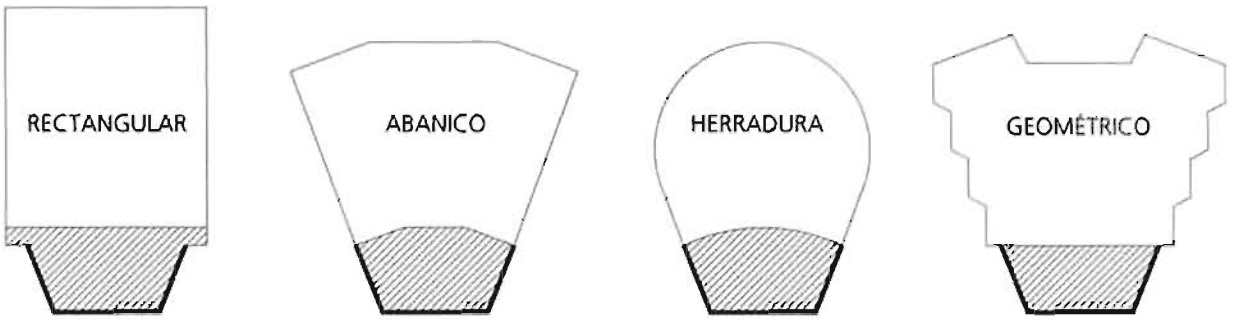


Figura 4. Salas estudiadas por Beranek (1996).

Tabla 7. Calificación de las salas de concierto según Beranek

Categorías	*Grado*	*Índice de Calidad Acústica (AQI)*
Categoría A+	Superior	1,0 a 0,90
Categoría A	Excelente	0,90 a 0,63
Categoría B+	Buena a excelente	0,63 a 0,40
Categoría B	Buena	0,40 a 0,25
Categoría C+	Aceptable	< 0,25

Debido a que el trabajo de Beranek estaba centrado en salas de concierto, de toda la muestra encuestada solamente fueron evaluados tres teatros de ópera: Eastman Theatre de Rochester y Festspielhaus de Salzburgo (entre la categoría B+ y B); y el Indiana University Auditorium de Bloomington (categoría C+).

Cabe destacar que las salas de concierto calificadas con la categoría superior (A+) fueron las estudiadas por Bradley en 1991, es decir, el Concertgebouw de Amsterdam (Holanda), el Grosser Musikvereinssaal de Viena (Austria) y el Symphony Hall de Boston (USA).

El segundo procedimiento de trabajo fue el organizar una detallada base de datos acústicos, procedente de mediciones realizadas por el propio autor, además de las proporcionadas por otros investigadores y organizaciones.

En la base de datos elaborada por Beranek se recogió una serie de magnitudes y relaciones dimensionales de las salas y de su aforo (Tabla 8).

Tabla 8. Magnitudes y relaciones dimensionales de las salas y de su aforo

N	Número de asientos de la sala	$S_e(m^2)$	Área de la escena	L(m)	Longitud media de la sala
$V(m^3)$	Volumen de la sala	$S_{pa}(m^2)$	Área de abertura del foso de orquesta	D(m)	Distancia máxima oyente-frente de la escena
$S_a(m^2)$	Área de suelo ocupada por los asientos	$Sp(m^2)$	Área de la cortina de proscenio	SD(m)	Profundidad media del escenario
$S_A(m^2)$	Superficie acústica efectiva de audiencia	H(m)	Altura media de la sala	SW(m)	Ancho medio del escenario
$S_c(m^2)$	Área ocupada por los coros	W(m)	Ancho medio de la sala	SH(m)	Altura media del escenario

Asimismo se midieron los principales parámetros acústicos: tiempo de reverberación (RT), tiempo de caída inicial (EDT), calidez (BR), intimidad (ITDG), claridad (C_{80}), fuerza acústica (G), eficiencia lateral (LF) y el coeficiente de correlación cruzada inter-aural (IACC). Los resultados de los parámetros acústicos medidos en los 14 teatros de ópera son los mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros acústicos medidos en los teatros de ópera estudiados por Beranek

Teatros de ópera	$RT_{o\ mid}$ (s)	RT_{mid} (s)	EDT_{mid} (s)	$C_{80}(3)$ (dB)	G_{mid} (dB)	*LF (–)*	$IACC_{E3}$ (–)
Indiana Univ. Auditorium. Bloomington, USA	1,43	1,45	–	–	–	–	–
Metropolitan Opera H. Nueva York, USA	1,78	2,28	2,25	–	–	–	–
Academy Of Music. Filadelfia, USA	1,20	1,31	1,20	2,24	1,45	0,165	0,53
Eastman Theatre. Rochester, Nueva York, USA	1,65	1,83	–	–	–	–	–
War Memorial Opera H. San Francisco, USA	1,70	–	–	–	–	–	–
Kennedy Opera House. Washington, USA	1,50	1,70	–	–	–	–	–
Teatro Colón. Buenos Aires, Argentina	1,80	–	–	–	–	–	–
Festspielhaus. Salzburgo, Austria	1,50	1,94	1,87	–0,28	3,44	0,158	–
Staatsoper. Viena, Austria	1,30	1,54	1,43	2,67	2,80	–	0,40
Opéra Bastille. París, Francia	1,58	1,71	1,60	3,73	–2,73	–	–
Opéra Garnier. París, Francia	1,10	1,22	1,16	4,57	0,70	–	0,50
Festspielhaus. Bayreuth, Alemania	1,55	–	–	–	–	–	–
Royal Opera House. Londres, Gran Bretaña	1,10	1,21	1,04	4,50	0,65	0,240	–
Teatro Alla Scala. Milán, Italia	1,20	1,36	1,19	3,50	–1,40	–	0,39

Al igual que en el texto de M. Barron, en el libro de Beranek las conclusiones se van realizando de forma esporádica, a lo largo de los diferentes capítulos del mismo.

TAKAYUKI HIDAKA

Por último, y más recientemente, el japonés T. Hidaka, en colaboración con L. L. Beranek, realiza una evaluación objetiva y subjetiva de las condiciones acústicas de veintitrés teatros de ópera de Europa, Japón y América[8].

La tabla 10 presenta los veintitrés teatros de ópera estudiados en once países: Argentina, Austria, República Checa, Francia, Inglaterra, Alemania, Hungría, Italia, Japón, Holanda y USA.

El número de asientos de estas salas variaba de 1.125 a 3.816, el volumen lo hacía entre 7.000 y 24.724 m^3 y el tiempo de reverberación (ocupado) oscilaba entre 1,1 y 2,0 s.

La correlación entre los valores de los parámetros acústicos ya había sido investigada por Barron (1993) y Beranek (1996) en salas de conciertos. Con este trabajo se profundiza en la utilidad de estos estudios para los teatros de ópera.

El criterio general para la realización de las medidas siguió las indicaciones de la Norma ISO 3382 (1997)[9]. Se emitieron de cinco a diez impulsos a través de una fuente sonora dodecaédrica calibrada, los cuales se registraron *in situ* en un DAT *(Digital Audio Tape)*, para su posterior análisis en laboratorio.

Las medidas se llevaron a cabo bajo las siguientes condiciones: (1) sin audiencia; (2) con los telones levantados (teatrales y cortafuegos); (3) con los instrumentos principales y las sillas de los músicos en el foso de la orquesta (excepto en tres de las veintitrés salas medidas).

[8] Hidaka, T. y Beranek, L. L. (2000). Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (1), pp. 368-383.

[9] UNE-EN-ISO 3382 (1997). *Acoustics - Measurements of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.*

Tabla 10. Teatros de ópera estudiados por Hidaka (2000)

Teatros de ópera. Hidaka, 2000	*Volumen (m^3)*	*Aforo (N)*
Music Theater, Amsterdam	10.000	1.689
Deutscheoper, Berlin	10.800	1.900
Komischeoper, Berlin	7.000	1.222
Erkel Theater, Budapest	17.000	2.340
Staatsoper, Budapest	8.900	1.450
Teatro Colón, Buenos Aires	20.570	2.487
Civic Opera House, Chicago	23.000	3.563
Semperoper, Dresden	12.480	1.300
Opera House, Essen	8.800	1.125
Staatsoper, Hamburgo	11.000	1.679
Royal Opera House, Londres	12.250	2.120
Teatro Alla Scala, Milán	11.252	2.289
Metropolitan Opera, Nueva York	24.724	3.816
Opera Garnier, París	10.000	2.131
Staatsoper, Praga	8.000	1.554
Eastman Theater, Rochester	23.970	3.347
Festspielhaus, Salzburgo	14.020	2.158
Opera House, Seattle	22.000	3.099
Bunka Kaikan, Tokio	16.250	2.303
New National Theater, Tokio	14.500	1.810
Nissei Theater, Tokio	7.500	1.340
Staatsoper, Viena	10.665	1.709
JFK Center Opera House, Washington	13.027	2.142

Los parámetros acústicos utilizados en esta investigación fueron los siguientes: tiempo de reverberación RT, tiempo de caída inicial EDT, claridad musical C_{80}, calidez BR, fuerza acústica G, coeficiente de correlación cruzada inter-aural IACC e intimidad ITDG.

En algunas salas se realizaron medidas adicionales con una ocupación del 100% y, en los demás casos, los valores ocupados fueron estimados[10].

Además de los resultados de los distintos parámetros acústicos, obtenidos en los veintitrés teatros de ópera estudiados, se aportaron las opiniones de reconocidos directores de ópera respecto de alguno de éstos y otros adicionales. Para ello, se remitieron por correo un total de sesenta y siete cuestionarios de los que fueron contestados veintidós (con una de las respuestas nula). En ellos se pretendía evaluar la acústica de estos teatros de ópera en una escala de cinco niveles: pobre, aceptable, buena, muy buena y una de las mejores, valorados posteriormente de uno a cinco puntos. El resultado de la encuesta se presenta en la figura 5.

[10] Hidaka, T., Nishihara, N. y Beranek, L. L. (2001). Relation of acoustical parameters with and without audiences in concert halls and a simple method for simulating the occupied state. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109 (3), pp. 1028-1042 (presentado en el ASA/ICA meeting en Seattle, Washington, 25 de junio de 1998).

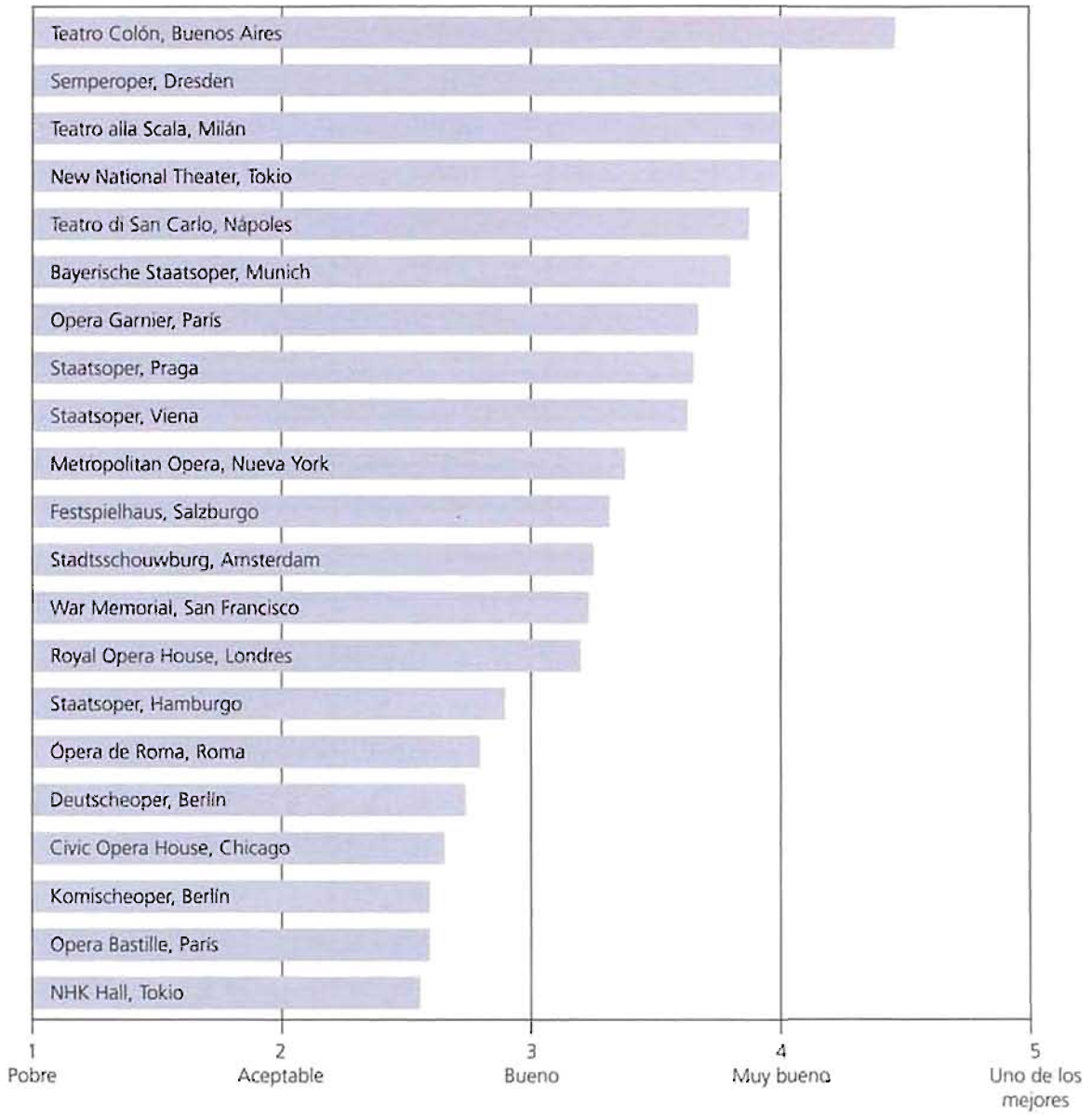


Figura 5. Evaluación de la calidad acústica de 23 teatros de ópera.

Una vez evaluadas las salas, se pusieron en relación los rangos de los parámetros acústicos, determinados en las mediciones, con los juicios subjetivos de los directores. A partir de las correspondientes correlaciones, se presentaron unas conclusiones que establecieron unos criterios para la evaluación de los teatros de ópera, así como las pautas de diseño de estas salas.

2. EXTENSIÓN Y METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

2.1. PLAN DE REHABILITACIÓN DE TEATROS DE ANDALUCÍA

Las actividades teatrales ocupan un lugar muy destacado en la cultura española. De hecho, disponemos de un rico y variado patrimonio arquitectónico, destinado fundamentalmente a acoger este tipo de manifestación artística, así como otras actividades culturales, sobre todo las musicales.

Tras el período de decadencia y abandono sucedido a mediados del siglo XX, en el que tuvo lugar el desmantelamiento de muchos de estos edificios, las administraciones públicas, principalmente autonómicas y municipales, han recuperado el interés en estas construcciones, promoviendo iniciativas de conservación y rehabilitación de edificios ya existentes, o construyendo otros de nueva planta.

En Andalucía, este renacimiento del interés por el mundo teatral se materializa en los años ochenta con una iniciativa pública: el Programa de Rehabilitación de Teatros Públicos, bajo la supervisión de la Dirección General de Arquitectura y Vivienda de la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía. Este proyecto, en el que también participan las instituciones municipales mediante la adquisición de los inmuebles, además de permitir la recuperación de este patrimonio y dotarlo de un adecuado equipamiento, desarrolla una infraestructura cultural andaluza que hoy en día hace posible la existencia del Circuito Andaluz de Teatros.

Como señala J. Ruesga[1], tras la adquisición de los teatros por parte de sus respectivos municipios, y una vez que se determinan los criterios de selección de los edificios: dotación de las capitales de provincia, municipios cabeceras de comarcas pobladas, interés arquitectónico y teatral..., se formaliza el Programa de Rehabilitación de Teatros Públicos de Andalucía, abarcando un total de 37 edificios pertenecientes a las ocho provincias andaluzas (Tabla 1).

Estas salas las podemos agrupar en tres tipos:

1. Teatros de gran tamaño, con un aforo aproximado de 1.000 plazas y con completa dotación de instalaciones y equipamiento técnico escénico. Dentro de este grupo destacan el Teatro Lope de Vega de Sevilla (Fig. 1), el Gran Teatro Falla de Cádiz, el Teatro Villamarta de Jerez de la Frontera (Fig. 2), el Gran Teatro de Huelva y el Gran Teatro de Córdoba.
2. Teatros de tamaño medio, el grupo más numeroso debido a su gran implantación territorial, de aforo próximo a las 500 plazas. A este tipo pertenecen, entre otros, el Teatro Triunfo de Utrera (Sevilla) (Fig. 3) y el Teatro de las Cortes de San Fernando (Cádiz) (Fig. 4).
3. Teatros singulares, tanto en sala como en escena, como consecuencia de su origen (principalmente conventos o iglesias desamortizados). El Teatro del Carmen de Vélez-Málaga (Málaga) es un claro ejemplo de este tipo.

Con la puesta en práctica del plan de rehabilitación de teatros, se producen los encargos de los proyectos correspondientes. Los arquitectos redactores de los mismos, además de tener que rehabilitar los edificios desde el punto de vista arquitectónico, deben rehabilitar también su función teatral, adecuándola al nivel de exigencia contemporáneo. La rehabilitación del uso teatral tiene dos vertientes específicas: el problema del equipamiento escénico y de las instalaciones teatrales, y el problema del acondicionamiento acústico de la sala.

---

[1] Ruesga Navarro, J. (1990). El lugar del espectáculo. Viejos edificios, nuevos teatros (en: *Arquitectura teatral y cinematográfica. Andalucía 1800-1990*). Sevilla: Consejería de Cultura y Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Autor, p. 82.

Tabla 1. Teatros pertenecientes al Programa de Rehabilitación de Teatros Públicos de Andalucía

Provincia	*Teatro y localidad*	*Promotor*	*Presupuesto (€)*
Almería	Apolo. Almería	Excmo. Ayunt. de Almería	2.169.654
	Saavedra. Cantoria	Excmo. Ayunt. de Cantoria	680.000
	Villaespesa. Sorbas	Junta de Andalucía	1.017.203
	Municipal Fiñana. Fiñana	Excmo. Ayunt. de Fiñana	48.000
Cádiz	G.T. Falla. Cádiz	Excmo. Ayunt. de Cádiz	3.498.491
	Olivares Veas. Arcos de la Frontera	Excmo. Ayunt. de Arcos de la Frontera	713.177
	Principal. Puerto Real	Excmo. Ayunt. de Puerto Real	3.155.915
	Villamarta. Jerez de la Frontera	Excmo. Ayunt. de Jerez de la Frontera	6.814.417
	Alameda. San Roque	Excmo. Ayunt. de San Roque	980.000
	Las Cortes. San Fernando	Excmo. Ayunt. de San Fernando	2.307.474
	Florida. Algeciras	Excmo. Ayunt. de Algeciras	3.000.000
Córdoba	G.T. Córdoba. Córdoba	Excmo. Ayunt. de Córdoba	187.396
	Circo. Puente Genil	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Puente Genil	610.000
	Victoria. Priego de Córdoba	Excmo. Ayunt. de Priego de Córdoba	2.450.881
	Garnelo. Montilla	Excmo. Ayunt. de Montilla	3.113.940
	Liceo. Baena	Junta de Andalucía	2.202.028
Granada	Calderón. Motril	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Motril	2.850.000
	Isabel la Católica. Granada	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Granada	4.210.000
	Cine Ideal. Baza	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Baza	2.356.262
	Mira de Amescua. Guadix	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Guadix	3.663.599
	Imperial. Loja	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Loja	1.800.000
	Oscense. Huéscar	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Huéscar	1.800.000
Huelva	G.T. Huelva. Huelva	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Huelva	2.449.124
	Teatro Cine. Río Tinto	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Río Tinto	200.000
	Colón. Bonares	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Bonares	630.000
	Capitol. Cortegana	Excmo. Ayunt. de Cortegana	2.276.075
	Cine Victoria. Nerva	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Nerva	3.140.000
Jaén	La Merced. Cazorla	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Cazorla	910.000
	Darymelia. Jaén	Junta de Andalucía	2.961.788
	Cervantes. Linares	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Linares	4.167.433
	Martínez Montañés. Alcalá la Real	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Alcalá la Real	2.610.000
Málaga	Cervantes. Málaga	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Málaga	1.830.082
	Del Carmen. Vélez-Málaga	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Vélez-Málaga	3.280.000
Sevilla	Lope de Vega. Sevilla	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Sevilla	2.914.909
	Gutiérrez de Alba. Alcalá de Guadaíra	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Alcalá de Guadaíra	1.250.000
	Enrique de la Cuadra. Utrera	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Utrera	1.652.783
	Cine Oriente. Morón de la Frontera	Junta de Andalucía. Excmo. Ayunt. de Morón de la Frontera	1.720.000

Figura 1. Teatro Lope de Vega de Sevilla.

Figura 2. Teatro Villamarta de Jerez de la Frontera.

Figura 3. Teatro Triunfo de Utrera.

Figura 4. Teatro de las Cortes de San Fernando.

Con el fin de alcanzar unas adecuadas condiciones acústicas, en 1988 la Consejería de Obras Públicas y Transportes firma un convenio específico con la E.T.S. de Arquitectura de Sevilla para desempeñar labores de asesoramiento en acústica. Desde entonces, un equipo formado por arquitectos y físicos pertenecientes al Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción (I.U.C.C) de la Universidad de Sevilla, ha venido estudiando y analizando el comportamiento y las condiciones acústicas de los teatros pertenecientes al citado Plan de Rehabilitación.

La experiencia acumulada después de más de quince años de trabajo, junto con la documentación obtenida de las mediciones acústicas, realizadas *in situ* en cerca de 30 teatros andaluces, antes y después de las obras de rehabilitación, ha permitido tener una visión global y actualizada de las condiciones acústicas de gran parte del patrimonio teatral andaluz.

2.2. TEATROS ESTUDIADOS

Los teatros andaluces elegidos para nuestra investigación han sido rehabilitados en los últimos veinte años. La mayoría de ellos pertenecen al Plan de Rehabilitación de Teatros Públicos de Andalucía, si bien algunos se han reformado en programas anteriores por la administración central. La tabla 1 muestra las salas estudiadas, los autores de los proyectos de rehabilitación, así como las fechas de construcción original y las de inicio y finalización de las obras de rehabilitación.

Tabla 1. Muestra de teatros andaluces

Nº	*Teatro. Localidad y provincia*	*Arquitecto/s*	*Const. original*	*Rehabilitación*	
				Inicio obras	*Fin obras*
1	Teatro Apolo. Almería	Ángel Jaramillo Esteban	1882	1986	1993
2	Teatro Saavedra. Cantoria (Almería)	Andrés Franco Reche	1926	1993	1993
3	Teatro Villaespesa. Sorbas (Almería)	Alberto Requena Guerra	1900	1994	1997
4	Gran Teatro Falla. Cádiz	José Antonio Carbajal Navarro Rafael Otero González	1905	1989	1989
5	Teatro Olivares Veas. Arcos de la Frontera (Cádiz)	Diego Morales Gómez de la T.	1910	1986	1993
6	Teatro Villamarta. Jerez de la Frontera (Cádiz)	José Antonio Carbajal Navarro José Luis Daroca Bruño Rafael Otero González	1928	1992	1994
7	Teatro Principal. Puerto Real (Cádiz)	Ángel Díaz Domínguez Juan Jiménez Mata	1859	1989	1993
8	Teatro de las Cortes. San Fernando (Cádiz)	Víctor Pérez E. / Ramón Garay L. / F.J. Márquez P. / Begoña Tavera H. / Juan J. Vázquez A.	1804	1994	1997
9	Gran Teatro de Córdoba. (Córdoba)	José Antonio Gómez	1873	1986	1986
10	Teatro Garnelo. Montilla (Córdoba)	Antonio Cabrera Ponce de León Oscar Rodríguez López	1917	1996	2000
11	Teatro Cine Victoria. Priego de Córdoba (Córdoba)	Socorro Serrano Rioja Rafael Cueto Martínez de Baños	1961	1994	1997
12	Teatro Isabel la Católica. Granada	Juan Ruesga Navarro	1950	1994	1998
13	Teatro Cine Ideal. Baza (Granada)	Félix de la Iglesia Salgado Alfonso Ruiz Robles	1920	1998	2001
14	Gran Teatro de Huelva. Huelva	Antonio de la Lama Lamamie José Mª Morales Lupiáñez José F. Barba Quintero	1923	–	1990
15	Teatro Capitol. Cortegana (Huelva)	Aurelio del Pozo Serrano	1957	1997	1999
16	Teatro Darymelia. Jaén	Isicio Ruiz Albusac	1927	–	1992
17	Teatro Lope de Vega. Sevilla	Víctor Pérez Escolano	1929	–	1988
18	Teatro Gutiérrez de Alba. Alcalá de Guadaíra (Sevilla)	José Mª Morales Hevia	1931	1988	1992

Dichos teatros, la mayoría de tamaño pequeño a mediano, forman parte del patrimonio arquitectónico andaluz y su rehabilitación pretendía, entre otros objetivos, su acondicionamiento acústico para un uso polifuncional, con el objeto de adaptarlos a la oferta y demanda cultural de cada localidad.

En el proceso de selección de las salas a estudiar, se han tenido en cuenta diversos criterios:

- En primer lugar, que el edificio estuviera originariamente construido como teatro, eliminando de la muestra salas que procedían de otras tipologías (por ejemplo, iglesias) para poder hacer un estudio comparativo.
- En segundo lugar, que el edificio se encontrase actualmente en uso, con la obra de rehabilitación totalmente terminada de acuerdo a su proyecto.
- En tercer lugar, que la muestra incluyera teatros de la mayoría de las provincias andaluzas.
- Y por último, que se abarcara un amplio rango de tamaños de salas, con el fin de deducir valoraciones acerca del comportamiento acústico.

Con todo lo anterior, finalmente han sido 18 los teatros (Figs. 1 a 5) objeto de este trabajo de investigación. La tabla 2 presenta algunos datos básicos de las salas. La muestra incluye dos tipologías arquitectónicas: teatros a la italiana (con planta en forma acampanada o de herradura) y teatros de planta rectangular.

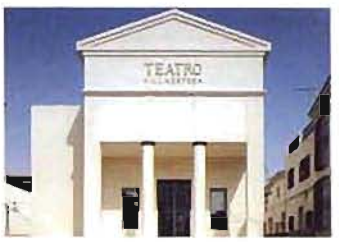
Como puede observarse, el conjunto de teatros abarca un período de tiempo que va desde el siglo XIX al XXI, sus volúmenes de sala, tras las obras de rehabilitación, están comprendidos en el rango de 800-8.000 m^3 y sus aforos se mueven entre 190 y 1.200 personas, aproximadamente.

Tabla 2. Datos básicos de las salas estudiadas

Nº	Teatro	Tipología	Volúmenes (m^3)		Aforo (personas)
			Sala	Escena	
1	Teatro Apolo	Rectangular	1.393	1.246	368
2	Teatro Saavedra	Rectangular	785	224	190
3	Teatro Villaespesa	Rectangular	1.062	260	273
4	Gran Teatro Falla	Italiana	8.114	5.854	1.038
5	Teatro Olivares Veas	Italiana	790	523	221
6	Teatro Villamarta	Rectangular	7.988	3.703	1.221
7	Teatro Principal	Italiana	2.214	1.211	444
8	Teatro de las Cortes	Italiana	2.492	1.222	360
9	Gran Teatro de Córdoba	Italiana	6.071	4.631	946
10	Teatro Garnelo	Rectangular	2.062	1.166	333
11	Teatro Cine Victoria	Rectangular	4.232	1.447	539
12	Teatro Isabel la Católica	Rectangular	5.035	1.742	689
13	Teatro Cine Ideal	Rectangular	1.694	1.379	299
14	Gran Teatro de Huelva	Rectangular	4.800	1.362	672
15	Teatro Capitol	Rectangular	2.999	1.990	515
16	Teatro Darymelia	Rectangular	1.888	1.303	417
17	Teatro Lope de Vega	Italiana	5.902	3.957	815
18	Teatro Gutiérrez de Alba	Rectangular	2.251	1.046	395

1. Teatro Apolo

2. Teatro Saavedra



3. Teatro Villaespesa

4. Gran Teatro Falla

5. Teatro Olivares Veas

6. Teatro Villamarta

7. Teatro Principal

8. Teatro de las Cortes

9. Gran Teatro de Córdoba

10. Teatro Garnelo

11. Teatro Cine Victoria

12. Teatro Isabel la Católica

13. Teatro Cine Ideal

14. Gran Teatro de Huelva

15. Teatro Capitol

16. Teatro Darymelia

17. Teatro Lope de Vega

18. Teatro Gutiérrez de Alba

Figura 1. Teatros andaluces estudiados. Estado tras las rehabilitaciones.

1. Teatro Apolo

2. Teatro Saavedra

3. Teatro Villaespesa

4. Gran Teatro Falla

5. Teatro Olivares Veas

6. Teatro Villamarta

7. Teatro Principal

8. Teatro de las Cortes

9. Gran Teatro de Córdoba

10. Teatro Gamelo

11. Teatro Cine Victoria

12. Teatro Isabel la Católica

13. Teatro Cine Ideal

14. Gran Teatro de Huelva

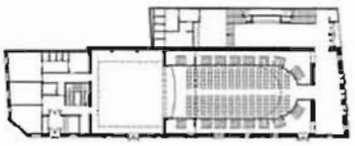
15. Teatro Capitol

16. Teatro Darymelia

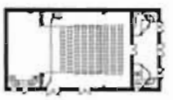
17. Teatro Lope de Vega

18. Teatro Gutiérrez de Alba

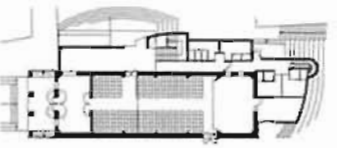
Figura 2. Interior de las salas tras las rehabilitaciones.



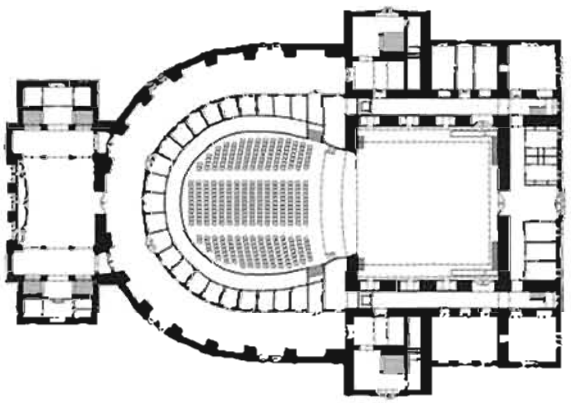
1. *Teatro Apolo*
Almería



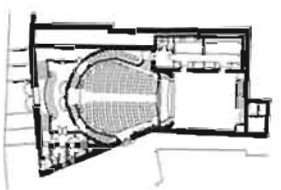
2. *Teatro Saavedra*
Cantoria, Almería



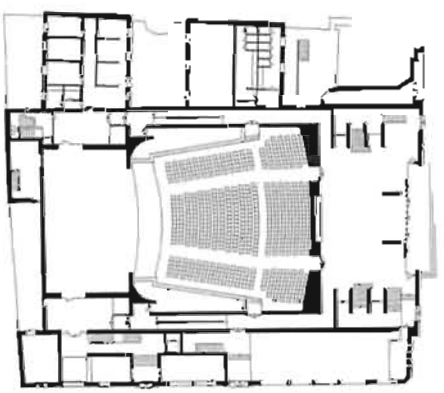
3. *Teatro Villaespesa*
Sorbas, Almería



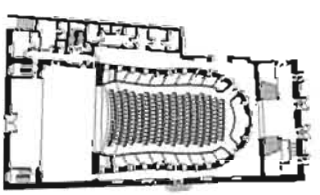
4. *Gran Teatro Falla*
Cádiz



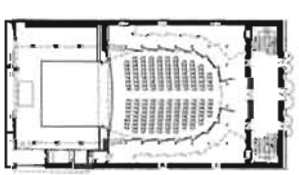
5. *Teatro Olivares Veas*
Arcos de la Frontera, Cádiz



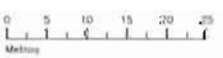
6. *Teatro Villamarta*
Jerez de la Frontera, Cádiz

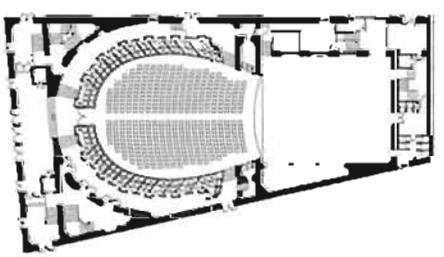


7. *Teatro Principal*
Puerto Real, Cádiz



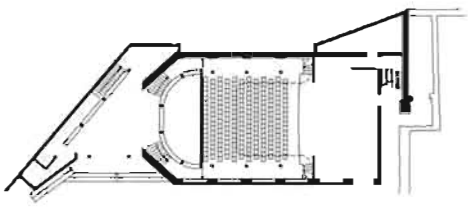
8. *Teatro de las Cortes*
San Fernando, Cádiz



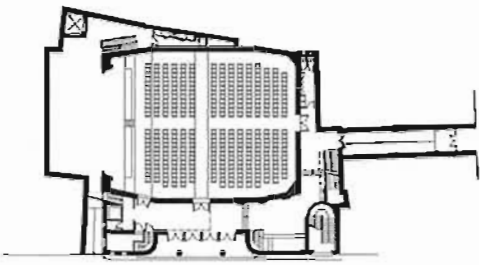


9. *Gran Teatro de Córdoba*
Córdoba

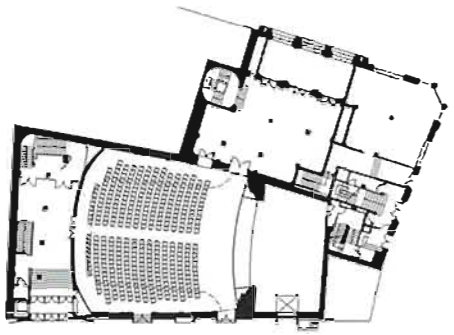
Figura 3. Teatros 1 a 9. Plantas. Estado tras las rehabilitaciones.



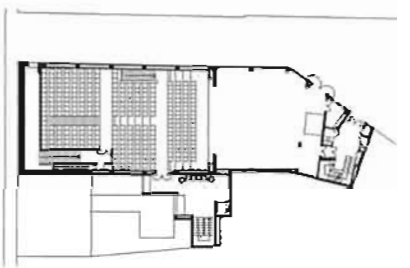
10. *Teatro Garnelo*
Montilla, Córdoba



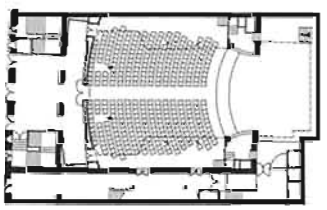
11. *Teatro Cine Victoria*
Priego de Córdoba, Córdoba



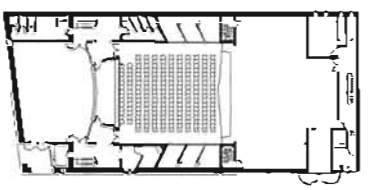
12. *Teatro Isabel la Católica*
Granada



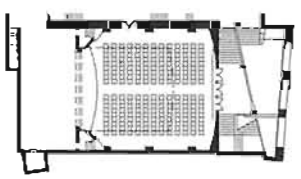
13. *Teatro Cine Ideal*
Baza, Granada



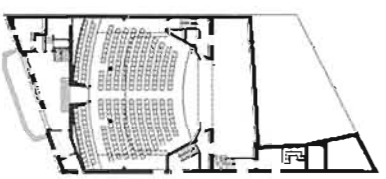
14. *Gran Teatro de Huelva*
Huelva



15. *Teatro Capitol*
Cortegana, Huelva



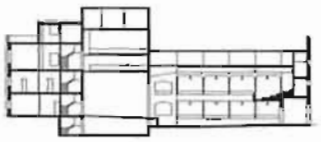
16. *Teatro Darymelia*
Jaén



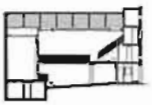
18. *Teatro Gutiérrez de Alba*
Alcalá de Guadaíra, Sevilla

17. *Teatro Lope de Vega*
Sevilla

Figura 4. Teatros 10 a 18. Plantas. Estado tras las rehabilitaciones.

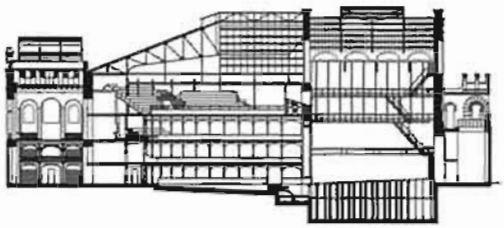


1. Teatro Apolo
Almería



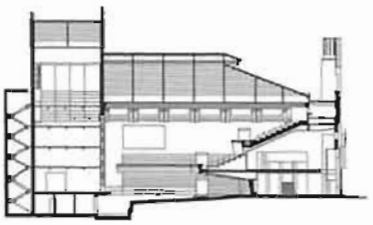
2. Teatro Saavedra
Cantoria, Almería

3. Teatro Villaespesa
Sorbas, Almería

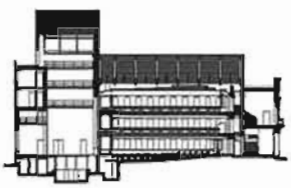


4. Gran Teatro Falla
Cádiz

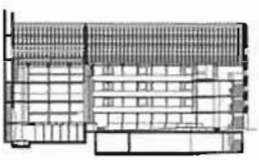
5. Teatro Olivares Veas
Arcos de la Frontera, Cádiz



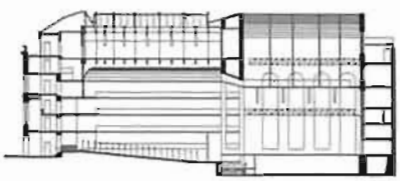
6. Teatro Villamarta
Jerez de la Frontera, Cádiz



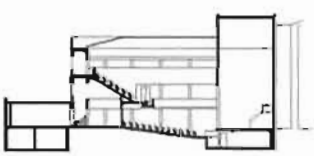
7. Teatro Principal
Puerto Real, Cádiz



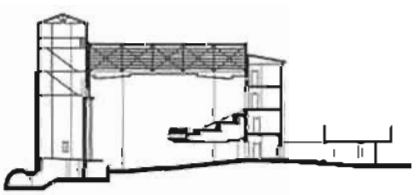
8. Teatro de las Cortes
San Fernando, Cádiz



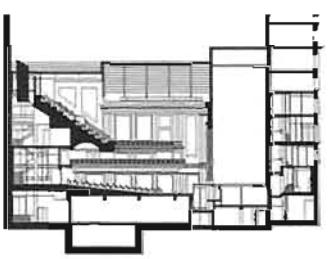
9. Gran Teatro de Córdoba
Córdoba



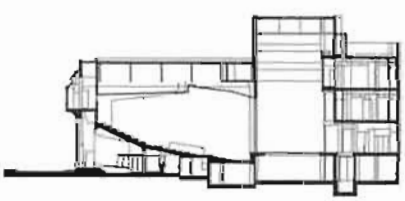
10. Teatro Garnelo
Montilla, Córdoba



11. Teatro Cine Victoria
Priego de Córdoba, Córdoba

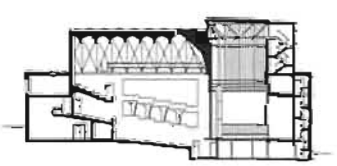


12. Teatro Isabel la Católica
Granada

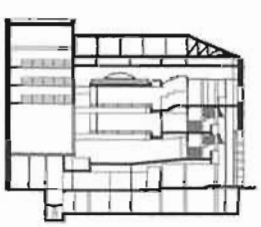


13. Teatro Cine Ideal
Baza, Granada

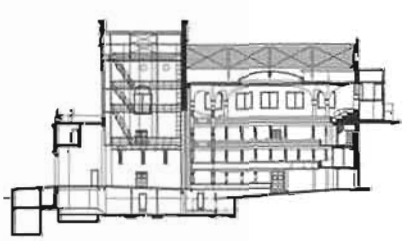
14. Gran Teatro de Huelva
Huelva



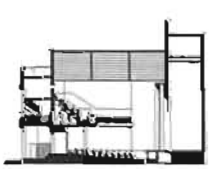
15. Teatro Capitol
Cortegana, Huelva



16. Teatro Darymelia
Jaén



17. Teatro Lope de Vega
Sevilla



18. Teatro Gutiérrez de Alba
Alcalá de Guadaíra, Sevilla

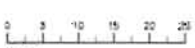


Figura 5. Secciones longitudinales. Estado tras las rehabilitaciones.

2.3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS ACÚSTICO

Transcurridos más de 15 años desde el inicio del Programa de Rehabilitación de Teatros Públicos de Andalucía, estando la mayor parte de las obras completamente terminadas y el resto en fases avanzadas, en este trabajo presentamos los resultados del análisis acústico global de un conjunto representativo de los teatros rehabilitados. El objetivo principal de este estudio es que sus conclusiones puedan ser utilizadas por arquitectos y especialistas en acústica para su aplicación en los proyectos arquitectónicos, especialmente en obras de rehabilitación.

Todo este estudio se ha desarrollado mediante una metodología contrastada por la realidad, y que se ha ido depurando a lo largo de varios años de trabajo en la rehabilitación acústica de teatros. Esta metodología, como pondremos de manifiesto más adelante, combina las formulaciones analíticas, las medidas experimentales realizadas *in situ* y la utilización de las técnicas de simulación del campo sonoro mediante ordenador (modelos informáticos de *ray tracing)* para conocer y predecir el comportamiento acústico de este tipo de recintos. En este sentido, hemos procurado, en la medida que los recursos lo han permitido, que nuestro laboratorio estuviera al día tanto en el equipamiento instrumental como en las técnicas de medida y el *software* disponible. Así mismo, en el ámbito de las formulaciones analíticas se ha intentado aplicar las últimas propuestas aceptadas por la comunidad científica especializada.

Podemos desglosar la metodología desarrollada para el análisis en seis fases, las cuales se han sucedido cronológicamente en el siguiente orden:

1. Toma de datos generales y planimétricos de cada teatro.
2. Realización de las mediciones acústicas *in situ*.
3. Creación de los modelos informáticos de cada teatro y simulación del campo sonoro en los mismos.
4. Elaboración de una base de datos en fichas.
5. Análisis y valoración individual de las condiciones acústicas de cada teatro.
6. Análisis y valoración global del comportamiento acústico del conjunto de teatros.

TOMA DE DATOS

En esta primera fase se lleva a cabo la recopilación de la información básica para el desarrollo de las fases posteriores. Los datos a los que nos referimos son los siguientes: planimetría del estado actual (antes de la rehabilitación) y del proyecto de rehabilitación; documentación fotográfica y videográfica; documentación arquitectónica (características estructurales, constructivas, materiales de revestimiento y acabados, así como su forma de colocación); relación con el entorno urbano: fuentes de ruido exterior; equipos e instalaciones que puedan ser fuentes de ruido y vibraciones; evolución de los usos del edificio desde su construcción original hasta el estado actual y propuesta de nuevos usos en el proyecto; aforo del teatro en el estado actual y en el proyecto de rehabilitación...

MEDICIONES ACÚSTICAS *IN SITU*

Una de las fases de mayor importancia en nuestra investigación, ha sido la realización de mediciones acústicas *in situ* en los teatros que componen la muestra.

Siempre que ha sido posible se han realizado medidas antes y después de la rehabilitación. Ello nos permitía saber de dónde partíamos y analizar el proyecto de rehabilitación a la luz de esta información.

Tabla 1. Mediciones acústicas realizadas

Nº	Teatro	Estado original	Estado final	Estado final (concha)
1	Teatro Apolo. Almería	–	10-11-00	–
2	Teatro Saavedra. Cantoria (Almería)	30-05-90	2-02-00	–
3	Teatro Villaespesa. Sorbas (Almería)	–	3-02-00	–
4	Gran Teatro Falla. Cádiz	–	23-02-91	–
5	Teatro Olivares Veas. Arcos de la Frontera (Cádiz)	11-10-91	26-02-99	–
6	Teatro Villamarta. Jerez de la Frontera (Cádiz)	17-03-90	3-07-97	1-07-97
7	Teatro Principal. Puerto Real (Cádiz)	17-03-89	22-06-99	–
8	Teatro de las Cortes. San Fernando (Cádiz)	2-12-90	8-06-99	–
9	Gran Teatro de Córdoba. Córdoba	–	5-06-95	17-04-00
10	Teatro Garnelo. Montilla (Córdoba)	23-02-91	28-01-00	28-01-00
11	Teatro Cine Victoria. Priego de Córdoba (Córdoba)	15-02-90	24-05-97	–
12	Teatro Isabel la Católica. Granada	26-09-91	11-06-99	–
13	Teatro Cine Ideal. Baza (Granada)	–	1-06-01	–
14	Gran Teatro de Huelva. Huelva	–	21-04-92	–
15	Teatro Capitol. Cortegana (Huelva)	–	3-11-00	–
16	Teatro Darymelia. Jaén	–	2-02-01	–
17	Teatro Lope de Vega. Sevilla	–	16-05-00	–
18	Teatro Gutiérrez de Alba. Alcalá de Guadaíra (Sevilla)	27-01-89	12-05-95	–

En los estados finales, tras las obras de rehabilitación, las medidas se han llevado a cabo en los 18 teatros del estudio. Por el contrario, las medidas de los estados originales de los edificios no siempre ha sido posible realizarlas. Los motivos más frecuentes han sido el mal estado de los inmuebles, algunas veces en ruina, o bien haberse iniciado las obras de reforma cuando el teatro se incorporaba al Programa. En algunos casos, se han realizado medidas adicionales en el estado intermedio cuando se ha considerado necesario para la toma de decisiones sobre determinados acabados o soluciones constructivas. Cuando se contemplaba en el proyecto la instalación de concha acústica en la escena, en el estado final se han realizado medidas en las dos configuraciones: con la concha acústica instalada y con ella recogida.

La tabla 1 presenta la relación de las medidas más importantes efectuadas en cada teatro, así como la fecha de realización de las mismas.

En todas las medidas, la fuente sonora (F) se situaba en el punto más usual de ubicación de la fuente natural sobre el escenario. Siempre que era posible, la posición de ésta se localizaba en el centro de la escena, sobre la embocadura, y a una altura de 1,70 m. Los micrófonos receptores se distribuían cubriendo las diferentes zonas de butacas de la sala, dependiendo su número de la capacidad de cada una de ellas. Dichos receptores se situaban a la altura del oído de los espectadores (1,2 m). Cuando un recinto era simétrico según el eje longitudinal de la sala, los receptores se situaban únicamente en una de las mitades de la misma. La figura 1 muestra un ejemplo de localización de la fuente sonora y de los receptores en uno de los teatros estudiados. El procedimiento de medida, así como los equipos y la instrumentación empleada, se describen en el apéndice 4.2 del texto.

En las medidas *in situ* se contemplaron los siguientes aspectos:

a) Tiempo de reverberación, valorado mediante la evaluación de los parámetros RT_{30}, RT_{20} y EDT, para las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4.000 Hz.

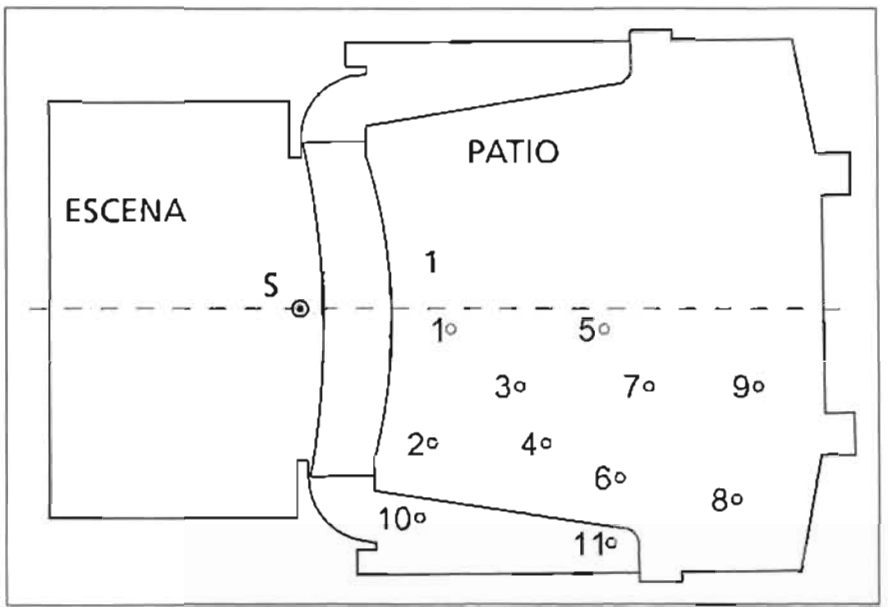


Figura 1. Posición de fuente y receptores en las mediciones del Gran Teatro Falla.

b) Distribución sonora, valorada mediante la evaluación de la fuerza acústica G para las mismas bandas de octava y en banda ancha en dBA.

c) Inteligibilidad de la palabra, valorada mediante el parámetro objetivo del índice RASTI.

d) Ruido de fondo, valorado mediante el espectro en bandas de octava y el nivel sonoro continuo equivalente $L_{eq,A}$.

MODELOS Y SIMULACIONES INFORMÁTICAS

Además de los resultados obtenidos a partir de las medidas acústicas realizadas *in situ*, hemos completado el análisis implementando modelos informáticos tridimensionales de los espacios (Figs. 2 y 3). Estos modelos constituyen una parte de los datos de entrada del programa informático CATT-Acoustics v.7.2.f. desarrollado por la empresa CATT de Gothenburg (Suecia). Como datos adicionales se han de proporcionar las propiedades acústicas (absorción y dispersión) de los cerramientos. A partir de estos datos el *software* es capaz de simular el campo sonoro en cada una de las salas mediante algoritmos basados en el trazado de rayos y proporciona información muy valiosa sobre el mismo.

En concreto, utilizando el módulo de mapeado, es posible obtener una representación mediante códigos de colores, de la distribución espacial de los parámetros acústicos, facilitando la evaluación del efecto que, sobre el campo acústico, tendrá una determinada decisión de diseño. El módulo de reflexiones iniciales, mediante el algoritmo de las fuentes imagen, permite evaluar el comportamiento de las primeras reflexiones

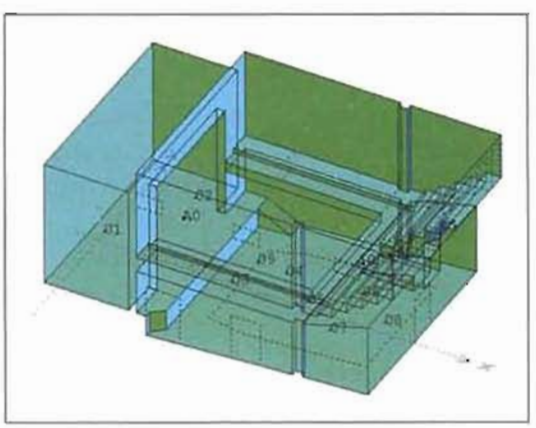


Figura 2. Modelo informático del teatro Saavedra.

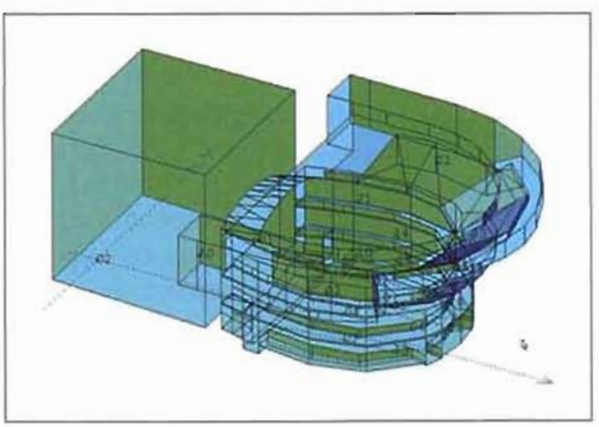


Figura 3. Modelo informático del Gran Teatro Falla.

en cada punto de recepción definido; el control de estas primeras reflexiones es de primordial importancia, pues son ellas las que condicionan de forma determinante la calidad percibida. Finalmente, el módulo de cálculo detallado completo, utiliza un algoritmo mixto complejo que permite obtener las repuestas al impulso en cada uno de los receptores; a partir de ellas es posible evaluar los valores numéricos de todos los parámetros acústicos e incluso recrear informáticamente el sonido percibido mediante la convolución matemática de estas respuestas con grabaciones anecoicas, en un proceso que se conoce como auralización.

Además de los parámetros acústicos evaluados a partir de las medidas *in situ*, mediante dicho programa se han simulado y presentamos los siguientes indicadores de cualificación, que se describen en el apéndice 4.1:

- Calidez (BR): se presentan los valores medios (s).
- Brillo (Br): se presentan los valores medios (s).
- Claridad de la voz (C_{50}): se utiliza el valor medio ponderado C_{50} (dB) denominado *speech average*.
- Claridad musical (C_{80}): se utiliza el valor medio ponderado $C_{80}(3)$ (dB).
- Definición (D_{50}): se presentan los valores medios a 1.000 Hz (%).
- Fuerza acústica (G): se muestra el valor medio G_{mid} (dB) de las bandas de octava de 500 Hz y 1 kHz, con las salas vacías.
- Eficiencia lateral (LF): se utiliza el valor medio LF_{4} (%) de las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 1 kHz.
- Coeficiente de correlación cruzada inter-aural (IACC): se determina el coeficiente de correlación medio inicial $IACC_{E3}$, de las bandas de octava comprendidas entre 500 Hz a 2 kHz.

Las simulaciones informáticas implican la implementación de las siguientes fases:

- Creación de modelos en tres dimensiones de cada teatro[2]. Se han realizado, al menos, dos modelos espaciales que reproducen el interior de las salas, antes y después de la rehabilitación, respectivamente. En los casos en los que había proyectada una concha acústica, se ha creado un tercer modelo.
- Asignación de coeficientes de absorción: una vez realizados los modelos espaciales, se asignaron los coeficientes de absorción acústica a las distintas superficies que los conformaban. En cuanto a la absorción sonora de las áreas de audiencia, cuya trascendencia comentaremos más adelante, hemos comprobado que los coeficientes de absorción propuestos por Beranek[3] para 3 tipos de butacas (ligera, mediana y fuertemente tapizadas), permiten estimar de forma adecuada los tiempos de reverberación de salas cuyas tipologías y tamaños corresponden a los de los teatros andaluces. La utilización de estos datos en los modelos de simulación ha sido de gran utilidad para estimar los tiempos de reverberación de las salas con presencia de público.
- Ubicación de fuentes y receptores: en todos los modelos se ha situado una única fuente sonora en el escenario, coincidiendo con el eje longitudinal de la sala. Su posición se ha hecho coincidir con la utilizada en las medidas *in situ*. Para aquellos parámetros en que ello puede resultar significativo, el nivel de presión sonora establecido para los cálculos era de 90 dB a 1,00 m de distancia, en cada una de las bandas de octava. La fuente se situó a una altura de 1,70 m sobre el nivel del suelo.

  Los receptores ocupan también la misma posición que la utilizada en las mediciones *in situ*. Normalmente se distribuyen en una de las mitades simétricas de la sala. Si ésta es muy pequeña, o no es simétrica, se distribuyen cubriendo todas las áreas de audiencia. La altura de los micrófonos sobre el nivel del suelo se especifica en 1,20 m.
- Concreción de las condiciones de cálculo y obtención de resultados: en cada teatro se realizaron, al menos, dos simulaciones: estado original, antes de las obras de rehabilitación, y estado

[2] Los modelos espaciales del estado original de los teatros Apolo de Almería y Gran Teatro de Córdoba, no llegaron a realizarse debido a la falta de una planimetría fiable o por la indefinición de sus materiales de revestimiento.

[3] Beranek, L. L. (1960). Audience and seat absortion in large halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 32, pp. 661-670.

final. En ambos casos se consideraron dos situaciones de cálculo: sala vacía y ocupada al 100%. Además, para los teatros que estaban dotados de concha acústica se realizaron las simulaciones correspondientes.

Las principales condiciones de cálculo fueron las siguientes:

- Nº de rayos *(ray tracing): Auto number*[4].
- Orden de las reflexiones especulares: 6.
- Tiempo de truncado de rayos (parte inicial): 400 ms.
- Tiempo de truncado (cálculo detallado): *Auto time*[5].
- Altura de los mapas de las áreas de audiencia sobre el suelo: 1.00 m.
- *Grid* (paso de la cuadrícula) de los mapas de las áreas de audiencia: 0.50 m.
- Ruido de fondo[6]: el correspondiente a la curva NR-25.
- Absorción del aire[7]: temperatura (20 °C), humedad relativa (50%) y densidad 1.20 kg/m^3.

En esta fase del cálculo resultaron de gran utilidad los valores obtenidos a partir de las medidas *in situ*, ya que permitieron contrastar los valores obtenidos en las simulaciones informáticas y ajustar los modelos tridimensionales elaborados, sobre todo en lo que se refiere a las propiedades acústicas de determinadas superficies, para las que los datos disponibles no eran fiables.

RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Tras la obtención de los resultados de las simulaciones informáticas y su posterior archivo, la información fue tratada estadísticamente y recopilada, junto a las medidas experimentales, en una base de datos.

La valoración acústica individual de cada sala se presenta en un formato de ficha en el apartado 3.1. Posteriormente se presenta la valoración acústica del conjunto en el apartado 3.2.

[4] Esta opción de cálculo la establecía el programa de simulación en función de la geometría de los modelos tridimensionales así como de algunos otros parámetros.

[5] El tiempo de truncado de los rayos del módulo de cálculo detallado se hacía de forma automática, en función de una estimación del tiempo de reverberación clásico.

[6] Usado únicamente para la simulación del índice RASTI.

[7] La absorción debida al aire se determinaba automáticamente en función de las tres variables indicadas.

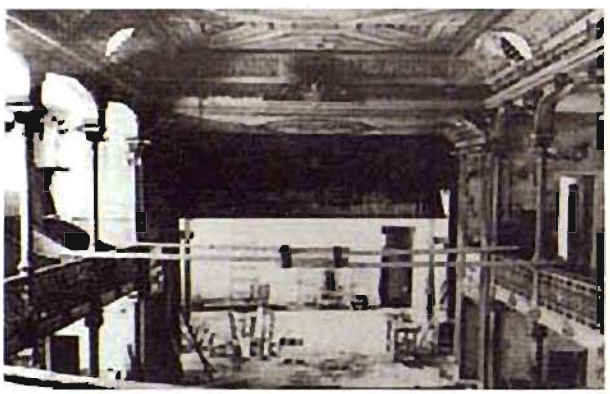
3. LA ACÚSTICA DEL PATRIMONIO TEATRAL ANDALUZ

3.1. DATOS DE LAS SALAS ESTUDIADAS. ANÁLISIS INDIVIDUAL: FICHAS

		Pág.
1.	Teatro Apolo. Almería	70
2.	Teatro Suavedra. Cantoria (Almería)	74
3.	Teatro Villaespesa. Sorbas (Almería)	78
4.	Gran Teatro Falla. Cádiz	82
5.	Teatro Olivares Veas. Arcos de la Frontera (Cádiz)	86
6.	Teatro Villamarta. Jerez de la Frontera (Cádiz)	90
7.	Teatro Principal. Puerto Real (Cádiz)	94
8.	Teatro de las Cortes. San Fernando (Cádiz)	98
9.	Gran Teatro de Córdoba. Córdoba	102
10.	Teatro Garnelo. Montilla (Córdoba)	106
11.	Teatro Cine Victoria. Priego de Córdoba (Córdoba)	110
12.	Teatro Isabel la Católica. Granada	114
13.	Teatro Cine Ideal. Baza (Granada)	118
14.	Gran Teatro de Huelva. Huelva	122
15.	Teatro Capitol. Cortegana (Huelva)	126
16.	Teatro Darymelia. Jaén	130
17.	Teatro Lope de Vega. Sevilla	134
18.	Teatro Gutiérrez de Alba. Alcalá de Guadaíra (Sevilla)	138

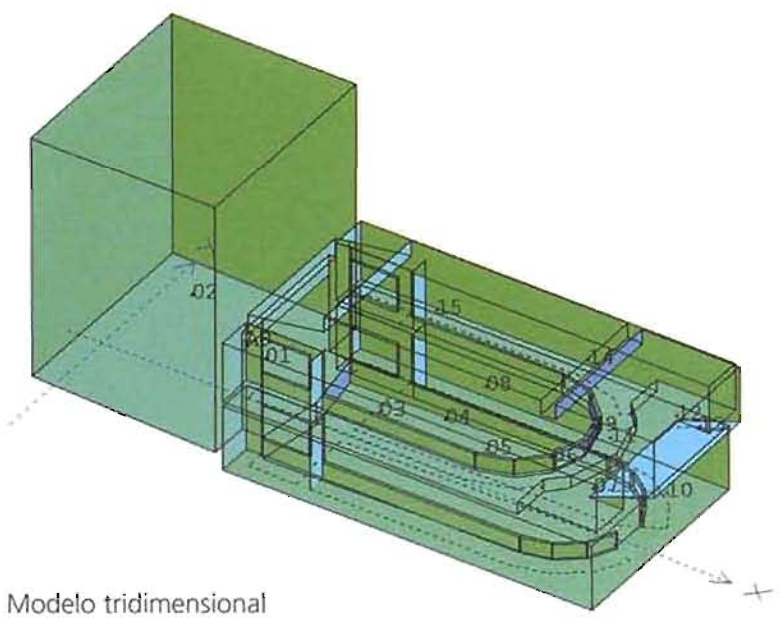
1	
TEATRO APOLO	
Almería	
Rambla Obispo Orbera, esq. C/ Juan Lirola	
Construcción:	1882
Rehabilitación:	1993
Arquitectos:	Antonio Góngora Galera
	Ángel Jaramillo Esteban*

(*) Arquitecto de la rehabilitación



Estado original

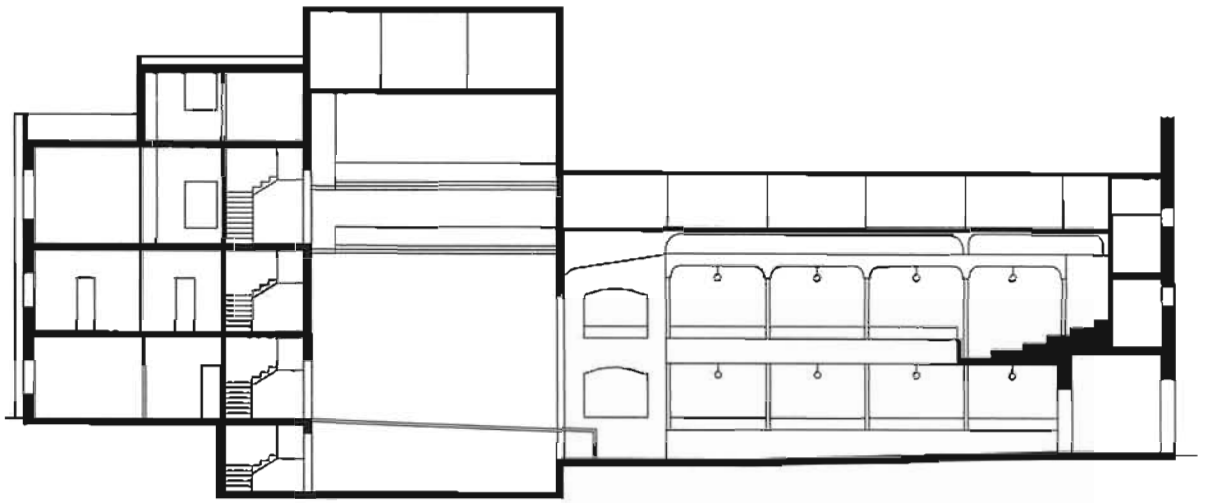
Rehabilitación



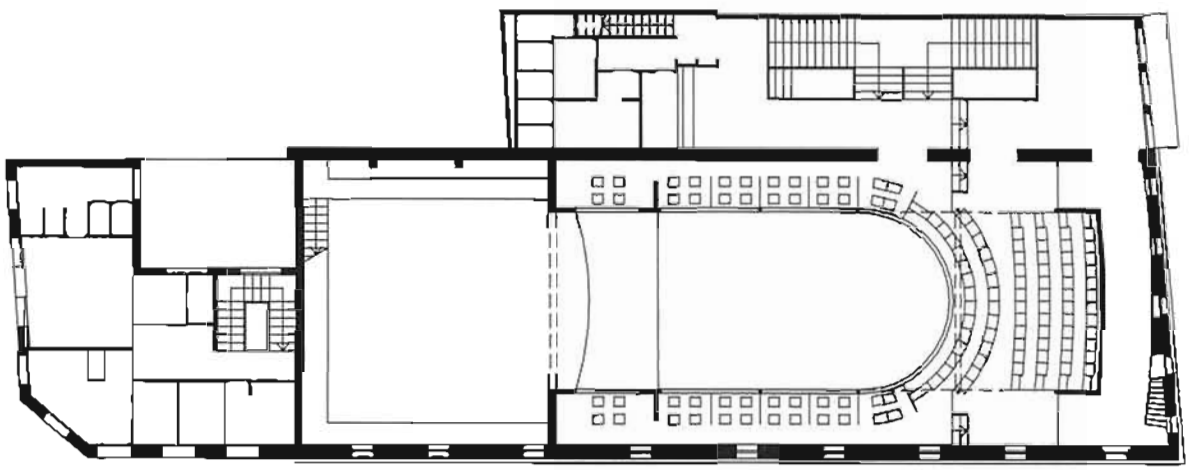
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

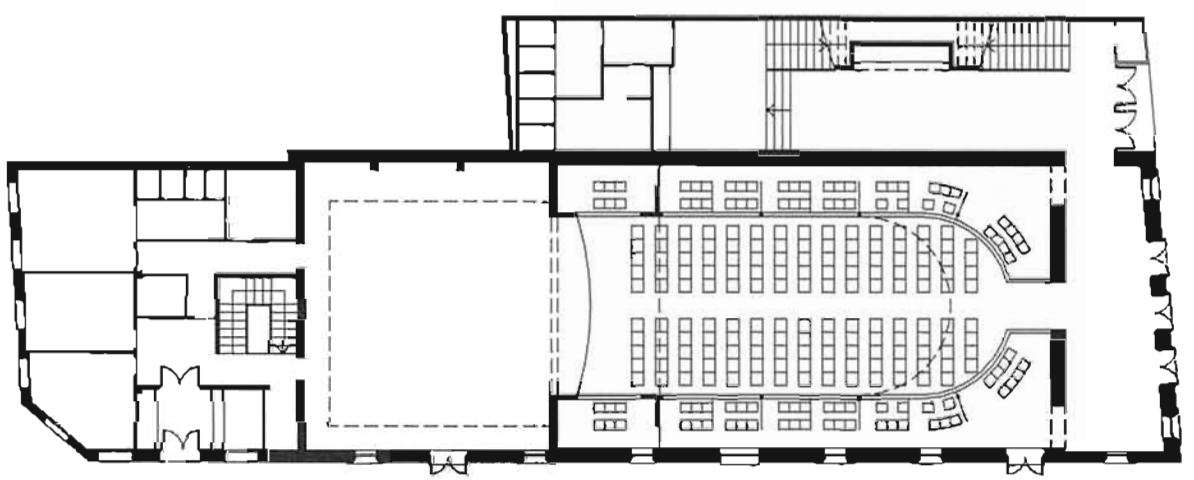
Superficie construida:	1.308 m²
Volumen sala:	1.393 m³
Volumen escena:	1.246 m³
Superficie de revestimiento:	1.928 m²
Superficie butacas:	126 m²
Superficie pasillos:	102 m²
Aforo:	368 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	18,65 m
Anchura media:	10,60 m
Altura media:	8,35 m



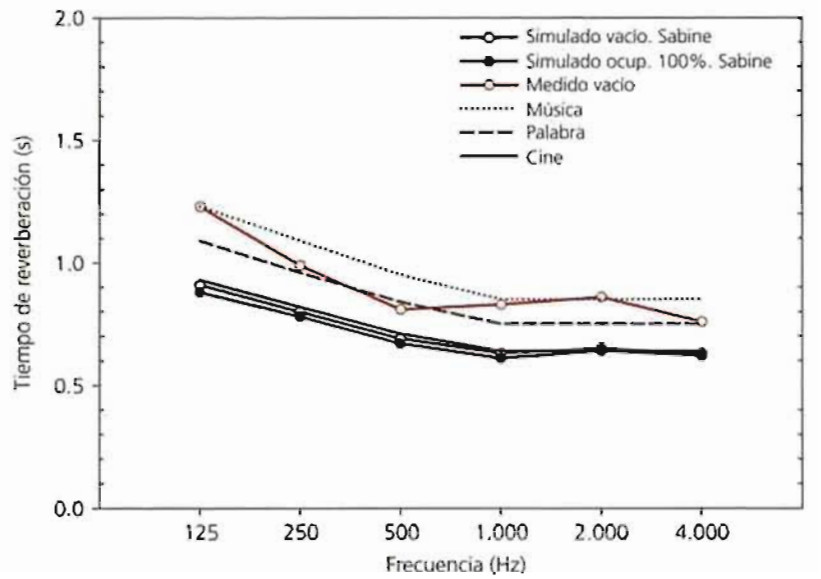
SECCIÓN



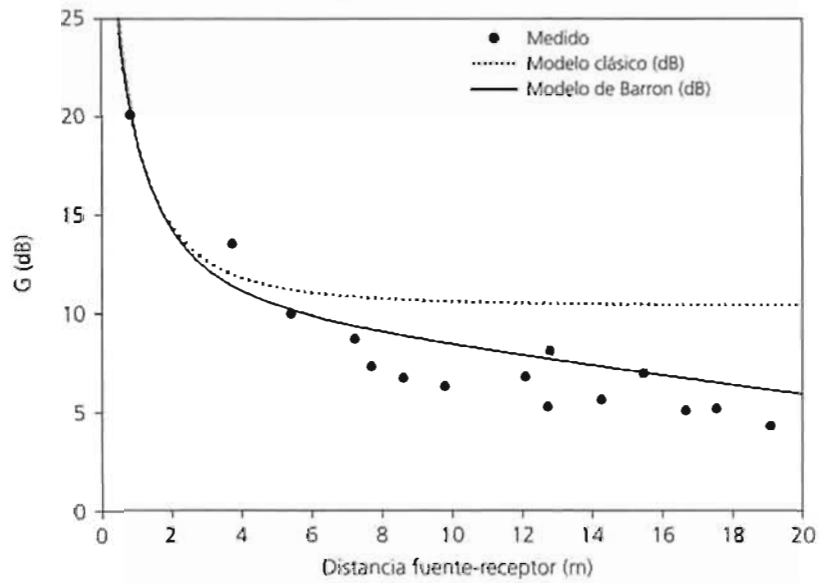
PLANTA ALTA



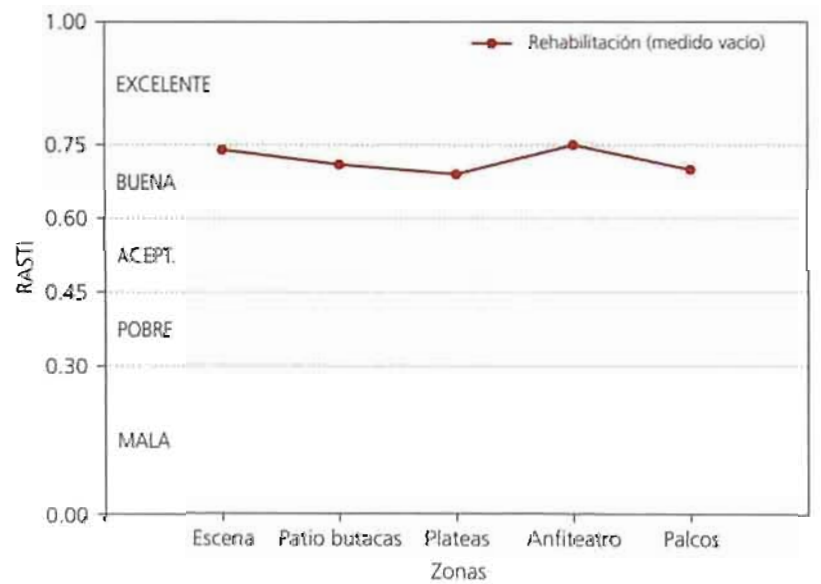
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	1,23	0,99	0,81	0,83	0,86	0,76	0,82
Sala ocupada 100% (simulado)	0,88	0,78	0,67	0,61	0,64	0,62	0,64

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	39,9	33,5	30,1	27,6	25,9	24,8	**30**
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

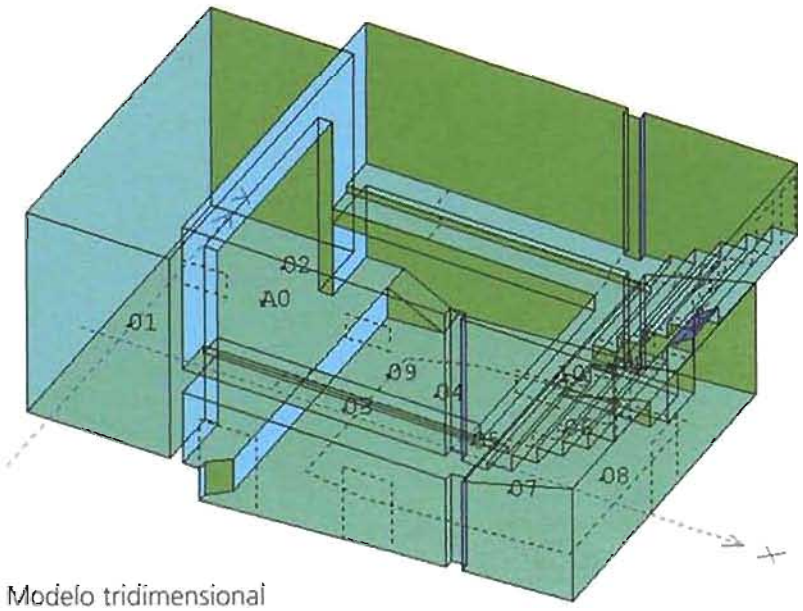
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,30	1,30	V_1 / N	3,79
Brillo Br (s)	0,97	0,98		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	75,7	76,1	V_1 / S_A	6,10
Claridad de la voz C_{50AV} (dB)	5,10	5,44		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	8,43	8,80	V_1 / S_{To}	5,93
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	6,45	6,20		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	20,98	20,13	S_A / V_1	0,62
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,47	0,36		

2	
TEATRO SAAVEDRA	
Cantoria (Almería)	
C/ Romero, 16, esquina C/ Ermita	
Construcción:	1926
Rehabilitación:	1993
Arquitectos:	Ramón López Cuesta
	Andrés Franco Reche*

(*) Arquitecto de la rehabilitación

Estado original

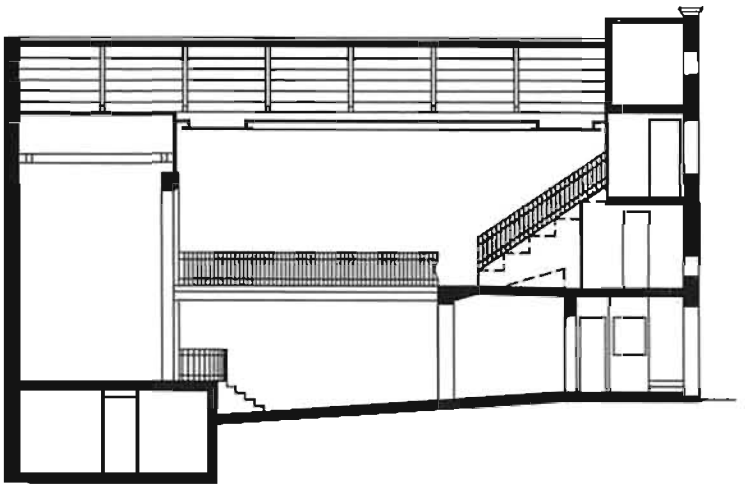
Rehabilitación



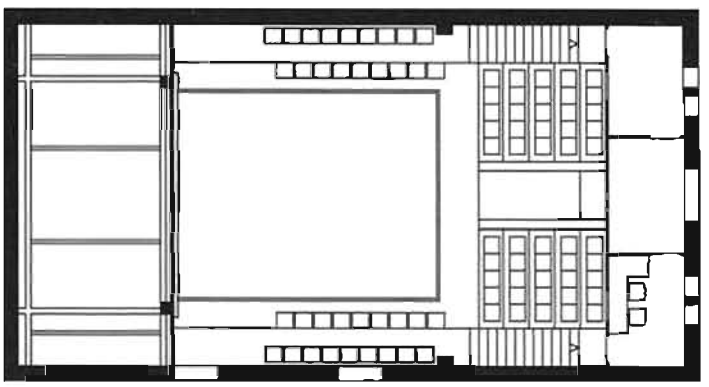
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

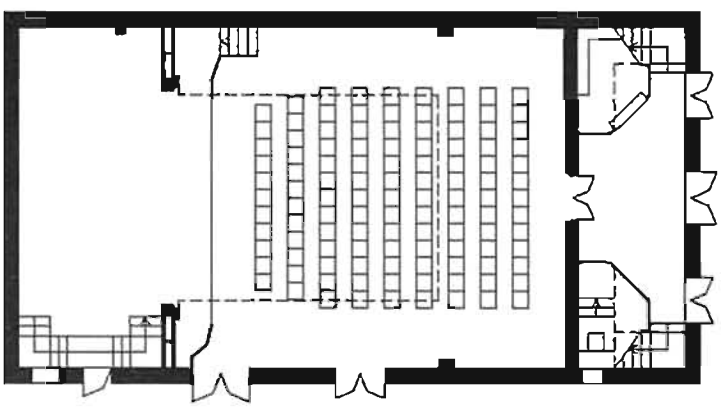
Superficie construida:	401 m²
Volumen sala:	785 m³
Volumen escena:	224 m³
Superficie de revestimiento:	857 m²
Superficie butacas:	73 m²
Superficie pasillos:	29 m²
Aforo:	190 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	10,80 m
Anchura media:	9,40 m
Altura media:	7,80 m



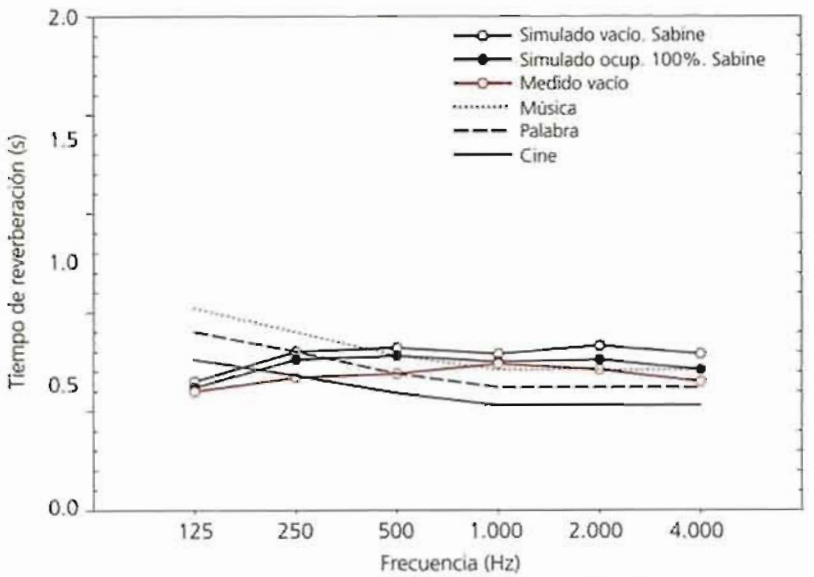
SECCIÓN



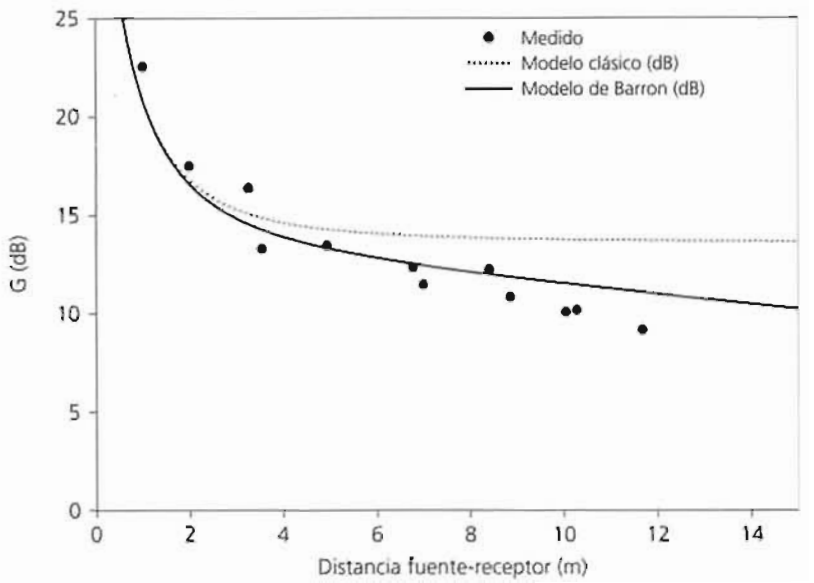
PLANTA ALTA



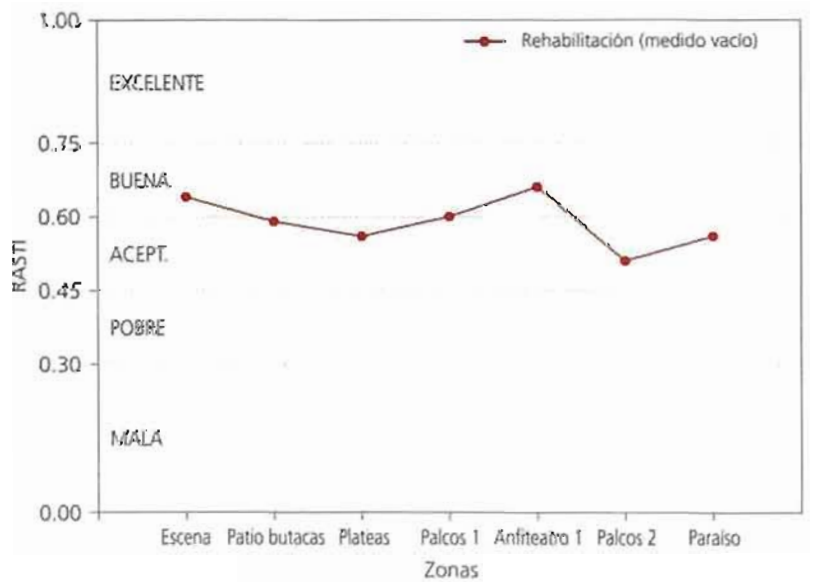
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	0,60	0,67	0,69	0,74	0,71	0,65	0,72
Sala ocupada 100% (simulado)	0,62	0,76	0,78	0,75	0,76	0,71	0,77

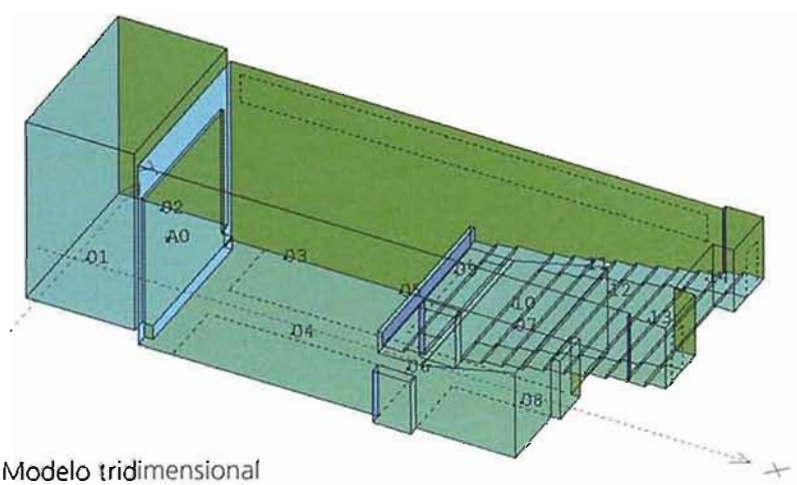
Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	34,0	26,0	22,3	20,5	20,0	20,7	**26**
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	0,90	0,90	V_1 / N	4,13
Brillo Br (s)	1,01	0,96		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	64,4	65,7	V_1 / S_A	7,69
Claridad de la voz $C_{50A\nu}$ (dB)	2,18	2,84		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	5,03	5,63	V_1 / S_{Tm}	7,47
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	12,90	12,60		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	25,73	25,75	S_A / V_1	0,54
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,39	0,32		

3	
TEATRO VILLAESPESA	
Sorbas (Almería)	
C/ San Francisco, s/n.	
Construcción:	1900
Rehabilitación:	1997
Arquitectos:	Alberto Requena Guerra*

(*) Arquitecto de la rehabilitación

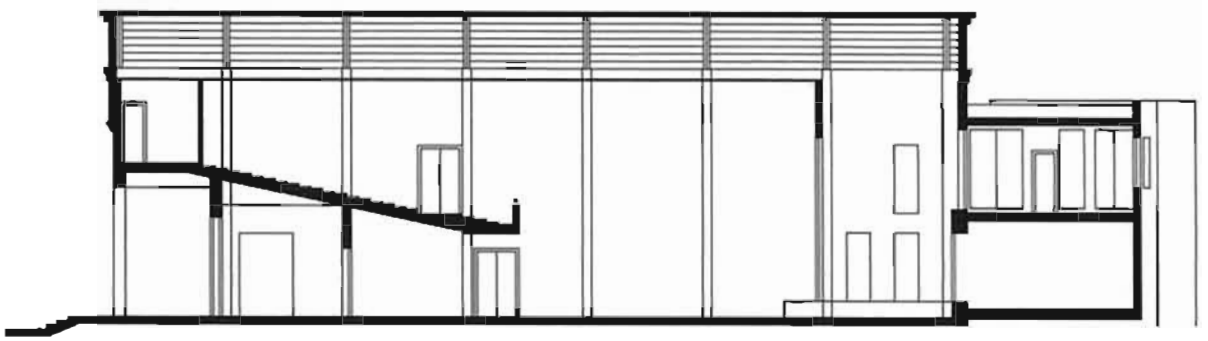
Rehabilitación



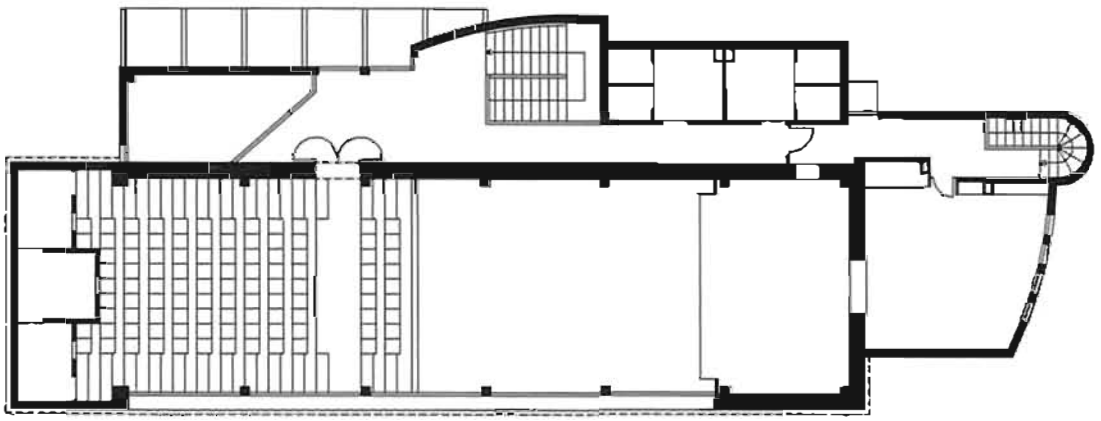
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

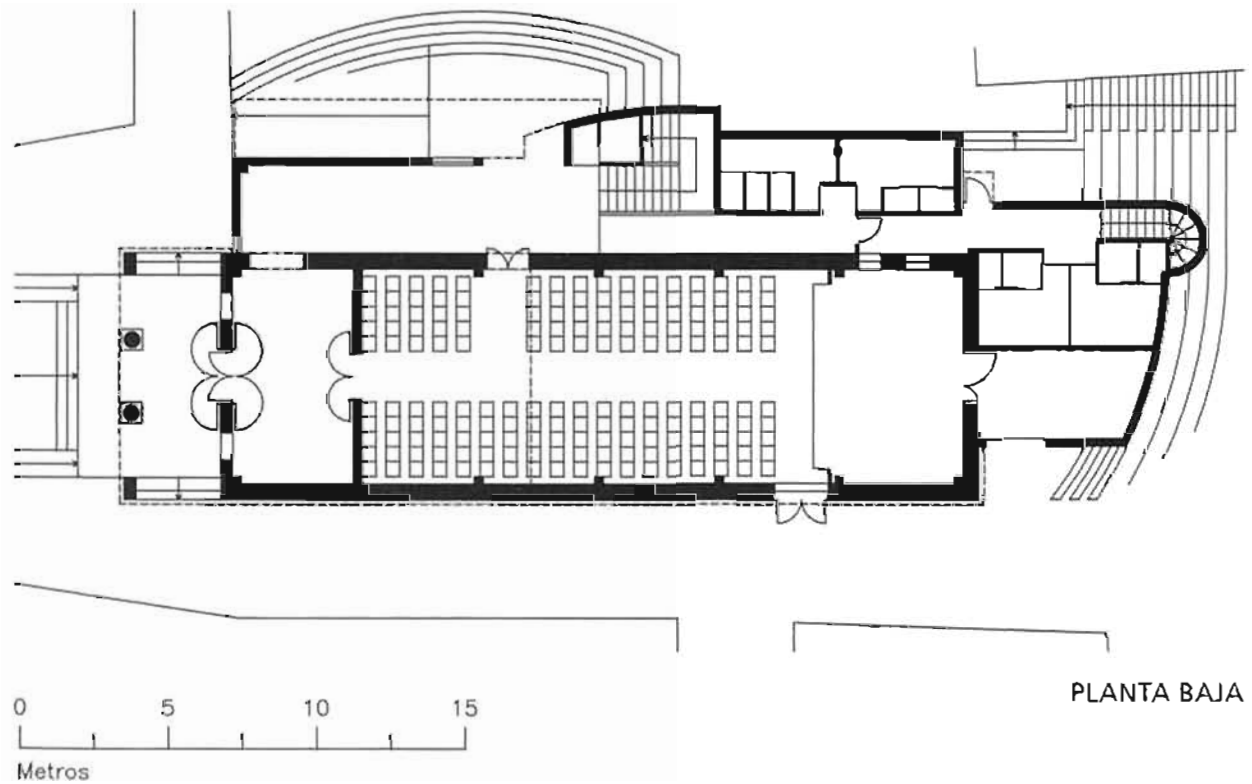
Superficie construida:	564 m²
Volumen sala:	1.062 m³
Volumen escena:	260 m³
Superficie de revestimiento:	1.022 m²
Superficie butacas:	103 m²
Superficie pasillos:	42 m²
Aforo:	273 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	15,65 m
Anchura media:	7,20 m
Altura media:	8,00 m



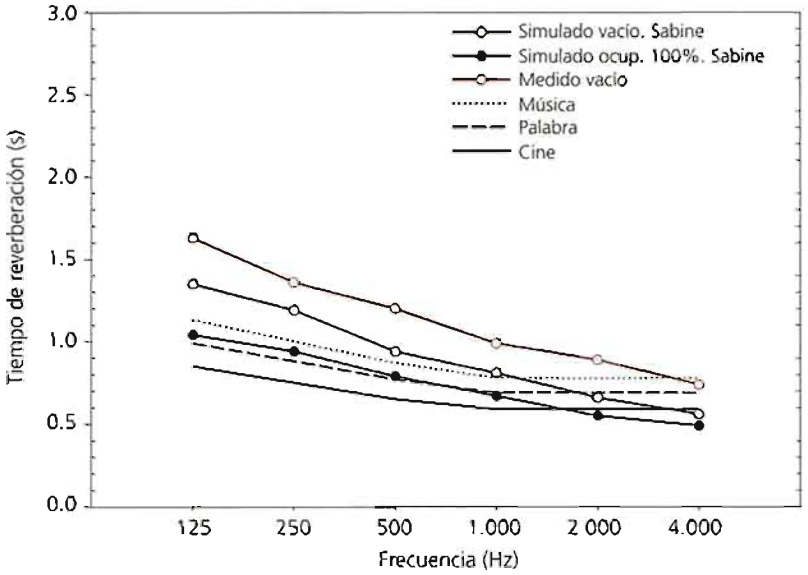
SECCIÓN



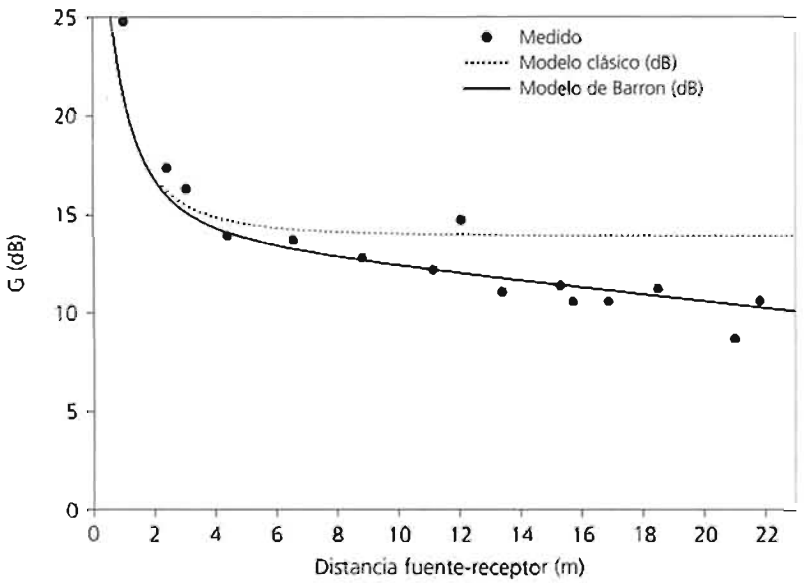
PLANTA ALTA



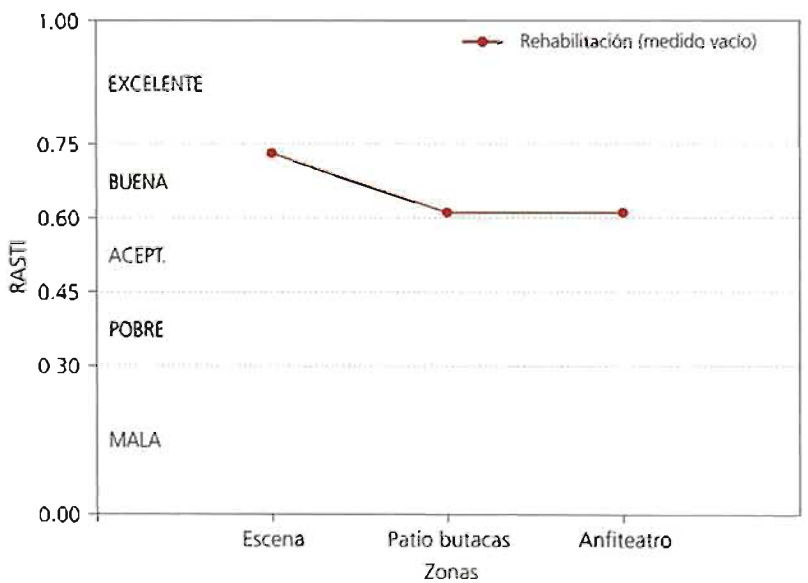
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ)*	1,63	1,36	1,20	0,99	0,89	0,74	1,10
Sala ocupada 100% (simulado)	1,04	0,94	0,79	0,67	0,55	0,49	0,73

Ruido de fondo (dB). *Medido* in situ. *Rehabilitación*	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	45,0	34,0	25,6	18,5	19,0	21,9	**27**
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

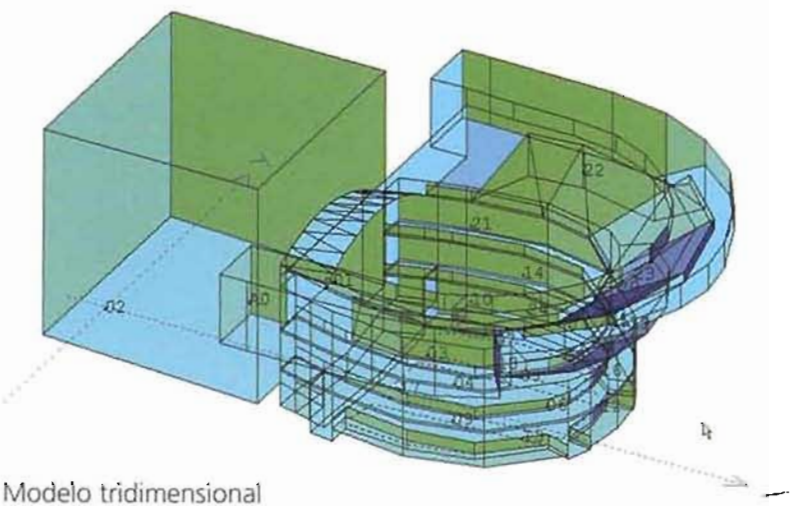
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,45	1,36	V_1 / N	3,89
Brillo Br (s)	0,70	0,71		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	62,20	70,50	V_1 / S_A	7,32
Claridad de la voz C_{50AV} (dB)	3,52	4,55		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	5,77	7,07	V_1 / S_{Tot}	6,87
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	10,95	9,90		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	26,13	25,75	S_A / V_1	0,53
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,34	0,26		

4	
GRAN TEATRO FALLA	
Cádiz	
Plaza Manuel de Falla	
Construcción:	1905
Rehabilitación:	1990
Arquitectos:	Juan Cabrera Latorre
	J. A. Carbajal Navarro*
	Rafael Otero González*

(*) Arquitectos de la rehabilitación

Estado original

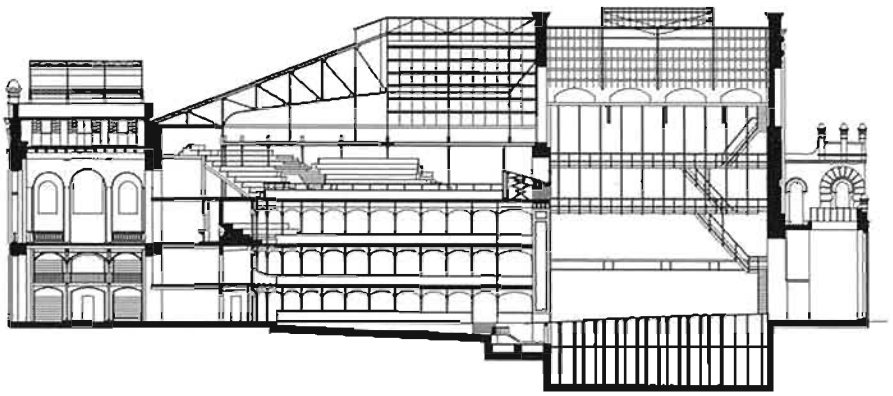
Rehabilitación



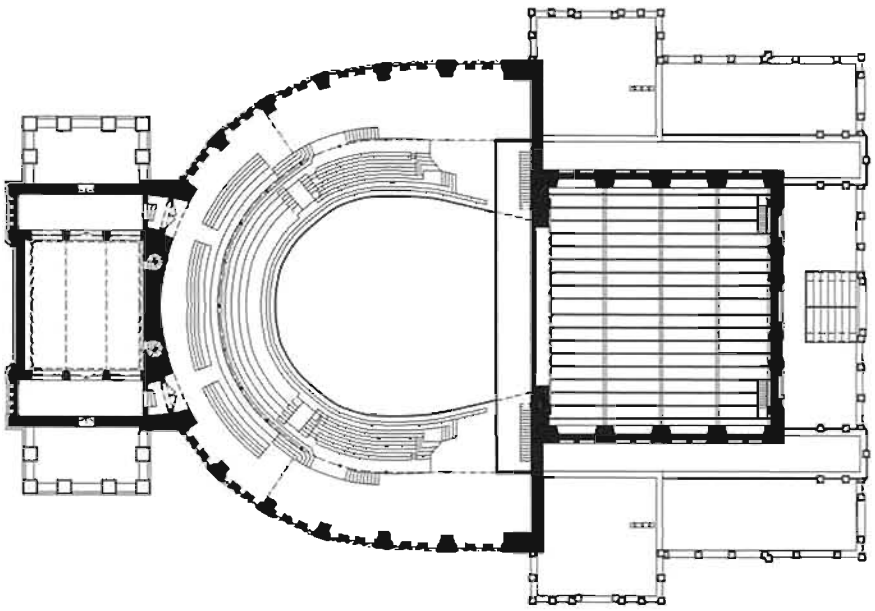
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

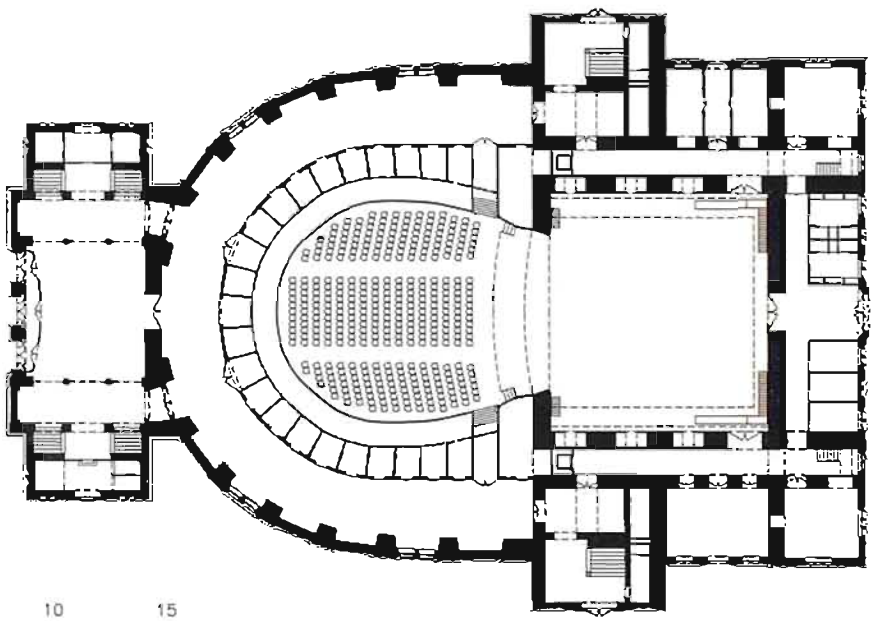
Superficie construida:	7.084 m²
Volumen sala:	8.114 m³
Volumen escena:	5.854 m³
Superficie de revestimiento:	6.313 m²
Superficie butacas:	687 m²
Superficie pasillos:	105 m²
Aforo:	1.038 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	17,35 m
Anchura media:	15,50 m
Altura media:	15,00 m



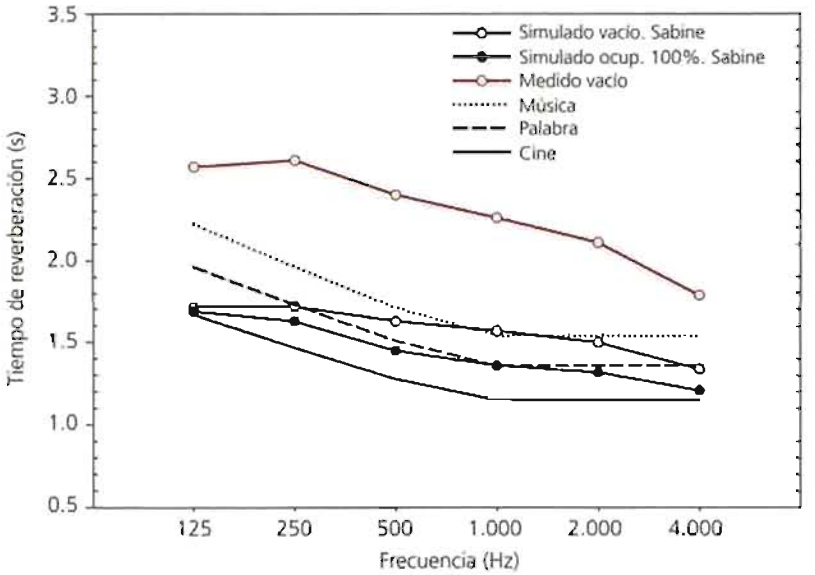
SECCIÓN



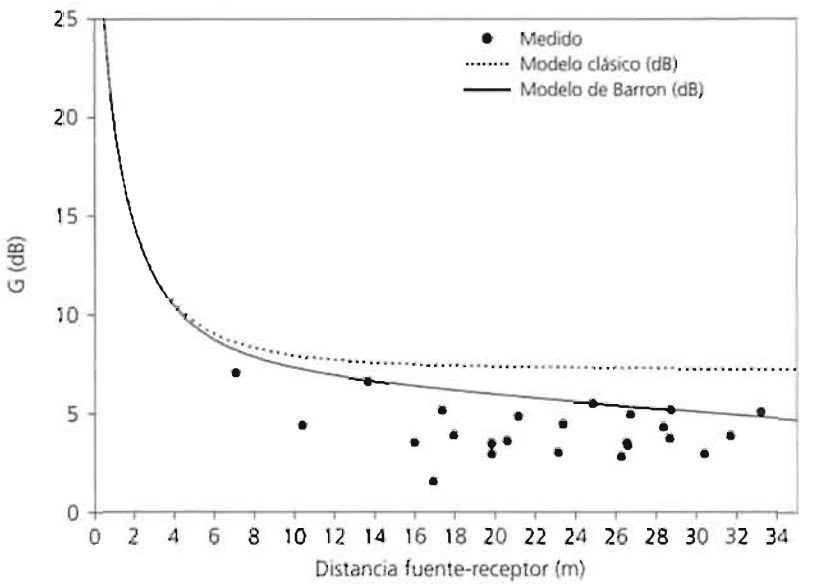
PLANTA ALTA



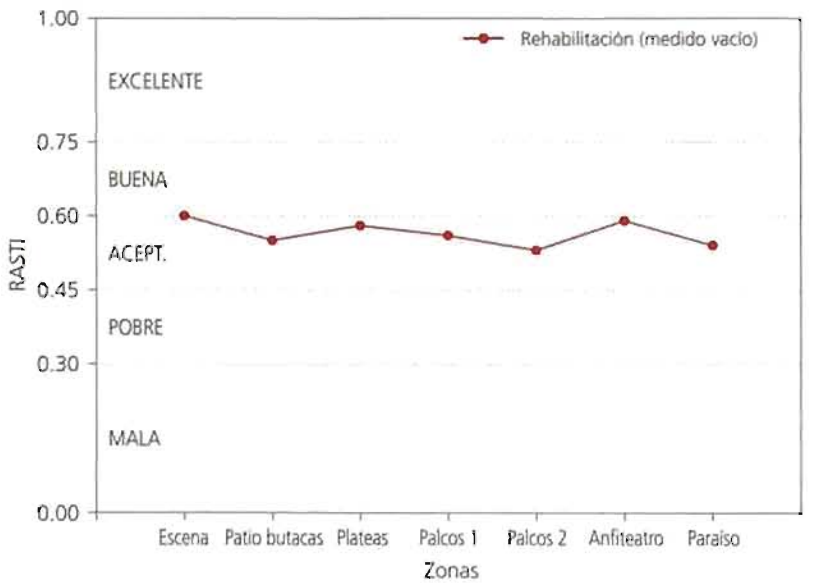
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	2,57	2,61	2,40	2,26	2,11	1,79	2,33
Sala ocupada 100% (simulado)	1,69	1,63	1,45	1,36	1,32	1,21	1,41

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. *Rehabilitación*	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	37,4	33,5	30,3	28,9	24,5	20,8	**29**
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

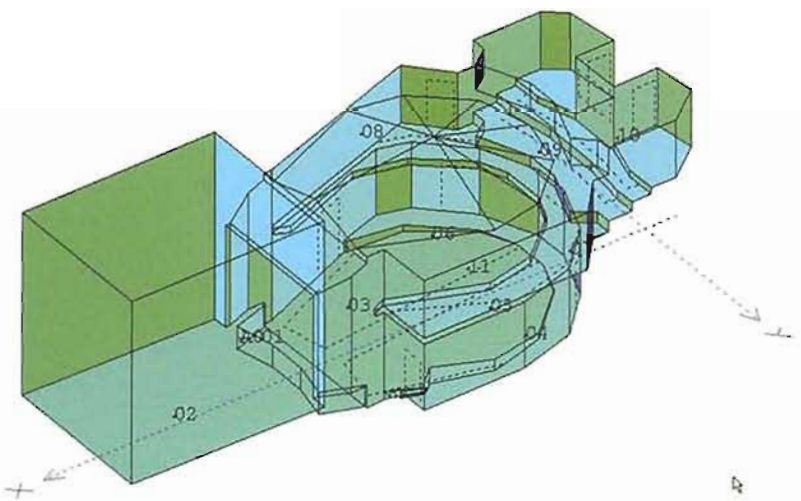
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,07	1,18	V_1 / N	7,82
Brillo Br (s)	0,89	0,90		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	47,20	53,10	V_1 / S_A	10,24
Claridad de la voz $C_{50A\nu}$ (dB)	–0,12	0,57		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	2,03	2,90	V_1 / S_{To}	9,34
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	2,85	2,15		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	23,75	23,03	S_A / V_1	0,76
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,48	0,38		

5	
TEATRO OLIVARES VEAS	
Arcos de la Frontera (Cádiz)	
C/ Maldonado	
Construcción:	1910
Rehabilitación:	1994
Arquitectos:	José Olivares Veas
	Manuel García Soria
	Diego Morales Gómez T.*

(*) Arquitecto de la rehabilitación

Estado original

Rehabilitación



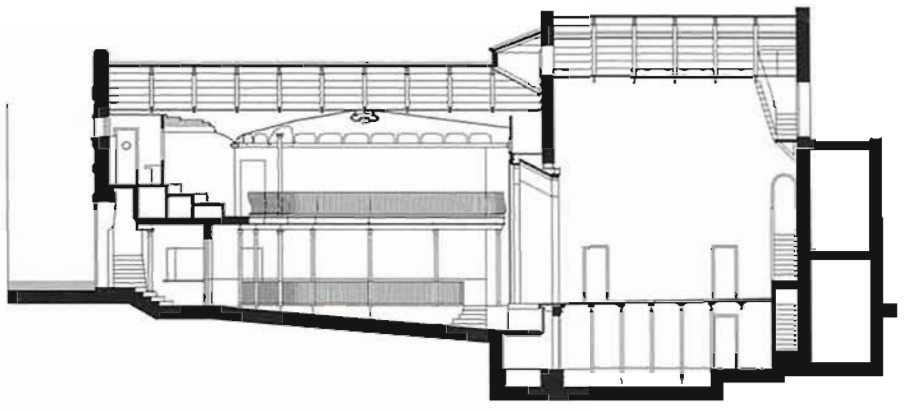
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

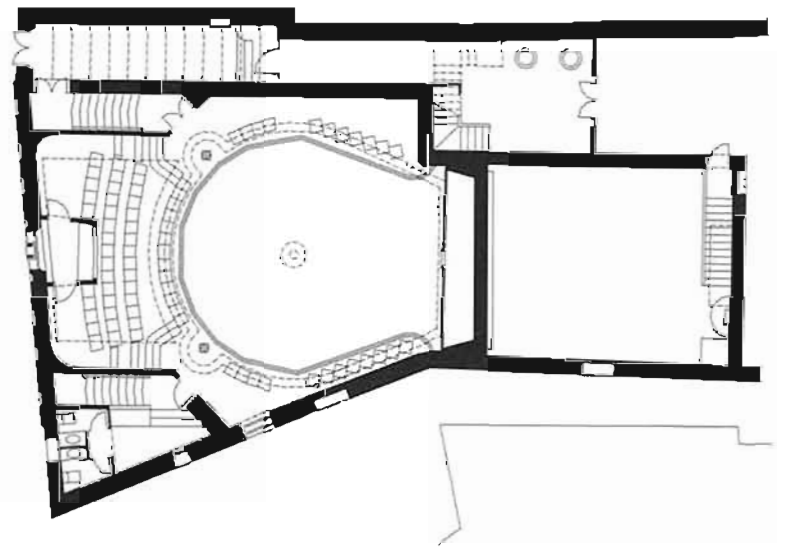
Superficie construida:	526 m²
Volumen sala:	790 m³
Volumen escena:	523 m³
Superficie de revestimiento:	1.021 m²
Superficie butacas:	78 m²
Superficie pasillos:	62 m²
Aforo:	221 pers.

Dimensiones sala:

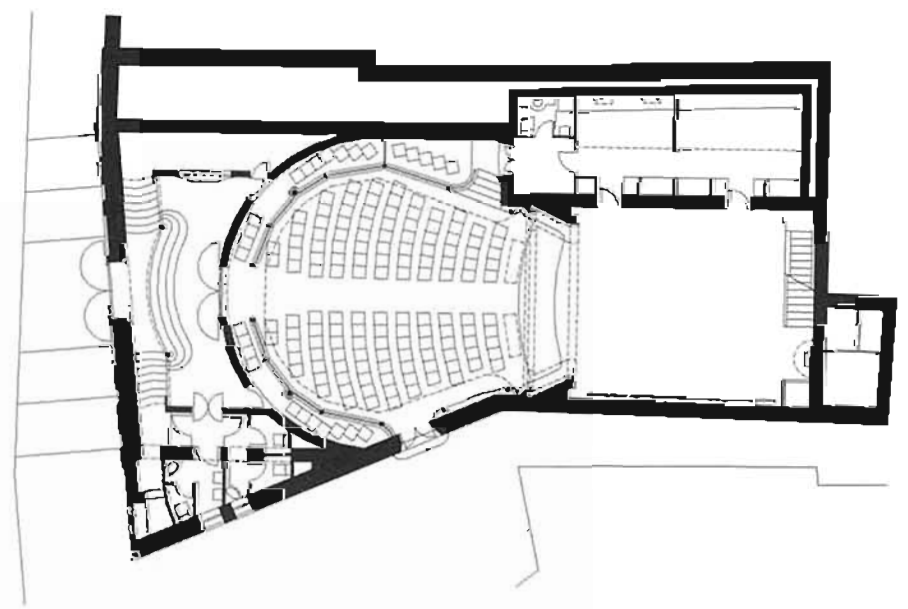
Longitud media:	8,55 m
Anchura media:	10,50 m
Altura media:	7,15 m



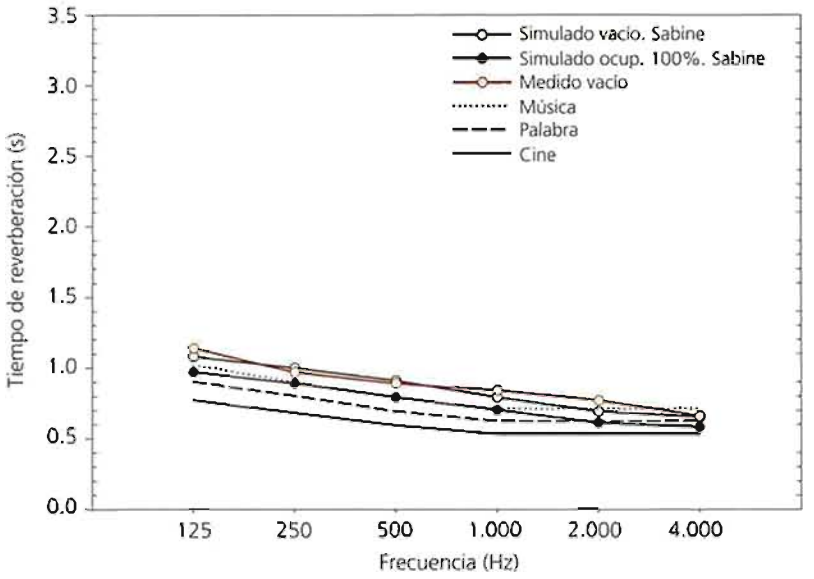
SECCIÓN



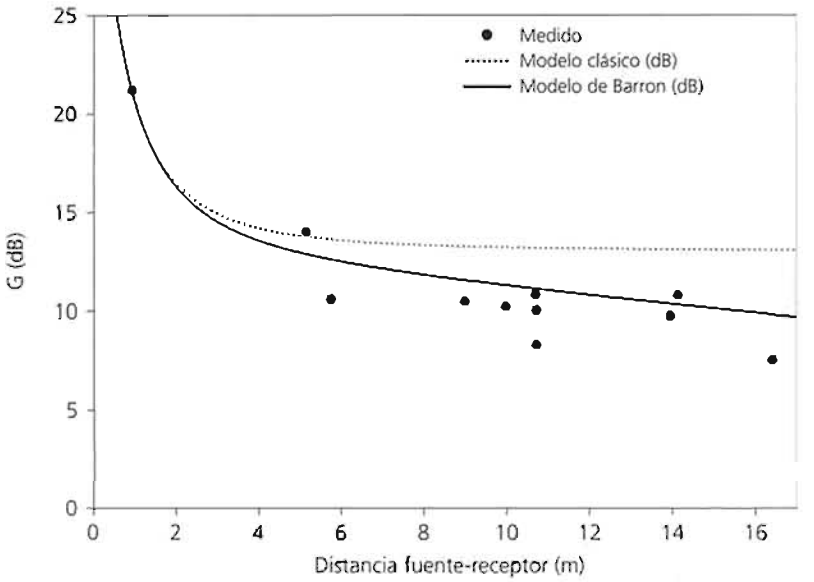
PLANTA ALTA



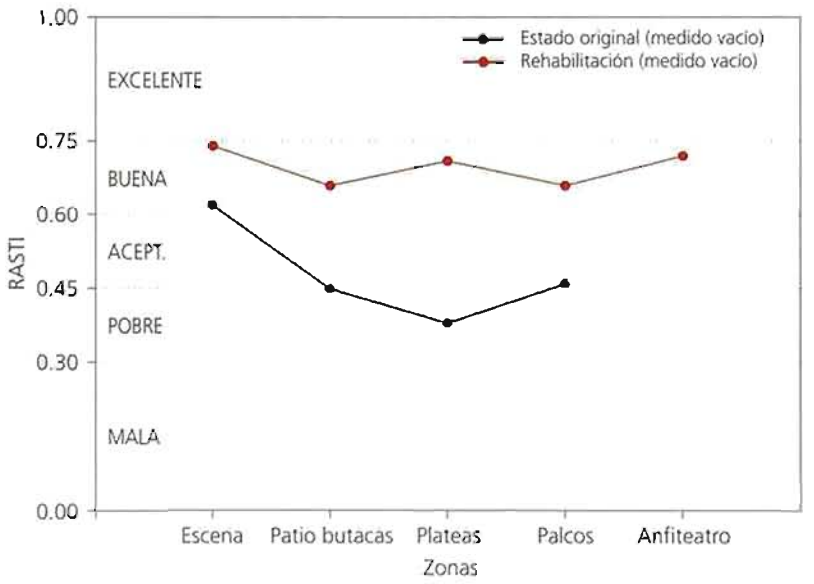
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	1,14	0,97	0,89	0,84	0,77	0,66	0,87
Sala ocupada 100% (simulado)	0,97	0,89	0,79	0,70	0,61	0,58	0,75

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. *Rehabilitación*	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	27,9	26,3	22,4	19,3	16,3	16,3	22
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

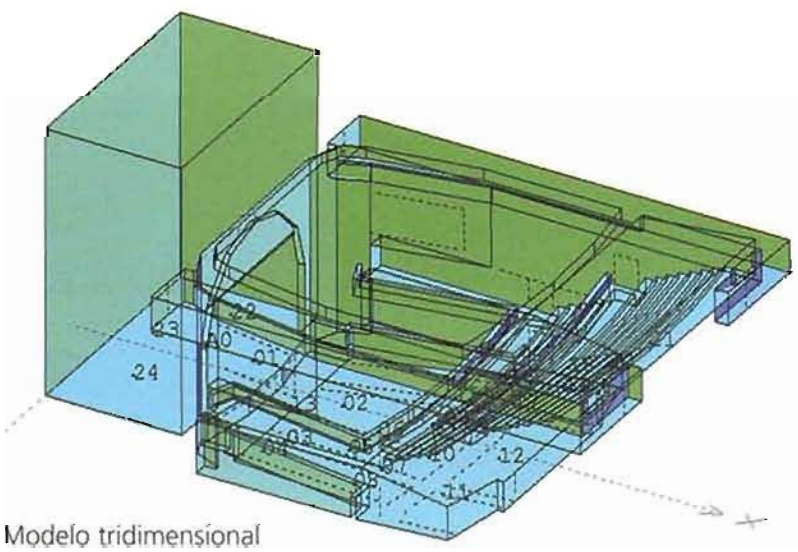
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,22	1,25	V_1 / N	3,58
Brillo Br (s)	0,79	0,80		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	63,50	70,90	V_1 / S_A	5,65
Claridad de la voz C_{50A} (dB)	3,64	4,90		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	6,40	7,83	V_1 / S_{Tp}	5,11
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	11,70	11,05		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	24,98	24,95	S_A / V_1	0,63
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,42	0,32		

6	
TEATRO VILLAMARTA	
Jerez de la Frontera (Cádiz)	
Plaza Romero Martínez, esquina C/ Medina	
Construcción:	1928
Rehabilitación:	1996
Arquitectos:	Teodoro Anasagasti
	Carbajal Navarro*
	Daroca Bruño* y R. Otero*

(*) Arquitectos de la rehabilitación

Estado original

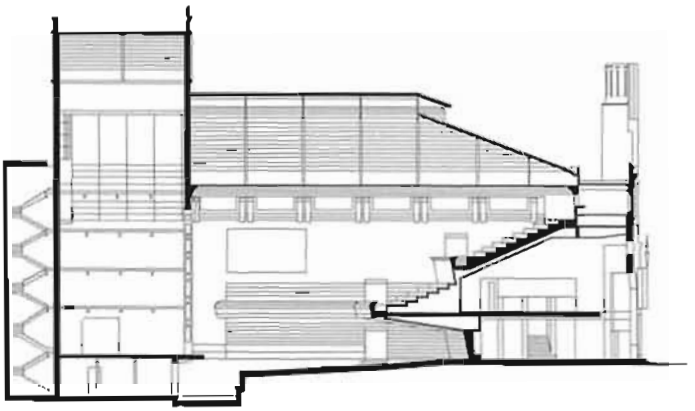
Rehabilitación



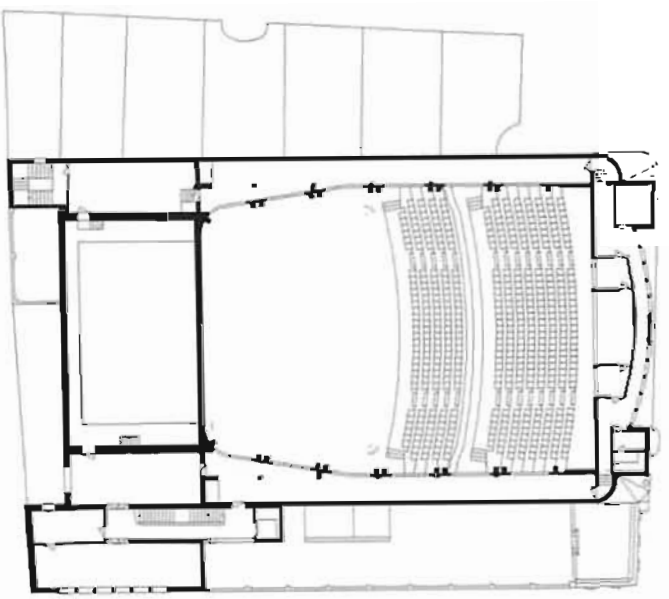
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

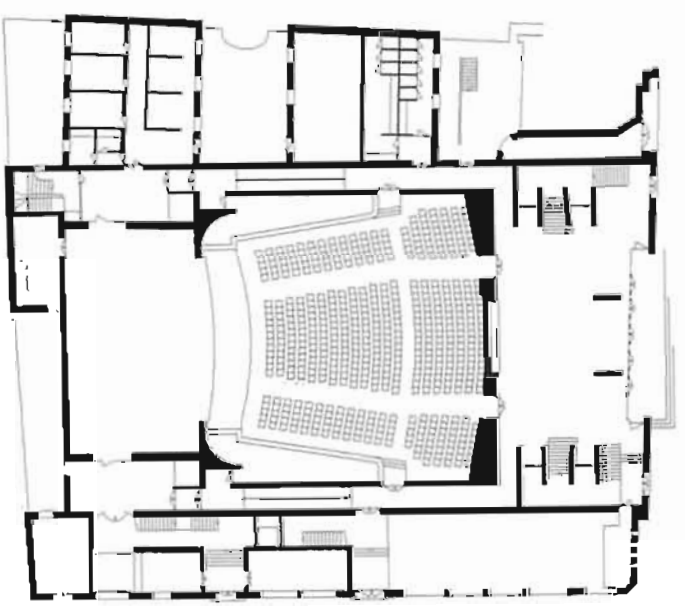
Superficie construida:	5.243 m²
Volumen sala:	7.988 m³
Volumen escena:	3.703 m³
Superficie de revestimiento:	5.371 m²
Superficie butacas:	555 m²
Superficie pasillos:	125 m²
Aforo:	1.221 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	21,75 m
Anchura media:	22,85 m
Altura media:	14,35 m



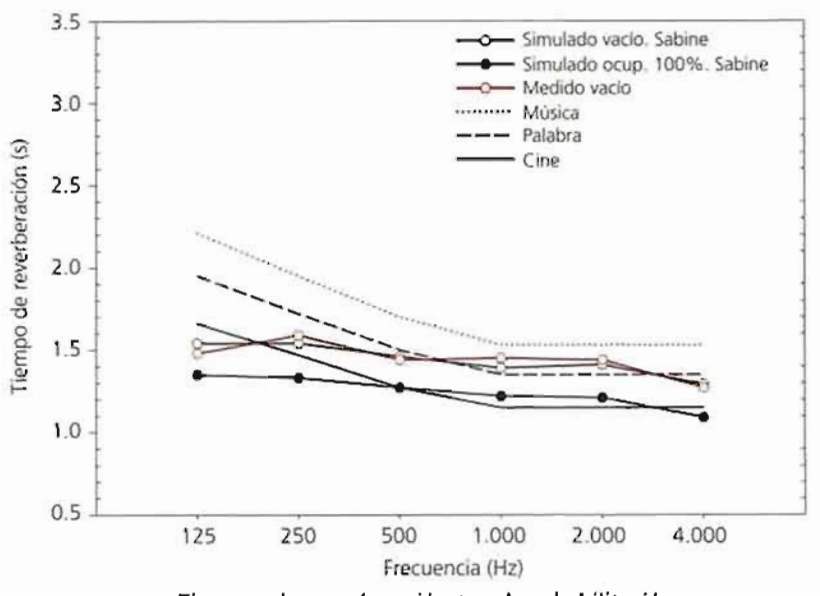
SECCIÓN



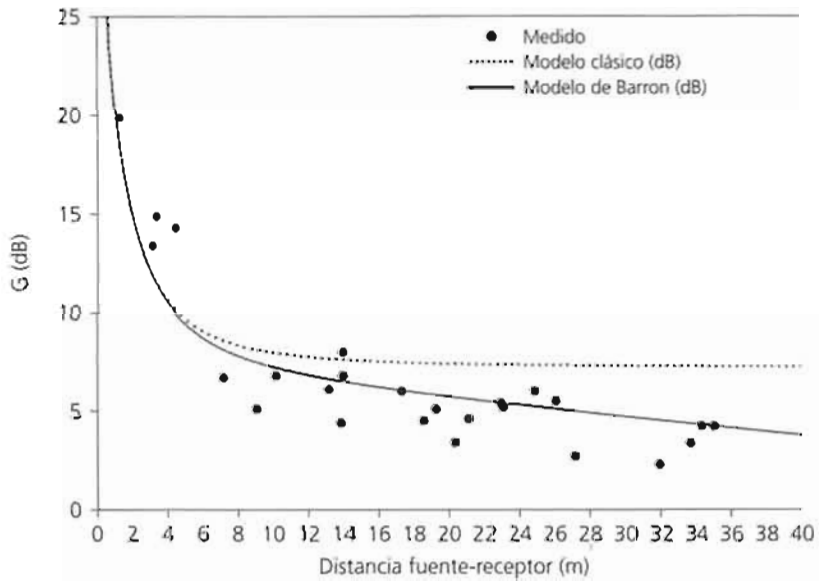
PLANTA ALTA



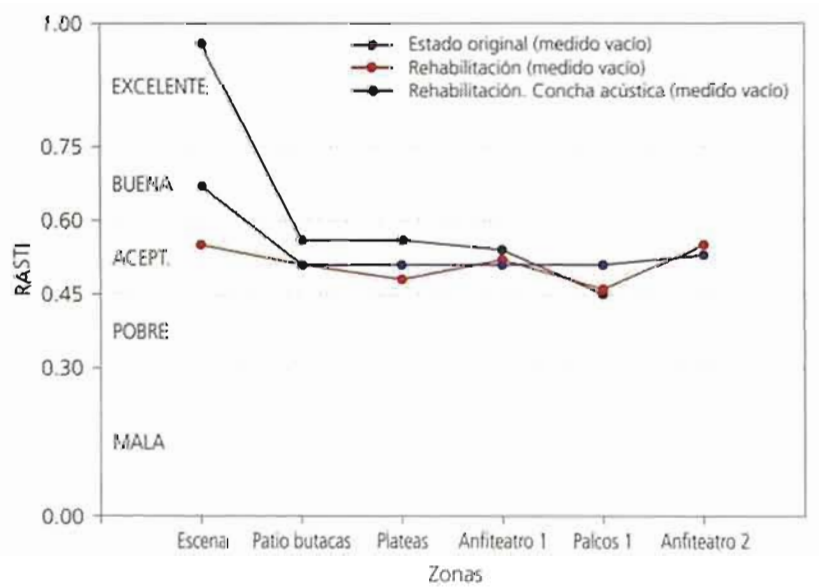
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	2,15	2,02	1,99	1,97	1,97	1,55	1,98
Sala ocupada 100% (simulado)	1,35	1,33	1,27	1,22	1,21	1,09	1,25

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	35,5	29,6	27,1	24,4	22,6	24,2	**29**
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

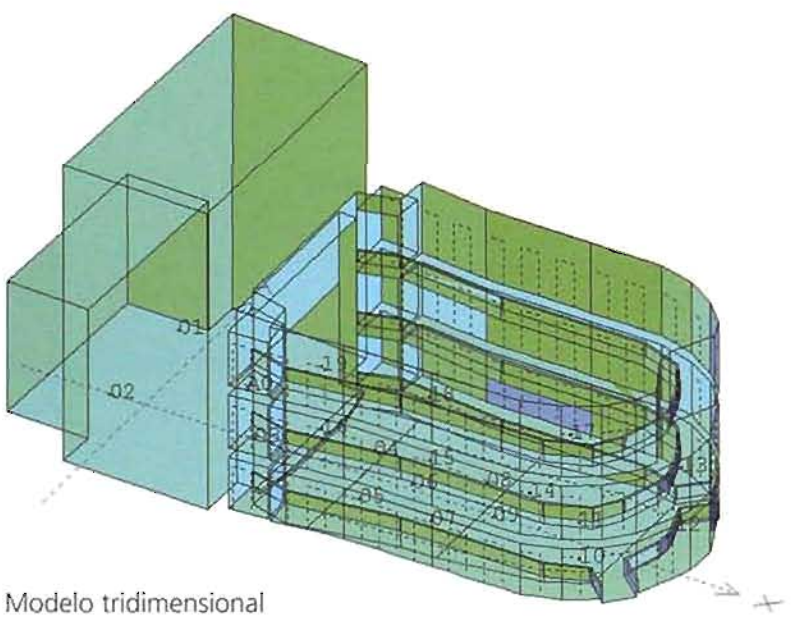
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,08	1,08	V_1 / N	6,54
Brillo Br (s)	0,95	0,92		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	51,40	57,40	V_1 / S_A	11,76
Claridad de la voz C_{50AV} (dB)	0,66	1,63		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	3,03	3,97	V_1 / S_{To}	10,39
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	4,65	4,00		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	26,00	26,18	S_A / V_1	0,56
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,47	0,36		

7	
TEATRO PRINCIPAL	
Puerto Real (Cádiz)	
C/ Amargura, 59	
Construcción:	1843
Rehabilitación:	1993
Arquitectos:	Ángel Díaz Domínguez*

(*) Arquitecto de la rehabilitación

Estado original

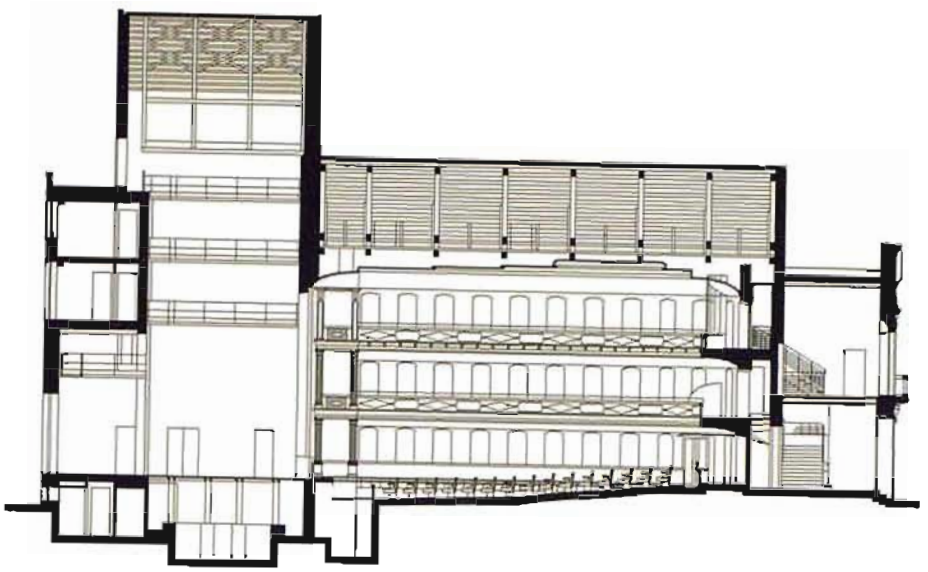
Rehabilitación



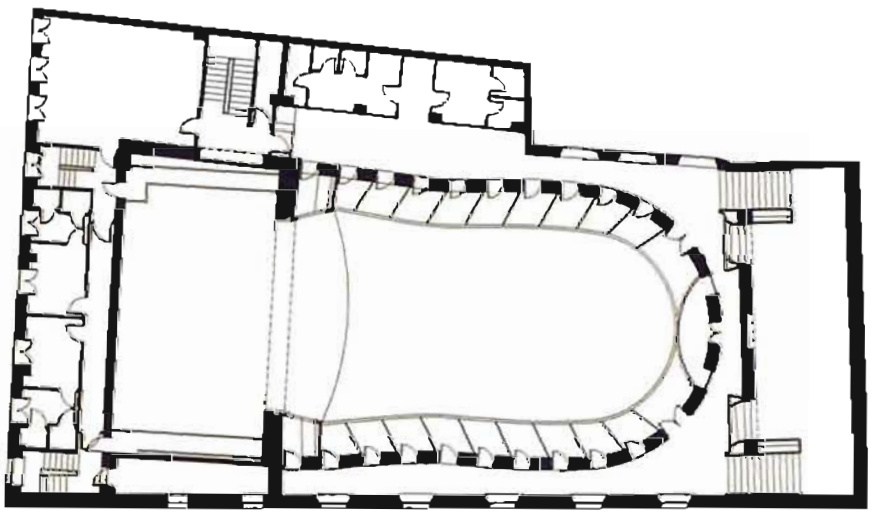
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

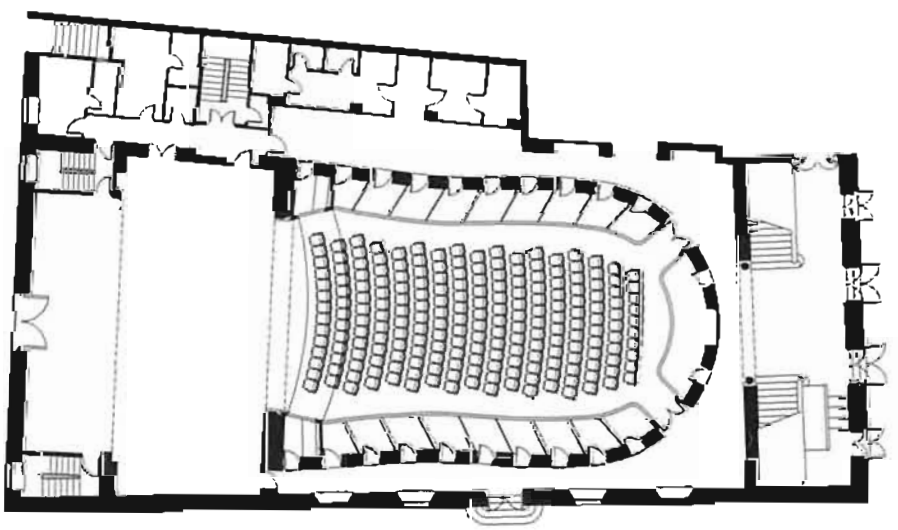
Superficie construida:	2.066 m²
Volumen sala:	2.214 m³
Volumen escena:	1.211 m³
Superficie de revestimiento:	2.172 m²
Superficie butacas:	233 m²
Superficie pasillos:	20 m²
Aforo:	444 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	16,20 m
Anchura media:	11,60 m
Altura media:	9,65 m



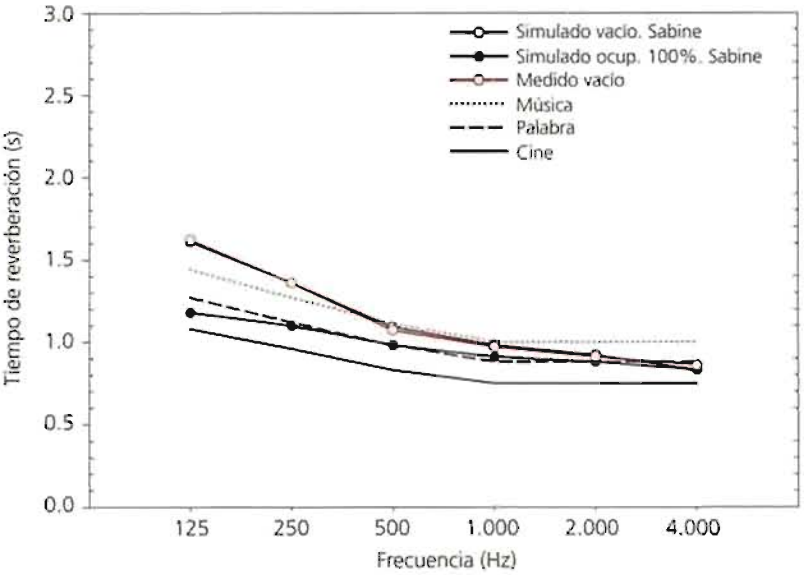
SECCIÓN



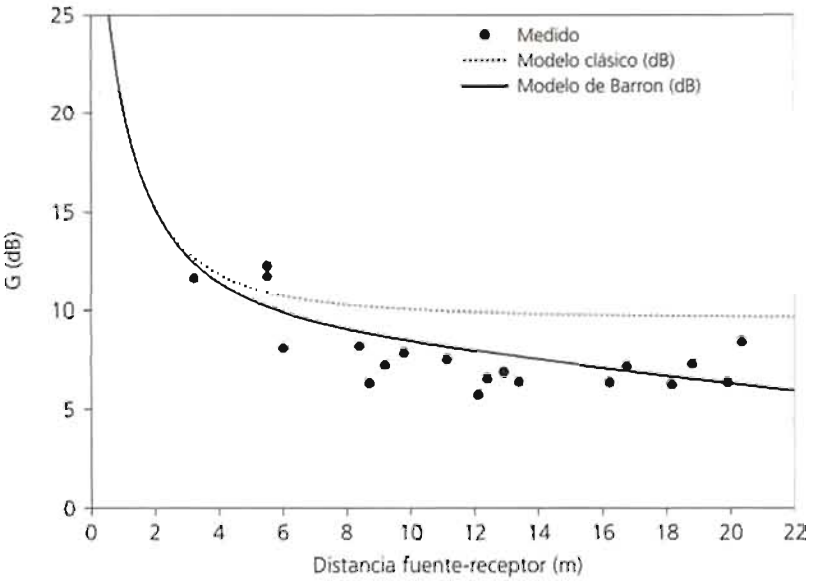
PLANTA ALTA



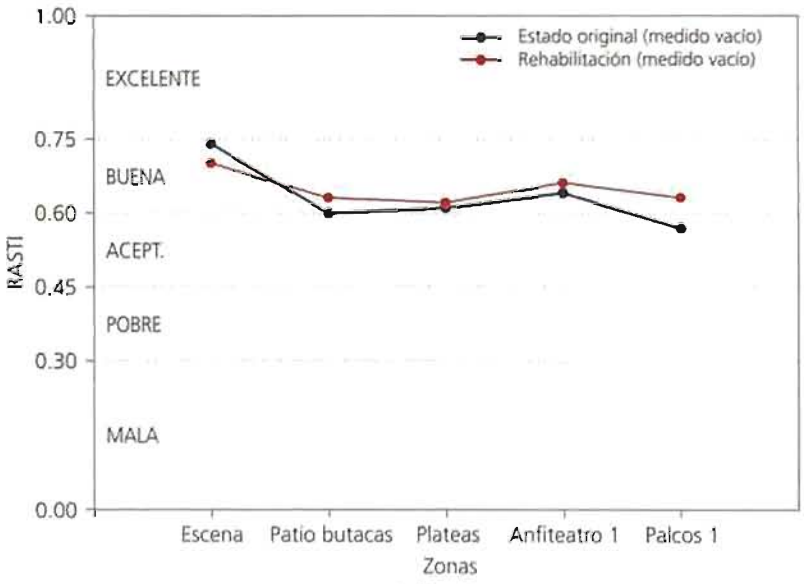
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	1,62	1,36	1,07	0,97	0,91	0,86	1,02
Sala ocupada 100% (simulado)	1,18	1,10	0,98	0,91	0,88	0,83	1,04

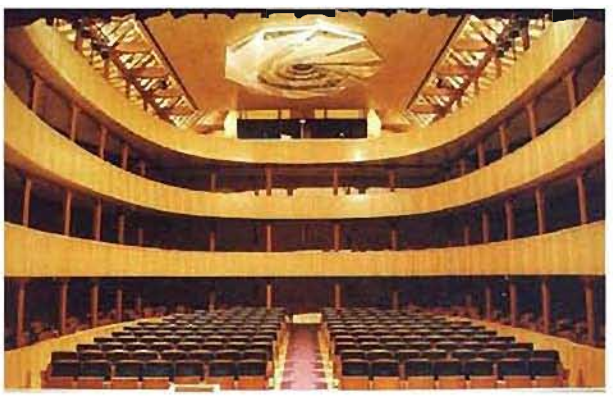
Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	40,5	39,1	34,7	30,3	28,6	27,3	**33**
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,43	1,21	V_1 / N	4,99
Brillo Br (s)	0,85	0,90		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	58,40	62,20	V_1 / S_A	8,76
Claridad de la voz C_{50AV} (dB)	1,71	2,07		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	3,97	4,60	V_1 / S_{To}	7,36
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	8,85	8,15		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	26,30	26,53	S_A / V_1	0,57
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,43	0,33		

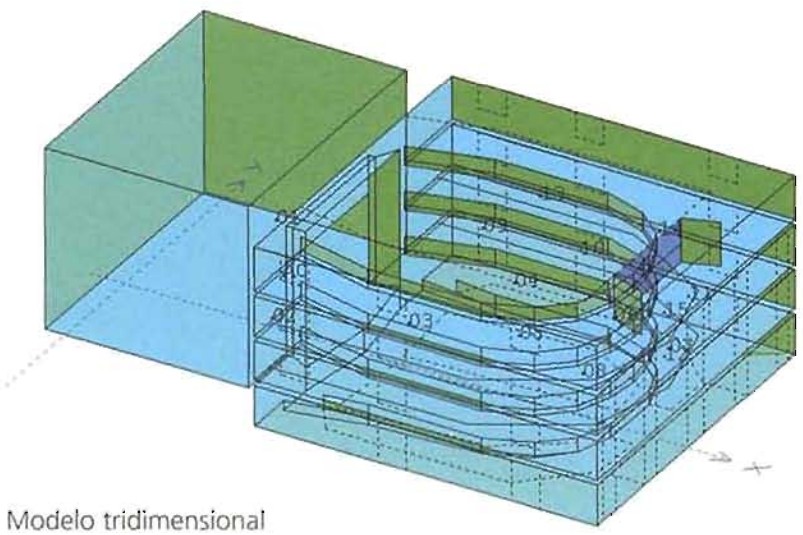
8	
TEATRO DE LAS CORTES	
San Fernando (Cádiz)	
C/ de las Cortes, esquina General Serrano	
Construcción:	1804
Rehabilitación:	1999
Arquitectos:	Estudio LAN*

(*) Estudio redactor del proyecto de rehabilitación

Estado original



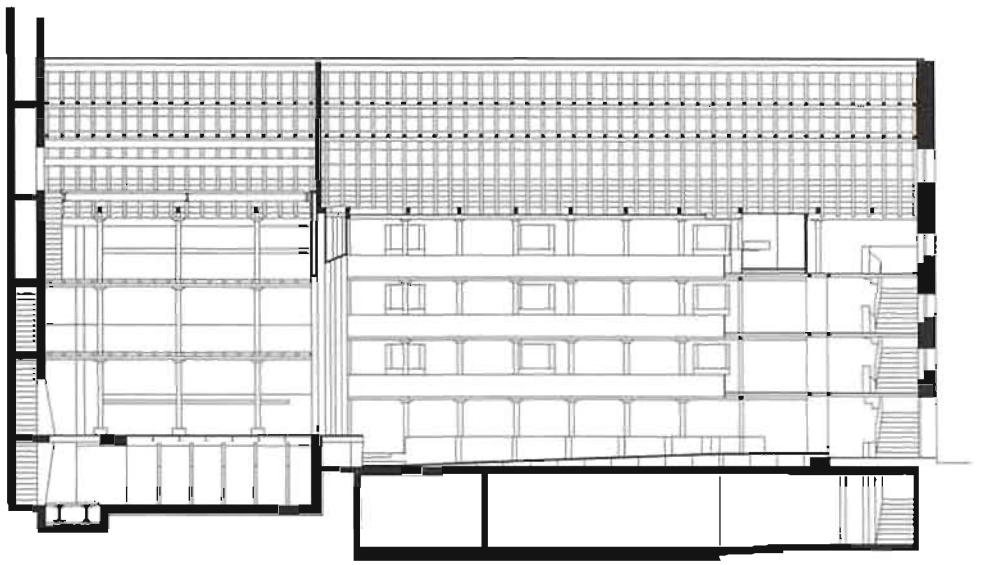
Rehabilitación



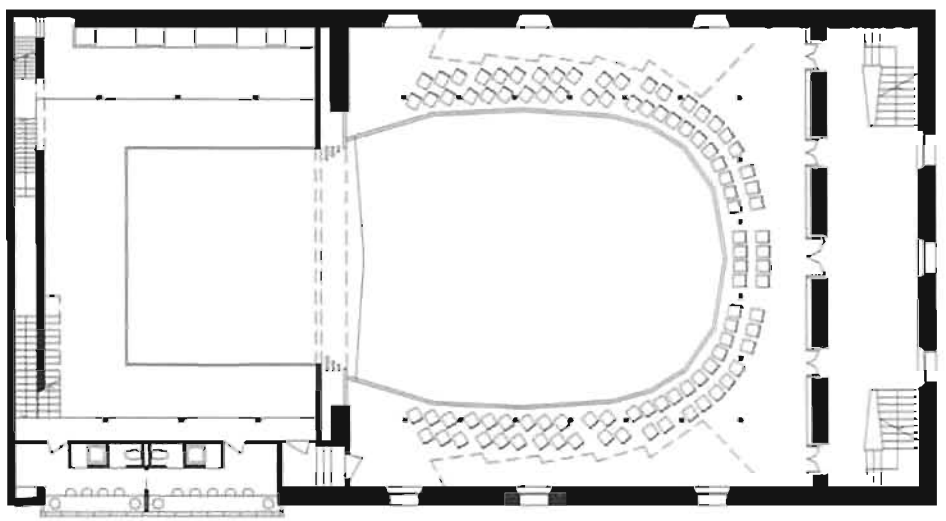
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

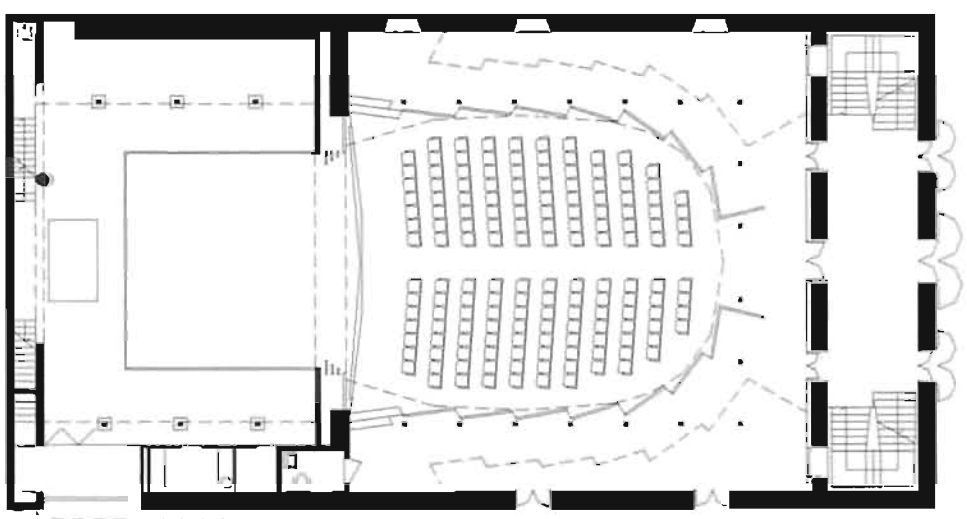
Superficie construida:	1.963 m²
Volumen sala:	2.492 m³
Volumen escena:	1.222 m³
Superficie de revestimiento:	2.956 m²
Superficie butacas:	246 m²
Superficie pasillos:	81 m²
Aforo:	360 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	16,95 m
Anchura media:	17,00 m
Altura media:	9,10 m



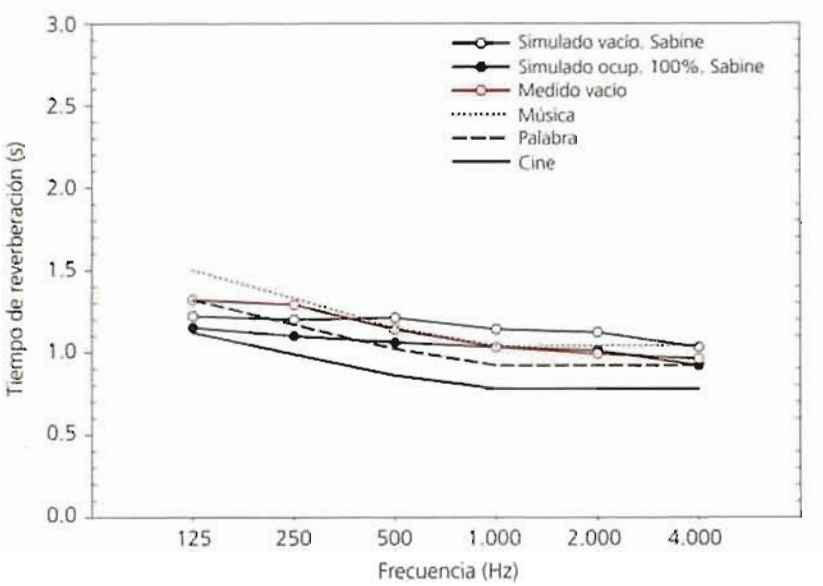
SECCIÓN



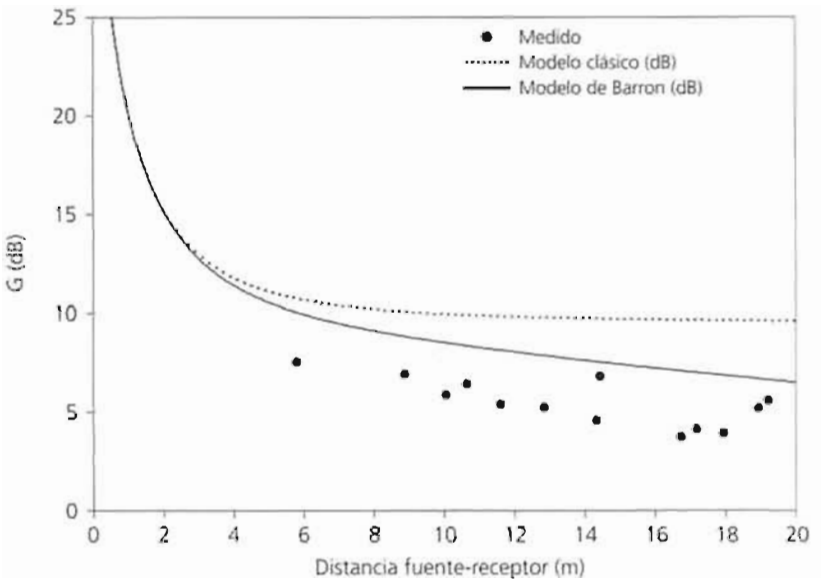
PLANTA ALTA



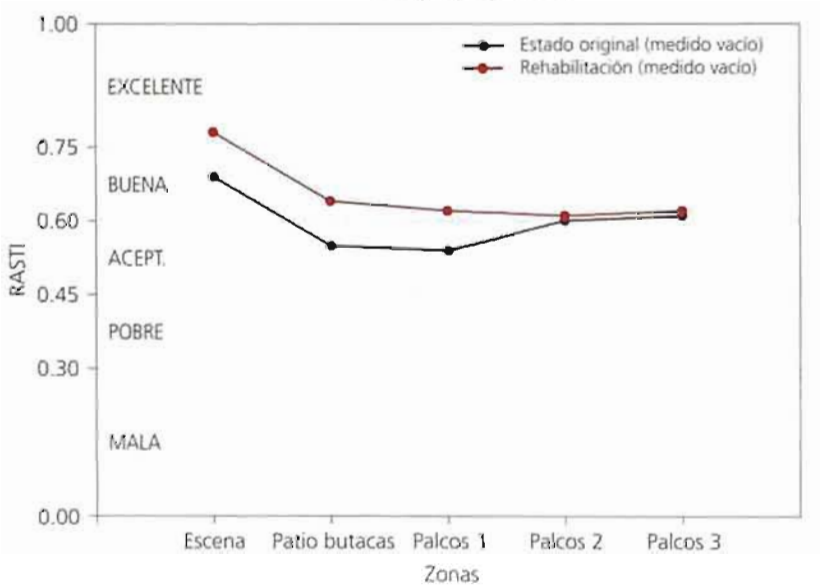
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ)*	1,32	1,29	1,14	1,03	0,99	0,96	1,09
Sala ocupada 100% (simulado)	1,15	1,10	1,06	1,03	1,01	0,92	1,05

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	28,4	24,4	22,9	19,5	20,2	20,7	**26**
Con aire acondicionado	55,5	46,2	44,9	40,7	33,3	28,7	**41**

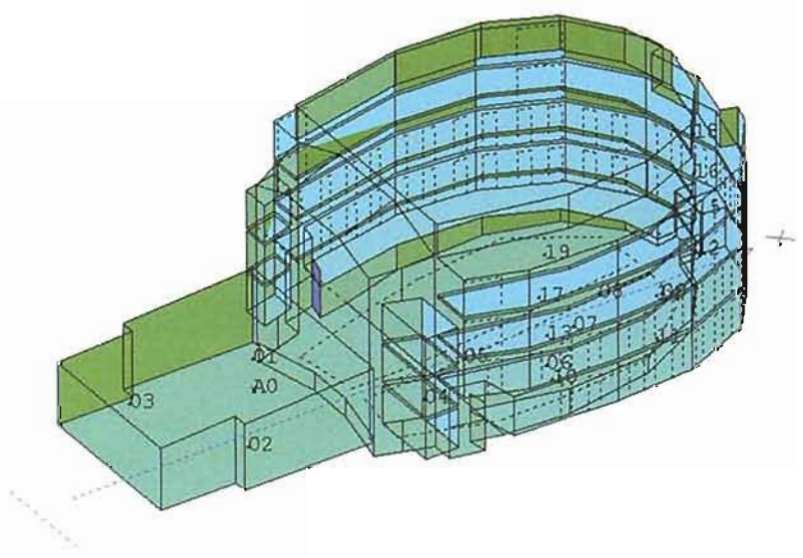
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,03	1,08	V_1 / N	6,92
Brillo Br (s)	0,91	0,92		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	49,90	56,00	V_1 / S_A	7,63
Claridad de la voz C_{50Av} (dB)	0,09	0,85		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	2,13	3,00	V_1 / S_{To}	7,33
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	8,00	7,30		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	21,83	22,23	S_A / V_1	0,91
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,46	0,36		

9	
GRAN TEATRO DE CÓRDOBA	
Córdoba	
C/ Menéndez Pelayo, s/n., esquina Gran Capitán	
Construcción:	1873
Rehabilitación:	1986
Arquitectos:	Amadeo Rodríguez
	José A. Gómez Luengo*

(*) Arquitecto de la rehabilitación

Estado original

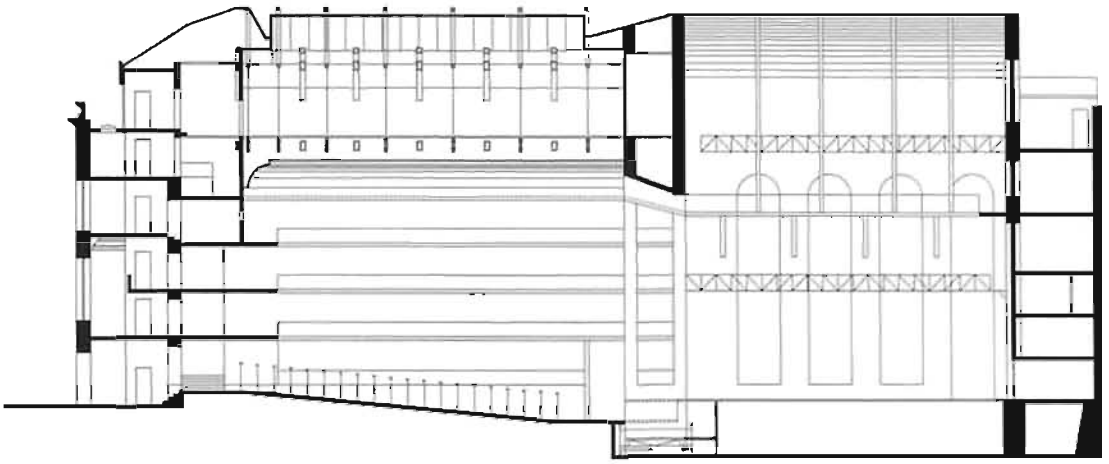
Rehabilitación



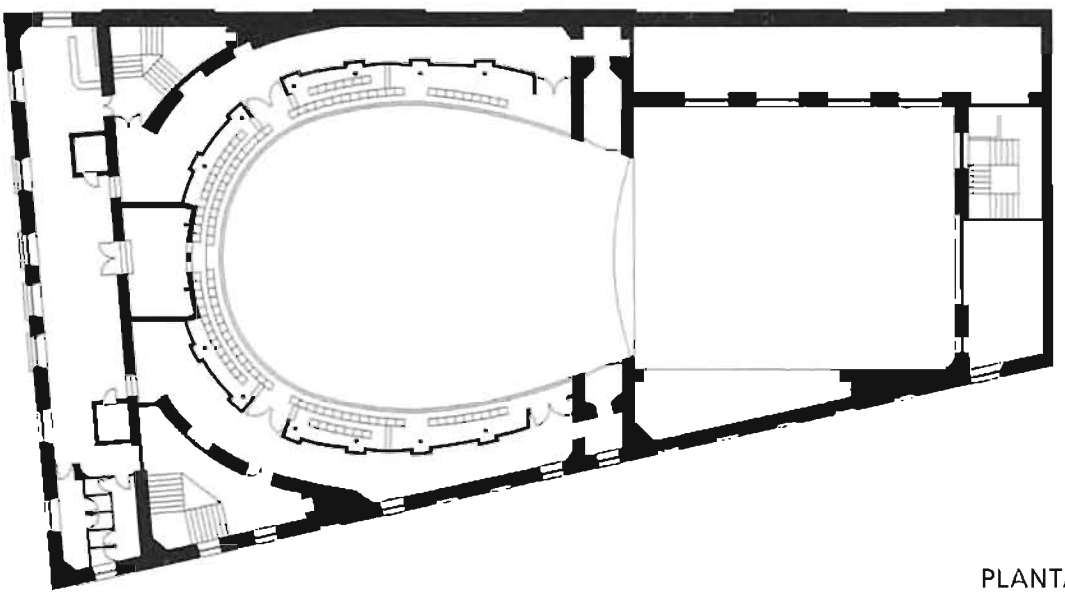
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

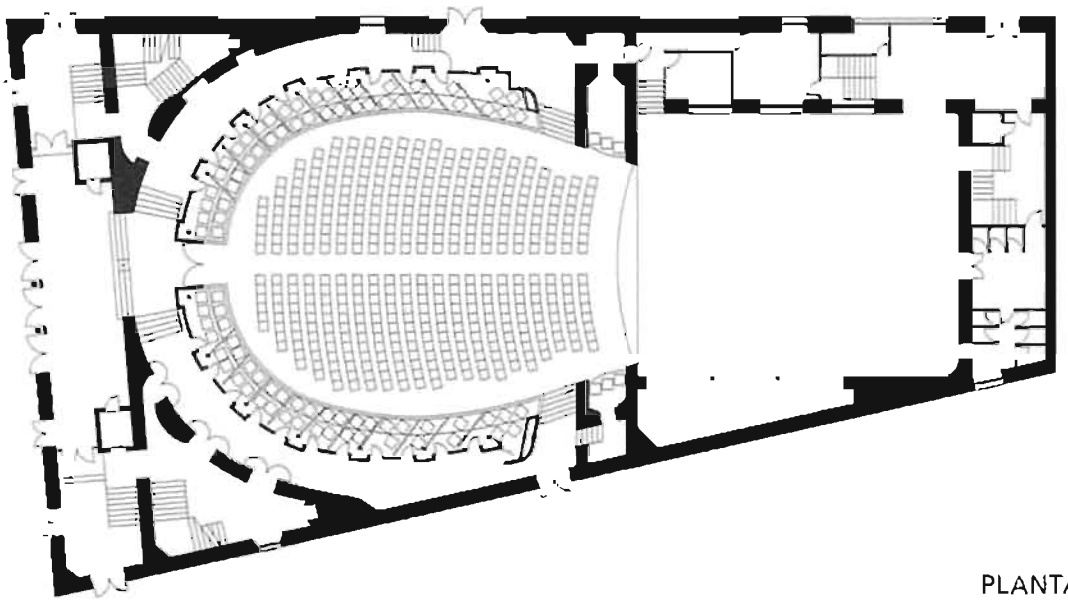
Superficie construida:	6.243 m²
Volumen sala:	6.071 m³
Volumen escena:	4.631 m³
Superficie de revestimiento:	4.448 m²
Superficie butacas:	536 m²
Superficie pasillos:	152 m²
Aforo:	946 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	23,60 m
Anchura media:	21,45 m
Altura media:	13,70 m



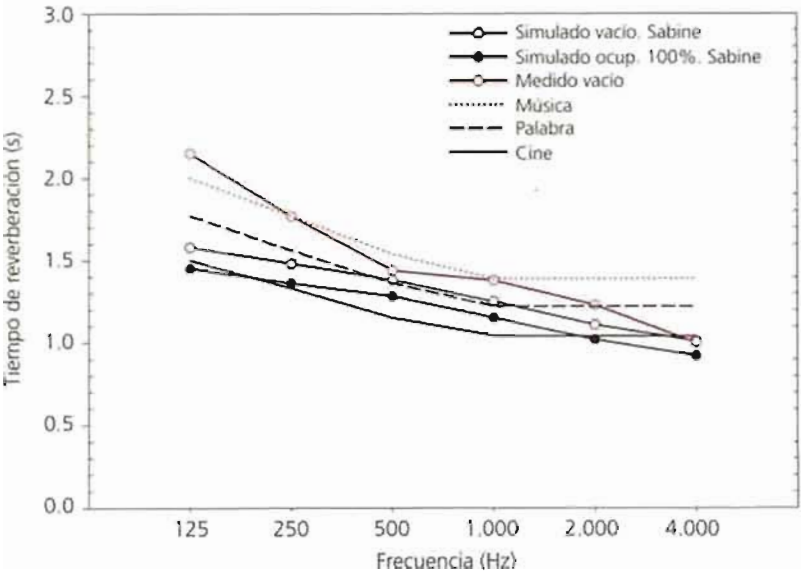
SECCIÓN



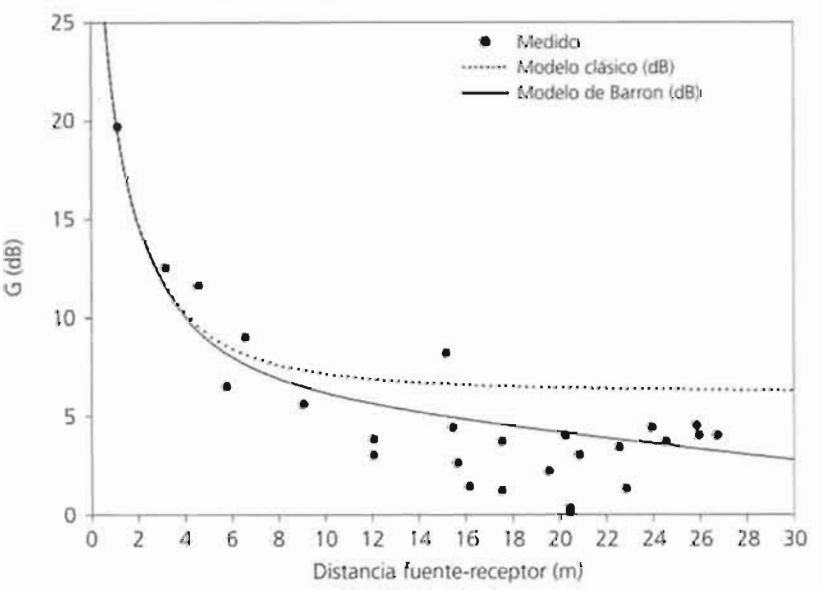
PLANTA ALTA



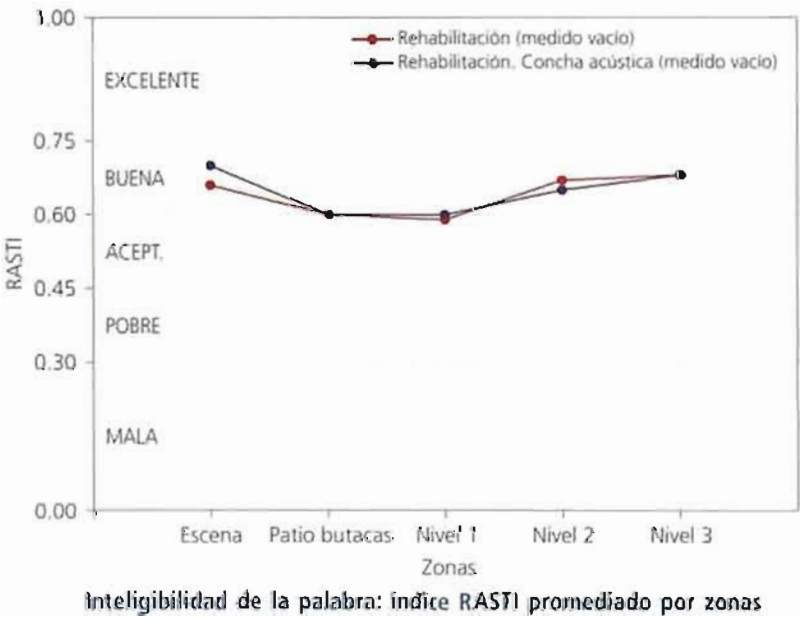
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ)*	2,15	1,77	1,44	1,38	1,23	1,00	1,41
Sala ocupada 100% (simulado)	1,45	1,36	1,28	1,15	1,02	0,92	1,22

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	29,9	31,7	24,2	21,0	21,4	23,6	**28**
Con aire acondicionado	43,4	40,8	36,2	32,9	26,6	24,3	**33**

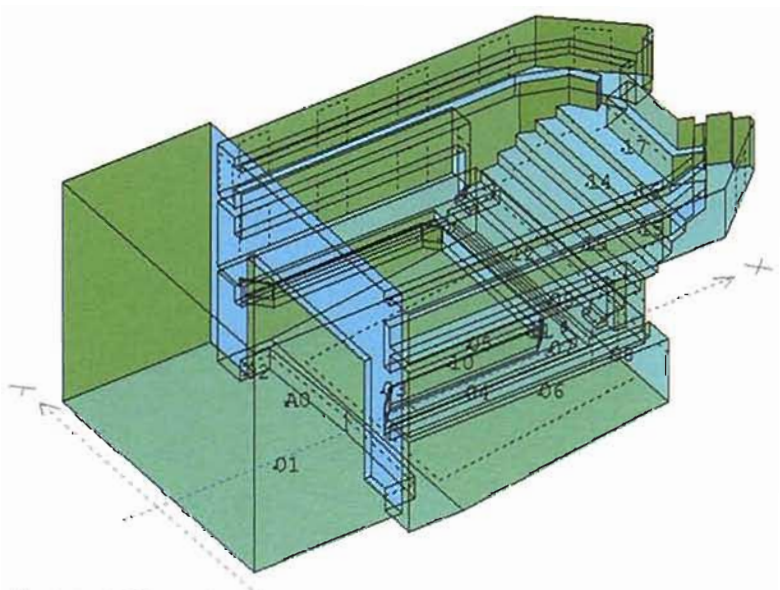
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,16	1,16	V_1 / N	6,42
Brillo Br (s)	0,81	0,80		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	58,20	61,10	V_1 / S_A	8,83
Claridad de la voz C_{50A} (dB)	2,18	2,77		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	3,47	3,87	V_1 / S_{10}	7,92
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	3,90	3,45		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	23,55	23,73	S_A / V_1	0,73
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,47	0,36		

10	
TEATRO GARNELO	
Montilla (Córdoba)	
Plaza de la Rosa, 5	
Construcción:	1917
Rehabilitación:	1999
Arquitectos:	Antonio Cabrera*
	Óscar Rodríguez*

(*) Arquitectos de la rehabilitación

Estado original

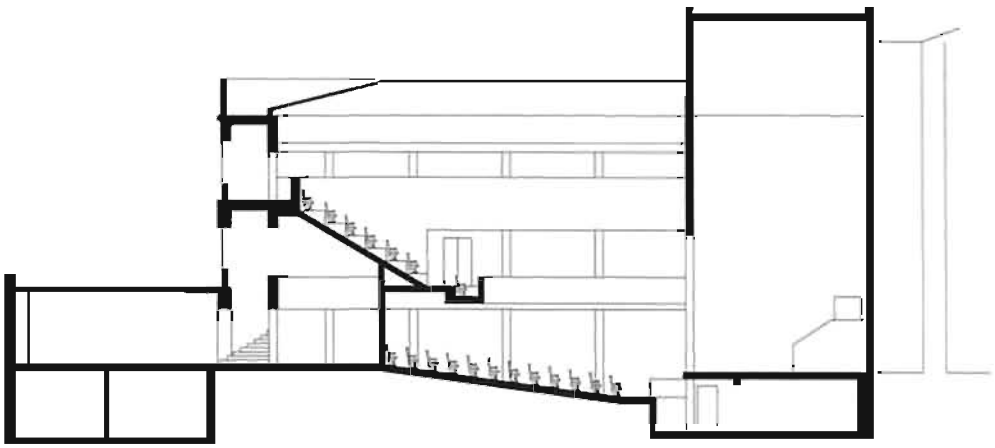
Rehabilitación



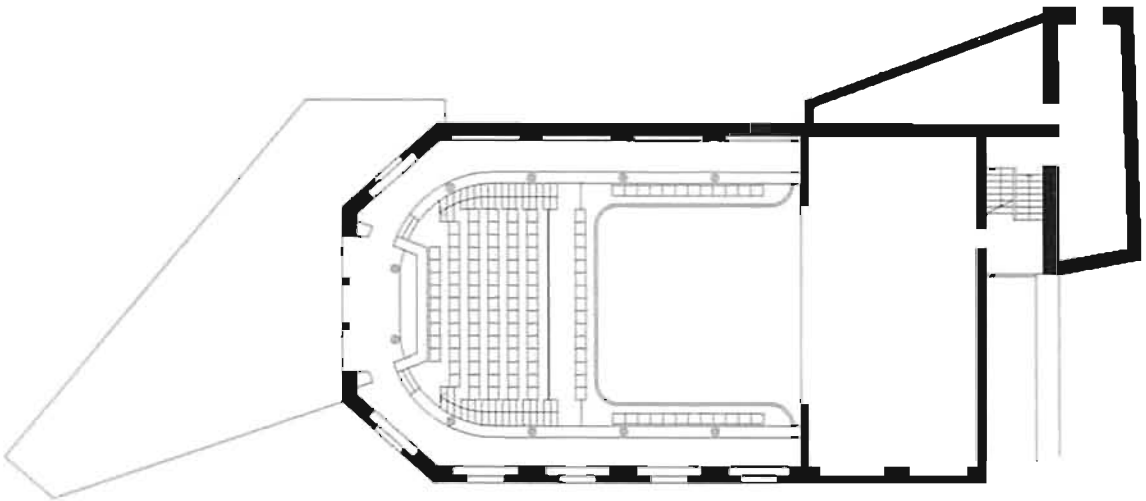
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

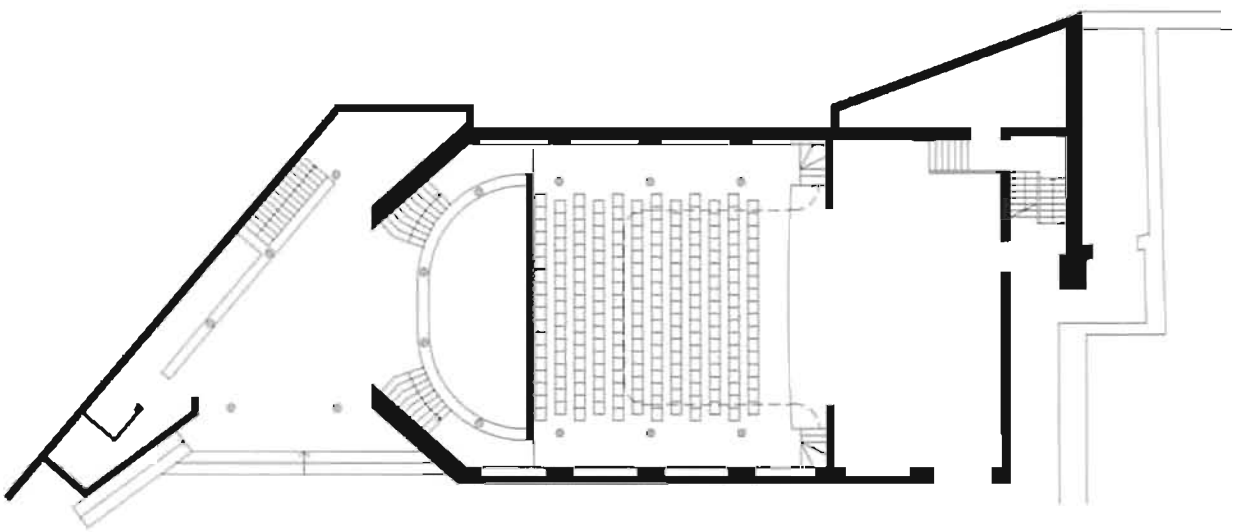
Superficie construida:	2.045 m²
Volumen sala:	2.062 m³
Volumen escena:	1.166 m³
Superficie de revestimiento:	2.232 m²
Superficie butacas:	143 m²
Superficie pasillos:	51 m²
Aforo:	333 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	12,90 m
Anchura media:	14,15 m
Altura media:	10,65 m



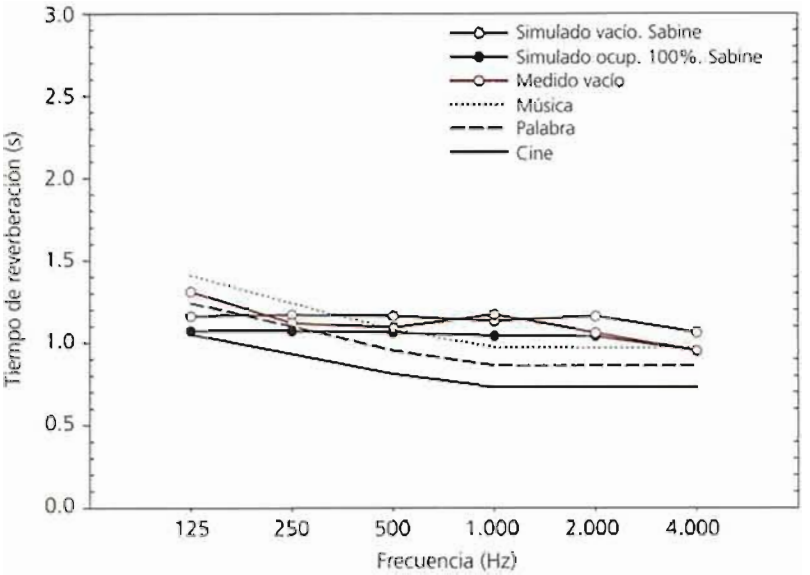
SECCIÓN



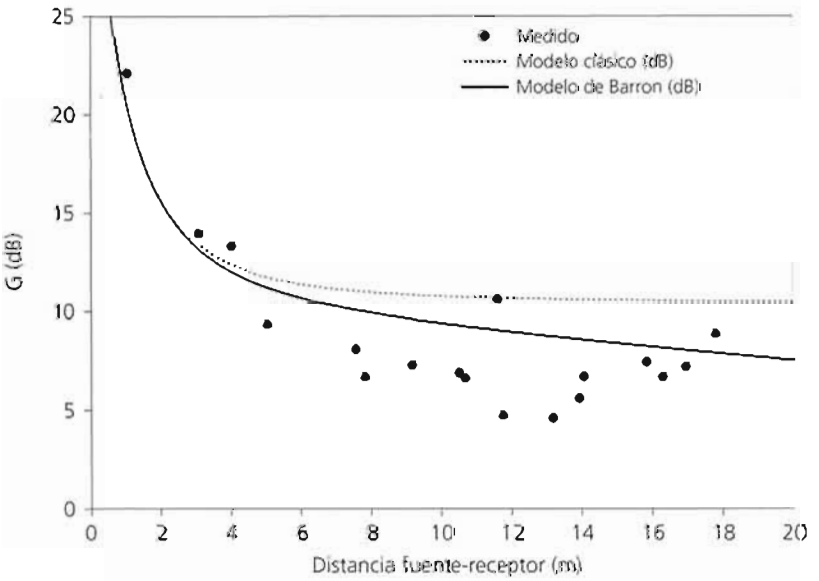
PLANTA ALTA



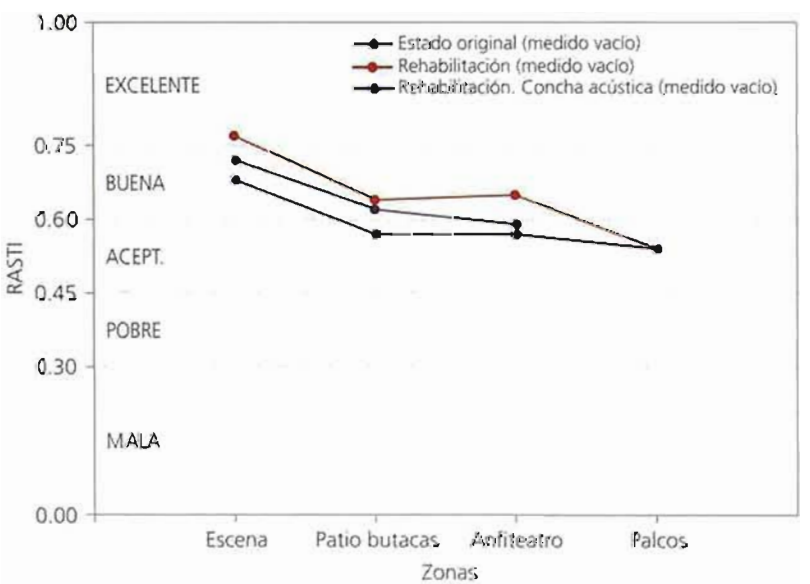
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	1,31	1,12	1,09	1,17	1,06	0,95	1,13
Sala ocupada 100% (simulado)	1,07	1,07	1,06	1,04	1,04	0,95	1,05

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	33,8	30,3	24,7	23,5	22,1	21,2	**26**
Con aire acondicionado	51,0	45,7	43,7	41,4	36,3	30,4	**41**

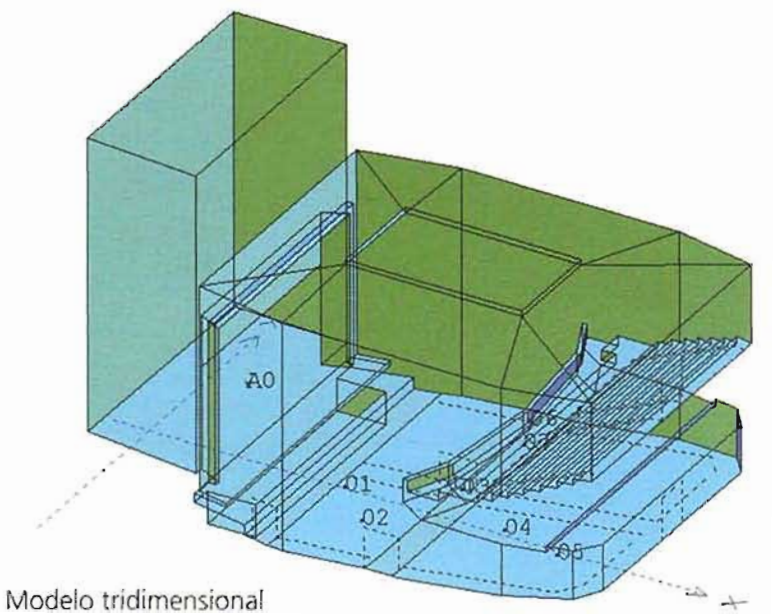
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,02	1,02	V_1 / N	6,19
Brillo Br (s)	0,97	0,95		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	52,20	58,60	V_1 / S_A	10,65
Claridad de la voz $C_{50A\nu}$ (dB)	0,67	1,63		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	3,10	4,10	V_1 / S_{tb}	8,77
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	9,50	8,80		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	25,58	25,57	S_A / V_1	0,58
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,42	0,31		

11	
TEATRO CINE VICTORIA	
Priego de Córdoba (Córdoba)	
C/ Antonio de la Barrera, 11	
Construcción:	1961
Rehabilitación:	1997
Arquitectos:	Víctor Escribano Ucelay
	Socorro Serrano*
	Rafael Cueto*

(*) Arquitectos de la rehabilitación

Estado original

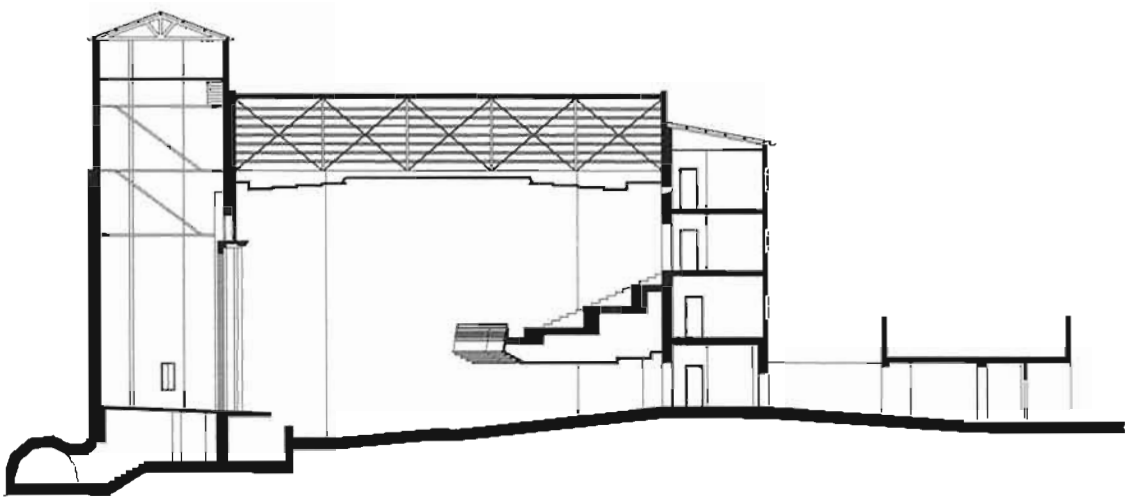
Rehabilitación



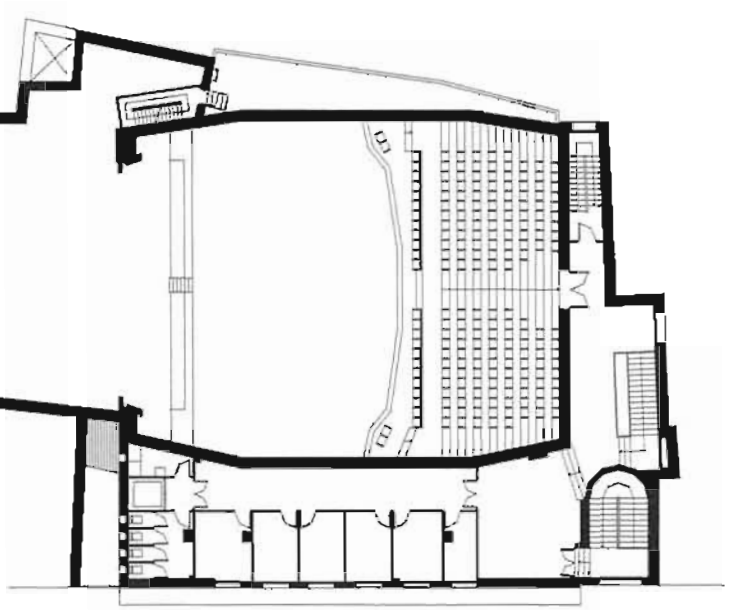
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

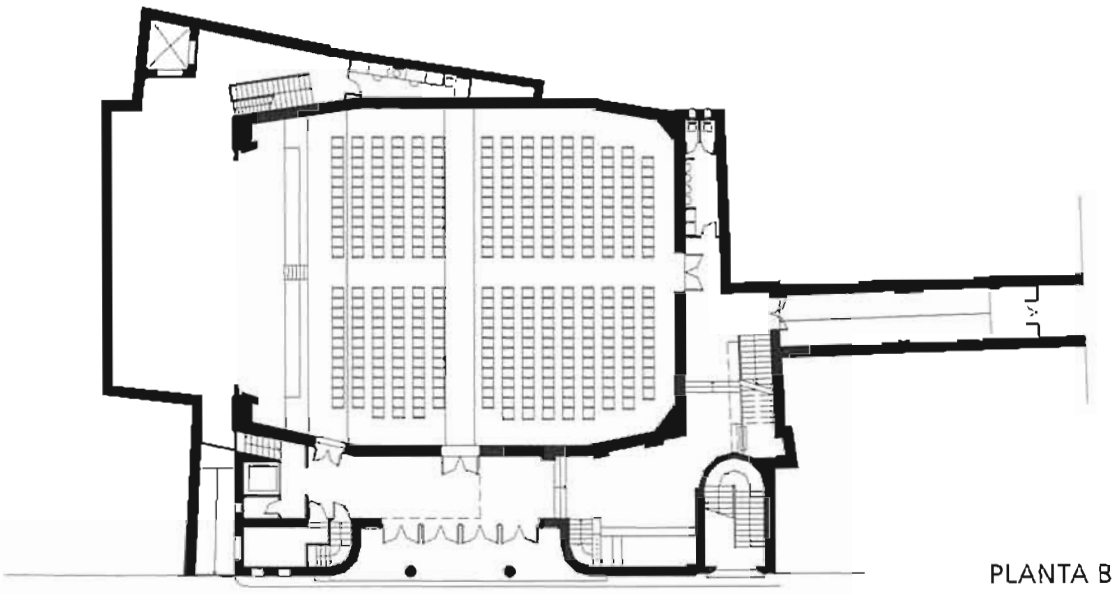
Superficie construida:	1.612 m²
Volumen sala:	4.232 m³
Volumen escena:	1.447 m³
Superficie de revestimiento:	2.774 m²
Superficie butacas:	252 m²
Superficie pasillos:	105 m²
Aforo:	539 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	21,60 m
Anchura media:	17,15 m
Altura media:	12,90 m



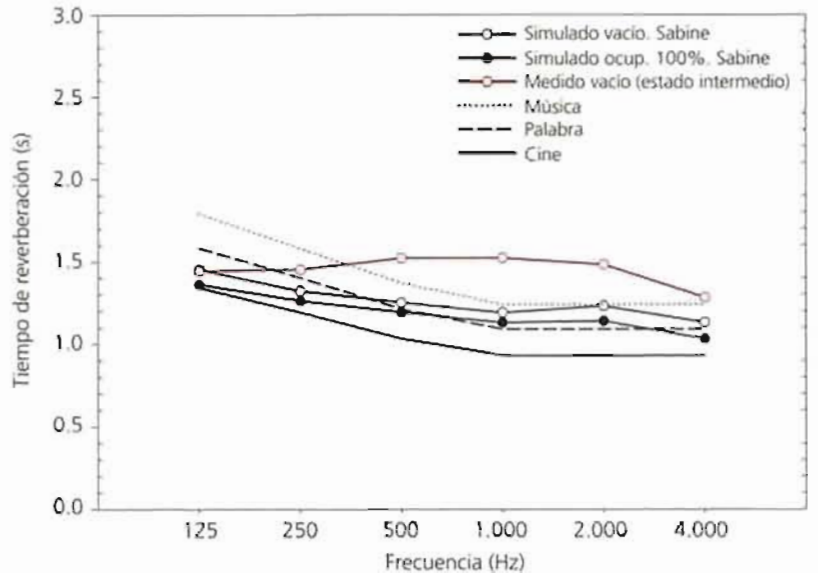
SECCIÓN



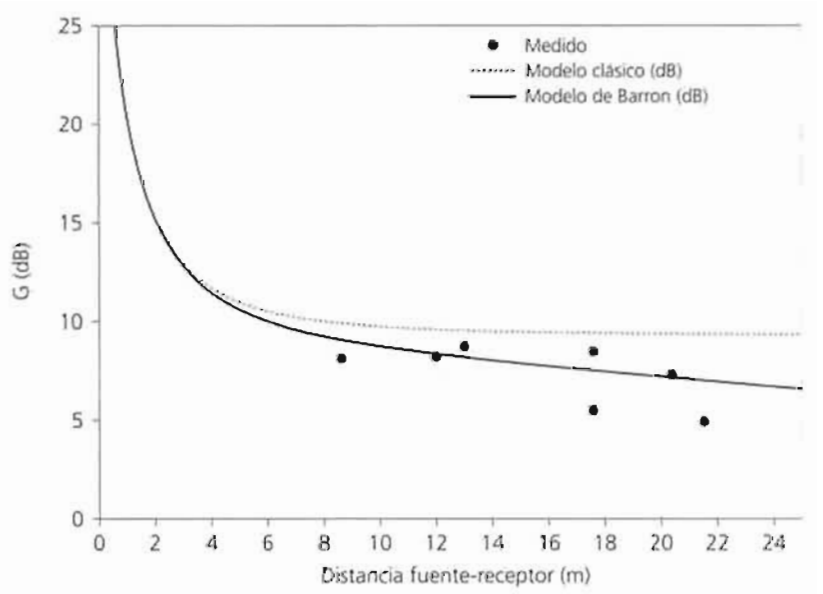
PLANTA ALTA



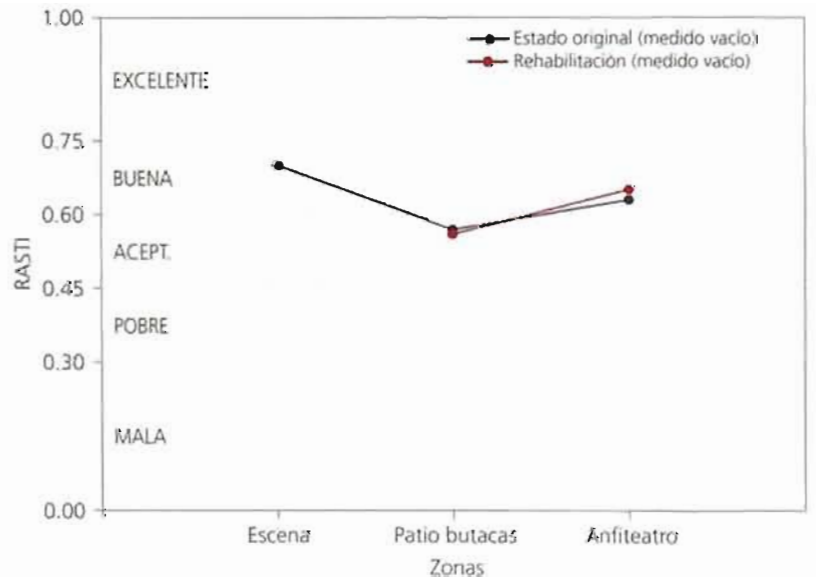
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	1,44	1,45	1,52	1,52	1,48	1,28	1,52
Sala ocupada 100% (simulado)	1,36	1,26	1,19	1,13	1,14	1,03	1,16

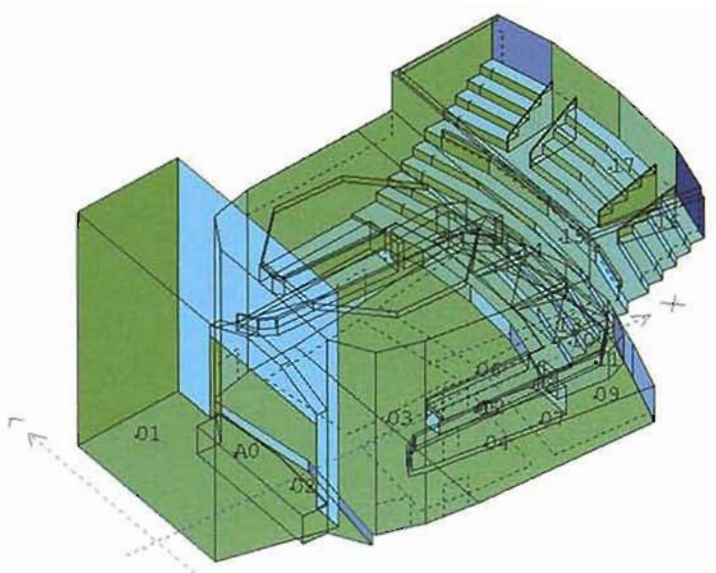
Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–
Con aire acondicionado	27,5	23,5	24,9	21,7	22,0	24,6	**30**

Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,14	1,13	V_1 / N	7,85
Brillo Br (s)	0,97	0,94		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	47,80	49,70	V_1 / S_A	11,86
Claridad de la voz C_{50A} (dB)	0,83	1,59		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	3,80	4,43	V_1 / S_{T_0}	10,02
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	5,75	5,30		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	26,03	26,45	S_A / V_1	0,66
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,34	0,25		

12	
TEATRO ISABEL LA CATÓLICA	
Granada	
C/ Acera del Casino	
Construcción:	1950
Rehabilitación:	1998
Arquitectos:	Miguel Olmedo Collantes
	Juan Ruesga Navarro*

(*) Arquitecto de la rehabilitación

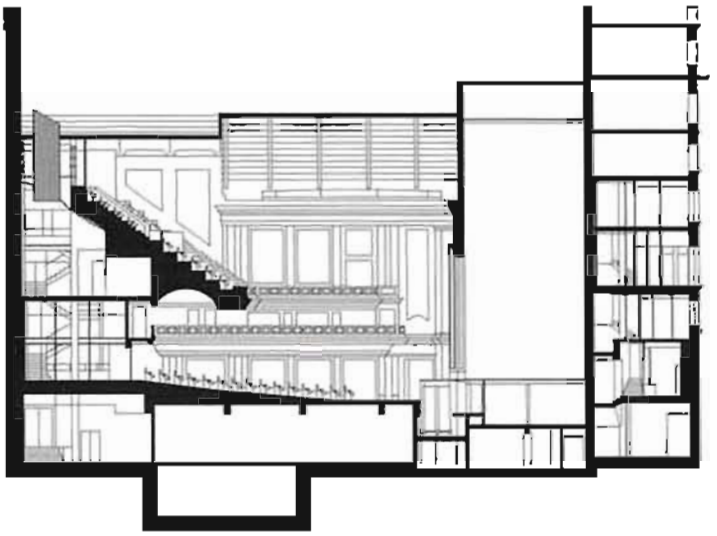
Rehabilitación



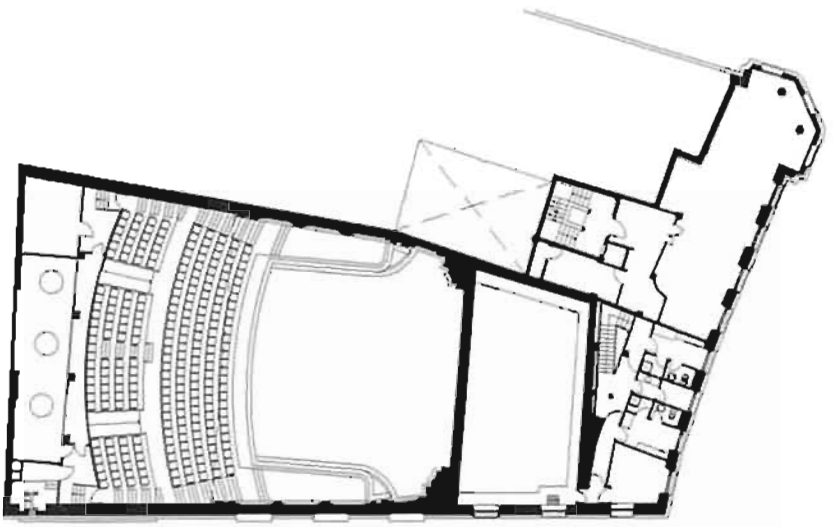
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

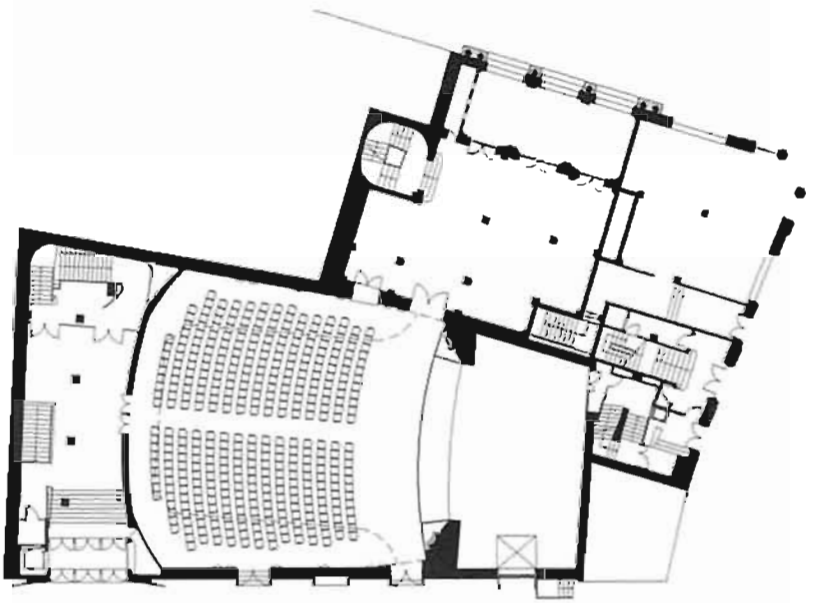
Superficie construida:	2.636 m²
Volumen sala:	5.035 m³
Volumen escena:	1.742 m³
Superficie de revestimiento:	3.408 m²
Superficie butacas:	289 m²
Superficie pasillos:	96 m²
Aforo:	689 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	21,20 m
Anchura media:	17,70 m
Altura media:	13,05 m



SECCIÓN



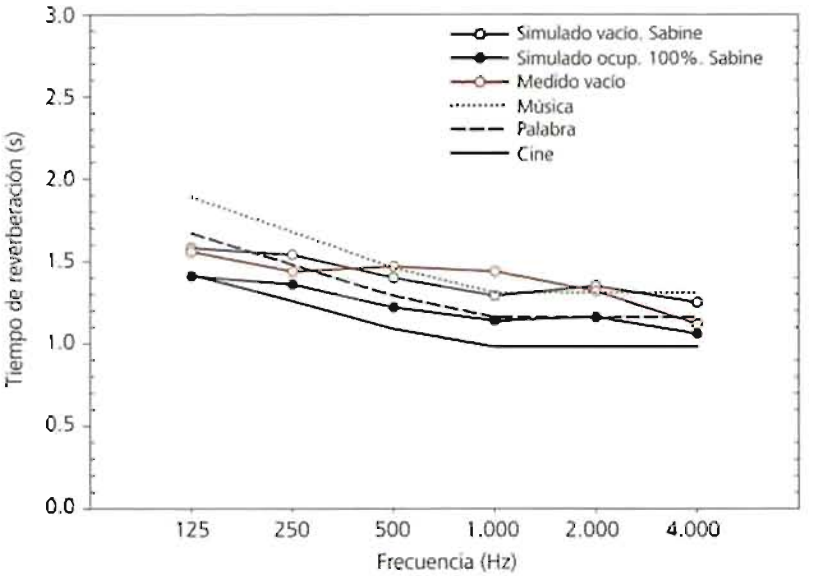
PLANTA ALTA



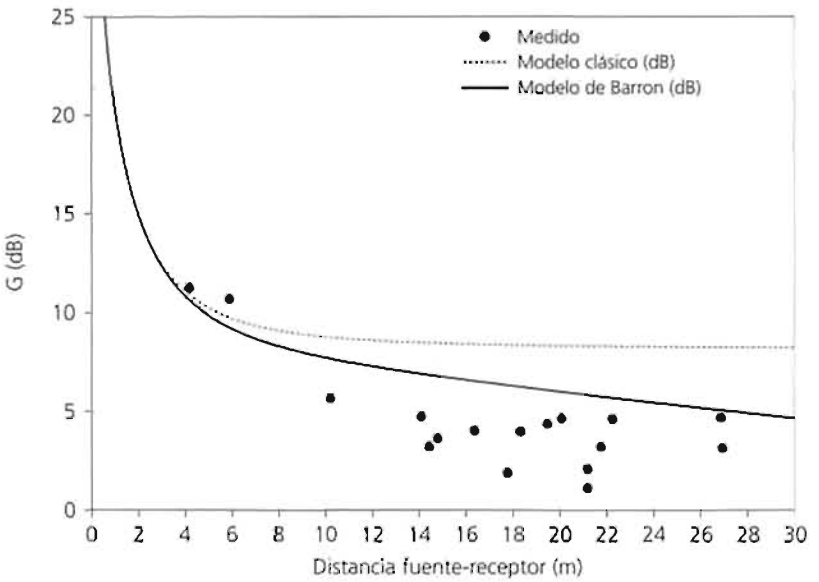
PLANTA BAJA

0 5 10 15

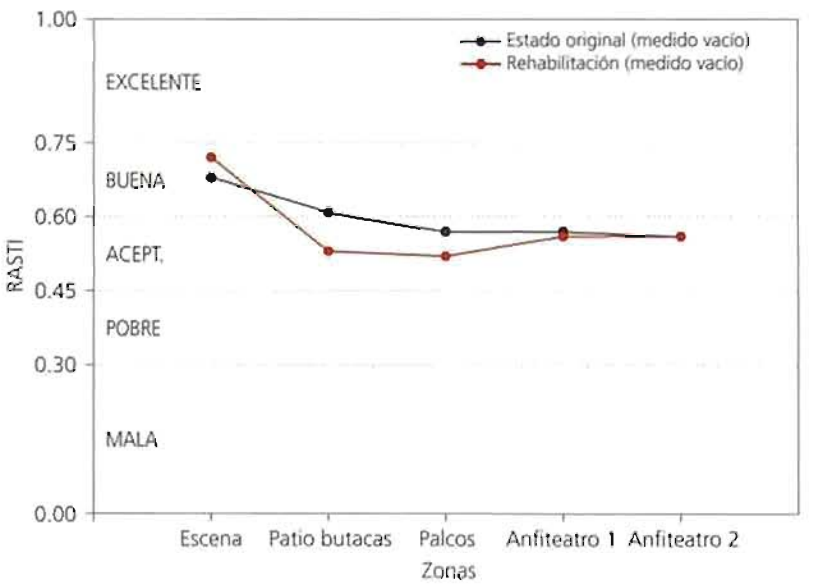
Metros



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	1,56	1,44	1,47	1,44	1,32	1,12	1,46
Sala ocupada 100% (simulado)	1,41	1,36	1,22	1,14	1,16	1,06	1,18

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. *Rehabilitación*	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	33,9	25,9	22,2	20,4	19,9	20,6	**26**
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

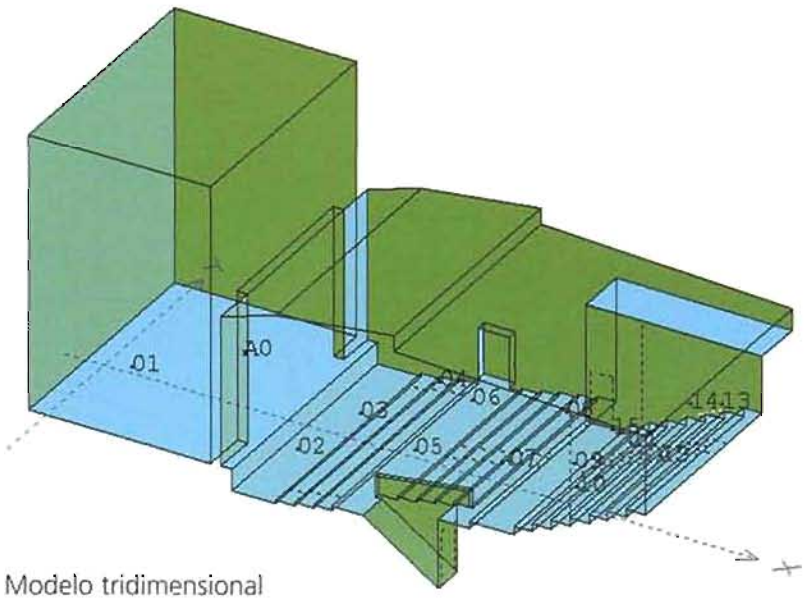
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,16	1,17	V_t / N	7,31
Brillo Br (s)	0,97	0,94		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	48,60	53,80	V_t / S_A	13,10
Claridad de la voz C_{50Av} (dB)	–0,37	0,71		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	2,17	3,13	V_t / S_{To}	11,26
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	6,00	5,15		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	21,03	20,70	S_A / V_t	0,56
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,42	0,32		

13	
TEATRO CINE IDEAL	
Baza (Granada)	
C/ Alamillos	
Construcción:	1920
Rehabilitación:	2001
Arquitectos:	Seviya, Gabinete de Proyectos*

(*) Estudio redactor del proyecto de rehabilitación

Estado original

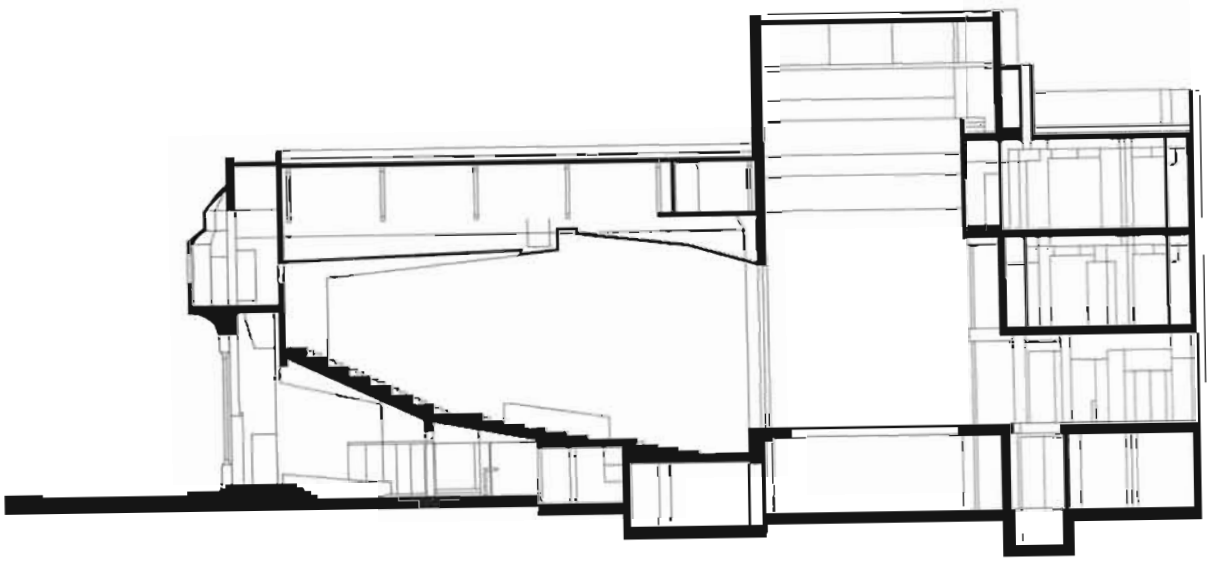
Rehabilitación



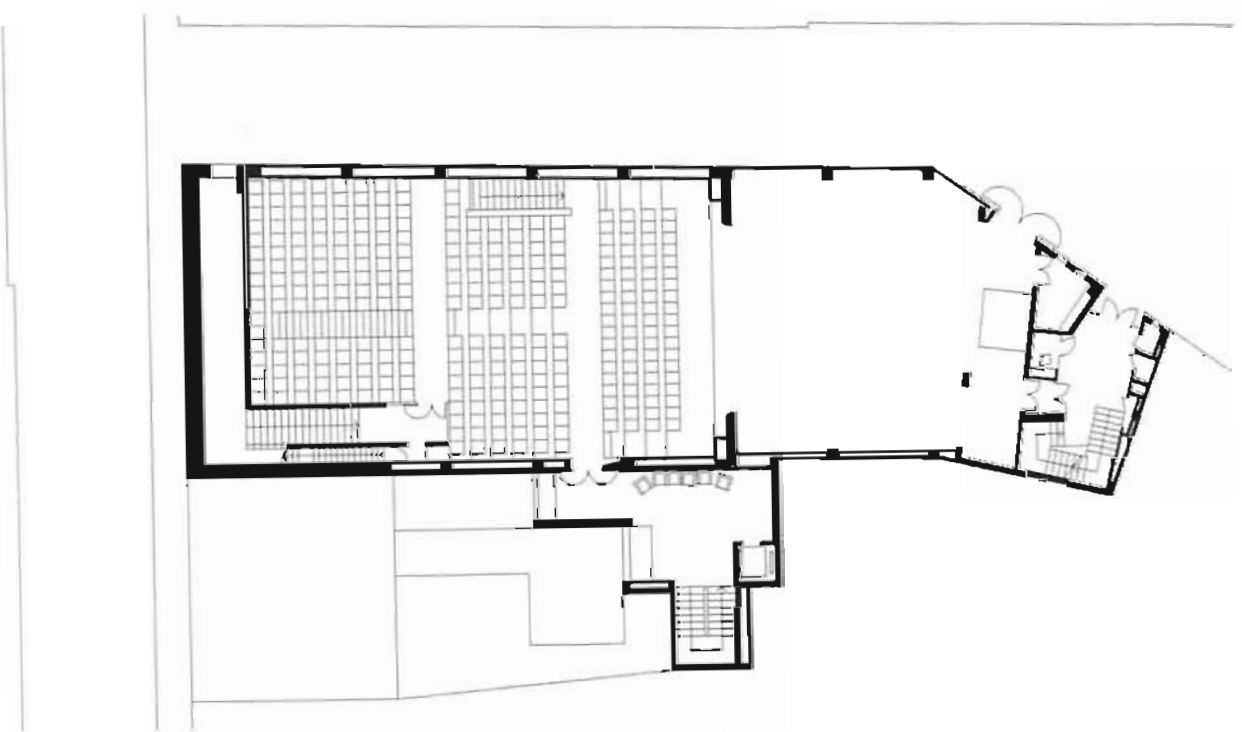
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

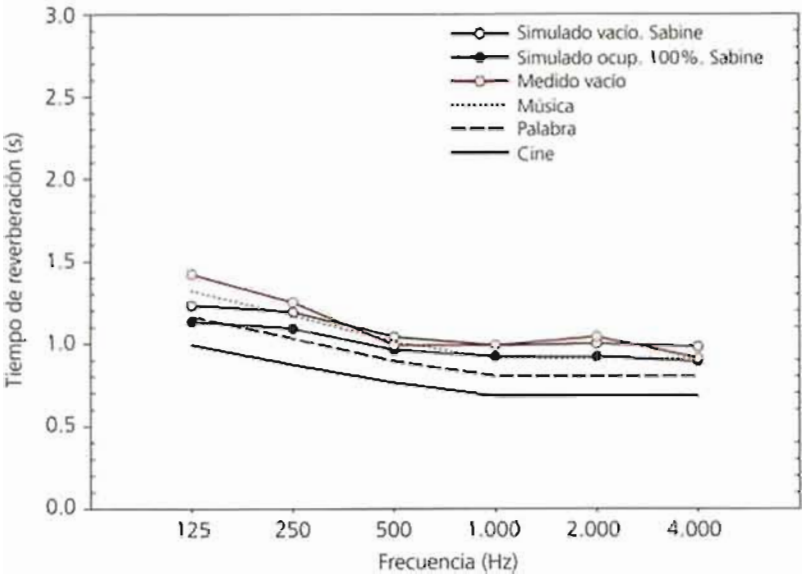
Superficie construida:	1.393 m²
Volumen sala:	1.694 m³
Volumen escena:	1.379 m³
Superficie de revestimiento:	1.677 m²
Superficie butacas:	144 m²
Superficie pasillos:	37 m²
Aforo:	299 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	20,35 m
Anchura media:	11,95 m
Altura media:	7,60 m



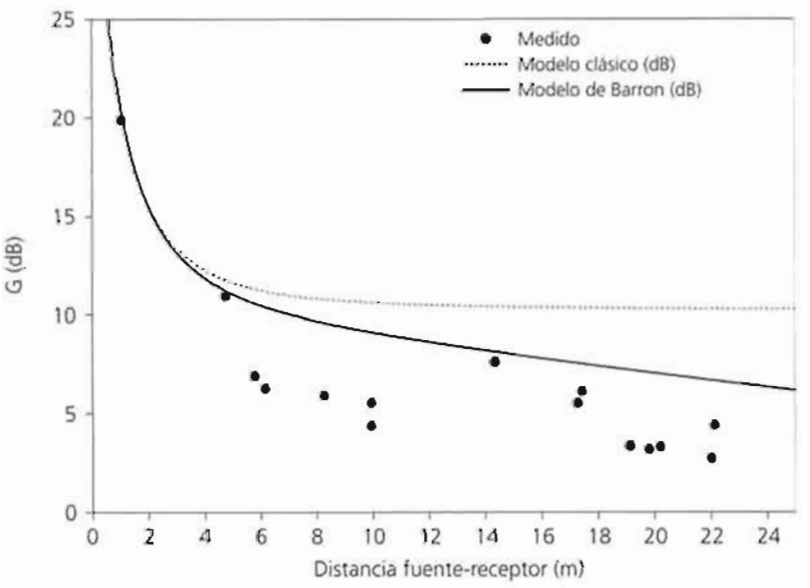
SECCIÓN



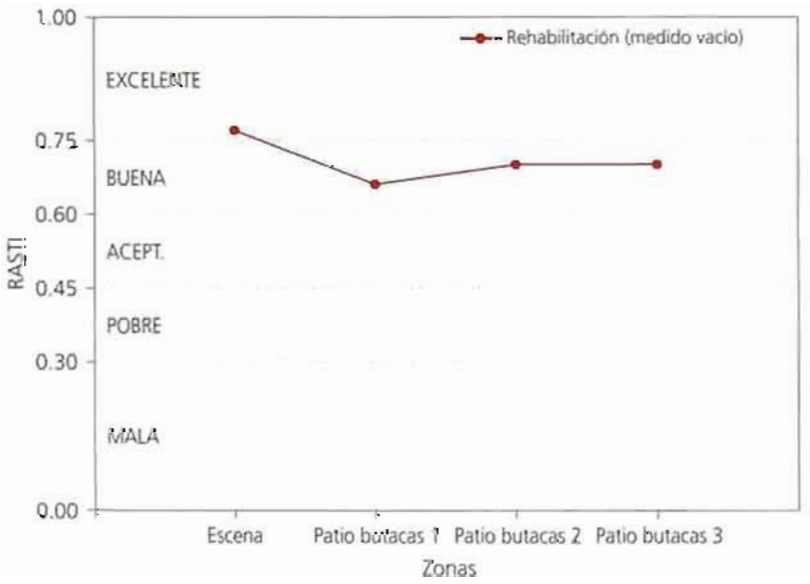
PLANTA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	1,42	1,25	0,99	0,99	1,04	0,91	0,99
Sala ocupada 100% (simulado)	1,13	1,09	0,96	0,92	0,92	0,89	0,94

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. *Rehabilitación*	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	22,3	19,8	18,6	21,0	16,4	15,9	**21**
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

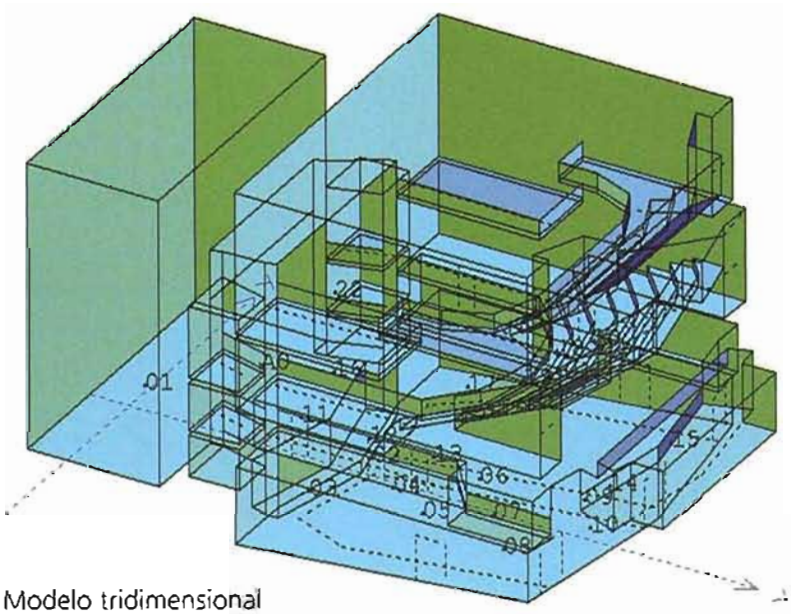
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,19	1,18	V_1 / N	5,66
Brillo Br (s)	0,98	0,96		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	53,90	57,30	V_1 / S_A	9,35
Claridad de la voz C_{50Av} (dB)	1,55	2,23		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	4,47	5,33	V_1 / S_{To}	9,35
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	7,85	7,25		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	24,28	24,23	S_A / V_1	0,61
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,35	0,27		

14	
GRAN TEATRO DE HUELVA	
Huelva	
C/ Vázquez López, 17	
Construcción:	1923
Rehabilitación:	1990
Arquitectos:	Teodoro Anasagasti
	Antonio de la Lama L.*

(*) Arquitecto de la rehabilitación

Estado original

Rehabilitación



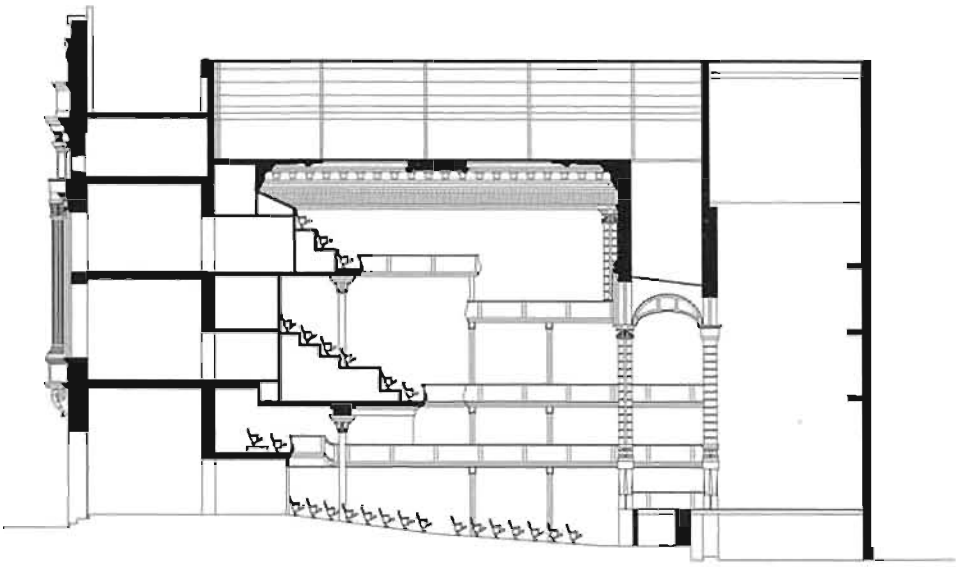
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

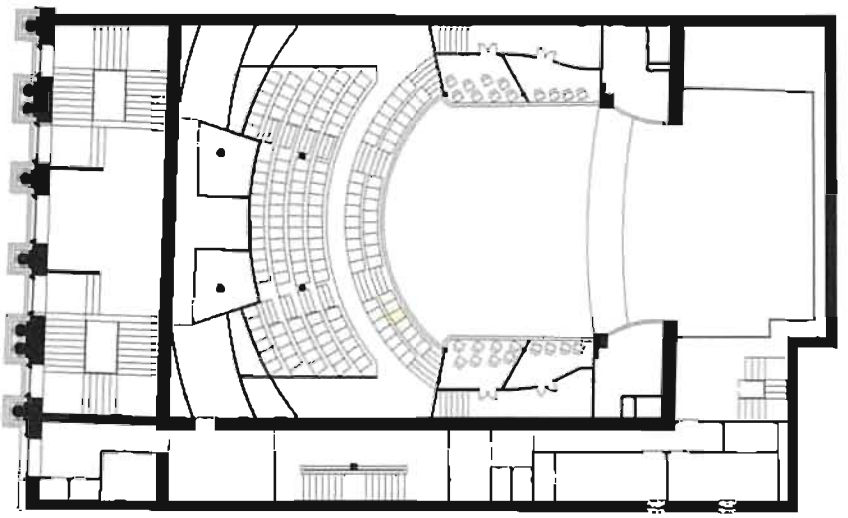
Superficie construida:	3.230 m²
Volumen sala:	4.800 m³
Volumen escena:	1.363 m³
Superficie de revestimiento:	3.728 m²
Superficie butacas:	354 m²
Superficie pasillos:	109 m²
Aforo:	672 pers.

Dimensiones sala:

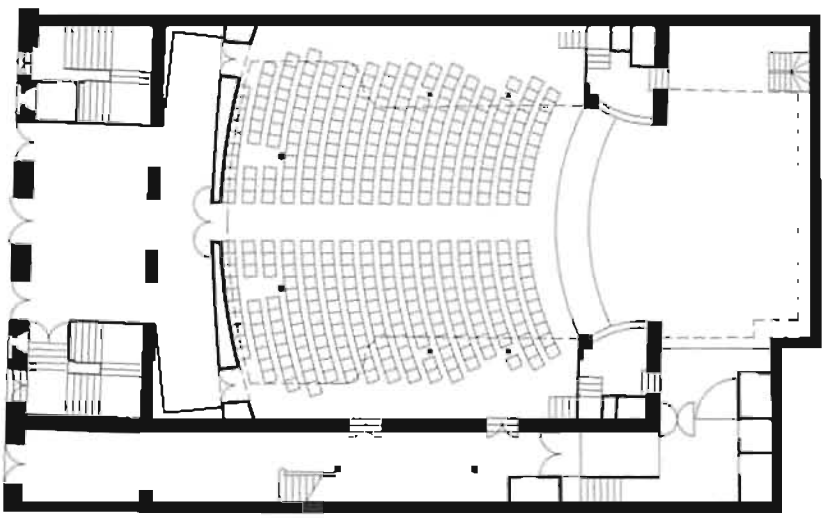
Longitud media:	18,60 m
Anchura media:	17,70 m
Altura media:	17,05 m



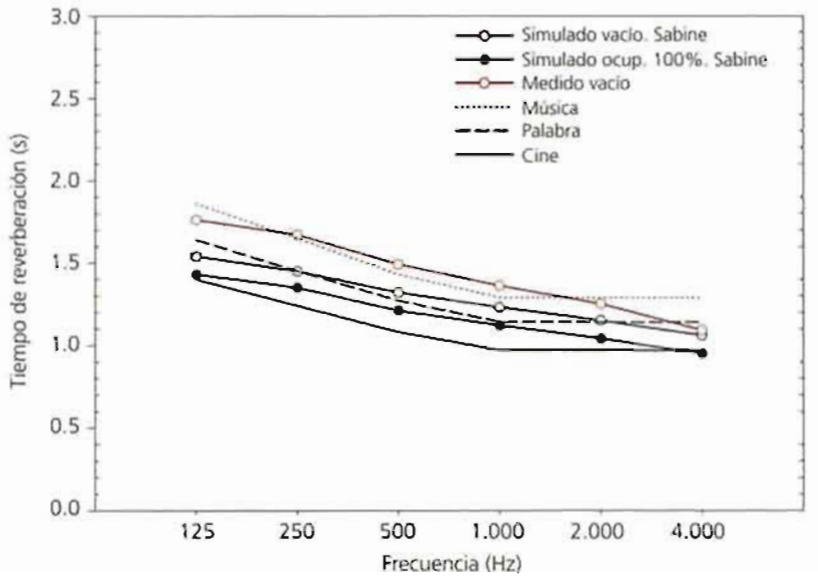
SECCIÓN



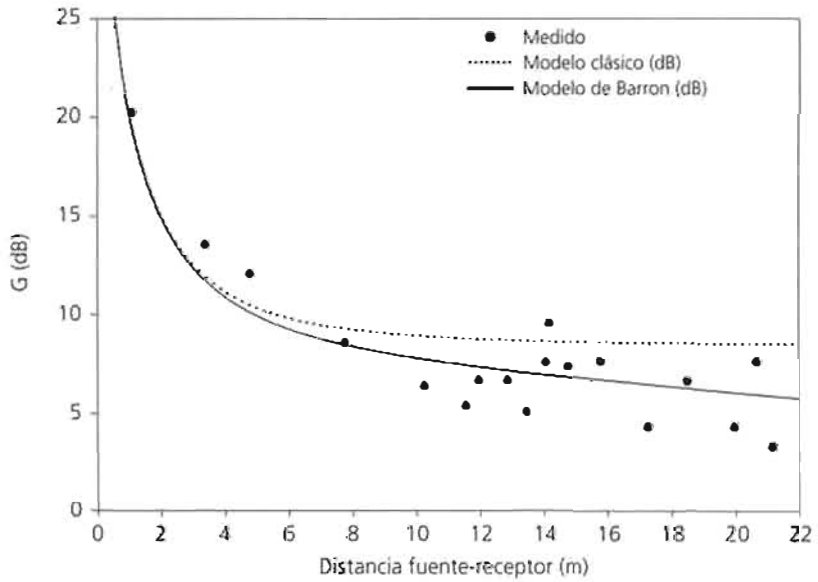
PLANTA ALTA



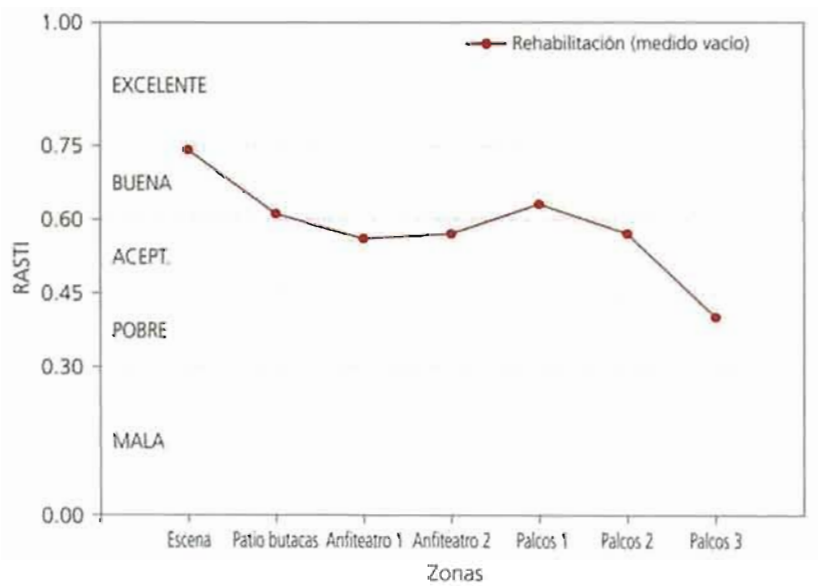
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	1,76	1,67	1,49	1,36	1,25	1,09	1,42
Sala ocupada 100% (simulado)	1,43	1,35	1,21	1,12	1,04	0,95	1,17

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	43,1	33,6	25,5	19,4	18,5	17,4	**24**
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

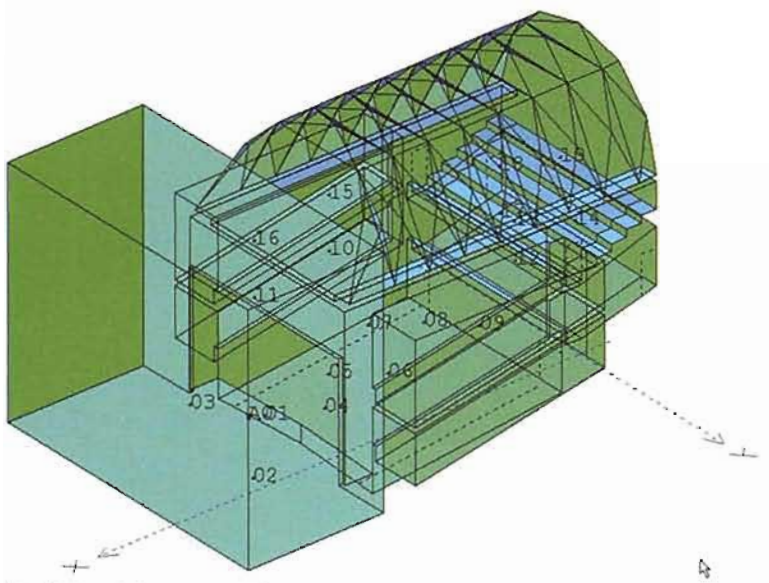
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,17	1,19	V_t / N	7,14
Brillo Br (s)	0,87	0,85		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	50,00	55,50	V_t / S_A	10,37
Claridad de la voz C_{50AV} (dB)	0,24	0,99		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	2,33	3,03	V_t / S_{Tot}	9,25
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	6,60	6,00		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	22,53	22,23	S_A / V_t	0,69
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,46	0,36		

15	
TEATRO CAPITOL	
Cortegana (Huelva)	
Construcción:	1957
Rehabilitación:	1999
Arquitectos:	José Mª Morales Lupiáñez
	Aurelio del Pozo Serrano*

(*) Arquitecto de la rehabilitación

Estado original

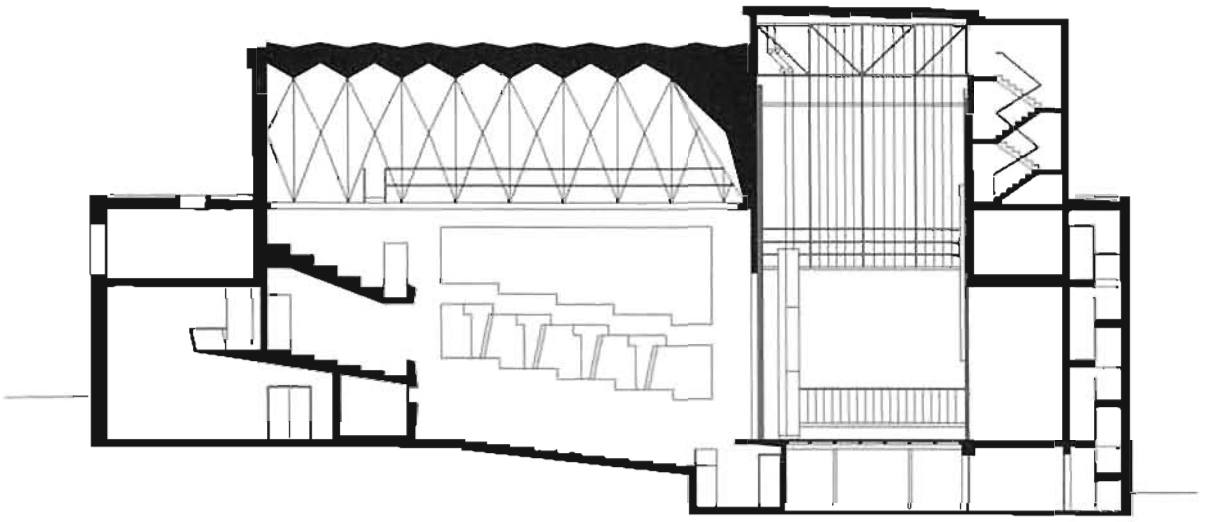
Rehabilitación



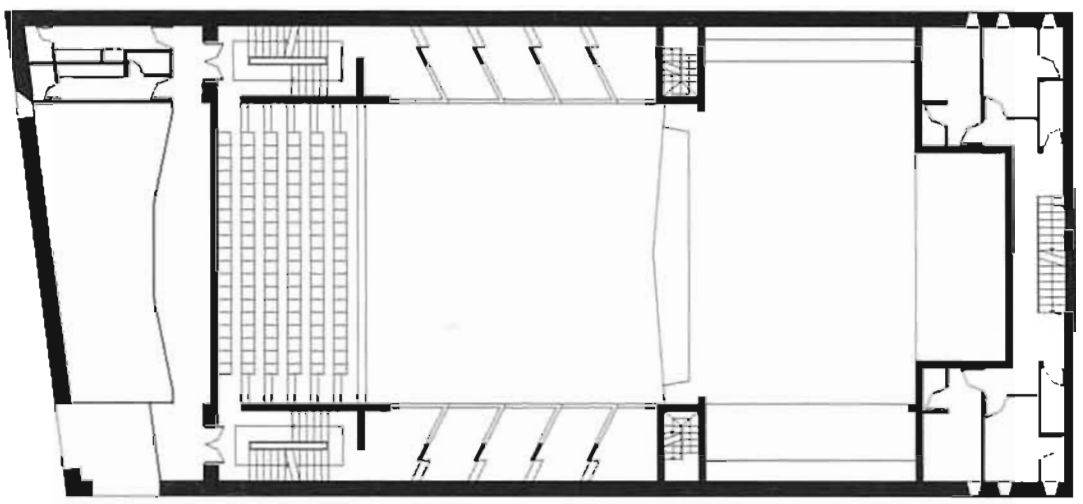
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

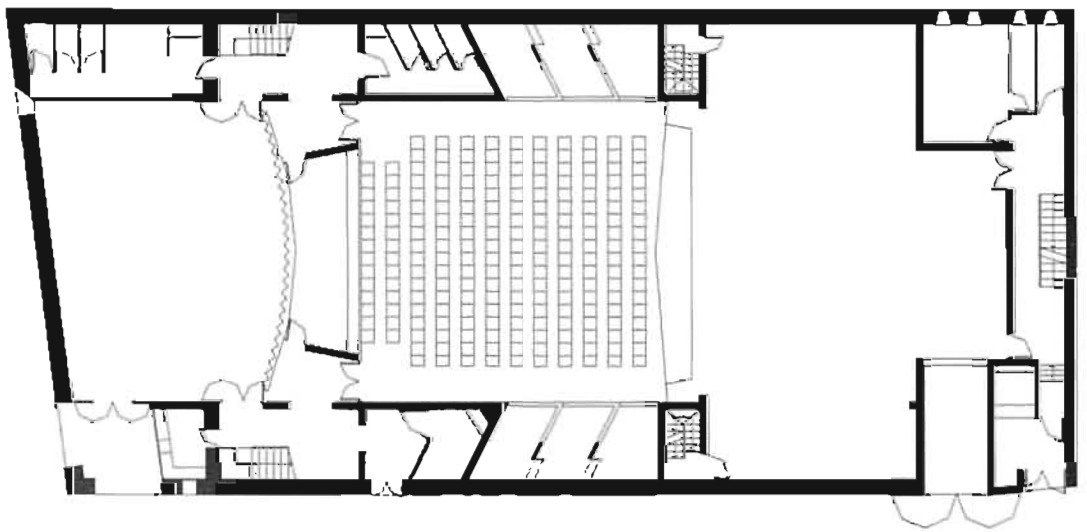
Superficie construida:	1.942 m²
Volumen sala:	2.999 m³
Volumen escena:	1.990 m³
Superficie de revestimiento:	2.738 m
Superficie butacas:	276 m
Superficie pasillos:	59 m
Aforo:	515 pers
Dimensiones sala	
Longitud media:	13,20 m
Anchura media:	11,70 m
Altura media:	12,50 m



SECCIÓN



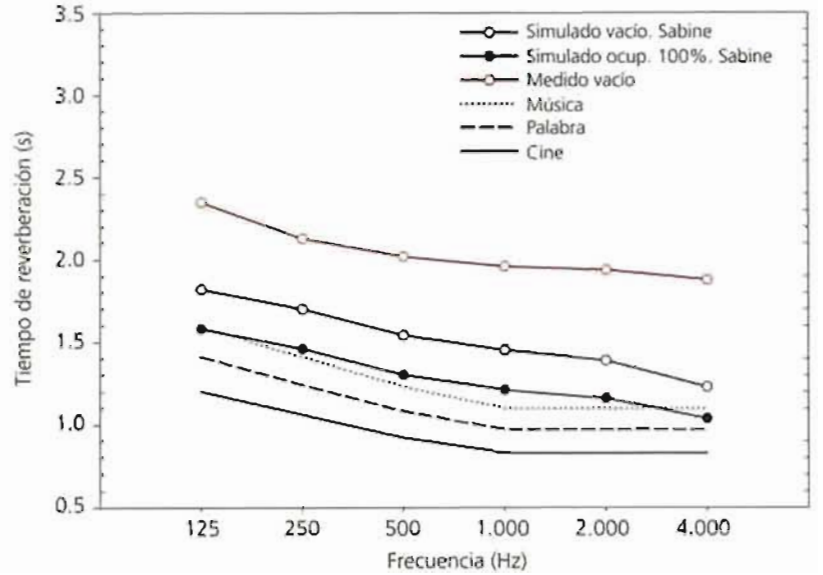
PLANTA ALTA



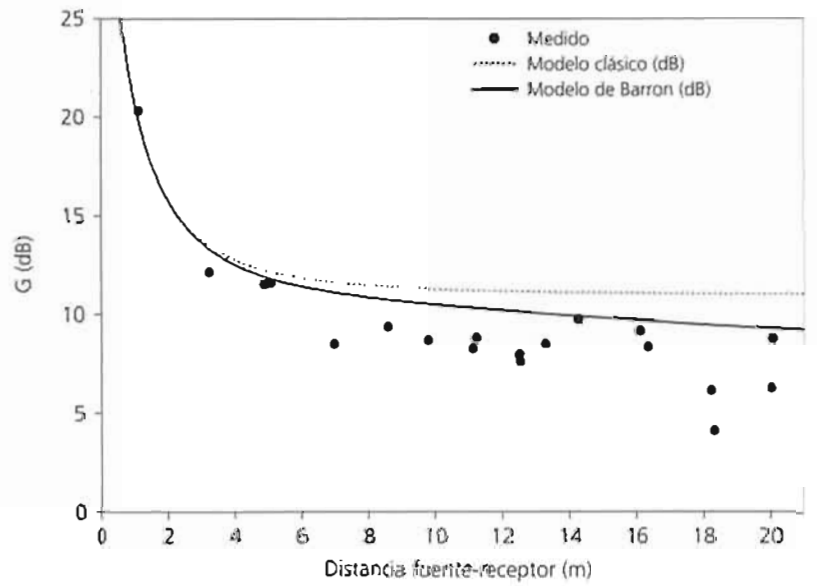
PLANTA BAJA

0 5 10 15

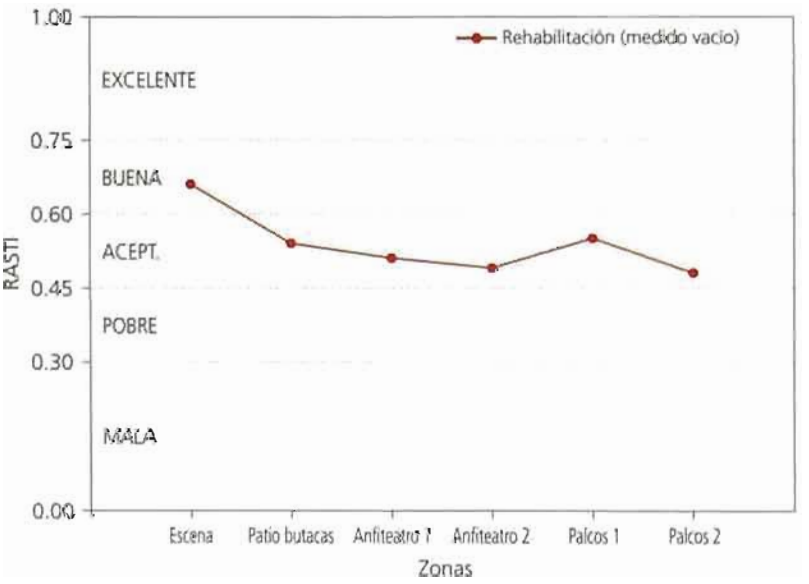
Metros



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	2,35	2,13	2,02	1,96	1,94	1,88	1,99
Sala ocupada 100% (simulado)	1,58	1,46	1,30	1,21	1,16	1,04	1,26

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	37,9	30,6	22,7	21,3	19,4	18,8	**24**
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

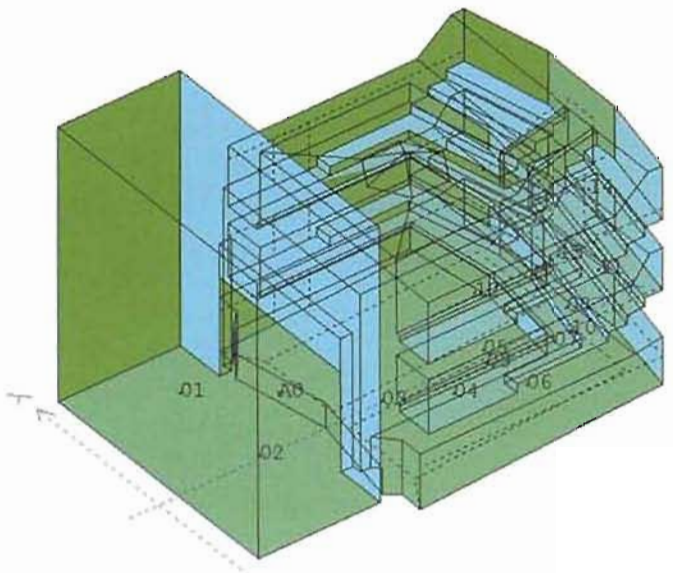
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,18	1,21	V_1 / N	5,82
Brillo Br (s)	0,88	0,88		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	44,90	51,90	V_1 / S_A	8,95
Claridad de la voz C_{50AV} (dB)	–0,51	0,88		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	1,53	3,17	V_1 / S_{To}	7,92
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	10,05	8,80		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	26,03	25,23	S_A / V_1	0,65
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,47	0,38		

16	
TEATRO DARYMELIA	
Jaén	
C/ Colón	
Construcción:	1927
Rehabilitación:	1992
Arquitectos:	Justino Flores
	Isicio Ruiz Albusac*

(*) Arquitecto de la rehabilitación

Estado original

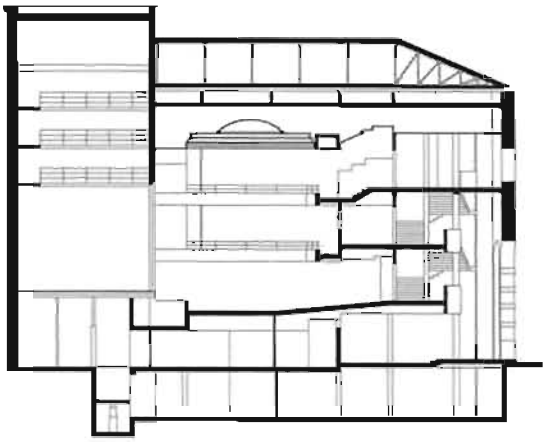
Rehabilitación



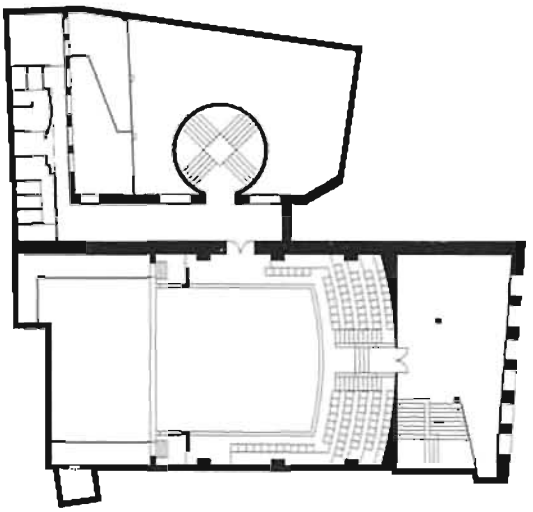
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

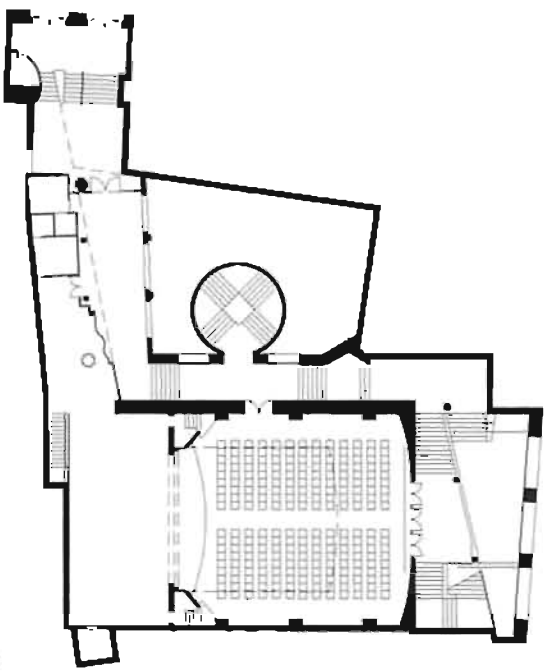
Superficie construida:	2.953 m²
Volumen sala:	1.888 m³
Volumen escena:	1.303 m³
Superficie de revestimiento:	2.214 m²
Superficie butacas:	173 m²
Superficie pasillos:	81 m²
Aforo:	417 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	14,90 m
Anchura media:	13,80 m
Altura media:	11.65 m



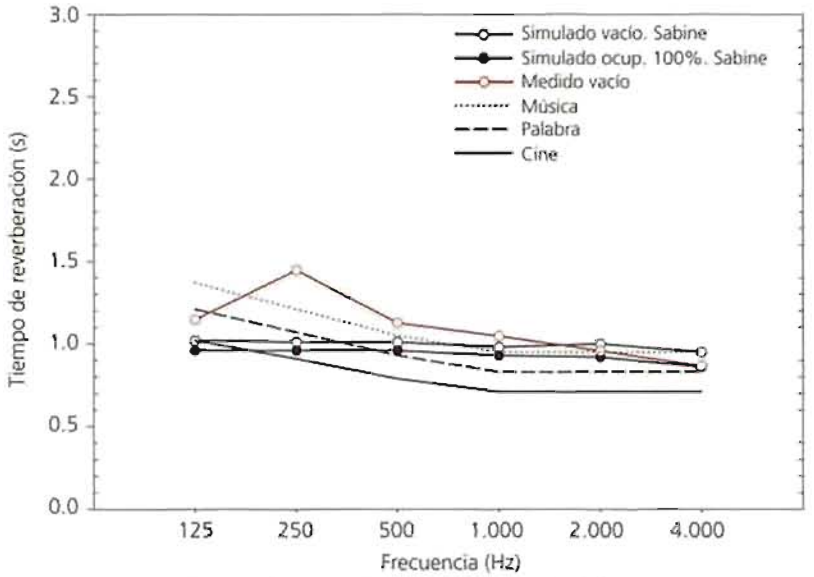
SECCIÓN



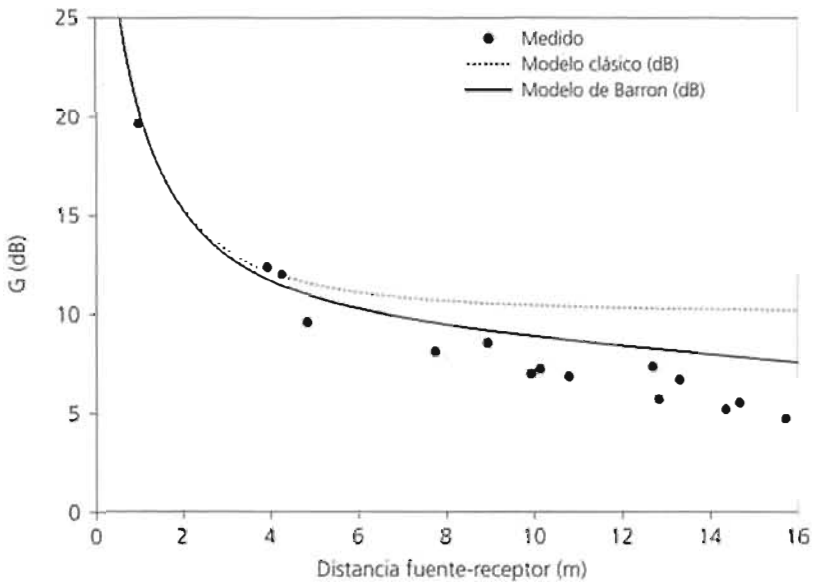
PLANTA ALTA



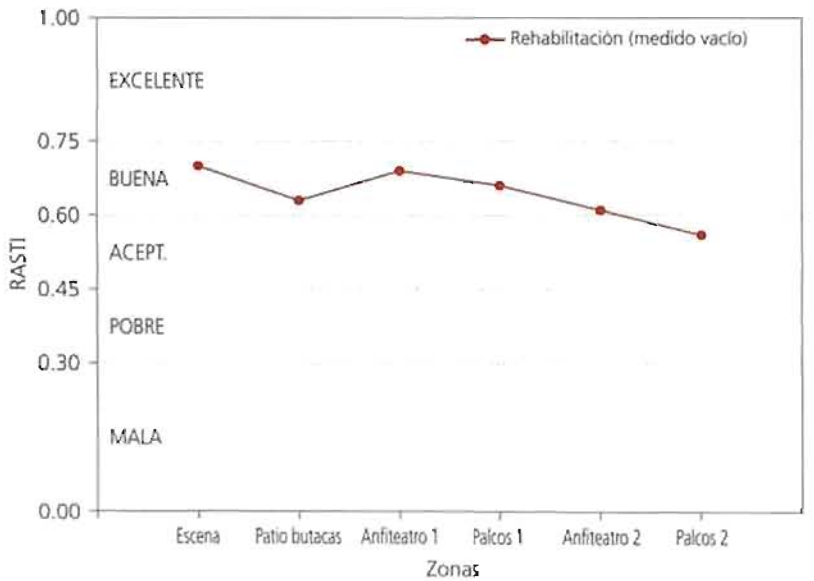
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	1,15	1,45	1,13	1,05	0,96	0,87	1,09
Sala ocupada 100% (simulado)	0,96	0,96	0,96	0,93	0,92	0,86	0,95

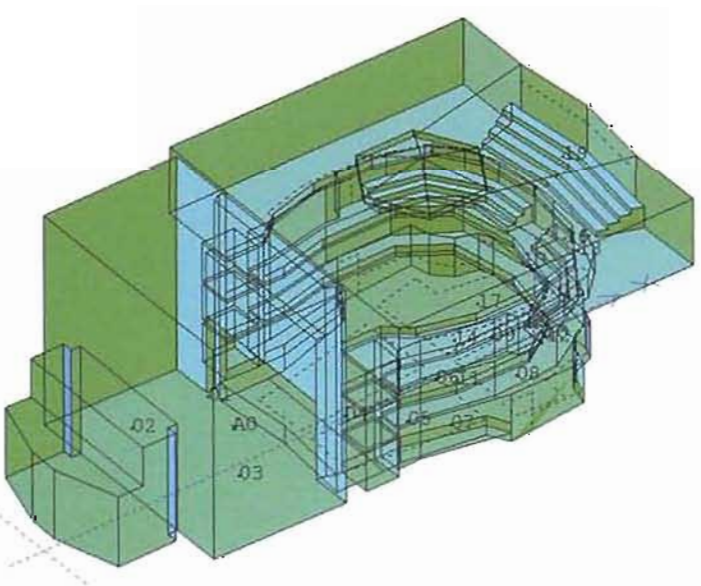
Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	36,2	35,0	29,6	20,3	16,4	17,9	**25**
Con aire acondicionado	39,8	35,3	31,0	27,1	25,1	24,3	**29**

Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,02	1,02	V_1 / N	4,53
Brillo Br (s)	0,98	0,94		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	53,60	55,20	V_1 / S_A	7,45
Claridad de la voz C_{50AV} (dB)	0,44	0,99		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	2,93	3,47	V_1 / S_{T0}	7,03
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	9,80	9,30		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	26,00	25,80	S_A / V_1	0,61
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,37	0,27		

17	
TEATRO LOPE DE VEGA	
Sevilla	
Avda. de María Luisa	
Construcción:	1929
Rehabilitación:	1988
Arquitectos:	Vicente Traver y Tomás
	Víctor Pérez Escolano*

(*) Arquitecto de la rehabilitación

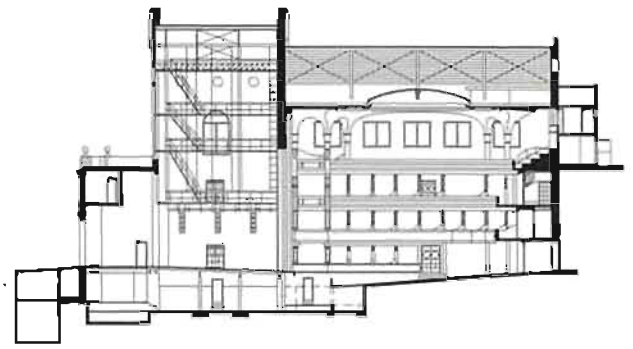
Rehabilitación



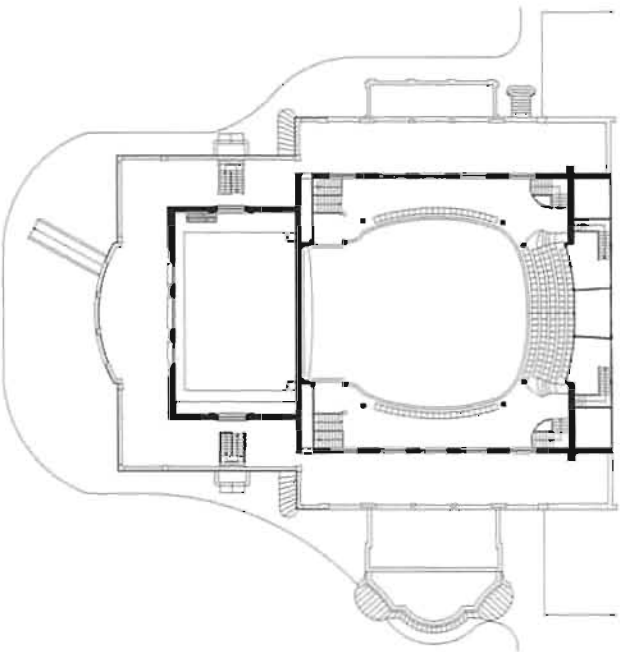
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

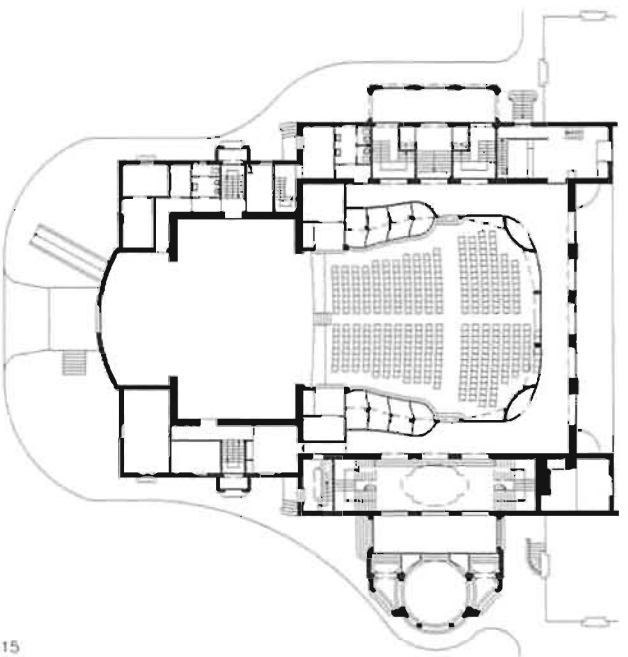
Superficie construida:	3.972 m²
Volumen sala:	5.902 m³
Volumen escena:	3.957 m³
Superficie de revestimiento:	4.610 m²
Superficie butacas:	411 m²
Superficie pasillos:	95 m²
Aforo:	815 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	21,20 m
Anchura media:	18,20 m
Altura media:	15,25 m



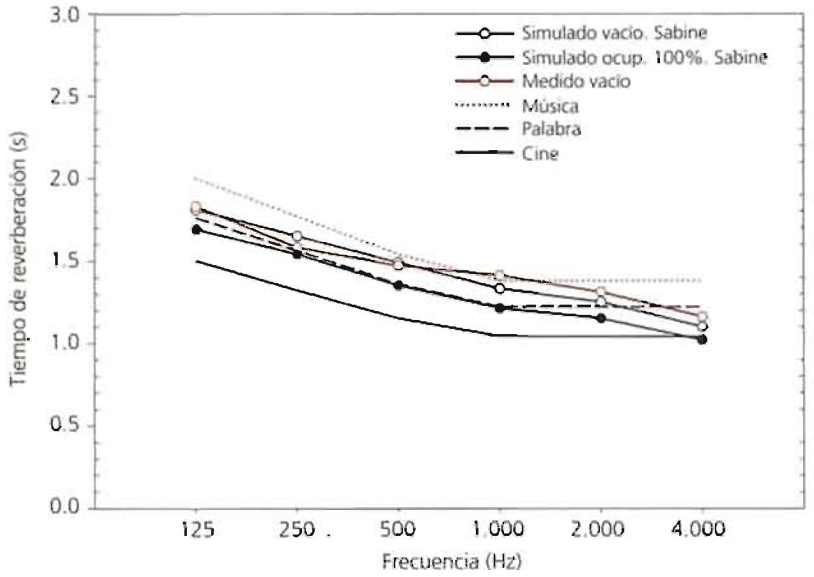
SECCIÓN



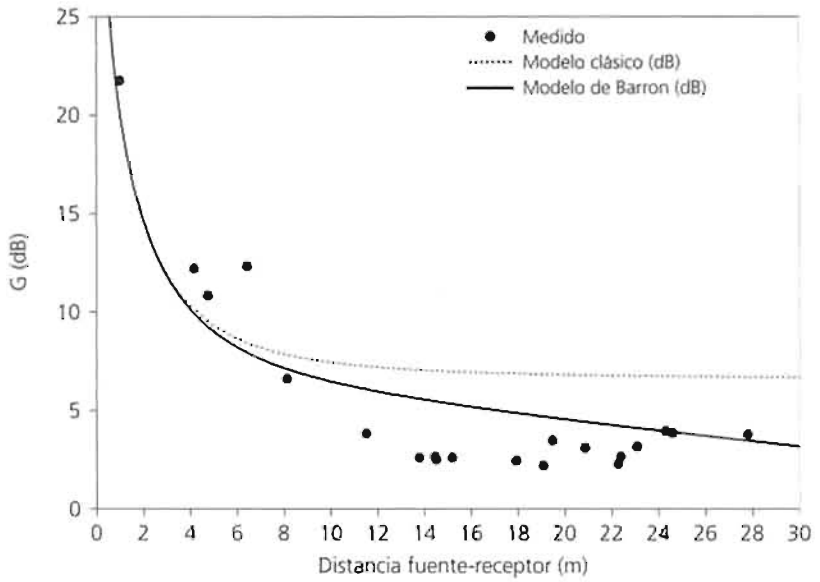
PLANTA ALTA



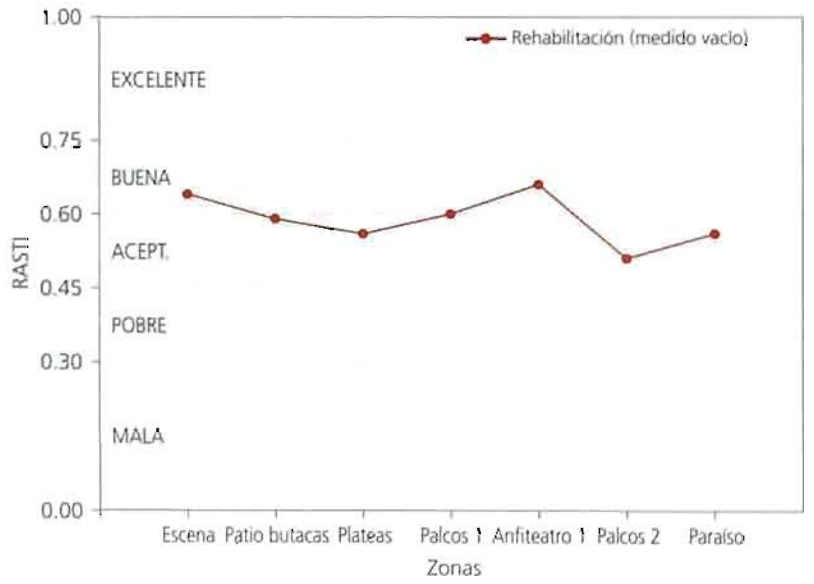
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ)*	1,83	1,58	1,47	1,41	1,31	1,16	1,44
Sala ocupada 100% (simulado)	1,69	1,54	1,35	1,21	1,15	1,02	1,28

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	25,1	18,4	15,5	15,9	15,5	18,1	**23**
Con aire acondicionado	43,2	35,9	31,5	28,4	24,3	23,9	**29**

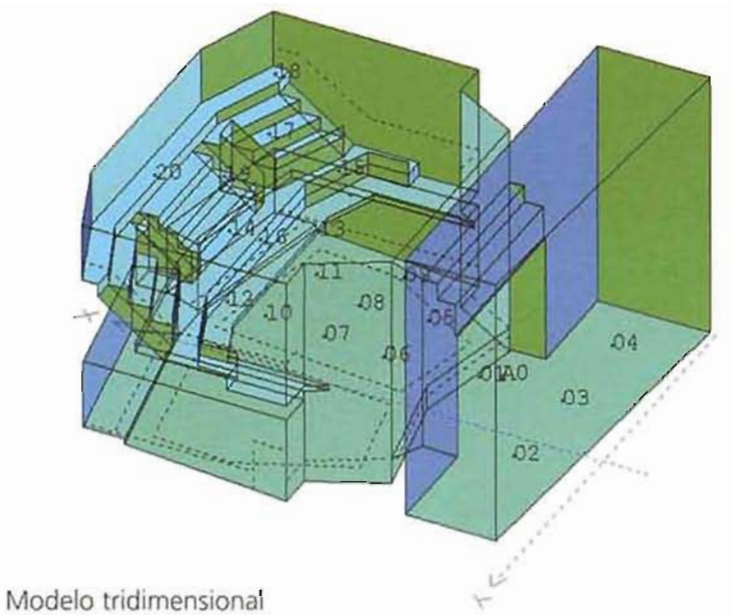
Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,23	1,26	V_1 / N	7,24
Brillo Br (s)	0,83	0,85		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	51,40	52,30	V_1 / S_a	11,67
Claridad de la voz C_{50Alv} (dB)	0,55	0,77		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	2,07	2,33	V_1 / S_{to}	9,30
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	5,00	4,60		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	21,30	21,73	S_a / V_1	0,62
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,49	0,39		

18	
TEATRO GUTIÉRREZ DE ALBA	
Alcalá de Guadaíra (Sevilla)	
C/ Ntra. Sra. del Águila, 49	
Construcción:	1931
Rehabilitación:	1992
Arquitectos:	Juan Talavera Heredia
	Manuel Gómez-Millán G.*

(*) Arquitecto de la rehabilitación

Estado original

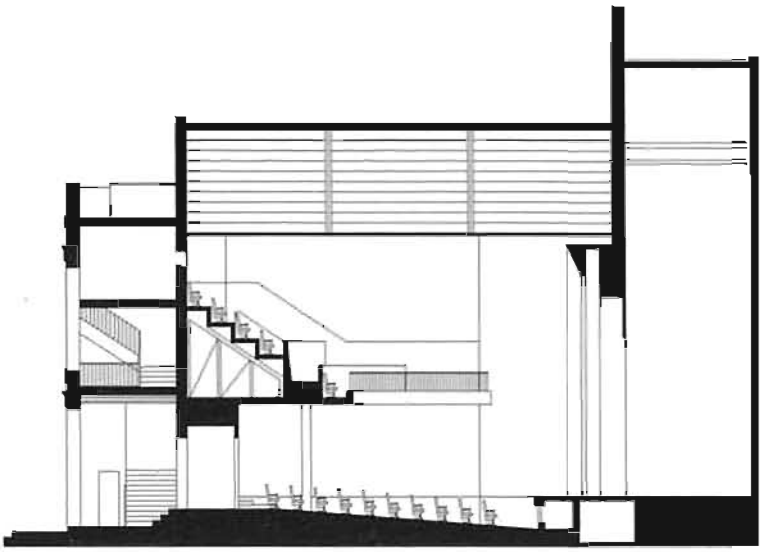
Rehabilitación



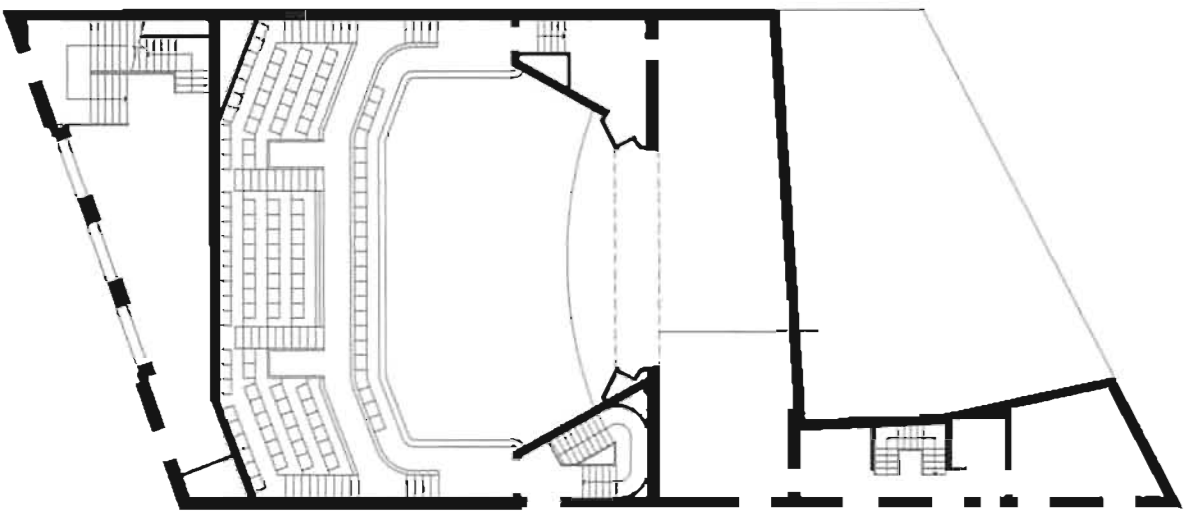
Modelo tridimensional

Datos técnicos:

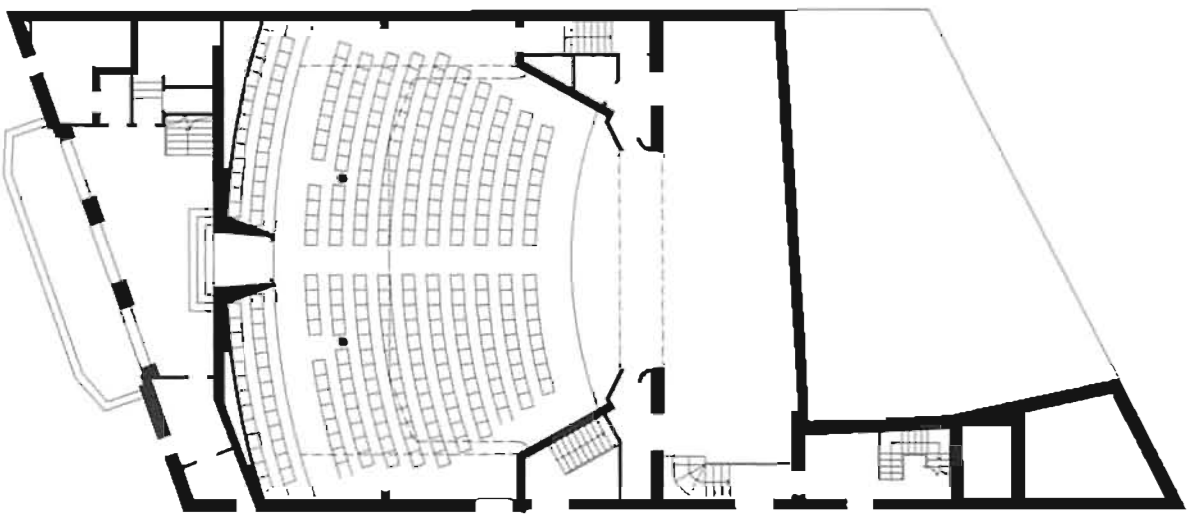
Superficie construida:	1.021 m²
Volumen sala:	2.251 m³
Volumen escena:	1.046 m³
Superficie de revestimiento:	2.049 m²
Superficie butacas:	190 m²
Superficie pasillos:	53 m²
Aforo:	395 pers.
Dimensiones sala:	
Longitud media:	13,95 m
Anchura media:	17,75 m
Altura media:	10,70 m



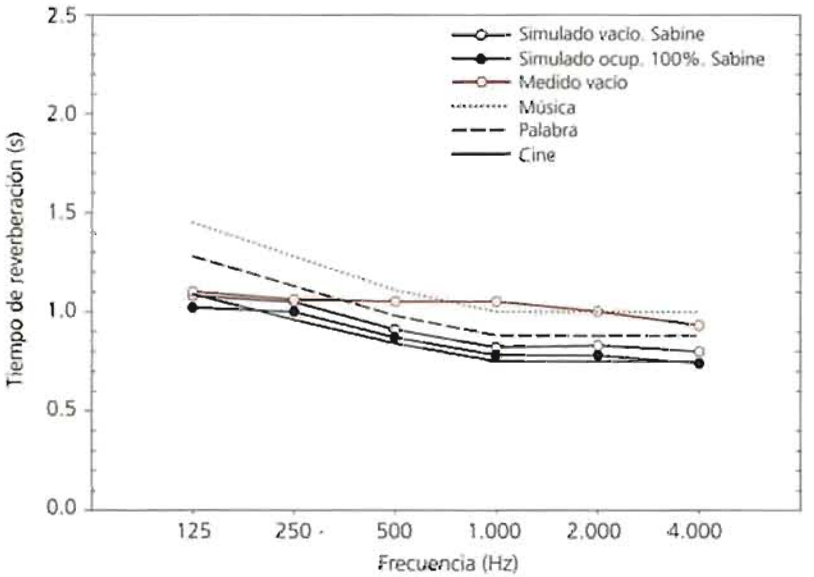
SECCIÓN



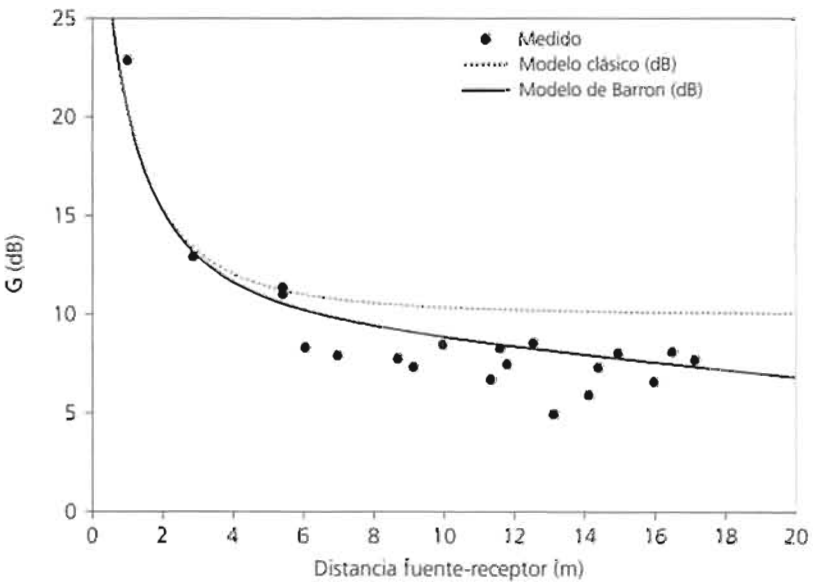
PLANTA ALTA



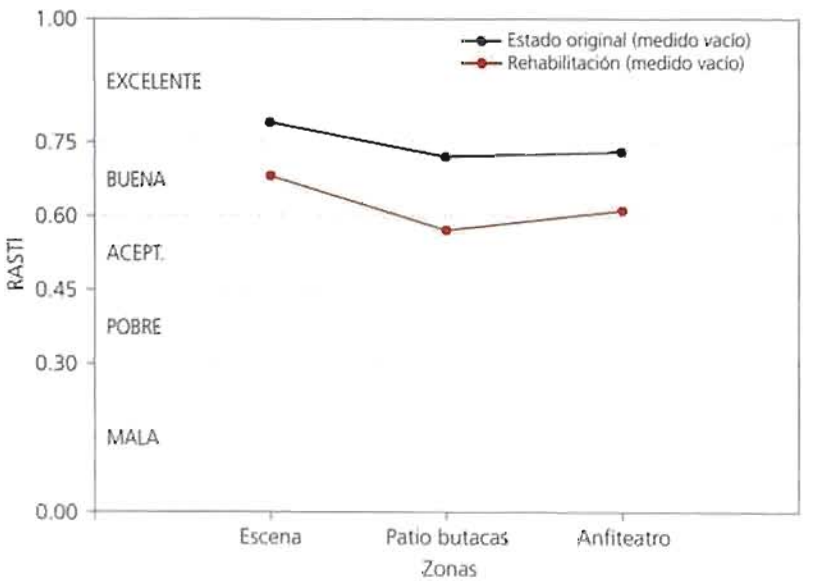
PLANTA BAJA



Tiempos de reverberación tras la rehabilitación



Distribución sonora: niveles globales tras la rehabilitación



Inteligibilidad de la palabra: índice RASTI promediado por zonas

Tiempos de reverberación (s)	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	RT_{mid}
Sala vacía (medido *in situ*)	1,10	1,06	1,05	1,05	1,00	0,93	1,05
Sala ocupada 100% (simulado)	1,02	1,00	0,87	0,78	0,78	0,74	0,83

Ruido de fondo (dB). Medido in situ. Rehabilitación	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1 kHz*	*2 kHz*	*4 kHz*	*NR*
Sin aire acondicionado	35,4	28,4	23,2	21,6	23,1	24,3	**29**
Con aire acondicionado	–	–	–	–	–	–	–

Parámetros de cualificación	*Sala vacía*	*Sala ocupada*	*Otros parámetros*	
Calidez BR (s)	1,23	1,22	V_t / N	5,70
Brillo Br (s)	0,94	0,92		
Definición D_{50} (%) 1 kHz	67,50	69,20	V_t / S_A	9,26
Claridad de la voz C_{50A} (dB)	2,53	2,95		
Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB)	4,93	5,20	V_t / S_{Tot}	8,81
Fuerza acústica G_{mid} (dB)	9,10	8,80		
Eficiencia lateral LF_4 (%)	20,08	19,43	S_A / V_t	0,62
Coeficiente de correlación $IACC_{E3}$	0,48	0,36		

3.2. VALORACIÓN ACÚSTICA DEL CONJUNTO

El hecho de disponer de los datos y valores de los parámetros acústicos más relevantes de un grupo de teatros, constituye una magnífica ocasión para realizar un análisis de conjunto de los mismos, con la finalidad de obtener directrices y orientaciones de carácter general, que puedan aplicarse en el proceso de diseño o rehabilitación de nuevos teatros. Aprender de la experiencia y de su análisis es labor habitual en el trabajo científico.

Evidentemente, un estudio de este tipo está lleno de dificultades de procedimiento, ya que cada teatro constituye una realidad arquitectónica bien diferenciada de las demás, de manera que los análisis comparativos deben realizarse contextualizando los valores particulares con respecto a las características del teatro a que corresponde. Una de estas características, que se ha revelado decisiva en la definición de la conducta acústica desde los estudios de Sabine, es el volumen de la sala. Si bien podríamos admitir que, sea cual sea el volumen de una sala, sus características acústicas podrían adoptar valores cualesquiera, en condiciones normales de diseño, el rango de variación de los mismos suele estar bastante acotado. Dicho de otro modo, normalmente el volumen de la sala se convierte en el parámetro más condicionante de su comportamiento acústico. Por esta razón, ha resultado de gran utilidad la representación de muchas de las variables acústicas de cada sala en diagramas cartesianos en los que la otra coordenada es el volumen. Se obtienen así conjuntos de puntos correspondientes al valor alcanzado para cada parámetro, en cada teatro, diferenciado por su volumen.

Puesto que en el apartado 3.1 se resumen las principales características acústicas de cada sala de manera individual, nos ocupamos aquí del análisis acústico del conjunto de la muestra de los 18 teatros andaluces, abordando las conclusiones referidas al tiempo de reverberación, la distribución sonora, la inteligibilidad de la palabra, otros parámetros de cualificación acústica de carácter energético, el ruido de fondo y otras variables geométricas de interés acústico.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Si en algún punto coinciden todas las opiniones, es que el tiempo de reverberación es el indicador acústico más representativo del comportamiento acústico de una sala, al ser el más expresivo en términos globales. Según esa apreciación, el ajuste del tiempo de reverberación de una sala dentro de un intervalo de valores, para cada frecuencia, es condición indispensable para lograr una buena acústica de la misma.

El tiempo de reverberación se ha medido utilizando el método del impulso integrado[1] y promediando espacialmente todos los puntos para cada una de las salas. En las figuras que siguen se presentan los valores correspondientes al tiempo de reverberación medio de las bandas de octava de 500 y 1.000 Hz (RT_{mid}), medido con las salas vacías, así como los simulados para una ocupación del 100%. Estos últimos, como ya hemos indicado, se han determinado mediante los modelos informáticos.

Tanto los valores medidos como los simulados, se han comparado con los dados por Beranek[2] para un conjunto de 14 teatros de ópera de reconocida buena acústica. Los principales parámetros acústicos de este conjunto de salas se mostraron, de forma detallada, en la tabla 9 del apartado 1.3. La tabla 1 presenta los datos del tiempo de reverberación, volumen y aforo de los mismos.

---

[1] Schroeder, M. R. (1965). New method of measuring reverberation time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 37, pp. 409-412.

[2] Beranek, L. L. (1996). *Concert and opera halls: how they sound*. Nueva York: Acoustical Society of America, pp. 593-617.

Tabla 1. Teatros de ópera estudiados por Beranek (1996)

Teatros de ópera	*Volumen (m^3)*	*Aforo (N)*	*RT_{mid} ocup. (s)*	*RT_{mid} vacio (s)*
Indiana University Auditorium. Bloomington, USA	25.545	3.718	1,43	1,45
Metropolitan Opera House. Nueva York, USA	24.723	3.816	1,78	2,28
Academy of Music. Filadelfia, USA	15.095	2.827	1,20	1,31
Eastman Theatre. Rochester, Nueva York, USA	23.973	3.347	1,65	1,83
War Memorial Opera House. San Francisco, USA	20.917	3.252	1,70	–
Kennedy Opera House. Washington, USA	13.027	2.142	1,50	1,70
Teatro Colón. Buenos Aires, Argentina	20.569	2.787	1,80	–
Festspielhaus. Salzburgo, Austria	14.018	2.158	1,50	1,94
Stattsoper. Viena, Austria	10.665	1.709	1,30	1,54
Opéra Bastille. París, Francia	21.000	2.700	1,58	1,71
Opéra Garnier. Paris, Francia	10.000	2.131	1,10	1,22
Festspielhaus. Bayreuth, Alemania	10.308	1.800	1,55	–
Royal Opera House. Londres, Gran Bretaña	12.248	2.120	1,10	1,21
Teatro Alla Scala. Milán, Italia	11.252	2.289	1,20	1,36

Con el fin de facilitar el análisis, los datos anteriores se han representado, en función del volumen de las distintas salas, junto con los tiempos de reverberación óptimos propuestos por seis autores: L. Cremer[3], J. Pérez Miñana[4], Knudsen y Harris[5], Leo L. Beranek[6], L. Conturie[7] y J. Jouhaneau[8]. Con el fin de no ser reiterativos, a continuación se presentan los resultados más significativos (Figs. 1 y 2). Con el fin de facilitar la lectura de las gráficas, en la tabla 2 se indica el número de orden de cada uno de los teatros andaluces, para su identificación.

En la mayoría de los casos, la nube de puntos correspondiente a las mediciones *in situ* y a las simulaciones, se sitúa dentro de la banda de tiempos de reverberación recomendados[9] (concierto-ópera-palabra).

Tabla 2. Numeración dada a los teatros en las gráficas

1	Teatro Apolo	7	Teatro Principal	13	Teatro Cine Ideal
2	Teatro Saavedra	8	Teatro de las Cortes	14	Gran T. de Huelva
3	Teatro Villaespesa	9	Gran Teatro de Córdoba	15	Teatro Capitol
4	Gran Teatro Falla	10	Teatro Garnelo	16	Teatro Darymelia
5	Teatro Olivares Veas	11	Teatro Cine Victoria	17	Teatro Lope de Vega
6	Teatro Villamarta	12	Teatro Isabel la Católica	18	Teatro Gutiérrez de Alba

[3] Cremer, L., Müller, H. A. y Schultz, T. J. (1982). *Principles and applications of room acoustics*. Volumen I. Londres: Applied Science Publishers, pp. 610-627.
[4] Pérez Miñana, J. (1969). *Compendio práctico de acústica*. Barcelona: Labor, S.A., pp. 319-428.
[5] Knudsen, V. O. y Harris, C. M. (1988). *Acoustical designing in Architecture*. (5ª ed.). Nueva York: Acoustical Society of America, pp. 171-174.
[6] Beranek, L. L. (1993). *Acoustics*. Nueva York: Acoustical Society of America, p. 425.
[7] Conturie, L. (1955). *L'acoustique dans les batiments. Théorie et applications*. Paris: Éditions Eyrolles, pp. 71-74.
[8] Jouhaneau, J. (1997). *Acoustique des salles et sonorisation*. Paris: Technique & Documentation, pp. 209-213.
[9] Beranek, L. L. (1993). *Opus cit.*, p. 425.

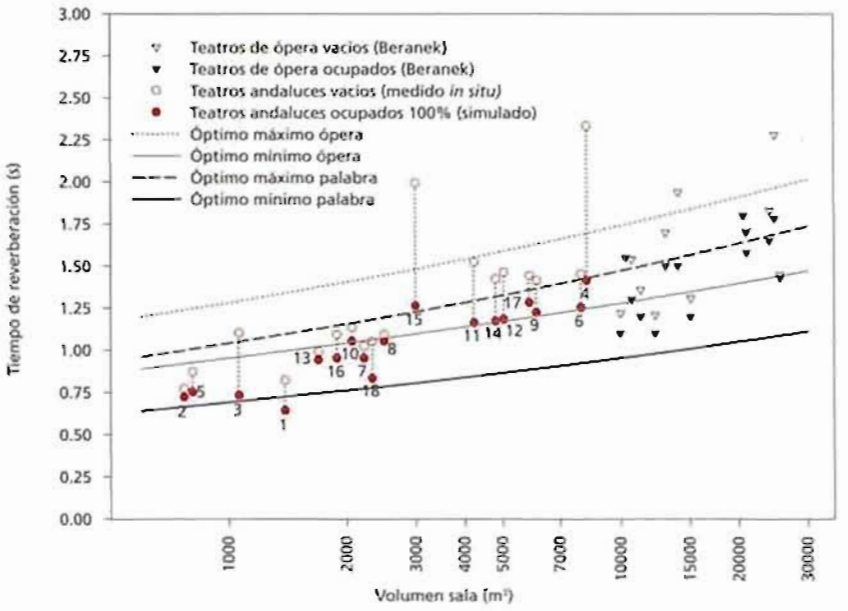


Figura 1. RT_{mid} medidos y simulados comparados con los recomendados por L. Cremer y los de las salas analizadas por L. Beranek.

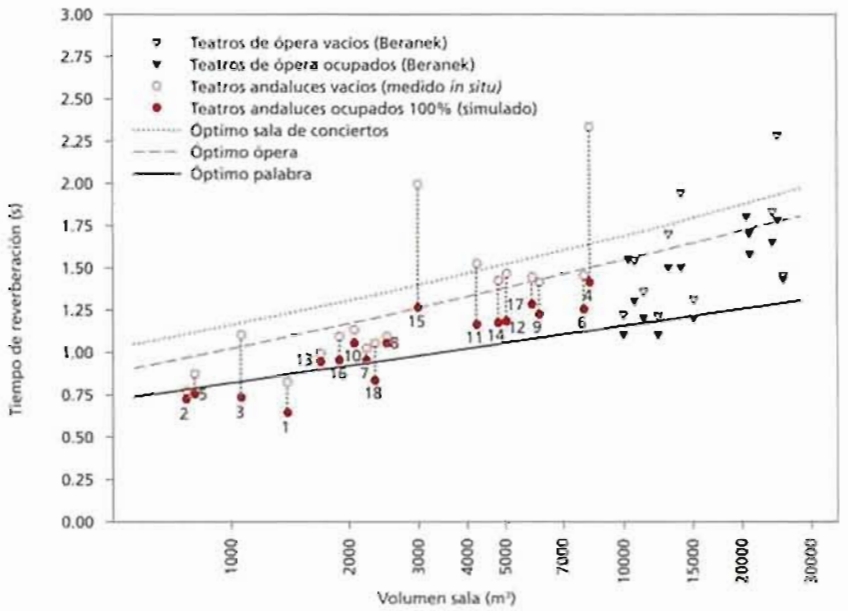


Figura 2. RT_{mid} medidos y simulados comparados con los recomendados por L. Beranek y los de las salas analizadas por él.

de acuerdo con el carácter multifuncional que se ha pretendido dar a las salas mediante las actuaciones de corrección acústica.

Este buen comportamiento en cuanto al tiempo de reverberación es generalizado, si bien conviene comentar los valores obtenidos en tres recintos: el teatro Apolo de Almería, algo sordo, con valores más propios para uso como cine que como teatro, y los teatros Capitol de Cortegana y Falla de Cádiz. En estos dos últimos, los tiempos de reverberación medidos, con las salas vacías, son los más altos de la muestra, propios de salas de conciertos de volúmenes muy superiores. Sin embargo, los tiempos de reverberación obtenidos mediante simulación para el teatro Capitol, con la presencia del público, se ajustan a los valores recomendados para un uso musical, objetivo pretendido por el autor del proyecto de rehabilitación. En el caso del Gran Teatro Falla, su tiempo de reverberación con la sala ocupada es adecuado para un uso polifuncional de la sala.

Los resultados tienen además un interés más general, pues vienen a completar la gama de valores disponibles en la bibliografía existente, ya que hasta ahora esta información estaba reducida a las grandes salas y auditorios de volúmenes superiores a 10.000 m³.

Aunque se ha optado por obviar, en general, el análisis espectral de los resultados, en la tabla 3 se presentan los rangos de valores para frecuencias bajas (125-250 Hz), medias (0,5-1 kHz) y altas (2-4 kHz)

Tabla 3. Tiempos de reverberación de los teatros andaluces

Situación	*Frecuencias*		
	Bajas	*Medias*	*Altas*
Sala vacía (medido)	0,63 a 1,96 s	0,72 a 1,52 s	0,68 a 1,38 s
Sala ocupada (simulado)	0,59 a 1,62 s	0,64 a 1,28 s	0,52 a 1,15 s

Tabla 4. Absorciones relativas (%), tras las rehabilitaciones, de escenarios y áreas de audiencia

Teatros		*Absorciones relativas a la total del teatro (%)*			
		Escenarios		*Áreas de audiencia*	
		SIN concha	*CON concha*	*SIN concha*	*CON concha*
Teatro Apolo		39,03	–	23,80	–
Teatro Saavedra		35,04	–	34,70	–
Teatro Villaespesa		27,07	–	35,32	–
Gran Teatro Falla		41,22	–	32,10	–
Teatro Olivares Veas		43,63	–	31,35	–
Teatro Villamarta		35,33	5,74	43,95	64,10
Teatro Principal		47,93	–	37,38	–
Teatro de las Cortes		37,65	–	26,35	–
Gran Teatro de Córdoba		41,28	5,57	43,20	68,85
Teatro Garnelo		45,06	12,55	29,63	47,47
Teatro Cine Victoria		37,65	7,82	34,65	53,07
Teatro Isabel la Católica		38,35	–	39,55	–
Teatro Cine Ideal		49,30	–	25,77	–
Gran Teatro de Huelva		31,53	–	38,57	–
Teatro Capitol		53,05	15,40	37,35	67,45
Teatro Darymelia		46,67	–	35,37	–
Teatro Lope de Vega		34,28	–	37,47	–
Teatro Gutiérrez de Alba		40,67	–	29,88	–
Medias	Teatros a la italiana	40,3	–	34,2	–
	Teatros rectangulares	41,0	–	34,6	–
	Todos	39,9	9,4	34,0	60,2

de los tiempos de reverberación de los teatros andaluces[10], con volúmenes entre 800 y 8.000 m³, en las situaciones de salas vacías (medición *in situ*) y ocupadas (simulación).

Hemos comentado anteriormente, que el tiempo de reverberación es uno de los parámetros acústicos más expresivos del comportamiento acústico de una sala. Como es sabido, las dos magnitudes que podemos variar para controlar este tiempo de reverberación son el volumen y la absorción sonora del recinto[11].

[10] De este rango de valores se han excluido los tiempos de reverberación de los teatros Capitol de Cortegana y Falla de Cádiz, como consecuencia del comportamiento singular de los mismos.

[11] Ver apéndice 4.1.

En la tabla 4 se muestran las absorciones relativas de los escenarios y de las áreas de audiencia de cada uno de los teatros tras las rehabilitaciones, calculadas, a partir de los datos de entrada, por el *software* de simulación *Catt-Acoustics*. Los porcentajes de absorción están referidos a la absorción total del teatro (sala + escena), distinguiendo las dos tipologías existentes en la muestra. Asimismo, y en los casos en los que estaba proyectada la instalación de un concha acústica, se presentan las absorciones correspondientes a estas situaciones.

Los resultados anteriores ponen de manifiesto que las superficies de absorción que tienen mayor influencia sobre el tiempo de reverberación, son las áreas de audiencia y la decoración y tramoya de las cajas escénicas, ya que entre las dos se suele superar el 75% de la absorción total del teatro. La absorción de los escenarios, tanto en los teatros de tipología a la italiana como en los de planta rectangular, suele ser del orden del 40%, mientras que las áreas de audiencia aportan en torno al 35% de la absorción total. Según esto, la actuación sobre la absorción acústica del resto de revestimientos de la sala (paredes laterales y techos, principalmente), que suponen el 25% de la absorción total, servirá para matizar la acústica de la misma en función del uso que se pretenda: teatro o sala de concierto.

Por otro lado, la utilización de concha acústica en los escenarios modifica al alza los tiempos de reverberación de las salas, dependiendo del diseño y materiales empleados en su ejecución. En estas situaciones, la absorción relativa de las áreas de audiencia aumenta hasta el 60%, ya que el volumen acoplado de la concha acústica no llega a aportar ni el 10% de la absorción total del teatro.

DISTRIBUCIÓN SONORA

La distribución sonora de un local permite evaluar el grado de difusión del campo acústico, así como la localización de posibles zonas de concentración de energía sonora o de sombra acústica, con el fin de conseguir un campo acústico lo más uniforme posible en todas las zonas de audiencia en cuanto a los niveles sonoros.

El campo sonoro generado en un recinto presenta notables diferencias respecto del generado por la misma fuente en condiciones de campo libre, lo que se traduce necesariamente en una percepción muy diferente por parte de la audiencia. La primera diferencia se refiere a la variación del nivel acústico con la distancia emisor-receptor. En un espacio abierto el nivel de presión sonora cae a razón de 6 dB cada vez que duplicamos esta distancia, mientras que en un recinto cerrado el nivel sonoro sólo presenta esta dependencia en las proximidades de la fuente; en cuanto nos alejamos de la misma, el nivel sonoro tiende a mantenerse constante (en el modelo clásico) puesto que prevalece el campo reverberado, creado por las múltiples reflexiones de las ondas en los confines de la sala, frente al sonido directo. De hecho, un parámetro característico de un recinto es su radio acústico o distancia crítica: a esta distancia el nivel del sonido directo procedente de la fuente y el del campo reverberado son iguales.

A finales de los años ochenta, M. Barron analiza con mayor detalle esta dependencia de los niveles de presión con la distancia emisor-receptor en los espacios cerrados, concretamente en auditorios. Partiendo del modelo clásico, estableció un nuevo modelo analítico, capaz de predecir las pequeñas atenuaciones con la distancia observadas en las medidas experimentales realizadas en el campo reverberante en el interior de estos auditorios.

Para valorar la uniformidad del campo acústico en los teatros andaluces se ha utilizado la fuerza acústica, G, medida en diferentes puntos del patio de butacas, palcos y anfiteatros. Esencialmente el parámetro evalúa los niveles de presión sonora en cada punto referidos al nivel producido por una fuente omnidireccional en campo libre, a una distancia de 10 m, emitiendo con la misma potencia total que la utilizada en el ensayo. Para valorar la dependencia con la distancia emisor-receptor, los resultados experimentales se presentan superpuestos con los valores estimados a partir de los dos modelos teóricos que hemos citado anteriormente: el clásico y el propuesto por Barron y Lee[12]. Hay que señalar que al utilizar este parámetro, en vez de los niveles de presión, es posible comparar los valores del mismo medidos en diferentes salas, ya que resulta independiente de la fuente y caracteriza por tanto el espacio.

[12] Barron, M. y Lee, L.-J. (1988). Energy relations in concert auditoriums. I. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84 (2), pp. 618-628.

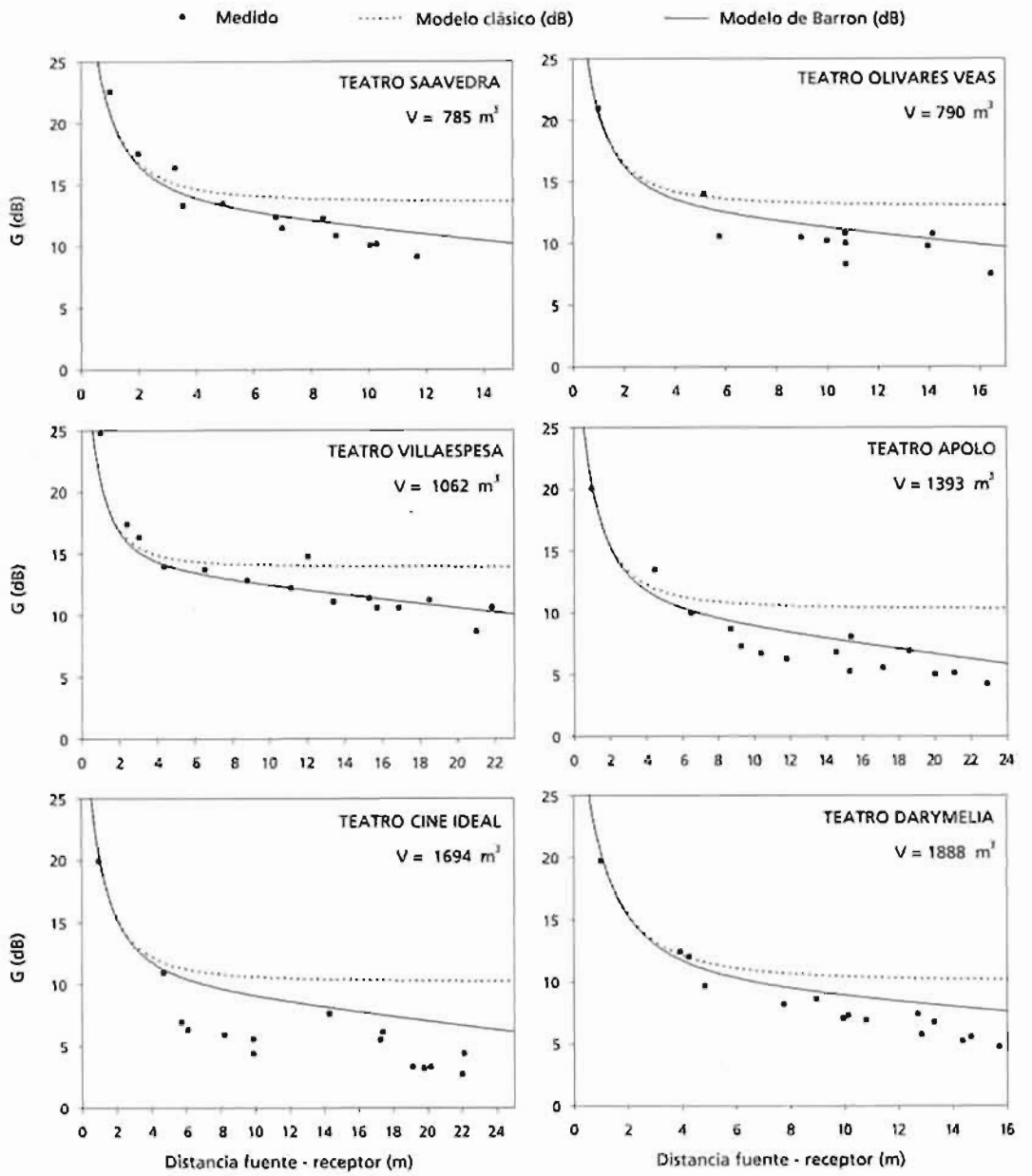


Figura 3. Variación de los niveles globales frente a la distancia emisor-receptor valorados mediante la fuerza acústica en los teatros de menor volumen.

En el modelo clásico, como ya hemos indicado, se asume la hipótesis de campo difuso en el interior de los recintos y, como consecuencia, los niveles de presión sonora tienen un término correspondiente al sonido directo, que depende de la distancia emisor-receptor, y otro correspondiente al campo reverberado que es independiente de dicha distancia.

En el modelo modificado de Barron-Lee no se asume la constancia del campo reverberado, debido fundamentalmente a la concentración de absorción en la zona de audiencia. Así pues, en los niveles de presión sonora aparecen términos debidos al sonido directo, al sonido reflejado que alcanza al receptor dentro de los primeros 80 ms después de la llegada del directo y al sonido reflejado tardío, que llega después de ese intervalo, todos ellos dependientes de la distancia. Este modelo, en los auditorios analizados por Barron, predice una atenuación del campo reverberado con la distancia a razón de 1 dB/10 m.

Con el objeto de realizar un análisis de conjunto de la distribución sonora, en las figuras 3 a 5 se comparan los valores de G, medidos en banda ancha, para los 18 teatros, con los modelos clásico y de Barron-Lee. Las salas aparecen ordenadas de menor a mayor volumen, en un rango que va desde los 785 m³ del teatro Saavedra hasta los 8.114 m³ del teatro Falla.

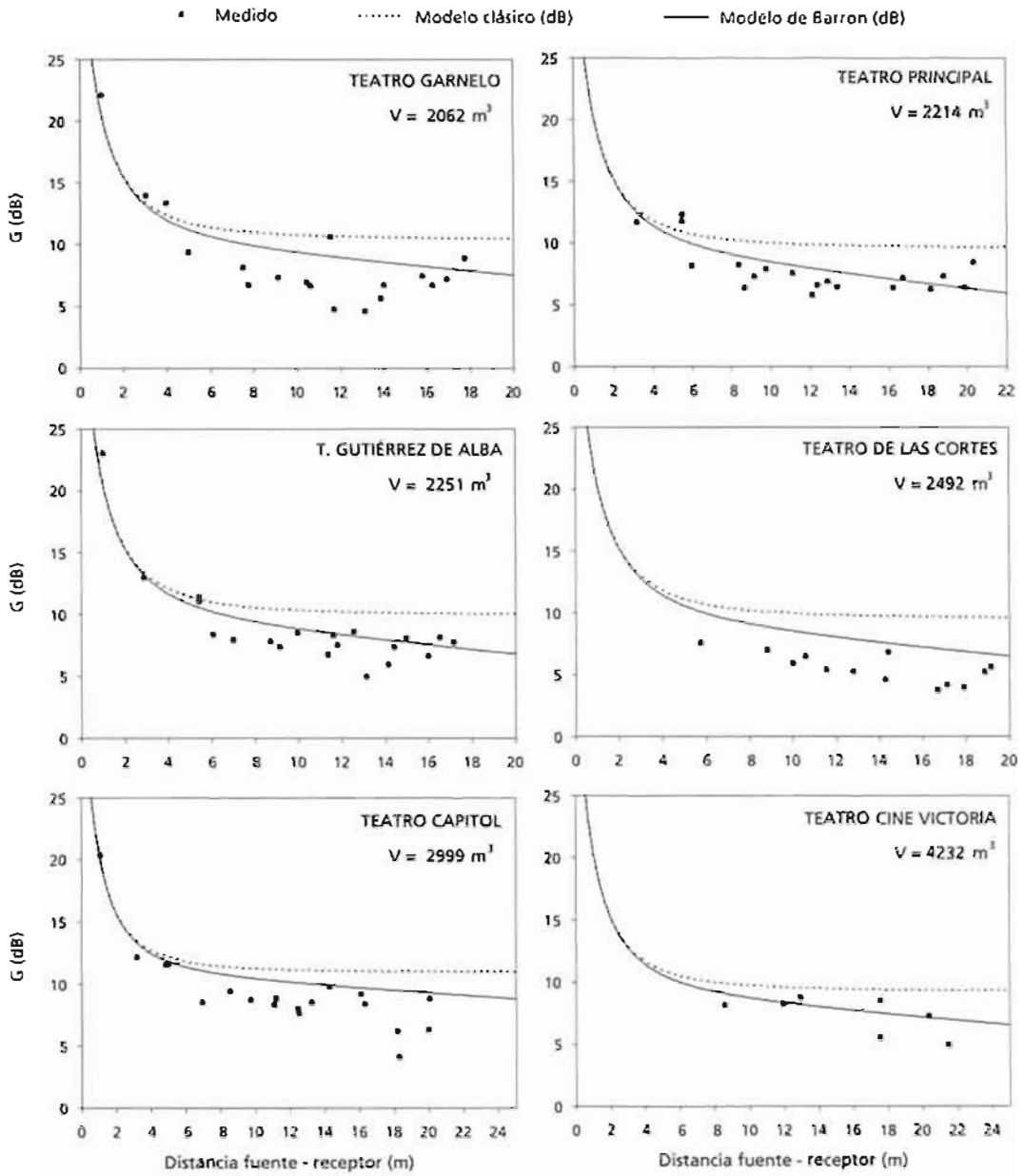


Figura 4. Variación de los niveles globales frente a la distancia emisor-receptor valorados mediante la fuerza acústica en los teatros de volumen intermedio.

De forma similar, la figura 6 permite valorar el efecto de la concha a este respecto. Para ello se presentan en paralelo las situaciones con y sin concha. Dichas medidas solamente están disponibles en 3 salas: el Teatro Garnelo de Montilla, el Gran Teatro de Córdoba y el Teatro Villamarta de Jerez.

En todas las figuras el modelo clásico aparece representado con línea de puntos, mientras que el de Barron y Lee se representa en línea continua y los datos medidos mediante círculos negros.

En muchos casos, las medidas experimentales ponen de manifiesto un comportamiento similar al sugerido por el modelo de Barron y Lee, al que se adaptan muy bien (teatros Saavedra, Villaespesa, Apolo, Darymelia, Principal y Victoria). En los demás, si bien los resultados experimentales siguen la tendencia del modelo, se observan atenuaciones algo mayores que las previstas por éste (es el caso de los teatros Olivares Veas, Ideal, Garnelo, Gutiérrez de Alba, Las Cortes, Capitol, Gran Teatro de Huelva, Isabel la Católica, Lope de Vega, Gran Teatro de Córdoba, Villamarta y Falla). Las razones de estas discrepancias son difíciles de precisar en estos momentos.

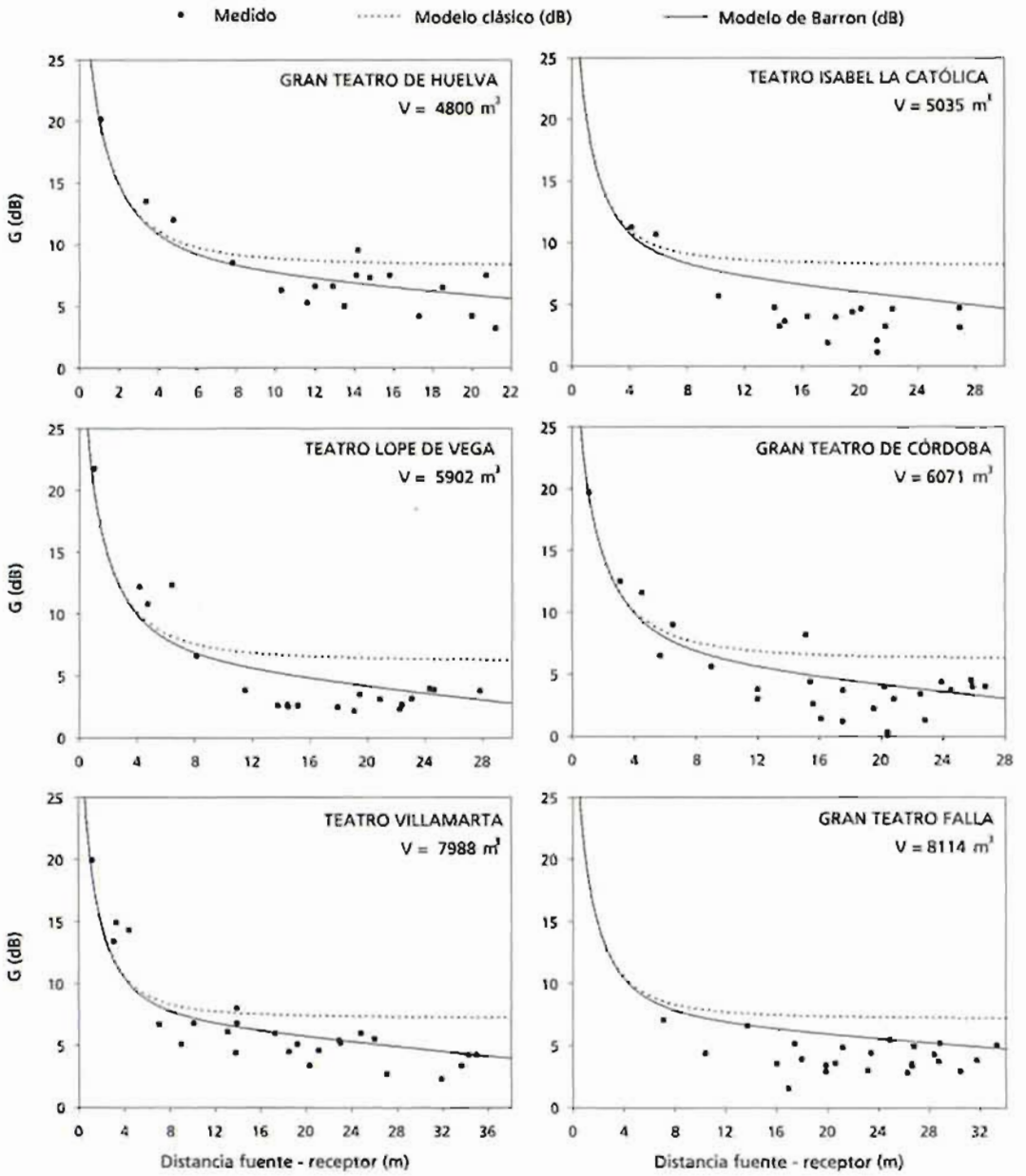


Figura 5. Variación de los niveles globales frente a la distancia emisor-receptor valorados mediante la fuerza acústica en los teatros de mayor volumen.

En este sentido, nuestros resultados son similares a los alcanzados por Bradley[13] en 1991, que, aunque confirma la validez de esta teoría revisada como un procedimiento útil para la predicción de los niveles en este tipo de salas, matiza su idoneidad.

En cuanto a las medidas realizadas con la concha acústica instalada (los tres casos corresponden al segundo grupo mencionado anteriormente), es de destacar que los niveles medidos se aproximan algo más al modelo de Barron y Lee (Fig. 6). La razón de este desplazamiento se debe al refuerzo de los niveles en la sala por las reflexiones tempranas aportadas por la concha, que originan un campo sonoro más parecido al de una sala de conciertos.

Como señalamos al comienzo de este apartado, la percepción sonora en un campo reverberado depende de las reflexiones del sonido en los límites de ese recinto, especialmente de las reflexiones tempranas que alcanzan al receptor inmediatamente después de la llegada del sonido directo. En un intento por obtener

[13] Bradley, J. S. (1991). A comparison of three classical concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89, pp. 1176-1192.

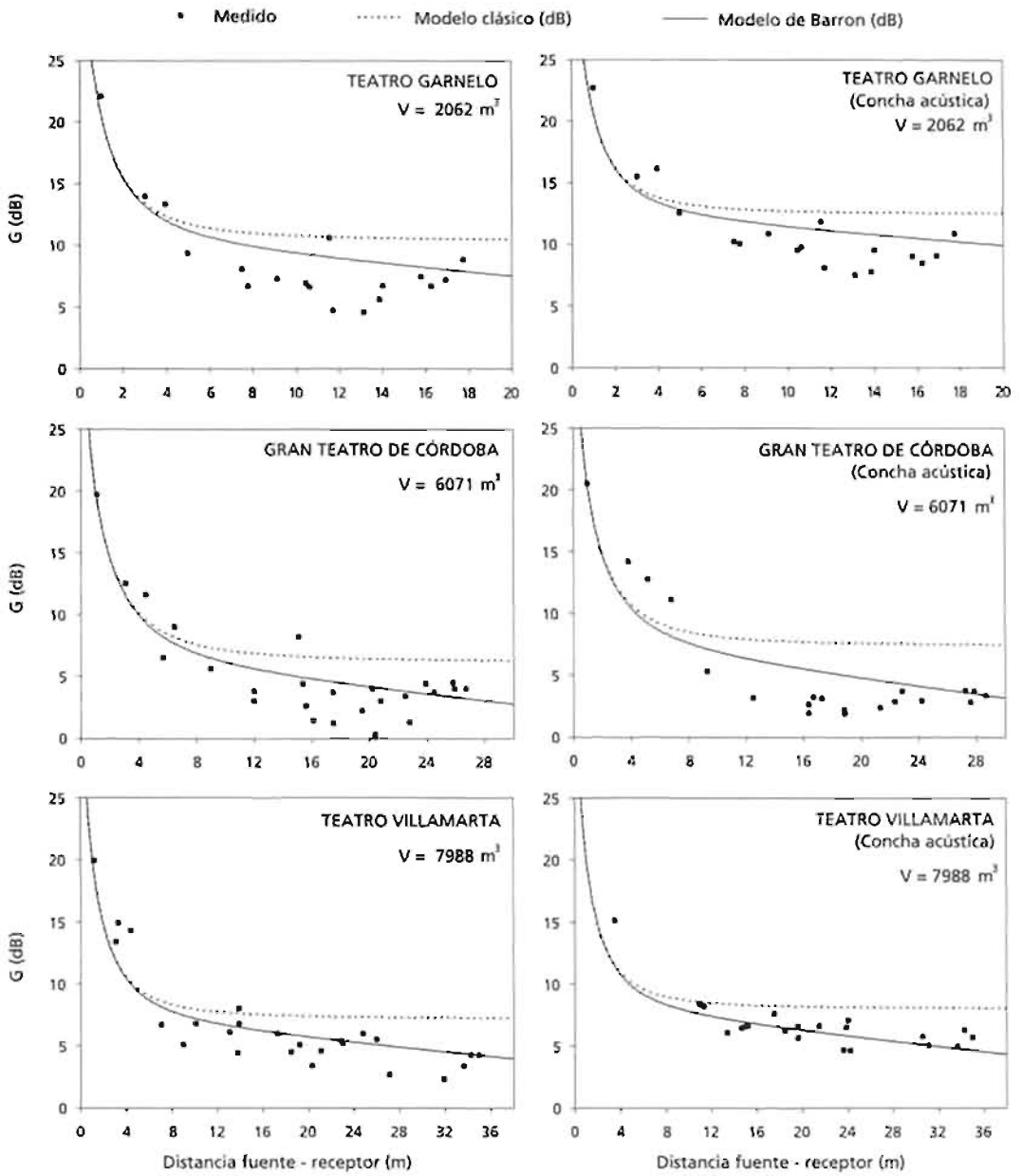


Figura 6. Fuerza acústica frente a la distancia emisor-receptor. Comparación entre las situaciones SIN concha acústica, a la izquierda, y CON ella, a la derecha.

conclusiones de utilidad para el diseño acústico de estos espacios, se han analizado los resultados aportados por el *software* de simulación para establecer la importancia relativa de las diferentes superficies y paramentos a la hora de aportar reflexiones sobre los distintos puntos de recepción.

La tabla 5 muestra el porcentaje de eficacia de las superficies con más influencia sobre las reflexiones sonoras en el interior de las salas (techos, paredes laterales y paredes de fondo). Los porcentajes presentados, obtenidos a partir de los ecogramas de las simulaciones informáticas, corresponden al estado final y se refieren al total de reflexiones producidas en el interior de las salas, excluyendo las incidentes en el volumen escénico.

El análisis de la tabla 5 muestra que, por orden de importancia, los cerramientos más eficaces desde el punto de vista de las reflexiones sonoras dentro de las salas, son los siguientes:

- Techos: son las superficies de mayor repercusión en la reflexión de los rayos sonoros. Independientemente de la tipología teatral, sobre ellos incide una media del 25% del total de reflexiones de la sala, destacando los techos ubicados sobre los patios de butacas.

- Paredes laterales: tienen una incidencia media del 20%. En los teatros de forma tradicional a la italiana, los paramentos laterales reflejan el 15% de los rayos sonoros, mientras que en los de planta rectangular se alcanzan resultados más altos (23%).

Según lo anterior, debe prestarse una atención especial a la forma, orientación, distribución y terminación acústica de estas superficies, ya que son las que pueden proporcionar reflexiones sonoras cortas, y por tanto, beneficiosas, sobre las áreas de audiencia de las salas.

Las paredes de fondo son paramentos que, con frecuencia, provocan reflexiones sonoras tardías. En la tabla 5, puede observarse que tienen una eficacia media del 6% sobre el total de reflexiones dentro de las salas. Para impedir la aparición de dichas reflexiones perjudiciales, debe procurarse que las mismas presenten revestimientos absorbentes y/o formas que impidan la aparición de posibles ecos en las filas de asientos delanteros.

Se ha observado que las conchas acústicas incrementan el número de reflexiones totales que se dirigen hacia las salas una media del 35%, al reducir drásticamente las que se pierden dentro del volumen escénico. La eficacia de techos, paredes laterales y de fondo se sigue manteniendo (Tabla 5). Por ello, la instalación de conchas acústicas en los escenarios mejora las condiciones de distribución sonora de las salas, ya que producen un refuerzo de los niveles de presión sonora, que las hacen más apropiadas para uso musical.

Sobre este comportamiento tiene influencia el diseño y materiales utilizados en las conchas acústicas. En los casos que hemos analizado, los materiales más frecuentemente empleados, y con los que se han

Tabla 5. Eficacia de reflexión sonora de techos, paredes laterales y paredes de fondo

Teatros	*Porcentaje de eficacia (%)*							
	Techos		*Paredes laterales*		*Paredes fondo*		*Resto*	
Teatro Apolo	26,1		29,0		4,5		40,4	
Teatro Saavedra	26,5		24,9		7,9		40,7	
Teatro Villaespesa	24,3		36,5		6,0		33,2	
Gran Teatro Falla	21,4		11,5		3,1		63,9	
Teatro Olivares Veas	28,1		22,9		6,1		42,9	
Teatro Villamarta	23,3	14,2	14,4	22,6	3,3	3,0	59,2	60,2
Teatro Principal	21,1		17,7		5,9		55,3	
Teatro de las Cortes	32,4		11,9		6,0		49,6	
Gran Teatro de Córdoba	27,8	12,4	12,5	27,2	7,2	7,4	52,4	53,0
Teatro Garnelo	23,6	23,4	23,6	24,6	4,1	4,0	48,7	48,0
Teatro Cine Victoria	24,7	24,3	24,8	25,5	5,5	6,0	44,7	44,2
Teatro Isabel la Católica	25,5		16,9		6,5		51,2	
Teatro Cine Ideal	26,0		30,6		3,8		39,6	
Gran Teatro de Huelva	22,5		15,0		6,2		56,3	
Teatro Capitol	33,4	21,0	21,0	38,5	7,9	7,7	37,7	32,8
Teatro Darymelia	26,6		20,8		7,6		45,0	
Teatro Lope de Vega	25,0		16,7		8,9		49,4	
Teatro Gutiérrez de Alba	25,1		18,2		7,9		48,8	
Medias	25,8	27,7	20,6	19,7	6,0	5,6	47,7	47,7

Nota: los valores en rojo corresponden a las mediciones con concha acústica.

obtenido resultados aceptables, son paneles de madera (10 a 15 mm de espesor) montados sobre estructuras desmontables de perfiles de aluminio.

Finalmente, hemos podido constatar la validez de la afirmación de que para lograr la homogeneidad del campo sonoro, las áreas de audiencia de este tipo de teatros deben distribuirse lo más homogéneamente posible, ya que constituyen las zonas de mayor absorción relativa de las salas[14], al concentrar una media del 60% de la absorción total de la misma. Esta característica es común a las dos tipologías estudiadas: teatros a la italiana y rectangular.

INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA

La inteligibilidad representa la capacidad de entender el mensaje oral después de haber atravesado un determinado canal de transmisión sonoro, como puede ser una sala. Evidentemente, para un teatro este concepto es de gran importancia y se intentará siempre maximizarla. Aunque, en esencia, se trata de una valoración subjetiva, se han elaborado diversos índices objetivos que se correlacionan bien con la apreciación subjetiva.

Entre los diferentes índices existentes, uno de los más extendidos y fiables es el índice RASTI[15] *(Rapid Speech Transmission Index)*, simplificación del STI *(Speech Transmission Index)*. El procedimiento se basa en el análisis de la degradación de la modulación de una señal portadora de banda ancha modulada. Las señales moduladoras, sinusoides de baja frecuencia, reproducen las frecuencias con que modulamos nuestro discurso al hablar. Este índice ha sido ampliamente contrastado con numerosas pruebas subjetivas, realizadas en múltiples idiomas, incluido el nuestro[16]. El índice RASTI varía entre cero y uno, lo que permite calificar las zonas, en relación con la inteligibilidad, desde mala a excelente, según la escala cualitativa representada en la figura 7. Esta calificación es especialmente significativa para los usos de la sala en los que la palabra juega un papel primordial, como son el uso teatral y el cinematográfico, frecuentes en las salas estudiadas.

Con el fin de poner de manifiesto la influencia de la tipología en la inteligibilidad, se ha representado (Figs. 8 a 13) el índice RASTI promediado espacialmente en cada teatro en función del volumen, distinguiendo las dos tipologías existentes en la muestra: teatros a la italiana (con planta de forma acampanada o de herradura) y teatros de planta rectangular. Asimismo, y con el propósito de analizar la influencia de la posición del espectador sobre la inteligibilidad, los promedios espaciales a los que nos referíamos antes, se han realizado para cada una de las siguientes zonas: patio de butacas, anfiteatros de primer nivel, anfiteatros de segundo nivel, plateas de planta baja, palcos de primer nivel y palcos de segundo nivel. Todos los valores presentados corresponden a las mediciones efectuadas *in situ* con las salas sin público.

Puesto que no hemos medido con presencia de público, hemos recurrido a los resultados de las simulaciones para estimar los valores del índice RASTI en tal situación. En la tabla 6 presentamos los valores promediados espacialmente por zonas. A efectos comparativos hemos incluido en la misma los valores, tanto medidos como simulados, sin la presencia de público.

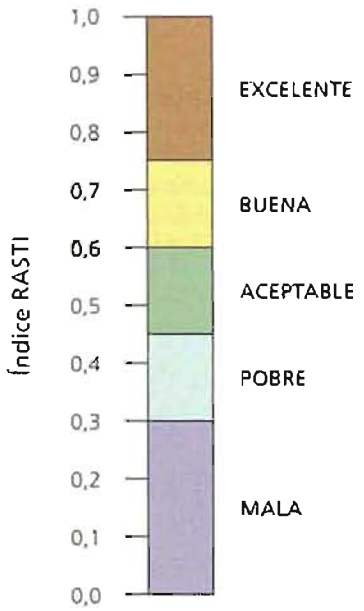


Figura 7. Valoración cualitativa de la inteligibilidad a partir del índice RASTI.

[14] En este porcentaje se excluye la absorción debida al volumen escénico.

[15] Houtgast, T. y Steeneken, H. J. M. (1985). A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77 (3), pp. 1069-1077.

[16] Díaz, C. y Velázquez, C. (1995). A live evaluation of the RASTI-method. *Applied Acoustics*, 46 (4), pp. 363-372.

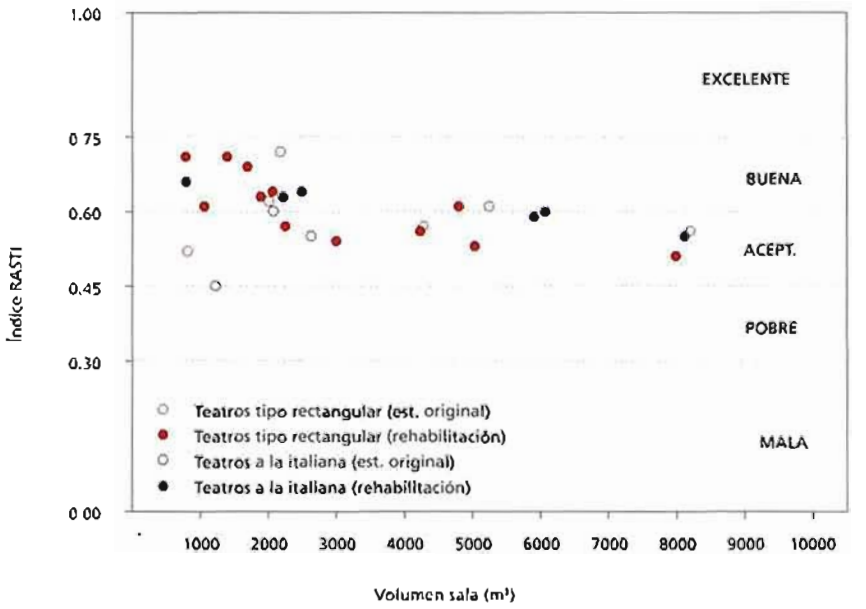


Figura 8. Valores RASTI, promediados espacialmente en los patios de butacas, frente al volumen para valorar la inteligibilidad.

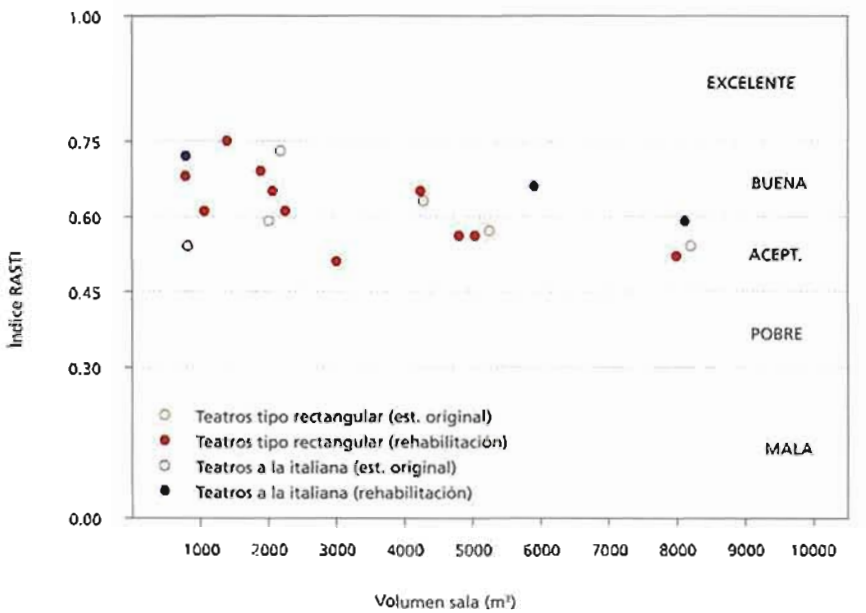


Figura 9. Valores RASTI, promediados espacialmente en los anfiteatros de primer nivel, frente al volumen para valorar la inteligibilidad.

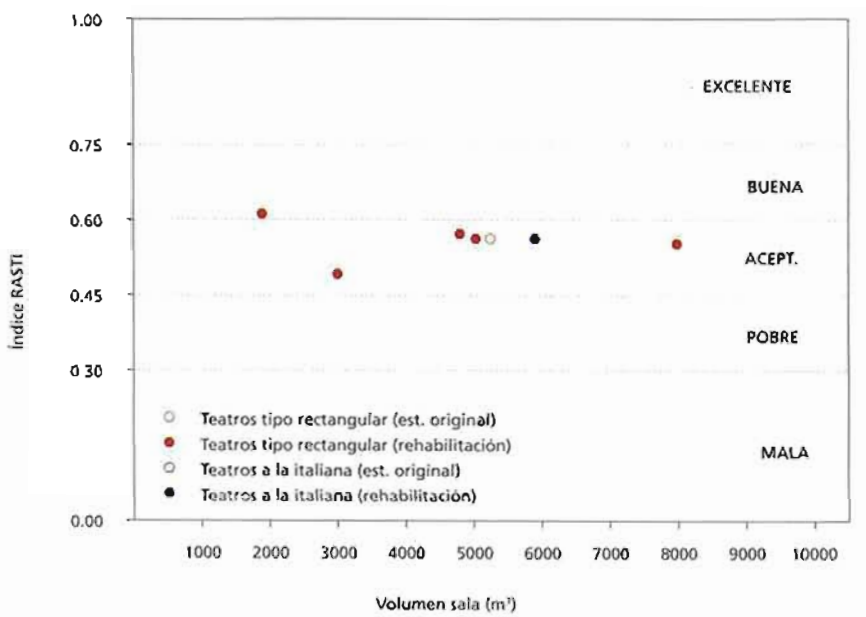


Figura 10. Valores RASTI, promediados espacialmente en los anfiteatros de segundo nivel, frente al volumen para valorar la inteligibilidad.

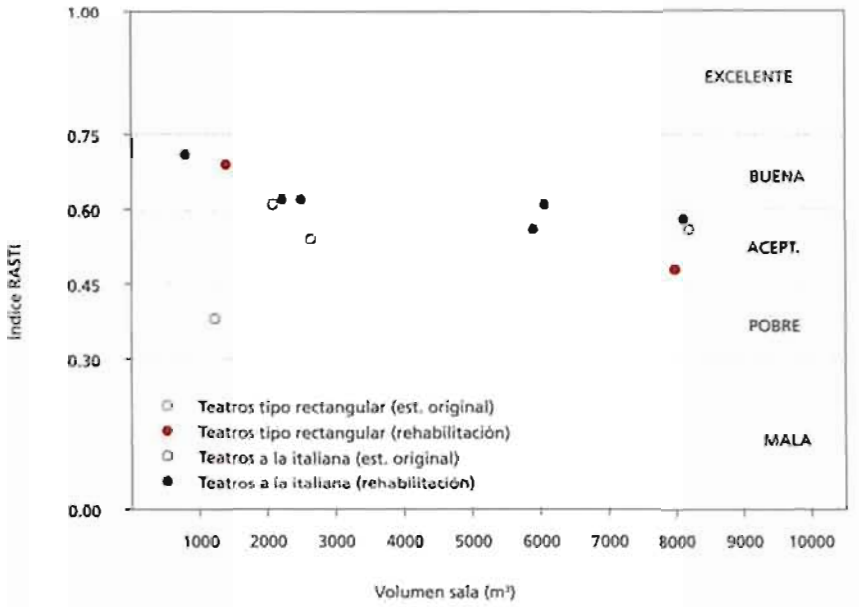


Figura 11. Valores RASTI, promediados espacialmente en las plateas, frente al volumen para valorar la inteligibilidad.

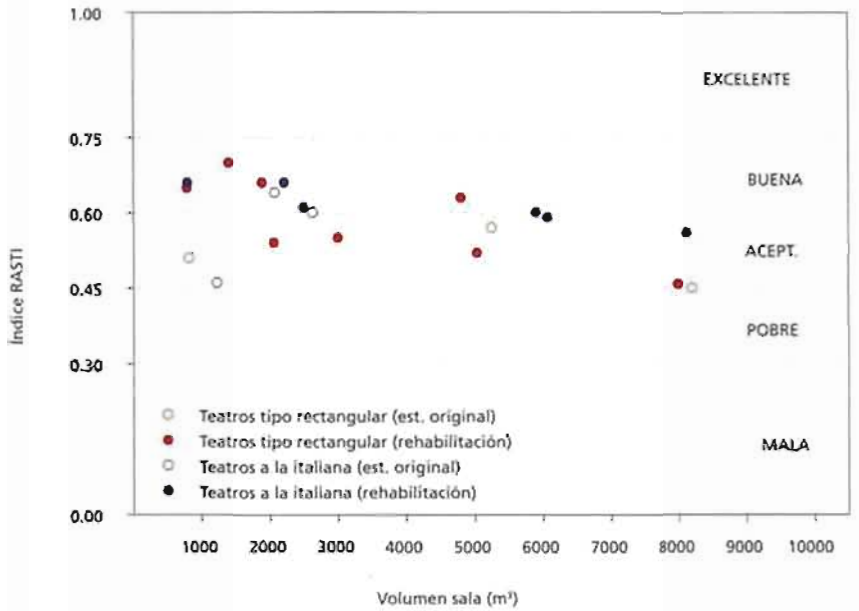


Figura 12. Valores RASTI, promediados espacialmente en los palcos de primer nivel, frente al volumen para valorar la inteligibilidad.

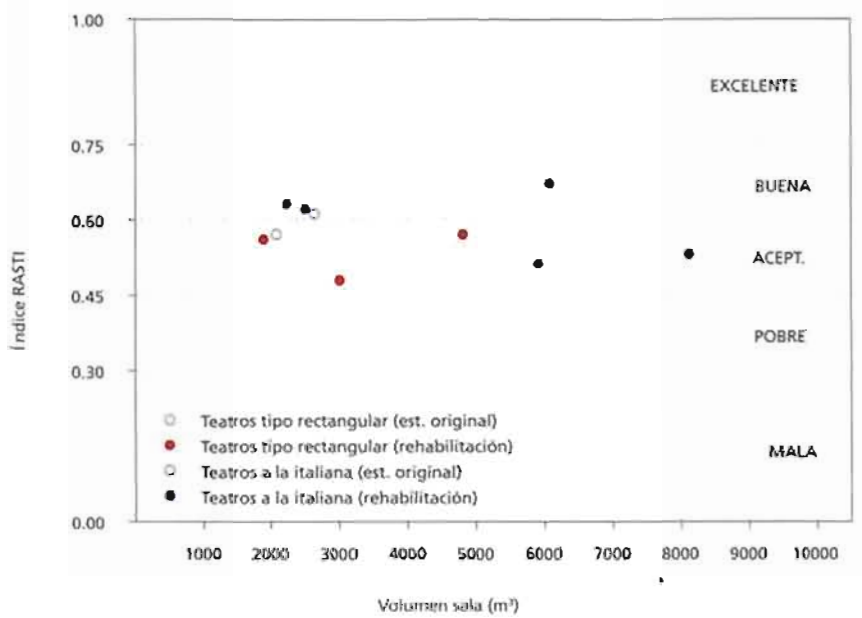


Figura 13. Valores RASTI, promediados espacialmente en los palcos de segundo nivel, frente al volumen para valorar la inteligibilidad.

Tabla 6. Valores RASTI promediados espacialmente por zonas y tipología de sala. Además de los valores medidos *in situ* (sin público) aparecen los valores simulados SIN y CON público

Zona del Teatro	*Teatros sin concha acústica*						*Teatros con concha*		
	A la italiana			Rectangular					
	Medido (vacío)	*Simulado*		*Medido (vacío)*	*Simulado*		*Medido (vacío)*	*Simulado*	
		Vacío	*Ocup.*		*Vacío*	*Ocup.*		*Vacío*	*Ocup.*
Patio butacas	**0,61**	0,55	0,57	**0,61**	0,58	**0,60**	0,56	0,47	0,50
Anfiteatros 1	**0,62**	**0,62**	**0,64**	**0,66**	0,59	**0,62**	0,54	0,48	0,52
Anfiteatros 2	0,56	0,52	0,54	0,56	0,52	0,55	0,53	0,46	0,52
Plateas (patio)	0,59	**0,60**	**0,62**	**0,62**	0,56	0,57	0,55	0,47	0,50
Palcos 1	0,59	0,57	0,59	**0,61**	0,57	0,58	0,55	0,45	0,49
Palcos 2	0,54	0,55	0,57	0,59	0,55	0,58	–	0,44	0,49
CALIFICACIÓN				***Buena***			*Aceptable*		

Como era de esperar, los índices RASTI medios más altos se han medido en los teatros de volúmenes menores. Concretamente, con volúmenes de sala inferiores a 3.000 m³, la inteligibilidad se ha calificado como buena en los patios de butacas, primeros anfiteatros y plateas[17]. En las salas de volúmenes superiores a 3.000 m³, la inteligibilidad de la palabra en todas las zonas, salvo los anfiteatros segundos, se puede calificar entre buena y aceptable.

Como puede observarse en la tabla 6, las dos tipologías teatrales estudiadas presentan una inteligibilidad de la palabra muy parecida desde el punto de vista global, ya que los índices medidos en una y otra no difieren más del 3-4%, siendo iguales en algunas zonas. Puede observarse además que el grado de ocupación (en promedio) no tiene influencia sobre la inteligibilidad (al menos al nivel de precisión que permite la simulación).

Las áreas de audiencia localizadas en los niveles superiores de los teatros (anfiteatros y palcos segundos), independientemente del volumen de las salas, son las zonas que presentan una inteligibilidad más baja, siendo aceptable en casi todos los casos.

Los valores de inteligibilidad estimados en presencia de público son ligeramente superiores (3,5%) a los simulados con las salas vacías, y muy similares a los medidos *in situ* en estas últimas condiciones. Es decir, la influencia del público sobre la inteligibilidad de la palabra es mínima, suponiendo unas condiciones aceptables de ruido de fondo (las simulaciones se han realizado suponiendo que el ruido de fondo en tales condiciones se describe mediante el espectro de la curva NR-25, descrita en el apéndice 4.1).

La utilización de conchas acústicas en salas de estas características reduce los índices de inteligibilidad de la palabra una media del 13-14%, como se puede apreciar a partir de los datos de la tabla 6. Por ello, el empleo de este elemento debe ser exclusivo, en general, para uso musical.

RUIDO DE FONDO

Para que la acústica de una sala sea adecuada, el ruido de fondo, procedente de fuentes internas o externas, no debe superar ciertos niveles a fin de que su interferencia con la señal del mensaje a percibir sea despreciable. Para determinar la influencia de un espectro de ruido y su grado de molestia,

[17] La única excepción a este comportamiento es el Teatro Capitol de Cortegana (3.000 m³ aprox.), concebido para un uso principalmente musical y, por tanto, con un tiempo de reverberación elevado que produce una disminución de la inteligibilidad.

es de gran utilidad la utilización de las curvas de valoración NR *(Noise Reduction)* de la norma ISO 1996[18].

En el apartado 3.1. se han incorporado los valores espectrales del ruido de fondo medido *in situ* en cada uno de los teatros. Estos espectros se midieron, promediando temporalmente durante más de cinco minutos, en algún punto representativo del patio de butacas de cada teatro. Así mismo, durante ese intervalo se midió el nivel sonoro continuo equivalente. En los casos en que había instalación de climatización, las medidas se repitieron con la misma funcionando en sus condiciones normales. En la misma tabla se valora cada uno de los espectros indicando el índice NR asociado.

La valoración global del ruido de fondo de los teatros andaluces se resume en la tabla 7, donde aparecen los rangos de valores del índice NR correspondientes a los estados originales y finales, en este caso funcionando los sistemas de climatización y con éstos parados.

Tabla 7. Rangos de valores del índice NR, para los espectros del ruido de fondo en los teatros

Estado original[19]	*Rehabilitación*	*Rehabilitación (climatización)*
NR 23 a 38	NR 22 a 32	NR 29 a 41

En esta valoración global, también resultan de interés los datos representados en la figura 14. En ella se muestra el nivel sonoro continuo equivalente L_{Aeq} (dBA) medido en cada uno de los teatros, frente al identificador de cada sala de la tabla 2. Se presentan los resultados en el estado original y en el estado final, en este caso, con y sin climatización.

La comparación de los niveles de ruido de fondo medidos en el estado final de los teatros andaluces, tras las obras de rehabilitación, con respecto a los registrados inicialmente[20], muestran, en general, una mejora en las condiciones de aislamiento de los teatros, en relación a las fuentes de ruido exteriores.

Como consecuencia de las necesidades actuales de acondicionamiento en los edificios, en muchas ocasiones las rehabilitaciones han incorporado instalaciones que no estaban presentes en los estados originales, y que se han convertido en fuentes de ruido interiores. Como es lógico, los niveles de ruido de fondo registrados cuando funcionaban estos sistemas aumentan ligeramente. Sin embargo, y a pesar de que muchas de estas instalaciones fueron desarrolladas con independencia de los proyectos de rehabilitación,

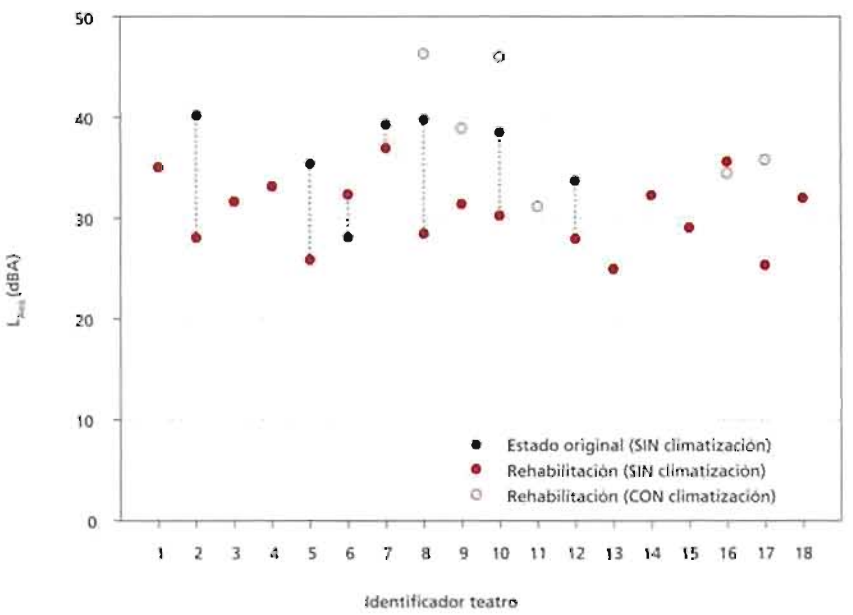


Figura 14. Valoración global del ruido de fondo en los estados original y final (con y sin climatización).

[18] ISO 1996: *Acoustics – Description and measurement of environmental noise.*

[19] De este análisis se ha excluido el T. Victoria por las condiciones en las que se realizó la medición del ruido de fondo.

[20] En el estado original solamente pudieron efectuarse 7 medidas de ruido de fondo.

en la mayoría de los casos no se superaron los niveles recomendables[21]. No obstante, para evitar posibles situaciones molestas, la instalación de equipos y sistemas de climatización en salas de este tipo, debe ser objeto de un estudio específico y coordinado con los técnicos responsables de los proyectos.

OTROS PARÁMETROS DE CUALIFICACIÓN ACÚSTICA

Hemos agrupado bajo este epígrafe los datos correspondientes a un conjunto de parámetros de cualificación, ampliamente aceptados por la comunidad científica especializada, pero que por diversas razones no fue posible medir *in situ*, de modo que los resultados presentados, en general, corresponden a los datos obtenidos mediante las simulaciones informáticas para los teatros rehabilitados. En la organización de la información y la valoración de la misma hemos tenido muy en cuenta los estudios llevados a cabo por Beranek[22].

Los parámetros[23] que se han estimado y valorado son los siguientes:

- Calidez (BR), que valora la reverberación a bajas frecuencias (s).
- Brillo (Br), que valora la reverberación a altas frecuencias (s).
- Claridad de la voz (C_{50}), se utiliza el valor medio ponderado C_{50} *speech average* (dB).
- Claridad musical (C_{80}), se utiliza el valor medio $C_{80}(3)$ (dB).
- Definición (D_{50}), se presentan los valores medios a 1.000 Hz (%).
- Fuerza acústica (G), se muestra el valor medio G_{mid} de las bandas de octava de 500 y 1.000 Hz, con las salas vacías (dB).
- Eficiencia lateral (LF), se utiliza el valor medio LF_4 de las bandas de octava comprendidas entre 125 y 1 kHz (%).
- Coeficiente de correlación cruzada inter-aural (IACC), se determina el coeficiente de correlación medio inicial, $IACC_{E4}$, de las bandas de octava comprendidas entre 500 y 2.000 Hz.

Los valores presentados en las figuras que siguen son los promedios espaciales y corresponden a la hipótesis de "sala ocupada", salvo en el caso de la fuerza acústica (G) que se ha estimado en ausencia de público, ya que en este caso disponemos como valores de referencia los medidos experimentalmente sin público. En todos los casos la variable del eje horizontal es el volumen de la sala. Como ya hemos indicado, las posiciones de los receptores en las simulaciones son las mismas que las utilizadas para las medidas *in situ*.

Calidez

La calidez BR *(Bass Ratio)* es un parámetro que valora la reverberación de una sala a bajas frecuencias. Los resultados obtenidos con este parámetro (Fig. 15) son similares a los establecidos para el tiempo de reverberación. En este sentido, y siguiendo la tendencia general de los resultados, los teatros presentan unos valores de calidez propios de un uso polifuncional.

Tras las rehabilitaciones, las salas muestran valores de calidez comprendidos en el rango 0,90-1,30 s, valores mínimo y máximo recomendables para uso teatral, tal y como se muestra en la misma figura 15. Asimismo, observamos que un gran número de salas se sitúan alrededor del valor 1,10 s, que, según Beranek[24], indica un comportamiento aceptable para su uso como sala de conciertos.

Por otro lado, y salvo la excepción del teatro más pequeño de la muestra (teatro Saavedra), todos los valores de la calidez se sitúan por encima de 1,05 s, valor aconsejado por Hidaka[25] tras sus recientes investigaciones sobre 23 teatros de ópera.

---

[21] Las únicas excepciones en este sentido fueron los teatros Garnelo (Montilla) y de las Cortes (San Fernando), en los que se detectaron problemas de ruido en el funcionamiento de estas instalaciones.

[22] Beranek, L. L. (1996). *Opus cit.*

[23] La definición de cada uno de estos indicadores se detalla en el apéndice 4.1.

[24] Beranek, L. L. (1996). *Opus cit.*, p. 430.

[25] Hidaka, T., y Beranek, L. L. (2000). Objective and subjetive evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (1), pp. 368-383.

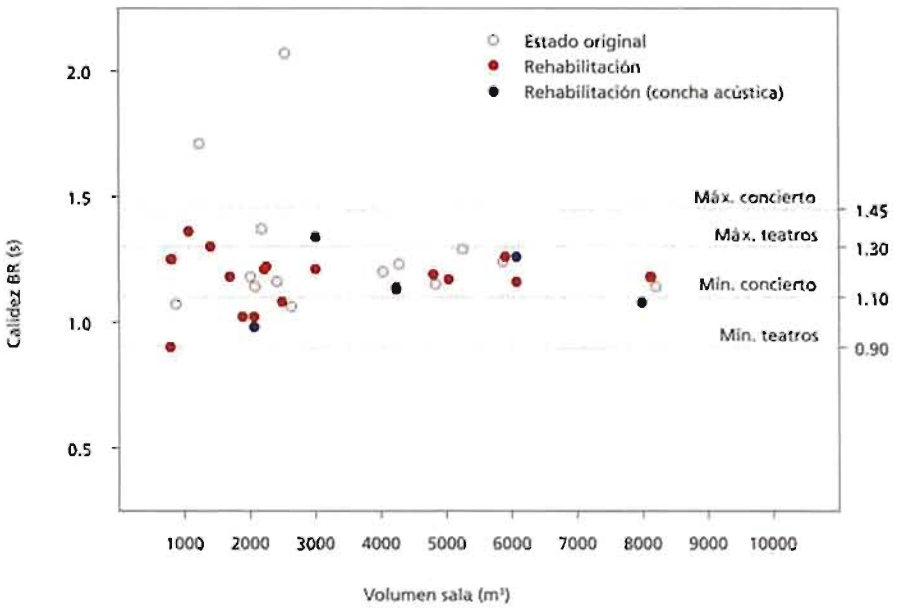


Figura 15. Valores promedio de la calidez simulados, salas ocupadas, frente al volumen.

Brillo

El brillo, de modo análogo a como lo hace la calidez a bajas frecuencias, valora la reverberación de la sala a altas frecuencias. La mayor parte de los valores presentados para el brillo (Fig. 16) se sitúan por encima del valor mínimo recomendado por Beranek[26] para salas ocupadas. Sólo el teatro Villaespesa (0,71 s) y el Gran Teatro de Córdoba con la concha acústica (0,74 s) quedarían por debajo del valor umbral de 0,80 s que recomiendan otros autores[27].

Claridad de la voz

Este parámetro se correlaciona bien con la inteligibilidad del mensaje oral y para la calificación se utiliza el promedio ponderado definido en el apéndice 4.1. De hecho, los resultados obtenidos para la claridad de la voz (C_{50}) tras las simulaciones, ponen de manifiesto su estrecha relación con el índice RASTI. Si se observa la figura 8 del apartado correspondiente, vemos que los valores RASTI medidos *in situ* presentan un comportamiento muy similar al parámetro C_{50} (Fig. 17). Asimismo, y como ocurría con el RASTI, las

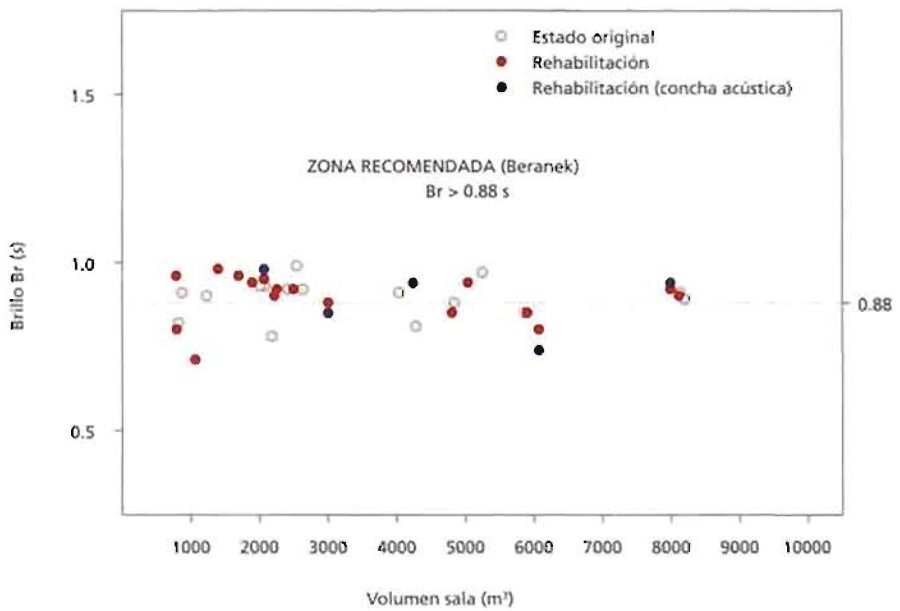


Figura 16. Valores promedio del brillo simulados, salas ocupadas, frente al volumen.

[26] Beranek, L. L. (1996). *Opus cit.*, p. 427.
[27] Arau, H. (1999). *ABC de la Acústica Arquitectónica*. Barcelona: CEAC, p. 263.

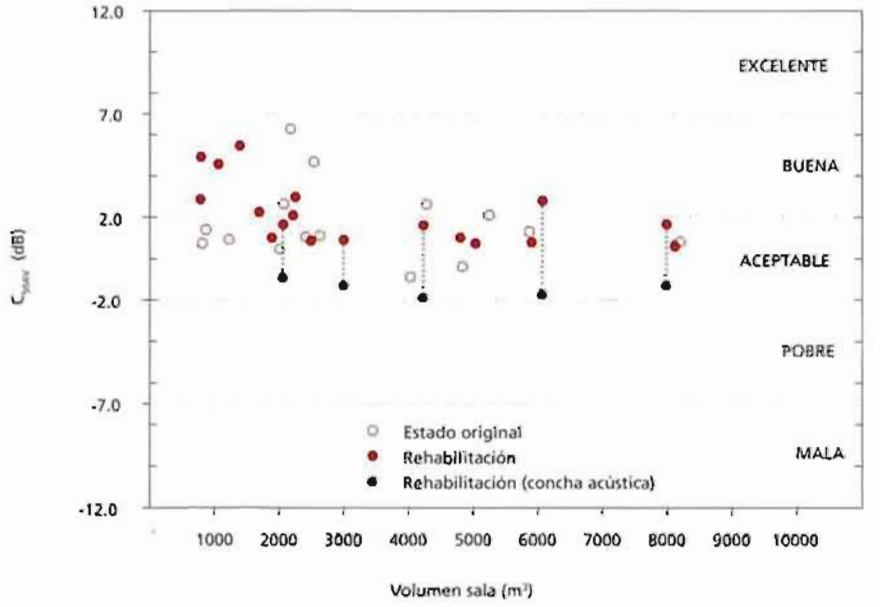


Figura 17. Valores promedio de la claridad de la voz simulados, salas ocupadas, frente al volumen.

salas de menor volumen son las que presentan unos valores de C_{50} más altos (de +2 a +6 dB), permitiendo calificar la inteligibilidad, en función de este índice, como buena. Los valores más bajos de C_{50}, en torno a –2 dB, se han obtenido cuando estaba instalaba la concha acústica en el escenario de los teatros que poseen este equipamiento. A partir de los 2.500 m³, el volumen no muestra una influencia significativa sobre el comportamiento de este parámetro en los teatros de la muestra.

Claridad musical

Este parámetro es análogo a la claridad de la voz, pero se amplía el intervalo de recepción de energía inicial hasta los 80 ms. Se correlaciona bien con la percepción subjetiva de la calidad de la música. Para cualificar el comportamiento de un recinto se suele utilizar el valor promedio de las bandas de octava centrada en 500, 1.000 y 2.000 Hz (ver Apéndice 4.1).

Como puede observarse en la figura 18, los valores de este parámetro se sitúan en el rango recomendado por Marshall[28] para salas de ópera; si bien Hidaka[29] mantiene que la claridad musical en teatros de ópera

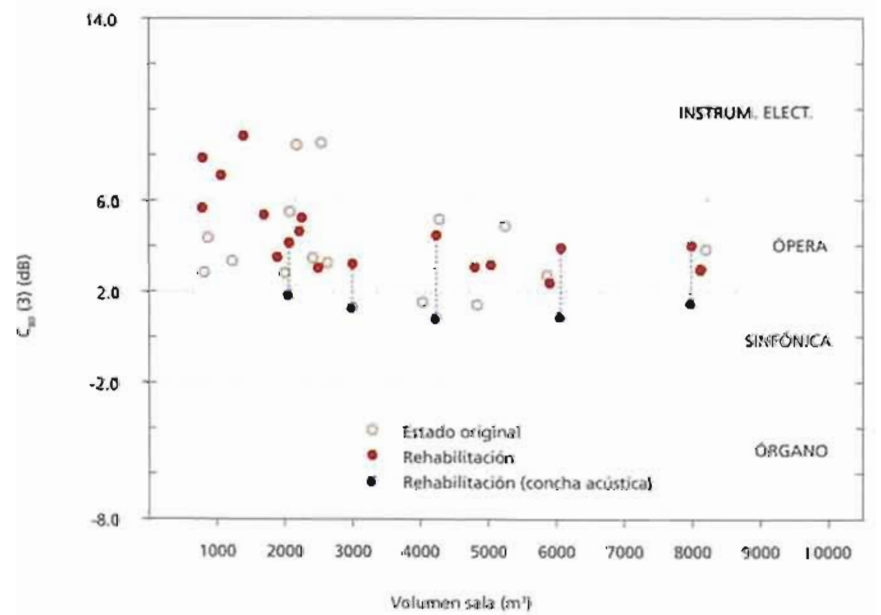


Figura 18. Valores promedio de la claridad musical simulados, salas ocupadas, frente al volumen.

[28] Marshall, L. G. (1994). An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96 (4), pp. 2251-2261.

[29] Hidaka, T. y Beranek, L. L. (2000). *Opus cit.*

debe situarse en el rango comprendido entre 1 y 3 dB. En los teatros andaluces, al tratarse de salas de volúmenes muy inferiores a los de las estudiadas por Hidaka, casi todos los valores superan los 3 dB.

Asimismo, y al igual que ya se observado con otros parámetros, en los teatros más pequeños se obtienen valores más altos de claridad musical. En este sentido, coincidimos con los estudios de Bradley[30], cuyas mediciones mostraban que las salas con mayores tiempos de reverberación, presentaban valores de C_{80} más bajos.

Por otro lado, cuando se instalan las conchas acústicas, los valores simulados se sitúan dentro del rango comprendido entre –2 y +2 dB, adecuados para salas de concierto, según afirman Barron[31] y Marshall[32].

Definición

Puesto que este parámetro está matemáticamente relacionado con la claridad de la voz C_{50} (ver Apéndice 4.1), aunque hemos representado los resultados para D_{50} (Fig. 19), para el análisis de este parámetro nos remitimos a lo comentado en el caso de la claridad de la voz, es decir, salvo las salas de menores volúmenes, todos los teatros se localizan dentro del rango de valores propio de las salas de ópera[33]. Igualmente, como el uso del parámetro D_{50} está indicado para valorar aspectos relacionados con la inteligibilidad de la palabra, en presencia de concha acústica (uso musical) los resultados simulados para el mismo disminuyen sensiblemente, al igual que ocurría con el índice RASTI o con la claridad de la voz C_{50}.

A modo de resumen, la tabla 8 presenta el rango de valores de la claridad de la voz C_{50}, definición D_{50} y claridad musical C_{80} simulado en los estados finales de los teatros andaluces.

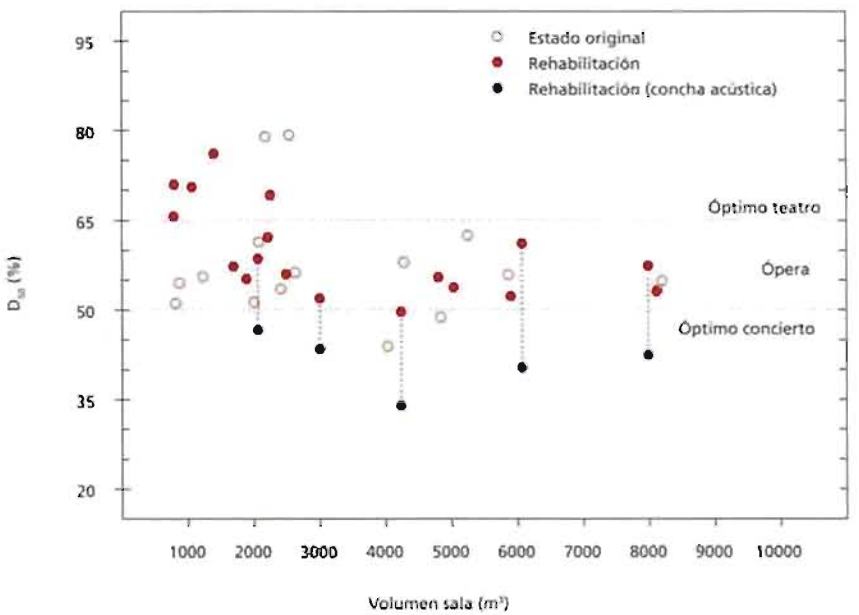


Figura 19. Valores promedio a 1.000 Hz de la definición simulados, salas ocupadas, frente al volumen.

Tabla 8. Rangos de variación de los valores simulados promedio de los parámetros C_{50}, D_{50} y C_{80} en los teatros andaluces

Estado	*Parámetro simulado*		
	C_{50} (dB)	*D_{50} (%)*	*C_{80} (dB)*
Simulado ocupado	0,6 a 5,4	50 a 76	2,3 a 8,8
Simulado ocupado (concha)	–1,9 a –0,9	34 a 47	0,8 a 1,8

[30] Bradley, J. S. (1991). *Opus cit.*
[31] Barron, M. (1993). *Auditorium acoustics and architectural design*. Londres: E & FN Spon and imprint of Chapman & Hall, p. 61.
[32] Marshall, L. G. (1994). *Opus cit.*
[33] Arau, H. (1999). *Opus cit.*, p. 265.

Al igual que ocurría con el índice RASTI, los mejores resultados de los parámetros C_{50}, D_{50} y C_{80} se han obtenido en las salas de volúmenes inferiores a 3.000 m³. Por otro lado, la utilización de concha acústica en la escena, provoca una disminución de la claridad de la voz y de la definición. En contra, la claridad musical alcanza niveles propios de salas de concierto, lo que corrobora la idoneidad de este elemento, a la hora de adecuar estas salas para uso musical.

Fuerza acústica

La fuerza acústica, G, expresada en dB, representa, de alguna manera, el grado de amplificación acústica producido por la sala entre el punto de emisión y el de recepción.

Los valores de G óptimos para un sala de conciertos vacía, según Beranek[34], deben estar comprendidos entre 4 y 5,5 dB. En nuestro caso, solamente los teatros de volúmenes cercanos a los de las salas estudiadas por este autor presentan valores comprendidos en ese rango (Fig. 20).

Como puede verse en la figura 20, las salas más pequeñas, que son las que más se distancian de este comportamiento musical, presentan una gran dispersión en los niveles de sonoridad simulados, con valores sensiblemente superiores a los propuestos por Beranek.

Además, y aunque no encontramos relación entre G y el volumen de las salas de concierto estudiadas por Beranek, en el caso de pequeños y medianos teatros como los de nuestra muestra, se observa una disminución de este parámetro a medida que aumenta el volumen de los mismos. Estos resultados, junto con las características morfológicas y dimensionales de estas salas, nos permiten matizar la propuesta de Beranek, para alcanzar valores de G superiores a 5 dB, sobre todo en salas de volúmenes inferiores a 5.000 m³. Para conseguir tales objetivos, debe cuidarse el diseño de los paramentos que más repercusión tienen sobre las reflexiones iniciales (techos y paredes laterales), y que influyen positivamente sobre este indicador.

Finalmente, puede comprobarse la efectividad de la concha acústica, ya que la sonoridad aumenta sus niveles una media de 2,6 dB, con un mínimo por encima de los 2 dB.

Eficiencia lateral

Se ha demostrado que el parámetro eficiencia lateral, LF, se correlaciona bien con la percepción de la sensación de espacialidad del campo sonoro. Para mejorar su valor se requiere la presencia de reflexiones laterales tempranas. A diferencia de los resultados de Bradley[35] en su análisis de salas de concierto, los da-

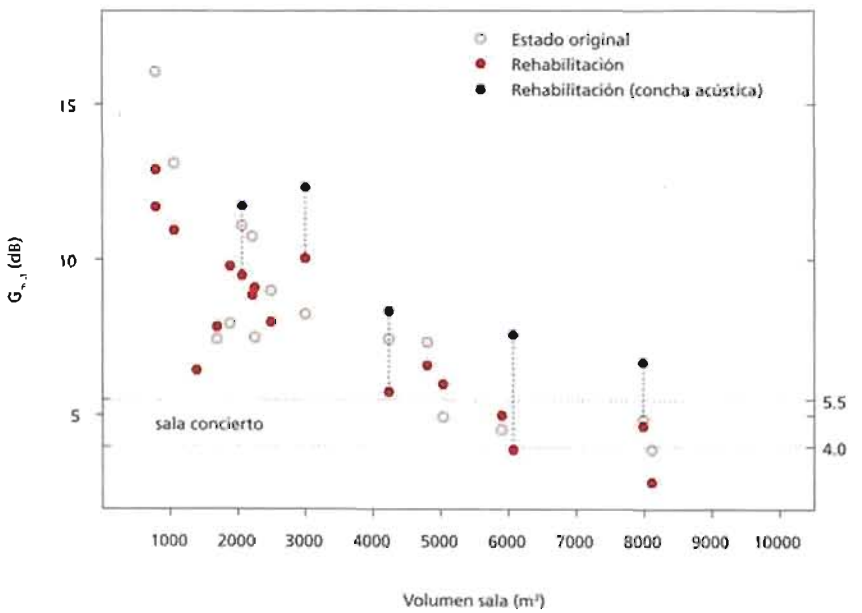


Figura 20. Valores promedio de la fuerza acústica simulados, salas sin público, frente al volumen.

[34] Beranek, L. L. (1996). *Opus cit.*, p. 446.
[35] Bradley, J. S. (1991). *Opus cit.*

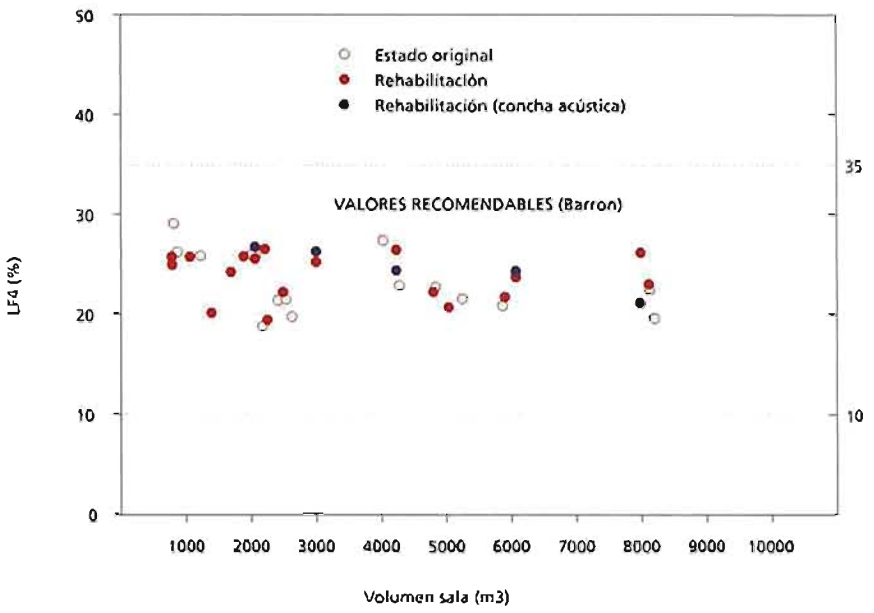


Figura 21. Valores promedio de la eficiencia lateral simulados, salas ocupadas, frente al volumen.

tos medidos en nuestros teatros presentan muy poca dispersión, al menos en lo que se refiere a los valores promedio. La eficiencia lateral de los teatros andaluces, tanto en su estado original como final, se sitúa entre el 20 y 30%. Además, este comportamiento parece independiente del volumen de las salas (Fig. 21).

Como muestra la figura 21, el uso de la concha acústica apenas altera los valores de la eficiencia lateral. Asimismo, y aunque la figura no presenta los valores de LF con las salas vacías, coincidimos con los resultados dados por Bradley[36], ya que este parámetro no sufre grandes cambios en presencia o ausencia de público en las salas.

Coeficiente de correlación cruzada inter-aural

El coeficiente de correlación cruzada inter-aural (IACC) es una medida del grado de similitud entre las señales percibidas por cada uno de los oídos, y está relacionado con la percepción de espacialidad del campo sonoro en una sala. Cuando las señales percibidas en ambos oídos son iguales, el coeficiente de correlación cruzada inter-aural es igual a 1. Por el contrario, si las señales son totalmente distintas el IACC vale 0.

En auditorios y salas de concierto es recomendable obtener altos valores de este índice.

Para las características morfológicas y dimensionales de los teatros andaluces, una vez rehabilitados, el coeficiente de correlación cruzada inter-aural medio ($IACC_{E3}$) está entre 0,25 y 0,40. Como puede observarse en la figura 22, la influencia de la concha acústica es despreciable sobre el IACC.

La tabla 9 muestra los valores simulados de la eficiencia lateral (LF_4) y del coeficiente de correlación cruzada inter-aural medio inicial ($IACC_{E3}$), ambos parámetros relacionados con la sensación de espacialidad del sonido en una sala.

Tabla 9. Rangos de valores simulados de los parámetros LF_4 e $IACC_{E3}$ en los teatros andaluces

Estado	*Parámetro simulado*	
	LF_4 (%)	*$IACC_{E3}$*
Simulado ocupado	19,4 a 26,5	0,25 a 0,39
Simulado ocupado (concha)	21,1 a 26,7	0,26 a 0,33

[36] Bradley, J. S. (1991). *Opus cit.*

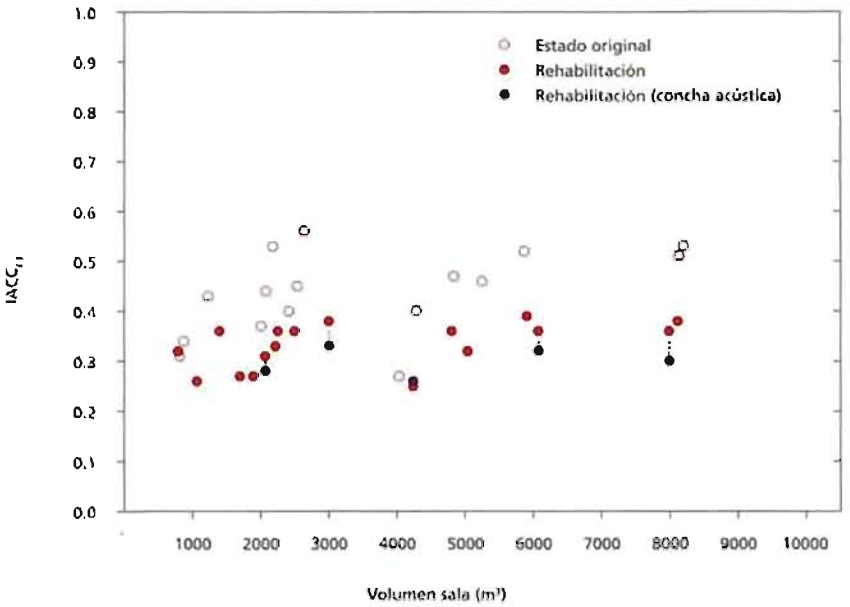


Figura 22. Valores promedio simulados del coeficiente de correlación cruzada inter-aural inicial, salas ocupadas, frente al volumen.

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

En acústica de salas se utilizan una serie de indicadores, de tipo genérico, que relacionan entre sí magnitudes geométricas de los recintos, y que permiten cualificarlos por comparación con los obtenidos en una amplia muestra representativa de teatros y salas de conciertos cuya acústica se considera buena.

En este apartado se presentan los valores de algunos de estos parámetros y se comparan con los obtenidos en la muestra representativa de teatros de ópera estudiados por Beranek.

Los parámetros utilizados[17] corresponden a las siguientes relaciones:

- Volumen sala / número de plazas (V_1/N).
- Volumen sala / superficie acústica efectiva de audiencia (V_1/S_A).
- Volumen sala / superficie total para teatros de ópera (V_1/S_{to}).
- Superficie acústica efectiva de audiencia / número de plazas (S_A/N).

Las figuras siguientes muestran los valores de estos indicadores tras las rehabilitaciones de cada teatro, así como las correlaciones existentes, puestas de manifiesto, en general, mediante la correspondiente recta de regresión tomando como variable independiente el $\log V_1$. Asimismo, se han incorporado los resultados de Beranek a efectos comparativos.

Cuando comparamos nuestros valores con los resultados obtenidos en la muestra representativa de teatros de ópera de acústica contrastada, vemos que las salas presentan unas relaciones similares para volúmenes de sala superiores a 5.000 m³, aproximadamente. En cambio, para las salas más pequeñas, aunque aparece una correlación lineal, la recta de regresión muestra, en general, una pendiente menor. De hecho, esto ha permitido proponer nuevas rectas de regresión para el conjunto de indicadores: volumen/plaza (V_1/N), volumen/área de audiencia (V_1/S_A) y volumen/área total en teatros de ópera (V_1/S_{to}), que pueden ser utilizadas como herramienta inicial de predimensionado en este tipo de recintos.

Se escriben a continuación las ecuaciones de las rectas de regresión que relacionan los indicadores V_1/N, V_1/S_A y V_1/S_{to}, obtenidas para la muestra de teatros andaluces rehabilitados:

$$N = -1.399 + 546 \cdot \log V_1$$

$$S_A = -978 + 373 \cdot \log V_1$$

$$S_{to} = -1.190 + 446 \cdot \log V_1$$

[17] La notación y definiciones para estos parámetros se muestran en el apéndice 4.1.

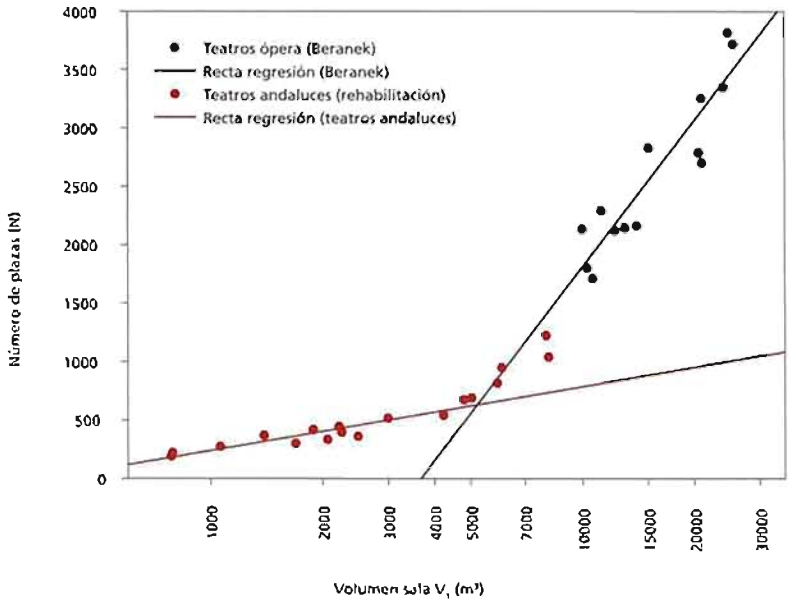


Figura 23. Correlación N-V_t para los teatros andaluces, tras la rehabilitación, y para las salas analizadas por Beranek.

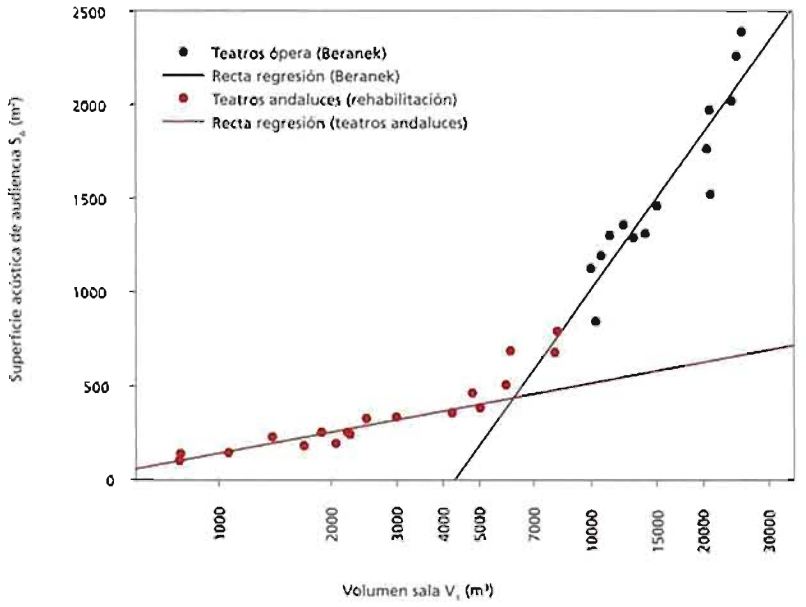


Figura 24. Correlación S_a-V_t para los teatros andaluces, tras la rehabilitación, y para las salas analizadas por Beranek.

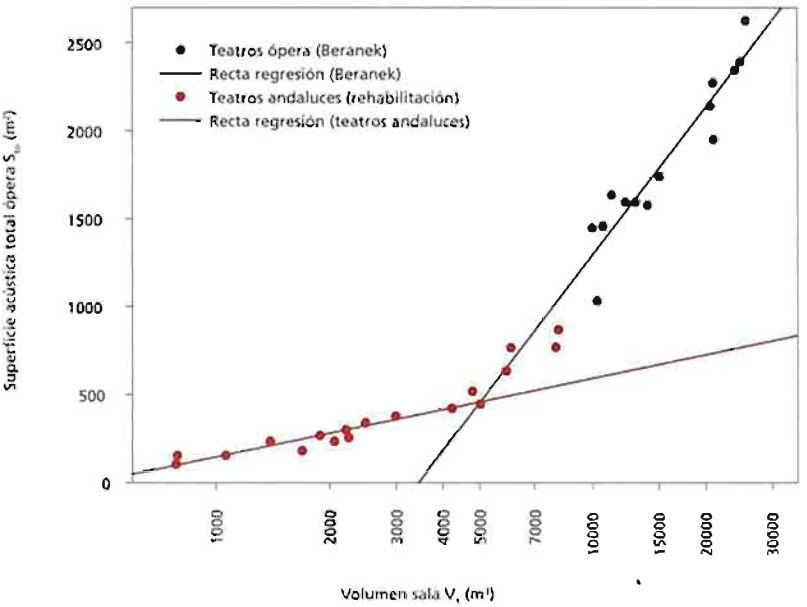


Figura 25. Correlación S_{to}-V_t para los teatros andaluces, tras la rehabilitación, y para las salas analizadas por Beranek.

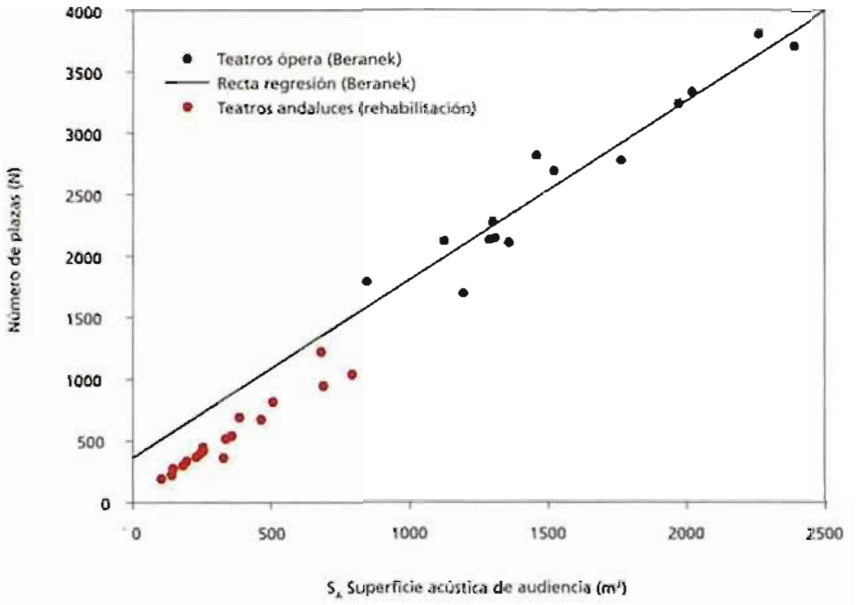
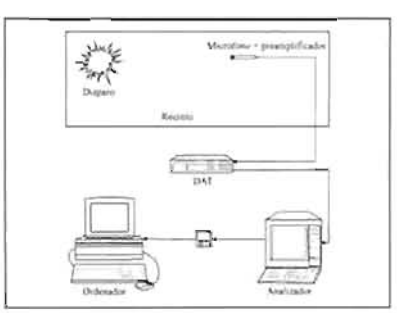


Figura 26. Correlación N-S_A para los teatros andaluces, tras la rehabilitación, y para las salas analizadas por Beranek.

donde N es el aforo total de las salas, S_A la superficie acústica efectiva de audiencia (m^2), S_{ta} la superficie acústica efectiva total en teatros de ópera (m^2) y V_1 el volumen de la sala (m^3).

A diferencia de las relaciones anteriores, el indicador S_A/N (Fig. 26), sigue la tendencia de los grandes teatros de ópera, con lo que sus proporciones parecen válidas para nuestra muestra.

4. APÉNDICES



4.1. CONCEPTOS DE ACÚSTICA DE SALAS

TEORÍAS PARA DESCRIBIR EL CAMPO ACÚSTICO EN RECINTOS

Es evidente que cuando se emite y recibe un mensaje en el interior de un recinto, éste (canal de transmisión) tiene una influencia significativa sobre la calidad del mismo. Los cambios que el campo acústico experimenta pueden ser útiles y perjudiciales a la vez, desde el punto de vista de la percepción auditiva. La reverberación que acompaña a cada impulso de una señal irregular (palabra o música) puede ser útil siempre que la duración sea la adecuada, escuchándose la palabra más clara y la música más animada. El análisis del campo sonoro se nos presenta como una cuestión primordial si se quiere conocer el comportamiento acústico del recinto. Este análisis se puede realizar adoptando diferentes puntos de vista a la hora de abordar el comportamiento del sonido en el interior del espacio. Ello nos conduce a las diversas teorías acústicas que habitualmente se utilizan para describir este comportamiento: la teoría estadística, la ondulatoria y la geométrica. A continuación presentamos brevemente las bases de cada una de ellas, señalando sus ventajas, inconvenientes y limitaciones.

TEORÍA ESTADÍSTICA

De la misma forma que la energía de una fuente sonora se radia en todas las direcciones, las ondas reflejadas que concurren y se propagan desde cualquier posición dentro de un recinto también viajan en todas las direcciones posibles. Las fases de las ondas que llegan a cada punto puede considerarse que están distribuidas de una forma aleatoria. Esto permite determinar la energía en cualquier posición de un recinto, sin tener en cuenta los retardos de fase, como los valores medios de la energía de las ondas reflejadas que simultáneamente coinciden en ella.

Las combinaciones de fenómenos aleatorios que tienen propiedades comunes, tales como las combinaciones de las reflexiones que alcanzan cada punto del local, se estudian mediante la matemática estadística, basada en la teoría de la probabilidad. El método estadístico no describe la física asociada al fenómeno; sin embargo, su ventaja consiste en que, mediante unas matemáticas sencillas, basadas en datos de los resultados del proceso, es posible obtener unas conclusiones objetivas de los aspectos cuantitativos del fenómeno, así como de sus posibles efectos. Para ello se idealiza el campo acústico en el interior en base a las siguientes proposiciones:

- Las ondas reflejadas llegan a todos los puntos del interior del recinto desde diferentes direcciones, siendo todas las direcciones igualmente probables.
- La energía sonora, en un punto del recinto, se obtiene sumando los valores de las energías de todas las ondas reflejadas que coinciden en dicho punto cada instante.
- La densidad de energía sonora, en un instante cualquiera, debe ser la misma en todo punto del recinto.

Un campo que cumpla con estas condiciones se conoce como campo sonoro difuso. La teoría estadística no descubre los detalles intrínsecos del fenómeno[1] por lo que no será capaz de dar una explicación adecuada de todos los fenómenos acústicos que podemos observar en el interior de los recintos.

[1] Recuero, M. y Gil, C. (1993). *Acústica arquitectónica* (2ª ed.). Madrid: Izquierdo, S.A., p. 28.

TEORÍA GEOMÉTRICA

La teoría geométrica hace una descripción muy simplificada del campo sonoro; se emplea con mayor precisión en el caso límite de longitudes de onda muy pequeñas, es decir, frecuencias muy altas. Esta consideración es correcta si las dimensiones de la sala y las de sus paredes son grandes comparadas con la longitud de onda del sonido.

En la teoría geométrica el concepto de onda se reemplaza por el de rayo sonoro. Éste es una idealización, como puede serlo el de onda plana. Como en óptica geométrica, entendemos por rayo sonoro una parte pequeña de una onda esférica, con abertura despreciable, que se origina en un cierto punto, tiene una dirección de propagación muy definida y está sujeta a las mismas leyes de propagación del rayo luminoso (aparte de la velocidad). De estas leyes, sólo la ley de la reflexión es de significativa importancia en la acústica de salas:

- El rayo incidente, el reflejado y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano.
- El ángulo de incidencia, formado por el rayo incidente y la normal, es igual al de reflexión, formado por la normal y el rayo reflejado.

Si el medio es homogéneo los rayos se propagan en línea recta. Si existen gradientes de densidad producidos, por ejemplo, por un gradiente térmico, el medio deja de ser homogéneo y los rayos se curvan. Sí ha de considerarse, con todas sus consecuencias, la velocidad finita de propagación, ya que es responsable de muchos efectos importantes tales como reverberación, ecos, etcétera.

Se desprecian los fenómenos de difracción y no se consideran los fenómenos de interferencia entre ondas; de tal modo que, si diferentes rayos coinciden en un punto, sus fases respectivas no se tienen en cuenta, y por tanto, su intensidad o densidad de energía es la suma de las de cada uno de ellos. Esto es posible si se considera que las componentes son incoherentes entre sí, lo que resulta plausible si tenemos en cuenta que los sonidos que se propagan en un recinto tienen un espectro complejo.

Por otra parte, si se desprecia la disipación del medio, la energía transportada por los rayos se mantiene constante; sin embargo, su intensidad disminuye, como en las ondas esféricas, con la inversa del cuadrado de la distancia.

Mediante la geometría, se puede determinar la trayectoria de los rayos sonoros, medir los recorridos que realizan, tanto el sonido directo como el reflejado, la incidencia de los rayos sobre las superficies límites del recinto y las pérdidas de energía derivadas de la absorción de los materiales de revestimiento.

La teoría geométrica es la base de los modelos ópticos, en los que se emplean maquetas de los recintos, a escala, y rayos (luminosos y láser) que simulan las ondas sonoras.

En la actualidad, estos últimos han sido desplazados por numerosos programas informáticos de simulación, que permiten prever y analizar las propiedades acústicas de una sala antes de ser construida. Mediante los algoritmos informáticos se estudia el comportamiento acústico del recinto, no sólo desde un punto de vista cualitativo, sino incluso de forma cuantitativa, como se ha expuesto en este trabajo.

TEORÍA ONDULATORIA

La acústica ondulatoria tiene en cuenta el comportamiento físico real de carácter ondulatorio del sonido y se basa en la resolución de la ecuación diferencial de ondas en cada sala, introduciendo sus condiciones específicas de contorno, tanto geométricas (forma) como físicas (propiedades acústicas de los materiales en su interior).

La teoría ondulatoria considera la sala como un sistema, que al ser excitado por la fuente, se comporta como un resonador complejo. Éste posee múltiples modos normales de vibración, cada uno con una frecuencia característica, denominada frecuencia propia de vibración y que depende de la geometría y dimensiones del recinto y de las características de sus superficies límites. Como consecuencia, las ondas estacionarias generadas en el interior del local, dan lugar a una distribución espacial heterogénea del campo acústico. Puede ayudarnos a entenderlo si lo comparamos con la vibración de una cuerda de guitarra cuando la pulsamos: en los puntos de amarre los desplazamientos de la misma son nulos, de modo que sólo las

frecuencias cuya longitud de onda sea una fracción entera de la longitud de la cuerda podrán establecerse en la misma. En el caso del recinto, el valor de la velocidad de las partículas del aire en contacto con las paredes debe ser nula, lo que a su vez implica que el valor de la presión alcance el valor máximo y la longitud de onda guardará con la dimensión del recinto la misma relación que la indicada antes para la cuerda de la guitarra.

La solución de la ecuación de onda para recintos de forma compleja puede resultar enormemente complicada, lo cual implica que esta teoría sólo puede ser aplicada a un escaso número de situaciones, en gran parte idealizadas. Aparte de que, conocer con detalle las propiedades de los innumerables modos propios que se forman en un recinto, resulta inútil para valorar la percepción del mensaje, si tenemos en cuenta el comportamiento del sistema auditivo humano frente a la frecuencia.

Aunque su aplicación práctica como vemos es muy limitada, una comprensión de esta teoría es esencial para explicar ciertos problemas que surgen en la acústica de salas, tales como la variación de la respuesta de un determinado altavoz al situarlo en recintos distintos, o bien la existencia de máximos y mínimos del nivel de presión sonora en un recinto excitado por una señal estacionaria.

Otro aspecto en el que hay que tener en cuenta el carácter ondulatorio de las ondas sonoras aparece cuando hay que considerar los fenómenos de difracción, muy importantes cuando se utilizan pantallas acústicas.

REVERBERACIÓN

Tiempo de reverberación: ecuación de Sabine

El tiempo de reverberación de un recinto (RT), a una frecuencia determinada, se define como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que cesa la emisión de la fuente sonora hasta el instante en el que el nivel de presión acústica cae 60 dB con respecto a su valor inicial o, lo que es lo mismo, que la intensidad sonora estacionaria se reduzca a la millonésima parte de su valor en el estado estacionario.

La expresión más utilizada para la previsión del tiempo de reverberación, y aceptada como de referencia a nivel internacional, es la denominada ecuación de Sabine, obtenida por el físico americano Wallace Clement Sabine, tras sus investigaciones a finales del siglo XIX.

La expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y sin tener en cuenta la absorción producida por el aire, es la siguiente:

$$RT(s) = 0{\cdot}161 \cdot \frac{V}{A_t} \qquad [1]$$

donde V es el volumen de la sala (m^3) y A_t la absorción sonora total del recinto (m^2 o sabinios métricos)[2].

El modelo experimental de Sabine se basaba en las siguientes hipótesis de trabajo:

a) La densidad de la energía sonora es homogénea en todos los puntos de la sala, por lo que la duración de la extinción sonora tendrá el mismo valor en cualquier punto.
b) Sabine parte de un recinto esférico de superficie homogénea, con lo que se supone igual eficacia de un absorbente en la reducción del sonido audible, en todos los puntos del recinto.
c) Como consecuencia de lo anterior, el tiempo de reverberación es independiente de la ubicación de la fuente.

Tiempo de reverberación medio

Según se desprende de la definición del tiempo de reverberación, éste depende de la frecuencia del sonido, entre otras cosas porque la absorción de los materiales no es la misma para todas las frecuencias.

[2] El sabinio métrico se define como la absorción sonora de una superficie de un metro cuadrado y coeficiente de absorción la unidad (por ejemplo una ventana de 1 m^2 completamente abierta).

Cuando se quiere caracterizar un local con un único valor del tiempo de reverberación se utiliza RT_{mid} que es la media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de octava de 500 y 1.000 Hz, es decir:

$$RT_{mid} = \frac{RT(500\,Hz) + RT(1\,kHz)}{2} \qquad [2]$$

Absorción sonora

La energía acústica total que incide sobre las superficies delimitadoras del volumen de un recinto se puede descomponer según el siguiente balance energético:

$$E_i = E_r + E_t + E_d \qquad [3]$$

donde E_i es la energía sonora total incidente, E_r la fracción de energía sonora reflejada hacia el interior, E_t la fracción de energía acústica transmitida al otro lado del cerramiento y E_d la fracción de energía sonora disipada en el interior del cerramiento.

El valor de $E_t + E_d$ constituye la energía absorbida por el cerramiento. Si dividimos la ec. [3] por E_i podemos escribir:

$$1 = \alpha + r \qquad [4]$$

donde:

$$\alpha = \frac{E_i + E_r}{E_i} = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}}$$

se denomina coeficiente de absorción del cerramiento y,

$$r = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\text{Energía reflejada}}{\text{Energía incidente}}$$

es el coeficiente de reflexión del mismo.

Si un recinto está delimitado por distintas superficies de revestimiento, la absorción total será la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, es decir:

$$A_t = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \ldots + \alpha_n S_n = \sum_{i=1}^{n} \cdot \qquad [5]$$

donde: α_i es el coeficiente de absorción de cada material y S_i las superficies correspondientes.

Con todo lo anterior, el coeficiente de absorción medio de un recinto se puede expresar de la siguiente forma:

$$\bar{\alpha} = \frac{A_t}{S_t} \qquad [6]$$

donde A_t es la absorción total del recinto y $S_t = S_1 + S_2 + \ldots + S_n$ su superficie total.

Difusión sonora

Se dice que un elemento es difusor cuando la energía acústica que incide sobre él no se refleja especularmente, sino que la fracción de energía reflejada es dispersada, de forma más o menos uniforme en todas las direcciones posibles.

La difusión sonora contribuye a crear un sonido envolvente y, por tanto, aumenta el grado de espacialidad en la sala, ya que la energía llega a los oídos de los espectadores desde todas las direcciones del espacio.

Para caracterizar los cerramientos respecto de este comportamiento, en las simulaciones acústicas se suele introducir un coeficiente (δ) determinado empíricamente como:

$$\delta = \frac{\text{Energía reflejada en direcciones no especulares}}{\text{Energía total reflejada}} \quad [7]$$

Así pues, si un elemento difusor refleja el 75% de la energía en su dirección especular y el 25% en otras direcciones, decimos que tiene un coeficiente de difusión $\delta = 0{,}25$.

Como este coeficiente contiene información de cuánta energía se difunde, pero no de cómo se reparte en las diferentes direcciones no especulares, se suele aceptar la ley de Lambert, en la que se supone que la energía difusa dispersada en cada dirección es proporcional al coseno que ésta forma con la normal a la superficie.

Absorción del aire

Además de la absorción sonora en las superficies interiores de una sala, la propagación de una onda por el aire somete a las moléculas del mismo a una vibración alrededor de su posición de equilibrio. En este movimiento vibratorio la onda tendrá que vencer la viscosidad propia del aire como fluido, la cual depende de la humedad relativa del mismo. Estos fenómenos provocan una disipación de la energía sonora en energía térmica y, por consiguiente, una absorción de la misma.

Para calcular la absorción sonora del aire se utiliza la fórmula:

$$A_a = 4mV \quad [8]$$

donde m es la constante de atenuación del sonido en el aire (m^{-1}) y V el volumen del recinto (m^3). Según Cremer[3] la constante de atenuación del sonido, para las condiciones de humedad habituales en recintos habitados, se puede determinar mediante la expresión:

$$m = \frac{[1-(\vartheta-20)\cdot 0.04]\cdot f^2}{\phi}\cdot 17\cdot 10^{-9} \quad [9]$$

donde ϑ es la temperatura del aire (°C), f la frecuencia central de cada una de las bandas de octava (Hz) y ϕ la humedad relativa del aire (%). Como vemos, la absorción producida por el aire crece con la frecuencia y con el volumen del recinto. En condiciones normales de diseño, solamente es significativa en recintos de grandes dimensiones (directamente proporcional al volumen) y para frecuencias superiores a 2.000 Hz.

La fórmula de Sabine corregida, al tener en cuenta la absorción debida al aire, se escribirá:

$$RT(s) = 0.161\cdot\frac{V}{A_t + 4mV} \quad [10]$$

EDT *Early Decay Time*

El tiempo de reverberación inicial EDT de un recinto, a una frecuencia determinada, se define como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que cesa la emisión de la fuente sonora hasta el instante en el que el nivel de presión sonora cae 60 dB, calculado según la pendiente correspondiente a los primeros 10 dB de la caída.

---

[3] Cremer, L., Müller, H. A. y Schultz, T. J. (1955). *Principles and applications of Room Acoustics*. Volumen 1. Londres: Applied Science Publishers, p. 213.

En la hipótesis de un recinto con una distribución uniforme y homogénea de los materiales de revestimiento, la caída de la energía sonora seguiría una evolución exponencial pura (línea recta en escala semilogarítmica). En esta situación ideal no habrá ninguna diferencia entre los valores de RT y del EDT. Cuando la distribución de absorción no es uniforme, los valores del EDT suelen ser, generalmente, bastante diferentes que los del RT.

El EDT de una sala está más relacionado con la impresión subjetiva de la reverberación que el tradicional RT. Por ello, las salas con valores de EDT significativamente menores que los RT, resultarán desde un punto de vista subjetivo más apagadas para la música, pero más inteligibles para la palabra.

Los valores recomendados del EDT, según H. Arau[4], son los siguientes (Tabla 1).

Tabla 1. Valores óptimos de EDT

Uso de la sala	*EDT (s)*
Teatro	$0{,}60 \cdot RT_{mid} \leq EDT \leq 0{,}75 \cdot RT_{mid}$
Ópera	$0{,}75 \cdot RT_{mid} \leq EDT \leq 1{,}00 \cdot RT_{mid}$
Sala concierto	$0{,}90 \cdot RT_{mid} \leq EDT \leq 1{,}00 \cdot RT_{mid}$

Curva tonal

Cuando se quiere dar una descripción más detallada de la reverberación de un recinto, se suelen representar los valores de RT (en bandas de octava o $^1/_3$ de octava) frente a las frecuencias centrales de las bandas en eje logarítmico. La curva que une estos puntos se suele denominar curva tonal del recinto (Fig. 1). En acústica arquitectónica, se suelen emplear las bandas de octava centradas en las frecuencias de 125, 250, 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz, pues cubren la mayor parte del espectro audible (sonidos graves, medios y agudos).

Tiempos de reverberación óptimos

El tiempo de reverberación de una sala es el indicador por excelencia de su comportamiento acústico, al ser el más expresivo en términos globales. El ajuste de este parámetro dentro de un intervalo de valores, para cada frecuencia, es condición indispensable para lograr una buena acústica de la misma.

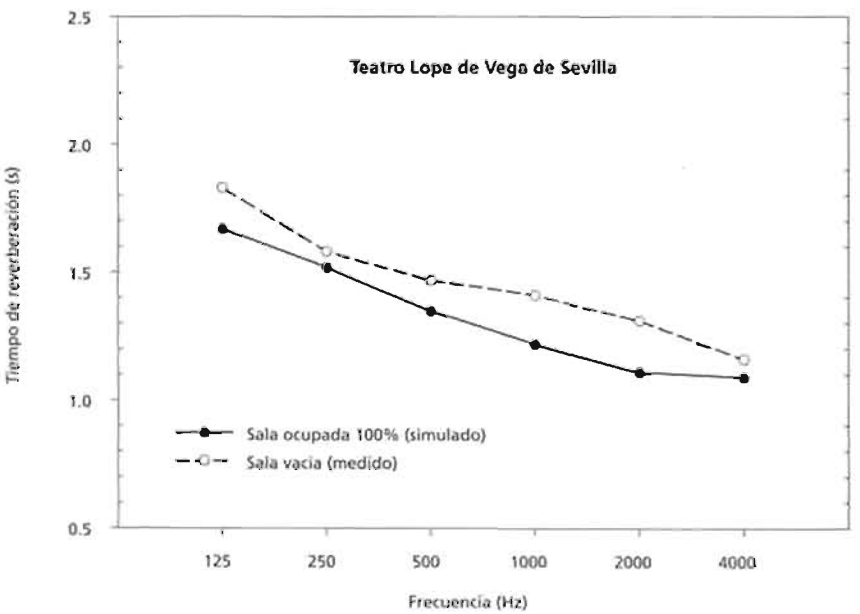


Figura 1. Curvas tonales de un teatro.

[4] Arau, H. (1999). *ABC de la Acústica Arquitectónica*. Barcelona: CEAC, p. 264.

La determinación de la curva tonal óptima de un local se basa en apreciaciones experimentales, basadas en la opinión y el gusto de los oyentes, además de en condiciones objetivas en las que se ha observado que el tiempo de reverberación óptimo depende, fundamentalmente, de los siguientes aspectos:

- Uso del recinto.
- Dimensiones del mismo.
- Naturaleza de la fuente sonora (música, palabra...).
- Tipo de obra musical.

Estas observaciones han permitido elaborar una serie de ábacos y fórmulas empíricas que permiten estimar el tiempo de reverberación óptimo, en función del volumen y del uso del recinto.

En la investigación que nos ocupa, se han utilizado las aportaciones de diferentes autores y fuentes, de las cuales destacamos las siguientes:

Propuesta de Knudsen y Harris[5] (1950)

Knudsen propone tiempos de reverberación óptimos, a la frecuencia de 500 Hz, para tres usos principales: música, palabra y cine. Dentro del uso musical se distinguen, a su vez, tres casos: música de cámara, concierto y de iglesia. Las ecuaciones que permiten obtener el RT óptimo a la frecuencia de 500 Hz, en función del volumen, son de la forma:

$$RTopt_{500} = a + b \cdot \log V \qquad [11]$$

donde *a* y *b* son constantes que dependen del uso y V es el volumen de la sala (m^3).

A otras frecuencias, los valores de RT se obtienen multiplicando el valor obtenido a 500 Hz por un coeficiente "R" que depende de la frecuencia:

$$RTopt_f = RTopt_{500} \cdot R \qquad [12]$$

En la tabla 2 aparecen los valores de R.

Knudsen admite que es aceptable una desviación de hasta el 10% de los valores finales de RT respecto de éstos. La figura 2 presenta los RT óptimos (500 Hz) correspondiente a salas de concierto (media musical), ópera y palabra en función del volumen de la sala.

Propuesta de Leo L. Beranek[6] (1954)

Beranek propone un ábaco donde se presentan los tiempos de reverberación óptimos en función del volumen, a la frecuencia de 500 Hz, para cinco usos distintos: iglesia, sala de conciertos, ópera, sala de conferencias o cine y estudios para la palabra.

En la figura 3 se muestran los RT óptimos sugeridos por este autor para los usos de sala de conciertos, teatros de ópera y sala de conferencias (cine), en función del volumen.

Tabla 2. Valores del coeficiente R(f) de Knudsen

Frecuencia (Hz)	*R*
$100 < f \leq 500$	$1 < R \leq 1{,}52$
$f \geq 500$ Hz	$R = 1$

[5] Knudsen, V. O. y Harris, C. M. (1988). *Acoustical designing in Architecture* (5ª ed.). Nueva York: Acoustical Society of America, pp. 171-174.

[6] Beranek, L. L. (1993). *Acoustics*. Nueva York: Acoustical Society of America, p. 425.

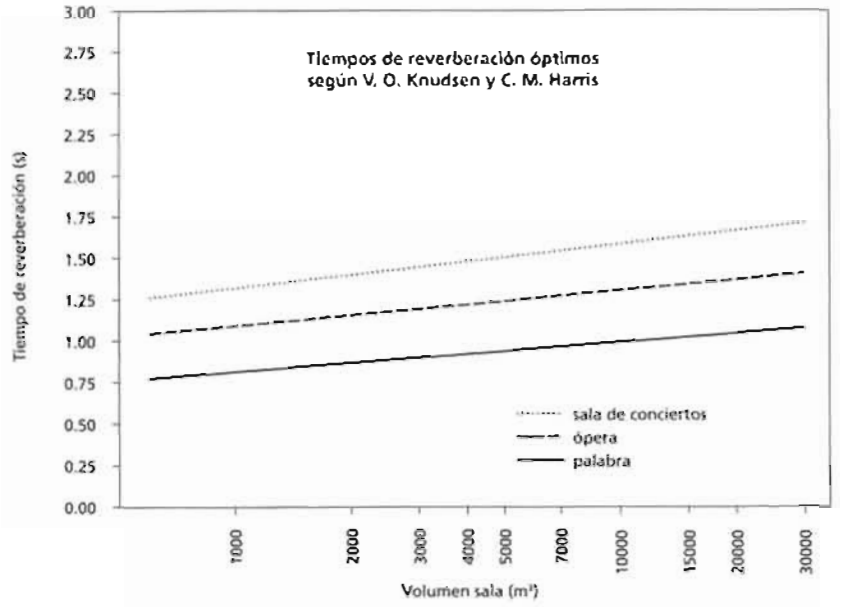


Figura 2. RT_{opt} propuestos por Knudsen y Harris.

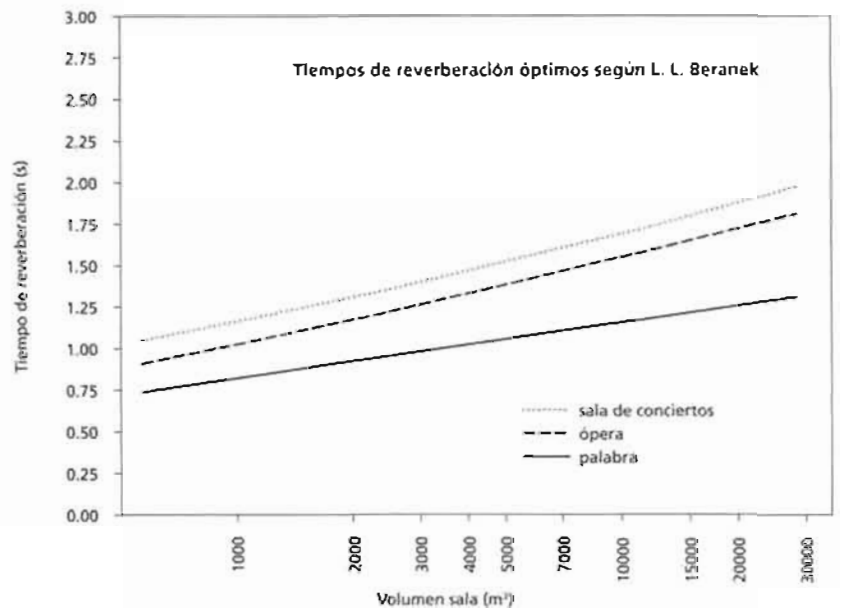


Figura 3. RT_{opt} propuestos por L. L. Beranek.

Propuesta de L. Conturie[1] *(1955)*

Conturie se basa en la teoría del decrecimiento constante de la energía sonora (directa y reverberante) dentro de los recintos, para establecer una ecuación que determina el tiempo de reverberación óptimo en función del volumen. Para la frecuencia de 500 Hz el RT_{opt} vale:

$$RTopt_{500} = K \cdot V^{1/3} \qquad [13]$$

donde V es el volumen de la sala (m^3) y K una constante que depende del uso y cuyos valores se muestran en la tabla 3.

Para determinar el RT_{opt} a otras frecuencias, el autor facilita una gráfica para tres volúmenes de salas (300, 3.000 y 30.000 m^3). Para frecuencias superiores a 500 Hz el tiempo de reverberación óptimo permanece invariable, ya que la corrección por frecuencia se realiza solamente para los sonidos graves.

[1] Conturie, L. (1955). *L'Acoustique dans les batiments. Théorie et applications*. Paris: Éditions Eyrolles, pp. 71-74.

Tabla 3. Valores de la constante K de Conturie	
Uso del local	*K (constante)*
Iglesia	0,10
Sala de concierto	0,09
Teatro y sala de conferencias	0,075

La figura 4 muestra, en función del volumen, los tiempos de reverberación óptimos (500 Hz) correspondientes a los usos de sala de concierto y palabra.

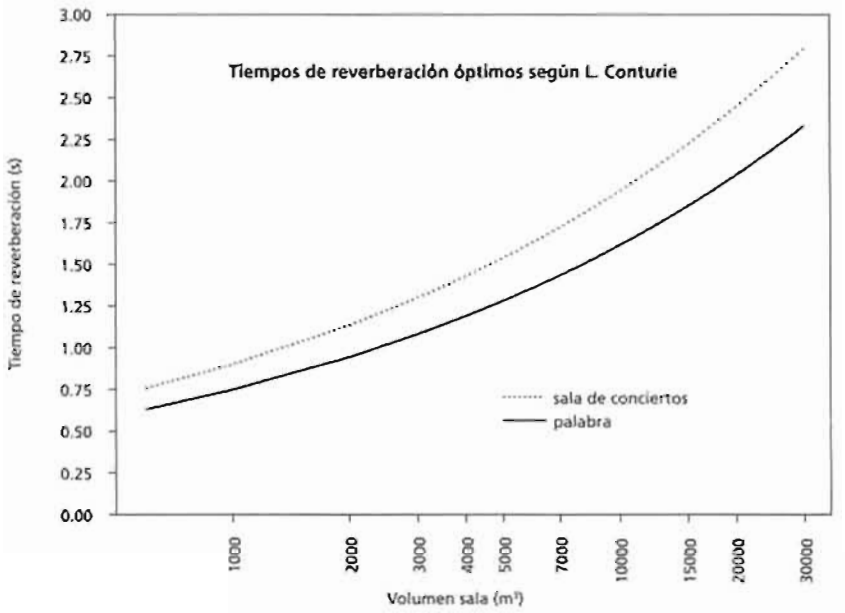


Figura 4. RT_{opt} propuestos por L. Conturie.

Propuesta de Pérez Miñana[8] *(1969)*

De forma similar al método de Conturie, Pérez Miñana elabora una fórmula empírica para fijar los tiempos de reverberación óptimos en un recinto:

$$T_{opt} = k \cdot u \cdot i \cdot V^{1/3} \qquad [14]$$

donde k es un coeficiente que depende de la frecuencia, u pondera el uso al que se destina la sala, i valora la existencia (o no) de apoyo electroacústico y V es el volumen del local (m^3).

Los valores recomendados para estos coeficientes se muestran en la tabla 4.

Asimismo, en la figura 5 se representan, en función del volumen, los valores correspondientes a los usos de salas de concierto, música de ópera y palabra.

Propuesta de L. Cremer[9] *(1978)*

A diferencia de Beranek, Cremer obtiene una banda óptima de tiempos de reverberación, en función del volumen, delimitada por una curva superior y otra inferior (valores máximos y mínimos), que permite una tolerancia en los valores obtenidos. De esta forma, se proponen cuatros gráficas que corresponden a los siguientes usos: sala de conferencias, teatros de ópera, salas de conciertos e iglesias.

[8] Pérez Miñana, J. (1969). *Compendio práctico de Acústica*. Barcelona: Labor, S.A., pp. 319-428.
[9] Cremer, L., Müller, H. A. y Schultz, T. J. (1982). *Opus cit.*, pp. 610-627.

Tabla 4. Coeficientes para determinar el tiempo de reverberación óptimo según Pérez Miñana

Coeficiente	*Frecuencia en banda de octava*					
f	*125 Hz*	*250 Hz*	*500 Hz*	*1.000 Hz*	*2.000 Hz*	*4.000 Hz*
	1,30	1,15	1,00	0,90	0,90	0,90
u	*Uso del recinto*					
	Palabra	*Música de ópera*	*Música de cámara*	*Música sinfónica*	*Música wagneriana*	*Música religiosa*
	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
i	*Existencia de apoyo electroacústico*					
	Con apoyo electroacústico			*Sin apoyo electroacústico*		
	0,85			1		

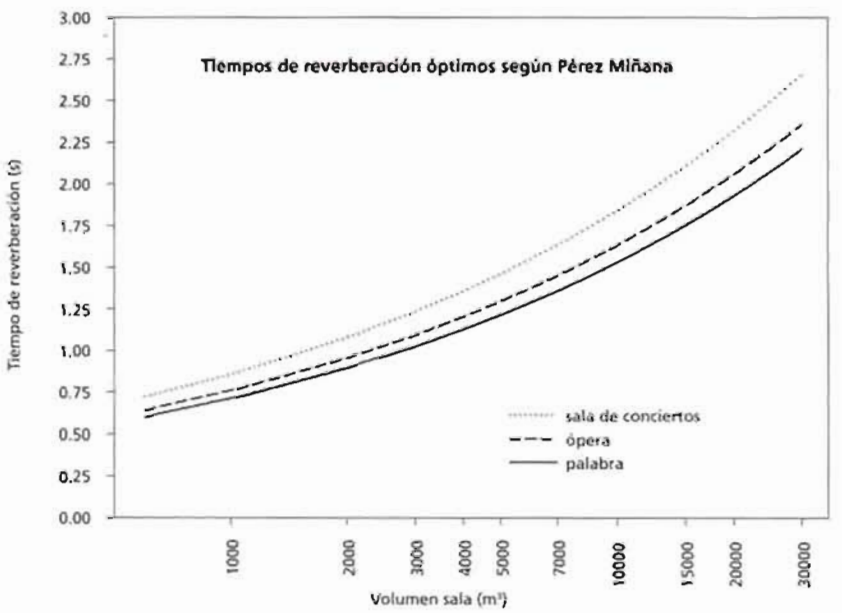


Figura 5. RT_{opt} propuestos por J. P. Miñana.

Las gráficas muestran los tiempos de reverberación medios (RT_{mid}) de las bandas de octava de 500 y 1.000 Hz. En ellas, los valores máximos se pueden asimilar a salas vacías, mientras que los mínimos corresponden a los RT óptimos de los recintos ocupados. Cremer propone admitir desviaciones en los valores comprendidas entre un 10% y un 20%.

Según Arau[10], las ecuaciones correspondientes a estas curvas óptimas para el uso de ópera y palabra, obtenidas por ajuste potencial, son las siguientes:

Uso para la ópera:

$$RT_{mid}(\text{máx}) = 0.509 \cdot V^{0.1335}$$
$$RT_{mid}(\text{mín}) = 0.396 \cdot V^{0.1273} \qquad [15 \text{ y } 16]$$

Uso para la palabra:

$$RT_{mid}(\text{máx}) = 0.368 \cdot V^{0.1505}$$
$$RT_{mid}(\text{mín}) = 0.264 \cdot V^{0.1394} \qquad [17 \text{ y } 18]$$

La figura 6 muestra la representación gráfica de estas ecuaciones.

[10] Arau, H. (1999). *Opus cit.*, p. 249.

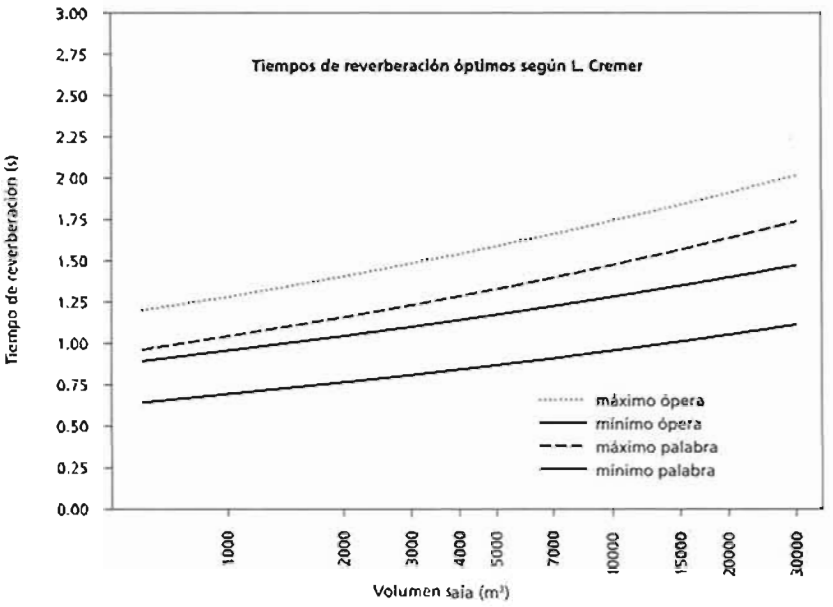


Figura 6. RT_{opt} propuestos por L. Cremer.

Propuesta de J. Jouhaneau[11] *(1997)*

J. Jouhaneau utiliza el mismo principio que Conturie y, por tanto, un algoritmo similar aunque estableciendo nuevas constantes para los distintos usos de las salas:

$$RT_{opt} = D \cdot V^{1/3} \qquad [19]$$

donde V es el volumen de la sala (m^3) y D un parámetro que depende del tipo de sala (Tabla 5). La figura 7 muestra gráficamente estos valores en función del volumen para tres usos diferentes: sala de conciertos, ópera y uso para la palabra.

Tabla 5. Valores del parámetro D de Jouhaneau

Tipo de sala	*Volumen (m^3)*	*D*
Salas de concierto	10.000 a 25.000	0,07
Óperas	7.000 a 20.000	0,06
Auditorios	500 a 4.000	0,06
Cines y teatros	500 a 10.000	0,05
Salas de conferencia	500 a 5.000	0,05
Estudios de grabación	100 a 1.000	0,04

Espacios acoplados

El acoplamiento acústico de espacios es un fenómeno, bastante frecuente en acústica arquitectónica, que sucede cuando al volumen principal de una sala se le anexan otros subespacios, normalmente con un volumen de aire más pequeño y con características acústicas notablemente deficientes.

Como ejemplos de espacios acoplados podemos citar las iglesias de nave central (alta) y capillas laterales (bajas); los teatros de corte en los que existían palcos de gran profundidad; los escenarios teatrales; los espacios situados bajo los anfiteatros, etcétera.

[11] Jouhaneau, J. (1997). *Acoustique des salles et sonorisation*. París: Technique & Documentation, pp. 209-213.

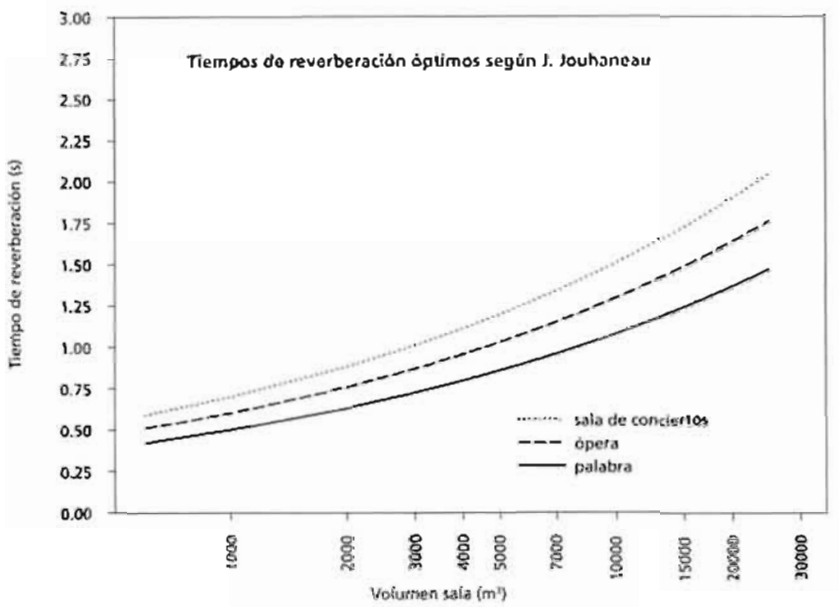


Figura 7. RT_{opt} propuestos por J. Jouhaneau.

En estos casos, el análisis estadístico del tiempo de reverberación no es aplicable, ya que la prolongación del sonido, cuando cesa la fuente sonora, no tiene el mismo valor en el volumen principal que en los acoplados. El cálculo del tiempo de reverberación en espacios acoplados, según Knudsen[12], puede determinarse mediante el siguiente método empírico:

a) Cuando la profundidad del espacio acoplado (P) sea menor o igual que dos veces la altura del hueco de apertura (H), el tiempo de reverberación se calcula como si se tratase de un espacio o volumen único, es decir:

$$\text{Si} \quad P \leq 2 \cdot H \rightarrow RT = 0.161 \cdot \frac{V_1 + V_2}{A_1 + A_2} \qquad [20]$$

donde V_1 y V_2 son los volúmenes del espacio principal y del acoplado, respectivamente, y A_1 y A_2 las correspondientes absorciones sonoras.

b) Cuando la profundidad del espacio acoplado (P) sea mayor que dos veces la altura del hueco de apertura (H), se necesita hacer un cálculo separado del tiempo de reverberación de cada uno de los volúmenes acoplados. Cada espacio tiene un comportamiento acústico distinto, lo que lleva a definir un RT en cada uno de ellos:

$$\text{Si} \quad P > 2 \cdot H \rightarrow RT_1 = 0.161 \cdot \frac{V_1}{A_1 + A'}; \; RT_2 = 0.161 \cdot \frac{V_2}{A_2 + A'} \qquad [21]$$

donde A' es la absorción virtual de la superficie de separación de los espacios acoplados, y cuyos coeficientes de absorción aparente se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Valores del coeficiente de absorción de la superficie virtual

Relación P/H	*125 Hz*	*500 Hz*	*2000 Hz*
2,5	0,30	0,50	0,60
3,0	0,40	0,65	0,75

[12] Knudsen, V. O. y Harris, C. M. (1988). *Opus cit.*, p. 177.

DISTRIBUCIÓN SONORA

La distribución sonora de un local permite evaluar el grado de difusión del campo acústico, así como la localización de posibles zonas de concentración de energía sonora o de sombra acústica, con el fin de conseguir un campo acústico lo más uniforme posible en todas las zonas de audiencia en cuanto a los niveles sonoros.

La consecución de una buena distribución sonora depende de la geometría del local (forma y tamaño) así como de la distribución, forma de colocación y tipo de acabado de las superficies de revestimiento.

Campo directo

El campo sonoro directo, o campo libre, se origina cuando una fuente acústica emite en un medio homogéneo e isótropo indefinido, libre de contornos.

En campo libre, la intensidad acústica recibida se debe al sonido directo y su valor disminuye a medida que el receptor se aleja de la fuente. Para una fuente sonora, puntual y omnidireccional, que emite frentes de onda esféricos en campo libre, la intensidad sonora en un punto situado a una distancia "r" será:

$$I_d = \frac{W}{4\pi r^2} \qquad [22]$$

donde W es la potencia acústica de la fuente sonora (W).

Según lo anterior, el nivel de intensidad sonora en un punto será:

$$L_d = 10 \cdot \log \frac{I_d}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{W}{4\pi r^2 I_0} \qquad [23]$$

donde I_0 es la intensidad de referencia de valor 10^{-12} W/m^2. La expresión anterior se puede escribir:

$$L_d = 10 \cdot \log \frac{W}{I_0 \cdot 1m^2} - 20 \cdot \log r - 10 \cdot \log 4\pi \equiv L_W - 20 \cdot \log r - 11 (dB) \qquad [24]$$

En el caso de una fuente direccional, en las expresiones anteriores habría que introducir la influencia de la directividad de la fuente y se escribirían así:

$$I_d = \frac{Q \cdot W}{4\pi r^2} \qquad [25]$$

$$L_d = L_W + 10 \cdot \log \frac{Q}{4\pi r^2} \qquad [26]$$

donde Q es el factor de directividad de la fuente.

Campo directo y campo reverberado

Aplicando exclusivamente las hipótesis de la teoría estadística, la energía sonora en cualquier punto de un recinto es resultado de dos sumandos: el primero corresponde a la energía del sonido directo, cuyo comportamiento acabamos de analizar (ec. [22]); el segundo, procede de la energía sonora asociada al sonido reflejado en los distintos paramentos del local, y cuyo valor es independiente de la distancia entre el emisor y el receptor.

La intensidad sonora en un punto, debida exclusivamente al sonido reflejado o reverberado, se puede demostrar que es:

$$I_r = \frac{4W}{R} \qquad [27]$$

donde W es la potencia de la fuente sonora (W) y R la constante acústica del local cuyo valor es:

$$R = \frac{S_t \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \qquad [28]$$

siendo S_t la superficie total de la sala (m^2) y α el coeficiente medio de absorción de la misma.

Cuando se tiene en cuenta la absorción debida al aire, en locales de grandes volúmenes y para las frecuencias altas, la constante R se expresa:

$$R = \frac{S_t \cdot \beta}{1 - \beta} \qquad [29]$$

donde:

$$\beta = \bar{\alpha} + \frac{4mV}{S_t} \qquad [30]$$

Con todo ello, la intensidad sonora total en un punto será la suma de las intensidades directa y la reverberada, es decir:

$$I_t = I_d + I_r = W \cdot \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \qquad [31]$$

Y el nivel de presión sonora total se escribirá:

$$L_t = L_w + 10 \cdot \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \qquad [32]$$

En los puntos próximos a la fuente sonora predomina el sonido directo, sobre todo en locales sordos (constante R grande). En puntos alejados predomina el sonido reflejado, sobre todo en locales reverberantes (constante R pequeña) y en este caso decimos que domina el campo reverberante.

La distancia límite a la que la intensidad del sonido directo es la misma que la debida al reverberado se denomina distancia acústica o radio crítico D_c, y se obtiene igualando los dos sumandos del paréntesis de la ec. [31], es decir:

$$D_c = \sqrt{\frac{R}{16\pi}} \qquad [33]$$

Si la fuente no es omnidireccional, la distancia o radio crítico será diferente en cada dirección y por ello aparecerá el factor de directividad, tal y como se muestra a continuación:

$$D_c = \sqrt{\frac{Q \cdot R}{16\pi}} \qquad [34]$$

Teoría revisada del campo reverberado: algoritmo de Barron y Lee

En 1988, y tras numerosas mediciones en teatros y salas de conciertos, Barron y Lee[13] propusieron un nuevo modelo para describir el campo reverberado.

Si en la ec. [32] expresamos la absorción en función del tiempo de reverberación de Sabine, y establecemos como nivel de referencia el nivel directo producido por la fuente en cuestión a una distancia de 10 m, es posible escribir:

[13] Barron, M. y Lee, L.-J. (1998). Energy relations in concert auditoriums. I. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 84 (2), pp. 618-628.

$$L - L_0 = 10 \cdot \log\left(\frac{100}{r^2} + 31200\frac{RT}{V}\right) \quad [35]$$

donde:

$$L_0 = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{4\pi r_0^2}\right); \text{ con } r_0 = 10 \text{ m} \quad [36]$$

A diferencia de la teoría clásica, el modelo de Barron y Lee incorpora una atenuación del sonido con la distancia, no sólo para el campo directo, sino también para el reverberado. Se consideran, pues, tres componentes de la energía sonora: el sonido directo *d*, el sonido reverberado inicial *e*, (retardo < 80 ms) y el sonido reverberado tardío *l*, (retardo > 80 ms), de modo que el nivel relativo total se escribirá:

$$L - L_0 = 10 \cdot \log(d + e_r + l) \quad [37]$$

donde:

$$d = \frac{100}{r^2} \quad [38]$$

$$e_r = 31200\ \frac{RT}{V}\ e^{\frac{-0.04r}{RT}}\left(1 - e^{-1.11 \cdot RT}\right) \quad [39]$$

$$l = 31200\frac{RT}{V}e^{-\frac{0.004r}{RT}} \cdot e^{-1.11 \cdot RT} \quad [40]$$

En la figura 9 se muestran los niveles de presión sonora globales, medidos en un teatro, frente a la distancia emisor-receptor, referidos al nivel acústico producido por una fuente omnidireccional en campo libre, a una distancia de 10 m emitiendo con la misma potencia. Los resultados se comparan con las estimaciones teóricas de los modelos clásico y de Barron y Lee. Este nivel relativo se recoge

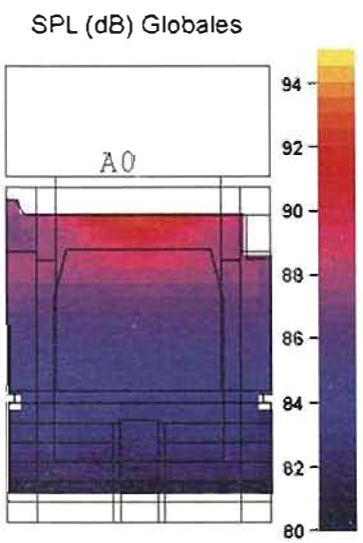


Figura 8. Representación gráfica de la distribución sonora en un teatro.

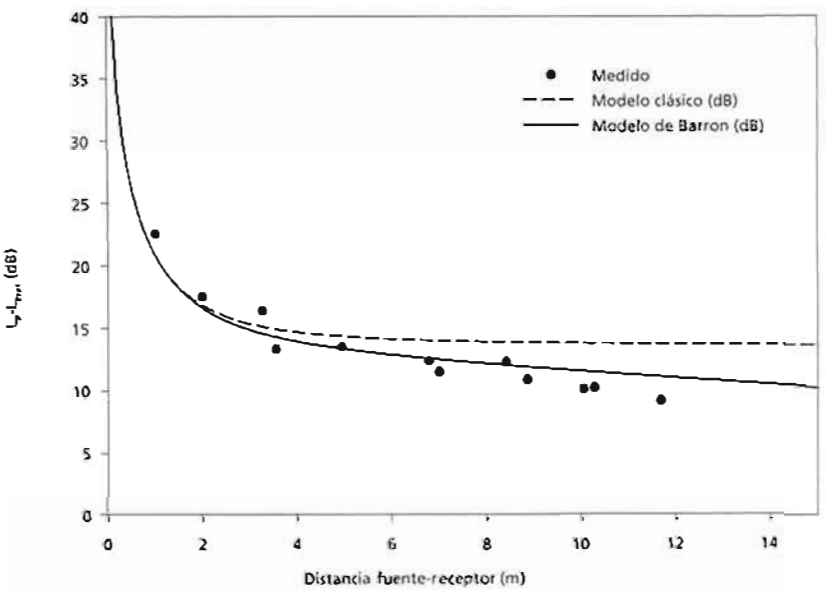


Figura 9. Valores de la fuerza acústica frente a la distancia para valorar la distribución sonora de un teatro. Comparación de valores medidos y calculados a partir del modelo clásico y del de Barron y Lee.

en la norma UNE-EN-ISO-3382 y se le denomina fuerza acústica en su traducción española (*strength* en inglés).

Esto, junto con los mapas de distribución sonora (Fig. 8), se puede entender como formas de representación de la distribución sonora.

INTELIGIBILIDAD

La inteligibilidad representa la capacidad de entender el mensaje oral después de haber atravesado un determinado canal de transmisión sonoro, como puede ser una sala. Lógicamente se trata de un concepto que depende, además de los condicionantes físicos del canal de transmisión, de los debidos al emisor y al receptor, y éstos pueden tener una fuerte carga subjetiva, por lo que resulta difícil su evaluación.

Los distintos procedimientos de medida de la inteligibilidad han pretendido encontrar indicadores objetivos y fáciles de evaluar o medir que a su vez se correlacionen bien con la inteligibilidad subjetiva.

La inteligibilidad de la palabra en una sala depende principalmente de los siguientes factores: niveles y espectro de la emisión sonora, niveles y espectro del ruido de fondo, distancia emisor-receptor y reverberación del recinto.

Índice de transmisión de la voz (STI)

Uno de los índices más utilizados es el índice STI (*Speech Transmission Index*), definido por Houtgast y Steeneken[14]. Permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra entre los valores 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima), con objeto de evaluar la calidad del canal de transmisión (recinto). Este índice ha sido ampliamente contrastado con numerosas pruebas subjetivas, realizadas en múltiples idiomas, incluido el nuestro[15].

El procedimiento de medida se basa en el análisis de la degradación de la modulación de una señal portadora de banda ancha modulada. Las señales moduladoras, sinusoides de baja frecuencia, reproducen las frecuencias con que modulamos nuestro discurso al hablar.

El STI se calcula a partir de la función de transferencia de la modulación (MTF), que representa el factor de reducción del índice de modulación (m), frente a la frecuencia de modulación (F_m). Esta reducción está causada, fundamentalmente, por la existencia de reverberación y de ruido de fondo.

El algoritmo de cálculo del STI, propuesto por Houtgast y Steeneken, se estructura en las siguientes fases:

1. Cálculo (o medida) de la reducción de los índices de modulación $m(F_0,F_m)$, donde F_0 son las frecuencias centrales de las bandas de octava comprendidas entre 125 y 8.000 Hz y F_m las frecuencias de modulación (comprendidas entre 0,63 y 12,5 Hz). Es decir, evaluamos la función de transferencia de modulación $m(F_0,F_m)$ para cada una de las 14 frecuencias de modulación, F_m, y para las 7 octavas comprendidas entre 125 y 8.000 Hz. En total se evalúan $7 \times 14 = 98$ valores de la MTF. El efecto de la reverberación y el ruido de fondo se pueden describir analíticamente mediante la siguiente expresión:

$$m(F_0,F_m) = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2\pi F_m RT}{13.8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1+10^{\frac{-S/N(F_0)}{10}}} \qquad [41]$$

donde RT es el valor del tiempo de reverberación (o EDT) para la banda de octava centrada en la frecuencia F_0 y $S/N(F_0)$ es la relación señal/ruido en la misma banda de octava.

---

[14] Houtgast, T. y Steeneken, H. J. M. (1973). The Modulation Transfer Function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility. *Acustica*, 28, pp. 66-73.

[15] Díaz, C. y Velázquez, C. (1995). A live evaluation of the RASTI-method. *Applied Acoustics*, 46 (4), pp. 363-372.

2. Conversión de los índices *m* a relaciones señal/ruido aparentes $(S/N)_{ap}$ para cada octava F_0 y frecuencia de modulación F_m mediante la expresión:

$$(S/N)_{ap}(F_0, F_m) = 10 \cdot \log \frac{m(F_0, F_m)}{1 - m(F_0, F_m)} \qquad [42]$$

Los 98 valores medidos se truncan de forma que todos ellos estén comprendidos entre +15 dB y −15 dB, de modo que si alguno es mayor que +15 dB éste se sustituye por el valor +15, y en el caso de los que sean menores de −15 dB por el valor −15.

3. Cálculo de las relaciones señal/ruido aparentes medias por bandas de octava.

$$\overline{(S/N)}_{ap}(F_0) = \frac{\sum_{F_m} (S/N)_{ap}(F_0, F_m)}{14} \qquad [43]$$

4. Cálculo de la señal/ruido aparente media ponderada global, mediante la expresión:

$$\begin{aligned} \overline{(S/N)}_{ap} = {} & 0.010\,\overline{(S/N)}_{ap\,125\,Hz} + 0.042\,\overline{(S/N)}_{ap\,250\,Hz} + \\ & 0.129\,\overline{(S/N)}_{ap\,500\,Hz} + 0.200\,\overline{(S/N)}_{ap\,1\,kHz} + \\ & + 0.312\,\overline{(S/N)}_{ap\,2\,kHz} + 0.250\,\overline{(S/N)}_{ap\,4\,kHz} + 0.057\,\overline{(S/N)}_{ap\,8\,kHz} \end{aligned} \qquad [44]$$

5. Cálculo del índice STI mediante la siguiente expresión:

$$STI = \frac{\overline{(S/N)}_{ap} + 15}{30} \qquad [45]$$

En la figura 10 se muestra la variación del índice STI, medido en una sala, frente a la distancia a la fuente.

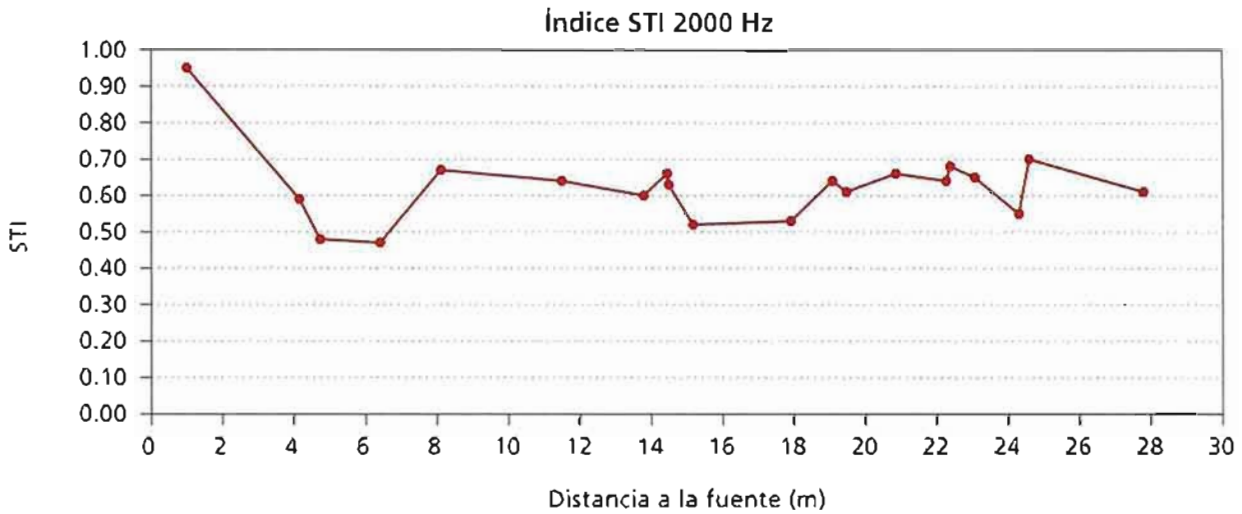


Figura 10. Variación del índice STI en función de la distancia a la fuente.

Índice RASTI

El índice RASTI[16] (*Rapid* STI) es un método simplificado, desarrollado a partir del índice STI cuando las facilidades de cálculo no eran tan potentes como las que hoy ofrecen los ordenadores. En la evalua-

[16] Hougast, T. y Steeneken, H. J. M. (1985). A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77 (3), pp. 1069-1077.

ción del índice RASTI el análisis se restringe a las bandas de octava de 500 y 2.000 Hz, y el número de frecuencias de modulación se reduce de 14 a 9 (cuatro en la banda de 500 Hz y cinco en la de 2.000 Hz).

En este caso, se calcula una única relación señal/ruido aparente media, que se toma como global:

$$\overline{(S/N)_{ap}} = \frac{\sum_{F_o,F_m} (S/N)_{ap}(F_o,F_m)}{9} \qquad [46]$$

A partir de la evaluación de la inteligibilidad en distintos puntos de una sala, se pueden trazar los mapas de inteligibilidad en las zonas de audiencia. La representación de este índice puede ser en forma de mapas como el de la figura 11, o mediante las curvas ISO-RASTI, es decir, contornos que unen puntos con el mismo valor del índice.

Con el fin de valorar de forma cualitativa la inteligibilidad de un recinto a partir de los valores STI, o RASTI, medidos o calculados, se ha elaborado la escala cualitativa de la figura 12.

RUIDO DE FONDO

Con independencia de la señal generada para transmitir el mensaje, en una sala existen otras, no deseadas, y que denominamos ruido de fondo. Las fuentes que originan este ruido pueden ser internas o externas. Entre las primeras cabe destacar las instalaciones de los edificios (sistemas de aire acondicionado, redes hidráulicas, sistemas de iluminación, etc.). Como fuentes de ruido externas destacan el tráfico rodado, los agentes atmosféricos, las actividades humanas, etcétera.

Para que la acústica de una sala sea adecuada, el ruido de fondo no debe superar determinados niveles. Nos ocupamos a continuación de la forma más habitual de valorar los niveles de estos ruidos.

Índices de valoración del ruido de fondo

Nivel de presión sonora ponderado (L_A): es el nivel de presión sonora global (banda ancha) ponderado mediante la red de ponderación A (UNE 21.314/75), para compensar las diferencias de sensibilidad que el oído humano tiene para las distintas frecuencias. Se expresa en dBA.

$$L_A = 10 \cdot \log \frac{p_{A_{ef}}^2}{p_{ref}^2} \text{ (dBA)} \qquad [47]$$

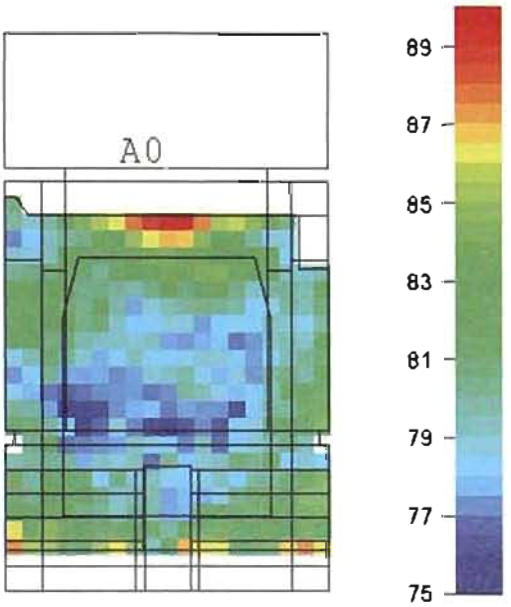


Figura 11. Mapa del índice RASTI (%) de una sala.

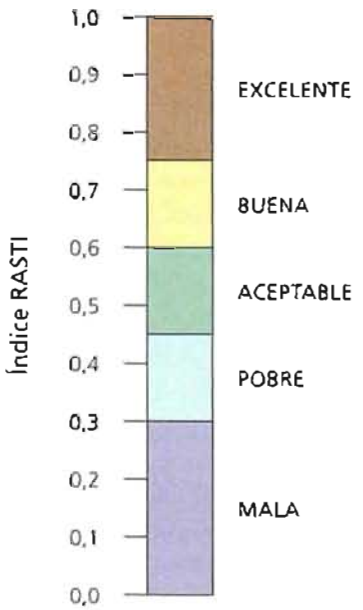


Figura 12. Valoración cualitativa de la inteligibilidad a partir del índice RASTI.

donde p_{Aef} es el valor eficaz de la presión acústica medida ponderado y p_{ref} = 20 μPa es la presión de referencia según normas internacionales.

La tabla 7 presenta las correcciones de la red de ponderación A en bandas de 1/3 de octava.

Nivel sonoro continuo equivalente (L_{Aeq}) es el nivel, en dBA, de un hipotético ruido continuo y estacionario que proporciona la misma cantidad de energía acústica que el ruido real fluctuante considerado, en un punto determinado, durante un período de tiempo T. Matemáticamente se puede expresar:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_{ref}^2} dt \quad (dBA) \qquad [48]$$

donde $p_A(t)$ es la presión eficaz, medida con la red de ponderación A, en función del tiempo, T el intervalo de duración de la medida y p_{ref} = 20 μPa

Si las medidas del nivel sonoro L_i se efectuasen en intervalos discretos de observación t_i durante los cuales el nivel sonoro es $L_i \pm 2.5$ dBA, la expresión de L_{Aeq} tomaría la forma:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T} \sum t_i 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \qquad [49]$$

La tabla 8 recoge los niveles máximos recomendados de L_{Aeq}, según los posibles usos del recinto.

Curvas de valoración

Los índices anteriores sólo proporcionan un valor global, sin más información espectral que la que corresponde a la red de ponderación A. Con el fin de paliar esta deficiencia, se han desarrollado diversos sistemas para valorar el espectro. En general se basan en un sistema de curvas sobre las que se superpone el espectro medido y permite valorarlo mediante un único número, normalmente el índice asignado a la primera curva situada por encima de la del espectro medido. Se utilizan de forma generalizada para establecer los niveles máximos recomendables en los recintos, dependiendo del uso de los mismos (Tabla 8). Las curvas de valoración tienen en cuenta la variación de la sensibilidad del oído humano

Tabla 7. Factores de compensación de la red de ponderación A, en bandas de 1/3 de octava

Frec. (Hz)	Red A	Frec. (Hz)	Red A	Frec. (Hz)	Red A	Frec. (Hz)	Red A	Frec. (Hz)	Red A
31,5	−39,4	100	−19,1	315	−6,6	1.000	0,0	3.150	+1,2
40	−34,6	125	−16,1	400	−4,8	1.250	+0,6	4.000	+1,0
50	−30,2	160	−13,4	500	−3,2	1.600	+1,0	5.000	+0,5
63	−26,2	200	−10,9	630	−1,9	2.000	+1,2	6.300	−0,1
80	−22,5	250	− 8,6	800	−0,8	2.500	+1,3	8.000	−1,1

Tabla 8. Valores máximos recomendados para los índices de valoración del ruido

Uso del recinto	L_{Aeq} (dBA)	NR	NC	PNC
Salas de música	25	25	25	20
Teatros	35	25	30	20
Cines	45	35	35	35
Salas de conferencias	35	35	30	40
Iglesias	40	35	30	35

en función tanto de la frecuencia como del nivel acústico. Las más conocidas son las curvas NR, NC y PNC.

Las curvas NR *(Noise Rating)* están construidas a partir de la banda de frecuencia de 1.000 Hz, de modo que, a dicha frecuencia, el valor de las curvas NR coincide con el nivel sonoro en dB. Se utilizan comúnmente y están normalizadas internacionalmente en la norma ISO R-1996. Se representan en la figura 13.

Para conocer el índice NR de un ruido de fondo, se superpone el espectro de dicho ruido, medido en bandas de octava, sobre estas curvas. El contorno NR que se sitúa inmediatamente por encima del espectro medido, determinará el índice NR del ruido.

Las curvas NC *(Noise Criteria)* propuestas por L. L. Beranek, son similares a las curvas NR. Su objetivo es establecer una relación entre el espectro de un ruido y la perturbación que provoca en la comunicación verbal.

Finalmente, las curvas PNC *(Prefered Noise Criteria)* son el resultado de pequeñas modificaciones realizadas a las curvas NC y suelen utilizarse con frecuencia para establecer los niveles máximos permitidos para los sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos.

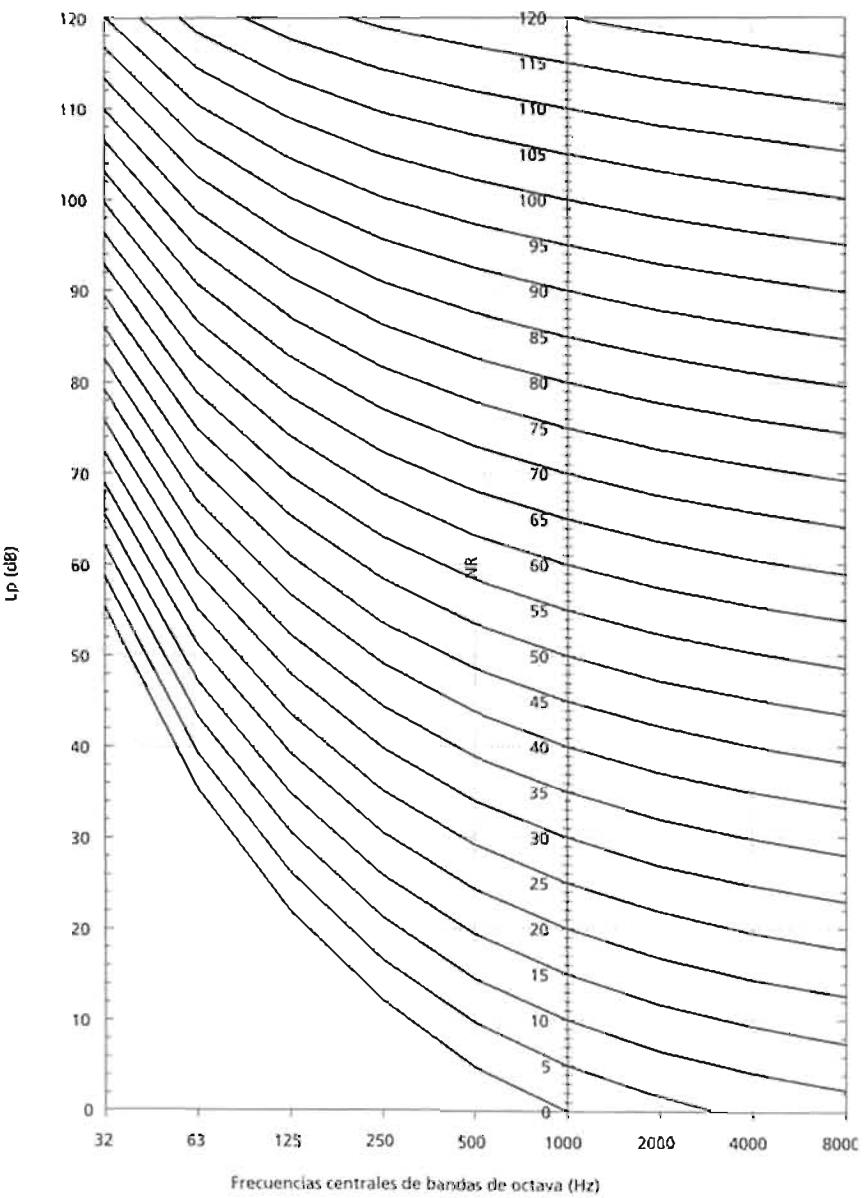


Figura 13. Curvas de valoración NR.

PARÁMETROS DE CUALIFICACIÓN ACÚSTICA

Calidez (BR)

La calidez BR *(Bass Ratio)* es un parámetro que se obtiene a partir del tiempo de reverberación y representa la riqueza de la sala a bajas frecuencias. Se obtiene como el cociente entre la suma de los RT correspondientes a las bandas de octava de 125 Hz y 250 Hz (RT_{low}) y la suma de los RT correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz (RT_{mid}):

$$BR = \frac{RT(125\ Hz) + RT(250\ Hz)}{RT(500\ Hz) + RTr(1\ kHz)} = \frac{RT_{low}}{RT_{mid}}\ (s) \qquad [50]$$

El margen de valores recomendados, según distintos autores, en función del uso del recinto, se muestra en la tabla 9.

Brillo (Br)

Al igual que la calidez, el brillo de una sala se obtiene a partir del tiempo de reverberación y valora la respuesta de la sala a altas frecuencias. Se obtiene como el cociente entre la suma de los RT correspondientes a las bandas de frecuencias de 2 kHz y 4 kHz (RT_{high}) y la suma de los RT correspondientes a las bandas de frecuencias de 500 Hz y 1 kHz (RT_{mid}):

$$Br = \frac{RT(2\ kHz) + RT(4\ kHz)}{RT(500\ Hz) + RT(1\ kHz)} = \frac{RT_{high}}{RT_{mid}}\ (s) \qquad [51]$$

Los valores recomendados, para todo tipo de salas, son los que aparecen en la tabla 10.

Claridad de la voz (C_{50})

Se define como 10 veces el logaritmo de la relación entre la energía que llega a un oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (sonido directo + primeras reflexiones) y la energía que le llega con posterioridad. Se obtiene para las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4.000 Hz. Se expresa en dB y se puede obtener a partir de la respuesta al impulso de la sala p(t), mediante la expresión:

Tabla 9. Valores óptimos de la calidez (BR)

Autor	*Uso recinto (ocupado)*	*Calidez recomendada*	
L. L. Beranek[17]	Sala conciertos	Si $RT_{mid} \geq 2{,}2$ s	$1{,}10 \leq BR \leq 1{,}25$ s
		Si $RT_{mid} \leq 1{,}8$ s	$1{,}10 \leq BR \leq 1{,}45$ s
		Si $2{,}2 \geq RT_{mid} \geq 1{,}8$ s	Se interpola linealmente
H. Arau[18]	Sala concierto	$1{,}10 \leq BR \leq 1{,}30$ s	
	Teatro	$0{,}90 \leq BR \leq 1{,}30$ s	

Tabla 10. Valores óptimos del brillo (Br)

Autor	*Brillo*
L. L. Beranek[19]	$\geq 0{,}88$
H. Arau[20]	$> 0{,}80$

[17] Beranek, L. L. (1996). *Concert and Opera Halls: how they sound.* Nueva York: Acoustical Society of America, p. 430.
[18] Arau, H. (1999). *Opus cit.*, p. 263.
[19] Beranek, L. L. (1996). *Opus cit.*, p. 427.
[20] Arau, H. (1999). *Opus cit.*, p. 263.

$$C_{50} = \frac{\text{Energía para } t \le 50\text{ms}}{\text{Energía para } t > 50\text{ms}} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t)dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t)dt} \text{ (dB)} \qquad [52]$$

Con fines de cualificación normalmente se utiliza el valor medio ponderado de C_{50} *(speech average):*

$$C_{50AV} = 0.15 \cdot C_{50}(500\text{ Hz}) + 0.25 \cdot C_{50}(1\text{ kHz}) + \\ + 0.35 \cdot C_{50}(2\text{ kHz}) + 0.25 \cdot C_{50}(4\text{ kHz}) \qquad [53]$$

Para una sala ocupada, el valor recomendado de C_{50} *(speech average),* según A. Carrión[21] debe ser:

$$C_{50AV} > 2 \text{ dB}$$

Asimismo, L. Gerald Marshall[22] propone la gráfica de la figura 14 para cualificar la inteligibilidad en función de los valores de C_{50AV}.

Claridad musical (C_{80})

Indica el grado de separación entre los sonidos individuales que integran una composición musical. Se define como 10 veces el logaritmo de la relación entre la energía que llega a un oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (sonido directo + primeras reflexiones) y la energía que le llega con posterioridad. Se expresa en dB y se obtiene para las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4.000 Hz. Su expresión, en términos de la respuesta al impulso de la sala p(t), es:

$$C_{50} = \frac{\text{Energía para } t \le 80\text{ms}}{\text{Energía para } t > 80\text{ms}} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t)dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t)dt} \text{ (dB)} \qquad [54]$$

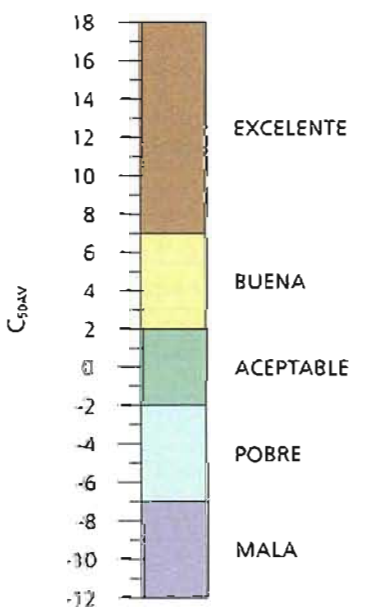


Figura 14. Valoración de la inteligibilidad en función de la claridad de la voz C_{50AV}.

Figura 15. Valores de la claridad musical C_{80} (3) recomendados por Marshall.

[21] Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos.* Barcelona: Ediciones UPC, p. 184.

[22] Marshall, L. G. (1993). An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 96 (4), pp. 2251-2261.

Tabla 11. Valores óptimos para la claridad musical C_{80} y $C_{80}(3)$

Autores	*Hipótesis*	*Intervalo recomendado (dB)*
L. L. Beranek[23]	Sala vacía	$-4 \leq C_{80}(3) \leq 0$
L. G. Marshall[24]	Sala ocupada	$-2 \leq C_{80}(3) \leq +2$
M. Barron[25]	Sala ocupada	$-2 \leq C_{80} \leq +2$
H. Arau[26]	Concierto. Sala ocupada	$-2 \leq C_{80} \leq +4$
	Ópera. Sala ocupada	$2 \leq C_{80} \leq +6$
	Teatro. Sala ocupada	$C_{80} \geq +6$

Cuando la energía sonora inicial y la reverberada son iguales, C_{80} es igual a cero.

Normalmente se utiliza el valor medio de la claridad, $C_{80}(3)$:

$$C_{80}(3) = \frac{C_{80}(500\,\text{Hz}) + C_{80}(1\,\text{kHz}) + C_{80}(2\,\text{kHz})}{3} \qquad [55]$$

Los valores recomendados por distintos autores de C_{80} y $C_{80}(3)$ se muestran en la tabla 11.

L. Gerald Marshall[27], en función del tipo de música, recomienda los valores del índice de claridad musical que se muestra en la figura 15.

Definición (D_{50})

La definición D_{50} (o *Deutlichkeit*)[28] es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye sonido directo y primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo. Se calcula en las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4.000 Hz. Su expresión, en términos de la respuesta al impulso p(t), es:

$$D_{50} = \frac{\text{Energía para } t \leq 50\ \text{ms}}{\text{Energía total}} = \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \qquad [56]$$

En general, los valores recomendados de D_{50} deben ser superiores a 0,5. No obstante, H. Arau[29], para salas ocupadas, propone los valores de la tabla 12:

Tabla 12. Valores óptimos para la definición D_{50}

Uso del recinto	*Valor recomendado (D_{50})*
Concierto	0,50
Teatro	0,65
Opera	0,50 a 0,65

[23] Beranek, L. L. (1996). *Opus cit.*, p. 555.
[24] Marshall, L. G. (1994). *Opus cit.*
[25] Barron, M. (1993). *Auditorium acoustics and architectural design*. London: E & FN Spon and imprint of Chapman & Hall. p. 61.
[26] Arau, H. (1999). *Opus cit.*, p. 266.
[27] Marshall, L. G. (1994). *Opus cit.*
[28] UNE-EN-ISO 3382 (1997). *Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.*
[29] Arau, H. (1999). *Opus cit.*, p. 265.

Es fácil establecer la relación entre la definición D_{50} y la claridad de la voz C_{50}. Para cualquier banda de frecuencia, se puede escribir:

$$D_{50} = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{C_{50}}{10}}} \qquad [57]$$

Fuerza acústica (G)

La fuerza acústica G *(sound strength)*[30] indica el grado de amplificación producido por una sala. Se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora producido por una fuente omnidireccional en un punto de una sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m (nivel de referencia). Se expresa en dB y se obtiene en las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4.000 Hz. Es posible calcularla a partir de la respuesta al impulso de la sala p(t) y de la respuesta al impulso medida a 10 m en condiciones de campo libre $p_{10}(t)$:

$$G = 10 \cdot \log \frac{\int_0^\infty p^2(t)dt}{\int_0^\infty p_{10}^2(t)dt} \quad (dB) \qquad [58]$$

Normalmente, a efectos de cualificación, se utiliza el valor medio de las bandas de octava de 500 Hz y 1 kHz:

$$G_{mid} = \frac{G(500\,Hz) + G(1\,kHz)}{2} \quad (dB) \qquad [59]$$

Los valores recomendados por L. L. Beranek[31], para una sala de concierto vacía, deben estar comprendidos en el intervalo:

$$4 \leq G_{mid} \leq 5,5 \text{ dB}$$

Eficiencia lateral (LF)

La eficiencia lateral LF *(Lateral Energy Fraction)* es una medida del grado de espacialidad del sonido y se define como la relación entre la energía que llega lateralmente a un oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (se excluye el sonido directo) y la energía recibida procedente de todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo. Es posible expresarla a partir de la respuesta al impulso medida con dos micrófonos en la misma posición, uno omnidireccional para evaluar la energía procedente de todas las direcciones, y otro con patrón de directividad en figura de ocho, orientando el plano de sensibilidad nula hacia la fuente, para evaluar la energía lateral:

$$LF = \frac{\text{Energía lateral para } t \leq 80 \text{ ms (sin sonido directo)}}{\text{Energía total para } t \leq 80 \text{ ms}} \qquad [60]$$

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p^2(t)\cos^2\theta dt}{\int_0^{80ms} p^2(t)dt} \qquad [61]$$

[30] UNE-EN-ISO 3382 (1997). *Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.*

[31] Beranek, L. L. (1996). *Opus cit.*, p. 446.

donde θ es el ángulo formado por el sonido incidente y el eje de máxima sensibilidad del micrófono (equivalente al eje de los oídos de un oyente)[32].

Según M. Barron[33], los valores recomendables para LF, en salas de conciertos, son:

$$0.1 \leq LF \leq 0.35$$

Normalmente, a efectos de cualificación, se utiliza el valor medio de las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 1 kHz:

$$LF_4 = \frac{LF(125\,Hz) + LF(250\,Hz) + LF(500\,Hz) + LF(1\,kHz)}{4} \qquad [62]$$

Para una sala vacía, el valor de LF_4 debe ser:

$$LF_4 \geq 0.19$$

Intimidad (ITDG)

La intimidad ITDG *(Initial Time Delay Gap)* se define como el intervalo de tiempo (en milisegundos) existente entre la llegada del sonido directo y la primera reflexión significativa. Beranek asocia la intimidad con la sensación que tiene un oyente de escuchar la música en un espacio de dimensiones reducidas.

El valor recomendado para este parámetro, según Beranek[34], debe ser ITDG < 20 ms, medido en el centro de la sala. Asimismo, la tabla 13 muestra las condiciones de audición de una sala, en función del indicador ITDG.

Tiempo central (T_s)

El tiempo central *(centre time)* T_s se define como el momento de primer orden del área situada por debajo de la curva de decaimiento energético[35]. Dicho parámetro es indicativo de la "distancia" (en ms) desde el origen temporal t = 0 hasta el "centro de gravedad" del área de la curva de decaimiento energético. Se obtiene para las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4.000 Hz. Su expresión, en función de la respuesta al impulso de la sala, es la siguiente:

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t\, p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \quad (ms) \qquad [63]$$

Tabla 13. Valoración del indicador ITDG

ITDG (ms)	*Condiciones de audición*
< 20	Excelente para la palabra y la música
20-30	Buena para la palabra; normal para la música
30-45	Impresión auditiva borrosa o imprecisa
45-60	Insatisfactoria
> 60	Pobre (posibilidad de eco)

[32] Cuando en la ec. [61] aparece en el numerador el término $\cos(\theta)$ en lugar de $\cos^2(\theta)$ denotaremos la eficiencia lateral como LFC, mientras que con $\cos^2\theta$ se representará por LF, tal y como establece la Norma UNE-EN-ISO 3382 (1997).

[33] Barron, M. (1993). *Opus cit.*, p. 61.

[34] Beranek, L. L. (1996). *Opus cit.*, p. 512.

[35] UNE-EN-ISO 3382 (1997). *Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.*

Si los valores de RT están comprendidos en 1 y 2 s, los valores de T_s deberían encontrarse dentro del margen siguiente:

$$72 \leq T_s \leq 144 \text{ ms}$$

Este parámetro indica la nitidez del sonido en puntos específicos de la sala y presenta una fuerte correlación con el EDT. Cuanto mayor sea T_s, menor será la nitidez.

Coeficiente de correlación cruzada inter-aural (IACC)

El coeficiente de correlación cruzada inter-aural IACC *(Inter-Aural Cross-correlation Coefficient)*[36] se calcula a partir de la función de correlación cruzada inter-aural entre las respuestas impulsivas calculadas o medidas en ambos oídos, e indica el grado de similitud existente entre ambas señales. La función y el cálculo del coeficiente, a partir de las respuestas al impulso en el oído derecho $p_R(t)$ y en el oído izquierdo $p_L(t)$, se expresan en las siguientes ecuaciones:

$$IACF_{t_1,t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t)p_R(t+\tau)dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t)dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t)dt}} \quad [64]$$

$$IACC_{t_1,t_2} = \max \left| IACF_{t_1,t_2}(\tau) \right| \quad -1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms} \quad [65]$$

donde IACF es la función de correlación cruzada inter-aural, t_1 el límite inferior de integración y t_2 el límite superior de integración.

Según los distintos tiempos de integración suelen calcularse tres índices diferentes, uno para las respuestas completas, otro para la parte inicial de las mismas y el tercero compara la similitud de la parte tardía:

$IACC_E$	$t_1 = 0$	$t_2 = \infty$ (en la práctica el valor de RT)
$IACC_{E(early)}$	$t_1 = 0$	$t_2 = 80$ ms
$IACC_{L(late)}$	$t_1 = 80$ ms	$t_2 = \infty$ (en la práctica el valor de RT)

Cuando las señales de ambos oídos son iguales, el coeficiente de correlación cruzada inter-aural IACC = 1. Por el contrario, si las respuestas son totalmente distintas el IACC = 0. Se evalúa en las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz.

Como las bandas más representativas de este coeficiente son las de 500, 1.000 y 2.000 Hz, se suele determinar un coeficiente de correlación cruzada inter-aural medio $IACC_3$:

$$IACC_3 = \frac{IACC(500 \text{ Hz}) + IACC(1 \text{ kHz}) + IACC(2 \text{ kHz})}{3} \quad [66]$$

OTROS PARÁMETROS

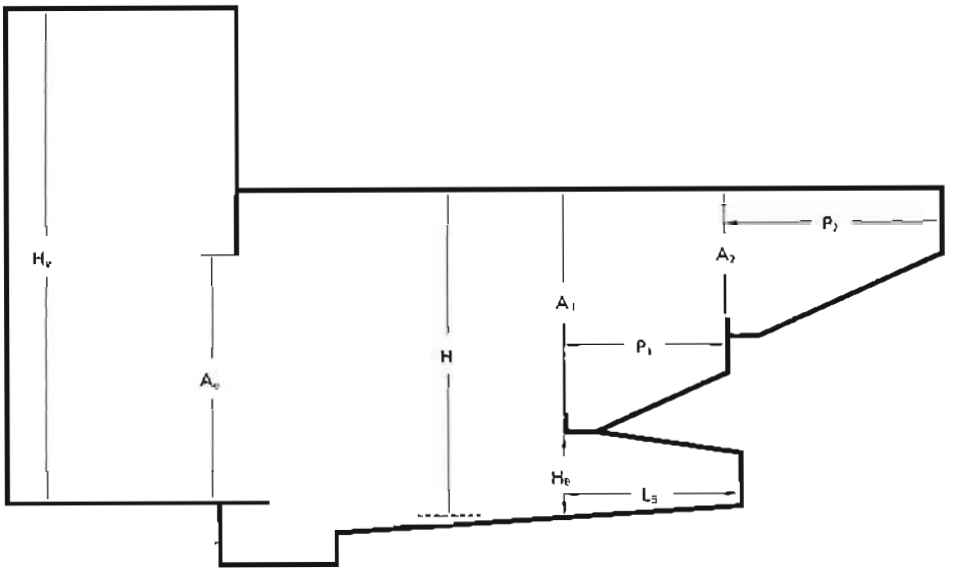
En acústica de salas se utilizan una serie de indicadores, de tipo genérico, que relacionan entre sí magnitudes geométricas de los recintos, y que permiten cualificarlos por comparación con los obtenidos en una amplia muestra representativa de teatros y salas de conciertos cuya acústica se considera buena.

La notación y definiciones de las distintas magnitudes geométricas utilizadas en los indicadores se muestran en la tabla 14 y, algunas de éstas, se identifican en la figura 16.

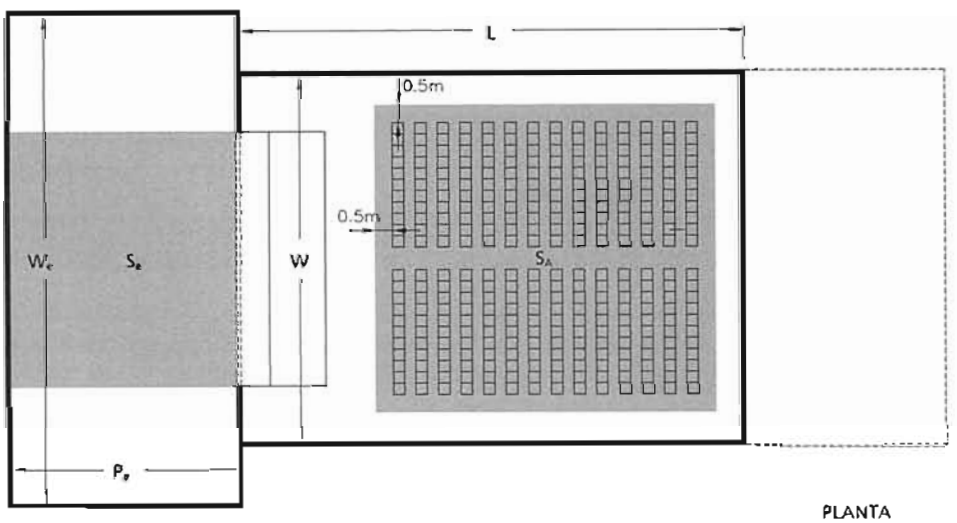
[36] UNE-EN-ISO 3382 (1997). *Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.*

Tabla 14. Magnitudes geométricas, acústicamente significativas, en una sala

		Dimensiones lineales (m)
Sala	L	Longitud media de la sala, medida desde la pared del escenario, por la cara que da al patio de butacas, hasta la pared de fondo. Si esta última es curva, se toma un punto medio representativo.
	W	Anchura media de la sala medida entre los paramentos opuestos en la zona de audiencia del patio de butacas, y sin tener en cuenta cualquier proyección de los anfiteatros.
	H	Altura media de la sala, medida desde el suelo del patio de butacas hasta el techo de la sala, en la parte de suelo del patio no cubierta por los anfiteatros.
	D	Distancia desde el frente de la escena hasta el espectador más lejano, medida sobre la línea central, a menos que la pared trasera sea curva, en cuyo caso se elegirá el punto más desfavorable.
Escena	P_e	Profundidad media de la escena.
	W_e	Anchura media de la escena.
	H_e	Altura media del techo de la escena (peine) sobre el suelo del escenario.
	A_e	Apertura media del escenario.
Balcones y anfiteatros	L_B	Profundidad media de la zona situada bajo un anfiteatro en el patio de butacas.
	H_B	Apertura de la zona situada bajo un anfiteatro en el patio de butacas.
	P_1	Profundidad media del primer anfiteatro.
	P_2	Profundidad media del segundo anfiteatro.
	A_1	Apertura de primer anfiteatro.
	A_2	Apertura de segundo anfiteatro.
		Superficies (m^2)
	S	Superficie total de revestimiento de la sala.
	S_a	Superficie sobre la que se localizan los asientos de la audiencia. Las superficies están proyectadas sobre la horizontal, con lo que en suelos inclinados, como los anfiteatros, el área inclinada no está medida.
	S_p	Área de una banda de 0,5 m de ancho alrededor de los asientos. Cuando la audiencia se sienta hasta el borde de una pared o de un antepecho de un anfiteatro, este ancho de pasillo no se considera.
	S_A	Superficie acústica efectiva de audiencia ($S_A = S_a + S_p$).
	S_e	Área de la escena, a menos que ésta sea muy grande, ya que entonces S_e es el área real ocupada por la orquesta. Como se utiliza sólo en el caso de conciertos, esta superficie se corresponde con el área de la escena ocupada por la concha acústica.
	S_f	Área del foso de la orquesta.
	S_c	Área de la cortina expuesta en el proscenio. Se supone que el telón cortafuegos está levantado.
	S_{tc}	Superficie acústica efectiva total de audiencia para salas de concierto ($S_{tc} = S_A + S_e + S_c$).
	S_{to}	Superficie acústica efectiva total de audiencia para teatros de ópera ($S_{to} = S_A + S_f + S_c$).
		Volúmenes (m^3)
	V_1	Volumen de la sala que incluye el volumen de aire desde el telón principal y el del foso de la orquesta, cuando existe. No incluye el volumen del escenario, concha acústica, ni el ocupado por la estructura de los anfiteatros.
	V_2	Volumen del escenario hasta la altura del peine.
	V_3	Volumen de la concha acústica.
		Aforo
	N	Número de asientos de la sala (normalmente, el espacio ocupado por las sillas de ruedas no está contabilizado).



SECCIÓN



PLANTA

Figura 16. Esquema de dimensiones y superficies.

Relación volumen/plaza (V_t/N)

La relación volumen/plaza es uno de los parámetros geométricos más significativos para obtener unas buenas condiciones acústicas en el interior de una sala. En efecto, al ser el RT directamente proporcional al volumen e inversamente proporcional a la absorción sonora del mismo (y la zona de audiencia suele ser la más absorbente), la relación V_t/N estará fuertemente correlacionada con el RT.

La tabla 15 recoge los valores recomendados para este indicador en función del uso del recinto.

Relación volumen/superficie acústica efectiva de audiencia (V_t/S_A)

L. L. Beranek propuso usar la relación V_t/S_A como parámetro geométrico de diseño en acústica de salas. Esta propuesta se basa en la observación del hecho de que la absorción sonora total de una sala aumenta proporcionalmente con la superficie de suelo ocupada por la audiencia, y es casi independiente del número de personas que ocupan esa superficie si la distribución es suficientemente densa[37].

[37] Beranek, L. L. (1960). Audience and seat absorption in large halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 32, pp. 661-670.

Según Beranek[38], la absorción debida a las superficies interiores de una sala ocupada, supone, normalmente, un 33% de la absorción total del recinto. Asumiendo este comportamiento, el tiempo de reverberación medio (RT_{mid}) del recinto ocupado, puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$RT_{mid} \cong 0{,}14 \cdot \frac{V}{S_t} \qquad [67]$$

donde V es el volumen del local (m^3). S_t es la superficie acústica efectiva total y la constante dimensional 0,14 incorpora las hipótesis realizadas por Beranek.

La tabla 15 presenta valores recomendados para este indicador.

Relación superficie acústica efectiva de audiencia/plaza (S_A/N)

Aunque la relación superficie acústica efectiva de audiencia/plaza (S_A/N) no debe superar 0,65 m^2/plaza, la tabla 15 muestra un rango de valores aceptables en función del uso de la sala.

Relaciones V_t/S_{tc} y V_t/S_{to}

Las relaciones V_t/S_{tc} y V_t/S_{to} son similares al indicador V_t/S_A, con la diferencia de que estos últimos se ajustan, de manera más específica, al uso del recinto como sala de conciertos o teatro de ópera, respectivamente. Como puede verse en las definiciones de la tabla 14, contemplan otras superficies, altamente absorbentes, y que son características de dichos usos.

Relaciones L/A_s y P_s/A_s

Ambos indicadores dependen de la apertura de la escena (A_s) hacia el patio de butacas o hacia el interior del volumen escénico. Permiten obtener información acerca del comportamiento de ambos volúmenes (sala y escena) como espacios acoplados, según el método empírico de Knudsen[39].

Balcones y anfiteatros

En este apartado se recogen los indicadores geométricos L_B/H_B, P_1/A_1 y P_2/A_2, que relacionan las dimensiones de balcones y anfiteatros, definidas en la tabla 14.

En los anfiteatros y balcones, la cantidad de reflexiones procedentes de las partes superiores de las salas depende en gran medida de la profundidad y apertura, hacia la sala, de estas formas. La disminución del sonido reverberante bajo ellas es desfavorable para la audición de la música. En el caso de teatros, la

Tabla 15. Valores recomendados para las relaciones V_t/N, V_t/S_A y S_A/N

Uso de la sala	V_t/N		V_t/S_A		S_A/N	
	Medio	Rango	Medio	Rango	Medio	Rango
Teatro	5,0	4,0-6,0	7,5	6,6-9,4	0,64	0,53-0,75
Ópera	5,7	4,5-7,4	8,2	6,9-9,5	0,57	0,52-0,66
Concierto	7,8	6,2-10,8	12,2	10,2-14,2	0,59	0,54-0,64
Polifuncional	7,1	5,1-8,5	10,6	9,2-12,0	0,66	0,63-0,75
Iglesia	7,2	5,1-9,1	–	–	–	–
Conferencias	3,1	2,3-4,3	–	–	–	–
Cine-teatro	3,5	2,8-5,1	–	–	–	–

[38] Beranek, L. L. (1996). *Opus cit.*, p. 437.
[39] Knudsen, V. O. y Harris, C. M. (1988). *Opus cit.*, p. 177.

disminución moderada del sonido reverberante lleva asociado un aumento de la claridad de la voz (C_{50}) y de la definición (D_{50}).

Barron[40] propone como criterio práctico que el límite máximo entre la profundidad de la zona situada debajo de un anfiteatro, o balcón en un teatro, y la apertura del mismo, sea igual a 2. En concreto, suelen establecerse estas especificaciones:

- Para las zonas situadas debajo de un anfiteatro en el patio de butacas:

$$L_B \leq 2.5 \cdot H_B \qquad [68]$$

- Para anfiteatros superiores:

$$P_1 \leq 2.5 \cdot A_1 \text{ ó } P_2 \leq 2.5 \cdot A_2 \qquad [69 \text{ y } 70]$$

Aunque acotar estos parámetros en los intervalos recomendados no es suficiente para garantizar un buen comportamiento acústico de una sala, podemos decir que sí que constituye una condición necesaria y, desde luego, una buena base para establecer el predimensionado acústico de cualquier diseño.

[40] Barron, M. (1995). Balcony overhangs in concert auditoria. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (5), pp. 2580-2589.

4.2. EQUIPOS DE MEDIDA E INSTRUMENTACIÓN

REVERBERACIÓN

La norma internacional UNE-EN-ISO 3382[1], describe las medidas de campo de tiempo de reverberación, y, en general, en este trabajo, se han seguido las recomendaciones allí sugeridas, adaptadas a la instrumentación disponible en nuestro laboratorio cuando se realizó la adquisición de datos.

En el método tradicional se utiliza una fuente de ruido de banda ancha, de forma que cuando la fuente se apaga se registra la curva de extinción. Esta curva puede tener fuertes fluctuaciones debido al carácter estocástico de la señal de excitación y, en consecuencia, deben promediarse, de forma coherente, varias curvas de extinción en cada posición de medida. Ampliando el proceso de promediado, para disponer de un promedio espacial, es posible obtener curvas de extinción más regulares a partir de las cuales se evalúa el tiempo de reverberación característico del recinto.

Otro método, ampliamente utilizado, hace uso de un disparo como señal de excitación (señal impulsiva), obteniéndose así la respuesta del recinto al impulso. Como demostró Schröeder, la curva de extinción del recinto puede calcularse mediante un proceso de integración hacia atrás del cuadrado de esta respuesta al impulso. Una de las ventajas fundamentales del método es que se eliminan las fluctuaciones estocásticas de la señal, de forma que una excitación en cada punto es suficiente para proporcionar una curva de extinción equivalente a la curva promedio obtenida mediante infinitas excitaciones utilizando el ruido interrumpido. También en este caso será recomendable realizar el promediado espacial que indicábamos antes.

En la figura 1 se muestra esquemáticamente la instrumentación utilizada, tanto en la fase de adquisición de datos, como en la de análisis y obtención de resultados. El disparo se produce en el punto más usual de ubicación de la fuente natural, en el escenario, mediante un revolver detonador de 9 mm. El micrófono se situó a una altura aproximada de la cabeza de una persona sentada (≈ 1.20 m).

La respuesta al impulso en los diferentes puntos de medida es captada mediante un micrófono (B&K 4165), incorporado al correspondiente preamplificador (B&K 2639), conectados, a través de una fuente de polarización de micrófonos (B&K 2804), al registrador magnético DAT Sony PC204 dotado de 4 canales. El fondo de escala de la etapa de entrada del DAT se ajustó para aprovechar al máximo su rango dinámico, pero evitando su saturación. No obstante, la relación señal-ruido a bajas frecuencias para este tipo de señales no llega a alcanzar los valores óptimos para tener caídas adecuadas para medir RT_{30}.

Posteriormente en el laboratorio se procede al análisis, en bandas de $^1/_3$ de octava, de las señales registradas, utilizando para ello un analizador en tiempo real B&K 2133, dotado de filtros digitales.

Para cada respuesta al impulso se obtiene un multiespectro (un espectro cada $^1/_{64}$ s) cubriendo, en bandas de $^1/_3$ de octava, el intervalo entre 100 y 6.300 Hz. El número de espectros se ajusta, en cada caso, en función de la duración de la caída. Utilizando las funciones implementadas en el propio analizador, cada multiespectro es integrado hacia atrás, según sugiere el método de Schröeder, y a partir de la pendiente, m, del multiespectro integrado, se evalúa el tiempo de reverberación:

$$RT = -\frac{60}{m}$$

[1] UNE-EN-ISO 3382 (1997). *Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.*

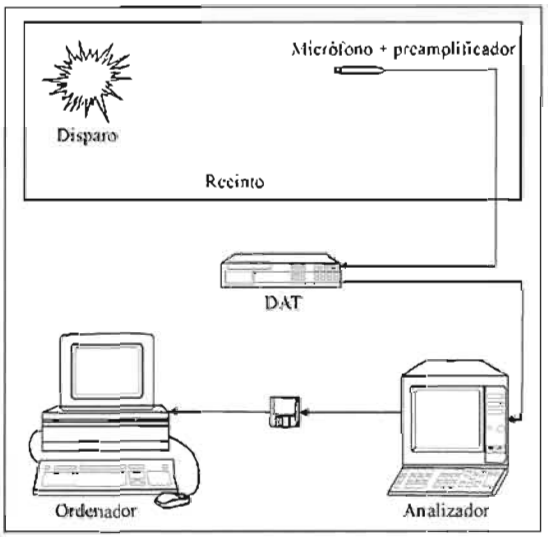


Figura 1. Esquema del sistema utilizado en el ensayo de tiempo de reverberación.

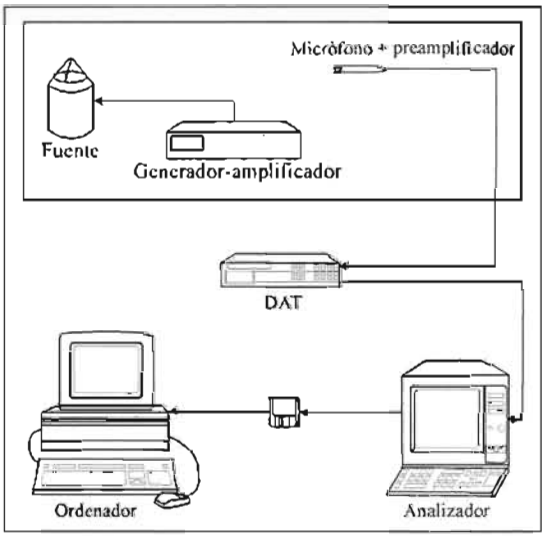


Figura 2. Esquema del sistema utilizado en el ensayo de distribución sonora.

Para calcular la pendiente se ha elegido el intervalo comprendido entre –5 y –30 dB contados a partir del nivel más alto del multiespectro integrado, siempre que ello era posible. Las curvas tonales presentadas en este trabajo corresponden al promedio espacial de los puntos medidos en el teatro.

Actualmente, la instrumentación disponible en el laboratorio nos permite determinar la respuesta al impulso utilizando señales robustas pseudoaleatorias (secuencias de máxima longitud) o deterministas (señales sinusoidales de barrido en frecuencia). Este tipo de señales están ampliamente contrastadas, de modo que es posible obtener todos los parámetros utilizados en este trabajo a partir de las respuestas al impulso obtenidas con estas señales.

DISTRIBUCIÓN SONORA

Las medidas de distribución sonora nos permiten caracterizar el grado de uniformidad del campo acústico en el interior del recinto. El ensayo consiste, esencialmente, en determinar el nivel de presión sonora, en diversos puntos situados en la zona de interés, mientras una fuente acústica emite ruido de banda ancha en el lugar más probable de ubicación del emisor en el uso normal del recinto.

En nuestro caso la señal de ruido es generada por una fuente sonora de referencia calibrada (B&K 4205). El nivel de potencia se ajustó entre 95 y 99 dB ref 1 pW, procurando alcanzar el valor más alto posible, evitando saturar el amplificador de la fuente. De esta forma el nivel de la señal en todos los puntos de medida, y para todas las bandas, permite despreciar el efecto del ruido de fondo.

La instrumentación y procedimiento de medida utilizados en este ensayo se han esquematizado en la figura 2 y se corresponden, en líneas generales, con los utilizados en los ensayos de reverberación, sustituyendo la señal impulsiva del disparo por la estacionaria generada por la fuente.

Antes de realizar las medidas, y una vez ajustado el fondo de escala del DAT, se registra una señal de calibración, generada por el calibrador de nivel sonoro B&K 4230, que proporciona 93,8 dB a 1.000 Hz. Esta señal se utiliza posteriormente en el laboratorio para calibrar el sistema de análisis, constituido esencialmente por el analizador B&K 2133 y el ordenador.

Para cada punto, el micrófono (B&K 4165) se sitúa a una altura de 1,20 m del suelo y se registra la señal generada por la fuente acústica durante unos 30 s. Esta señal es posteriormente analizada en el laboratorio, en bandas de octava (para las octavas comprendidas entre 125 y 8.000 Hz), eligiendo los 15 s centrales de cada registro para promediar linealmente. Además, el analizador proporciona los niveles globales de banda ancha, lineal y ponderado *A*.

Como la fuente está calibrada, conocer el espectro de emisión de potencia acústica nos ha permitido estudiar el carácter difuso del campo acústico, al poder evaluar la fuerza acústica y comparar ésta con los modelos clásico y de Barron del campo acústico interior en un recinto.

INTELIGIBILIDAD. ÍNDICE RASTI

La inteligibilidad se ha evaluado utilizando el índice RASTI *(Rapid Speech Transmission Index)*, simplificación del STI *(Speech Transmission Index)*, que tiene como ventajas esenciales su fácil realización y su repetitividad.

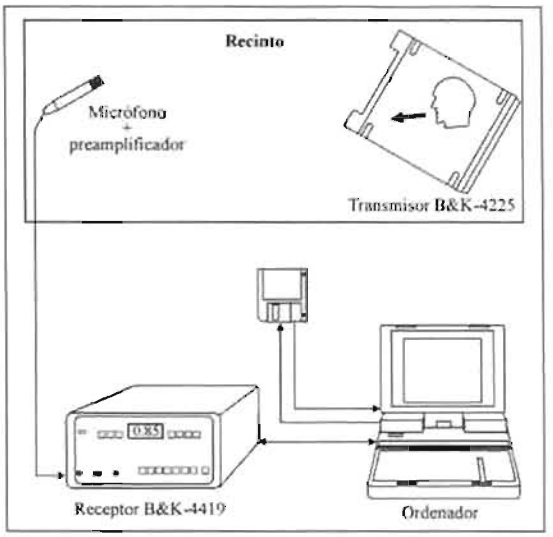


Figura 3. Esquema del sistema utilizado en el ensayo de inteligibilidad.

En este método, un emisor (B&K 4225) envía al canal de transmisión, en este caso el teatro, una señal de ruido filtrada en las bandas de octava de 500 y 2.000 Hz, esenciales para la inteligibilidad de la palabra, y modulada, en cada banda, con señales de baja frecuencia que intentan reproducir las modulaciones de la voz humana al hablar (1,02, 2,03, 4,07 y 8,16 Hz en la banda de 500 Hz y 0,73, 1,45, 2,90, 5,81 y 11,63 en la de 2.000). El emisor, además, posee unas características de direccionalidad parecidas a las de la cabeza humana.

Un micrófono capta la señal en cada punto de medida y la envía al receptor (B&K 4419). Éste analiza la degradación de la modulación entre el punto de emisión y el de recepción, obteniéndose la Función de Transferencia de Modulación entre los dos puntos. A partir de ella se determina el índice RASTI.

En nuestro caso todo el proceso estaba controlado mediante un ordenador portátil, vía interface RS232, a través de un programa de elaboración propia: desde el acondicionamiento del receptor hasta el almacenamiento de los datos en disco para su posterior análisis y tratamiento. En la figura 3 aparece un esquema del sistema de medida utilizado. El micrófono, situado a una altura aproximada de 1,20 m del suelo, se desplaza entre los distintos puntos seleccionados.

En todos los casos el período de medida, para cada posición, se ha fijado en 32 s (el más alto posible) con el fin de minimizar las fluctuaciones aleatorias en el índice RASTI causadas por las variaciones del ruido de fondo.

Puesto que se entiende que, dadas las características y funcionalidad del recinto, el orador tenderá a elevar la voz al dirigirse a la audiencia, el nivel de emisión se ha ajustado en su valor de ref. +10 dB, lo que supone niveles de emisión aproximados de 69 dB en la banda de 500 Hz y 59 en la de 2 kHz, medidos a 1 m del altavoz.

RUIDO DE FONDO

Las medidas de ruido de fondo se han realizado siguiendo, esencialmente, el procedimiento descrito para los ensayos de distribución sonora. De hecho, el esquema es el mismo que el de la figura 2, si desconectamos la fuente y registramos únicamente el ruido de fondo. Al no ser esta señal estacionaria, el tiempo de registro en el DAT fue de 10 minutos, aproximadamente. En este caso, como los niveles eran mucho menores, se reajusta el fondo de escala del DAT y se vuelve a grabar la señal del calibrador como referencia. Aprovechando las capacidades del sistema de adquisición y análisis de datos, se han realizado medidas simultáneas del ruido en varios puntos diferentes, si se ha considerado significativo. Las medidas se hicieron con la instalación de climatización encendida y, posteriormente, apagada cuando ha sido posible. Además, junto a uno de los micrófonos de registro se coloca un sonómetro integrador que nos proporciona el nivel continuo equivalente (L_{eqA}) del período de medida.

El análisis se ha realizado, promediando linealmente en el analizador durante el período de registro, tanto en bandas de octava como de tercios de octava.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

ACKERMAN, J. S. (1980). *Palladio.* Madrid: Xarait Ediciones.

ARAU, H. (1999). *ABC de la Acústica Arquitectónica.* Barcelona: CEAC.

BAILS, B. (1796). *De la Arquitectura Civil. Elementos de Matemática. Tomo IX. parte I* (TOMO I: Estudio crítico por Pedro Navascués Palacio y TOMO II: Texto [1983]. Murcia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia).

BARRON, M. (1973). Growth and decay of sound intensity in rooms according to some formulae of geometric acoustics theory. *Journal of Sound and Vibration,* 27 (2), pp. 183-196.

BARRON, M. (1988). Subjetive study of British symphony concert halls. *Acustica,* 66, pp. 1-14.

BARRON, M. y LEE, L.-J. (1988). Energy relations in concert auditoriums, I. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 84 (2), pp. 618-628.

BARRON, M. (1993). *Auditorium acoustics and architectural design.* Londres: E & FN Spon and imprint of Chapman & Hall.

BARRON, M. (1995). Balcony overhangs in concert auditoria. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 98 (5), pp. 2580-2589.

BARRON, M. (1996). Loudness in concert halls. *Acustica,* 82, S21-S29.

BERANEK, L. L. (1960). Audience and seat absortion in large halls. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 32, pp. 661-670.

BERANEK, L. L. (1962). *Music, Acoustics and Architecture.* Nueva York: Wiley.

BERANEK, L. L. (1988). *Acoustical measurements.* Massachusetts: Acoustical Society of America (versión original 1949).

BERANEK, L. L. (1993). *Acoustics.* Nueva York: Acoustical Society of America.

BERANEK, L. L. (1996). *Concert and Opera Halls: how they sound.* Nueva York: Acoustical Society of America.

BERANEK, L. L. y HIDAKA, T. (1998). Sound absortion in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 104, pp. 3169-3177.

BERANEK, L. L., HIDAKA, T. y MASUDA, S. (2000). Acoustical design of the opera house of the New National Theatre, Tokyo, Japan. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 107, pp. 355-367.

BISQUERRA, R. y FORNER, A. (1992). Normativa sobre referencias bibliográficas y citas en el redactado. *Revista de Investigación Educativa,* 19, pp. 81-87.

BISTAFA, S. R. y BRADLEY, J. S. (2000). Reverberation time and maximun background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 108 (4), pp. 1721-1731.

BISTAFA, S. R. y BRADLEY, J. S. (2000). Predicting reverberation times in a simulated classroom. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 107 (2), pp. 861-875.

BORK, I. (2000). A comparison of room simulation software - The 2nd Round Robin on room acoustical computer simulation. *Acustica,* 86, pp. 943-956.

BRADLEY, J. S. (1985). Uniform derivation of optimum conditions for speech in rooms. *Building Research Note, 239.* Ottawa: National Research Council of Canada.

BRADLEY, J. S. (1991). A comparison of three classical concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 89, pp. 1176-1192.

BRADLEY, J. S. (1992). Predicting theater chair absorption from reverberation chamber measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 91, pp. 1514-1524.

BRADLEY, J. S. y HALLIWELL, R. E. (1986). New room acoustics measurement software. *The Journal of the Acoustical Society of America,* Suppl. 1 80, S39.

BRADLEY, J. S., REICH, R. D. y NORCROSS, S. G. (2000). On the combined effects of early-and late-arriving sound on spatial impression in concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108, pp. 651-661.

CARRIÓN, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Ediciones UPC (Universidad Politécnica de Cataluña).

CATT-ACOUSTIC V7.2, USER'S MANUAL. (1999). *Room Acoustics prediction and desktop auralization*. CATT, Gothenburg (Suecia).

CAVANAUGH, W. J. y WILKES J. A. (1998). *Architectural Acoustics. Principles and practice*. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc.

CONTURIE, L. (1955). *L'Acoustique dans les batiments. Théorie et applications*. Paris: Éditions Eyrolles.

CREMER, L., MÜLLER, H. A. y SCHULTZ, T. J. (1982). *Principles and applications of Room Acoustics*. Volumen 1. Londres: Applied Science Publishers (edición original en alemán: Stuttgart: Hirzel, 1978).

DÄMMING, P. (1991). Model investigations into sound fields in reverberation rooms. *Acustica*, 75, pp. 105-120.

DIRECCIÓN GENERAL DE ARQUITECTURA Y VIVIENDA. MOPU (1985). *Arquitectura teatral en España*. Madrid: Autor.

EGAN, M. D. (1972). *Concepts in Architectural Acoustics*. Nueva York: McGraw-Hill.

EGAN, M. D. (1988). *Architectural Acoustics*. Nueva York: McGraw-Hill.

FAVARO, A. (1882). *L'Acustica applicata alla costruzione delle sale*. Torino: Tip. e Lit. Camilla e Bertolero.

FERNÁNDEZ MUÑOZ, A. L. (1989). *Arquitectura teatral en Madrid: del corral de comedias al cinematógrafo*. Madrid: El Avapiés, S.A.

FLORES, P. (1990). *Manual de acústica, ruido y vibraciones* (3ª ed.). Barcelona: Ediciones GYC.

FORSYTH, M. (1985). *Buildings for music*. Cambridge: Cambridge University Press.

FÜRJES, A. T., AUGUSZTINOVICZ, F. y ARATÓ-BORSI, E. (2000). A new method for the objective qualification of rooms. *Acustica*, 86, pp. 911-918.

GARCÍA TOLOSANA, C. y SERRA, J. (1984). *Curso de rehabilitación. Acondicionamiento térmico y acústico*. Madrid: COAM.

GÓMEZ DE LIAÑO, I. (1986). *Athanasius Kircher. Itinerario del éxtasis o las imágenes de un saber. Tomos I y II*. Madrid: Ediciones Siruela.

HAAN, C. H. y FRICKE, F. R. (1992). Statistical investigations of geometrical parameters for the acoustic design of auditoria. *Applied Acoustics*, 35, pp. 105-127.

HANNA, Y. I. y KANDIL, M. M. (1991). Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Applied Acoustics*, 34, pp. 281-291.

HIDAKA, T. y BERANEK, L. L. (2000). Objective and subjetive evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (1), pp. 368-383.

HIDAKA, T., BERANEK, L. L., MASUDA S., NISHIHARA, N. y OKANO, T. (2000). Acoustical design of the Tokyo Opera City (TOC) concert hall, Japan. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (1), pp. 340-354.

HIDAKA, T., NISHIHARA, N. y BERANEK, L. L. (2001). Relation of acoustical parameters with and without audiences in concert halls and a simple method for simulating the occupied state. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109 (3), pp. 1028-1042.

HODGSON, M. (1991). Evidence of diffuse surface reflections in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89 (2), pp. 765-771.

HOUGAST, T. y STEENEKEN, H. J. M. (1973). The Modulation Transfer Function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility. *Acustica*, 28, pp. 66-73.

HOUGAST, T. y STEENEKEN, H. J. M. (1985). A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77 (3), pp. 1069-1077.

IZENOUR, G. C. (1988). *Theater technology*. Nueva York: McGraw-Hill.

IZENOUR, G. C. (1996). *Theater desing* (2ª ed.). Manitoba: Yale University Press.

JOSSE, R. (1975). *La acústica en la construcción*. Barcelona: Gustavo Gili, S.A. (traducción del original francés: *Notions d'acoustique a l'usage des architectes, ingénieurs et urbanistes*. Paris: Eyrolles).

JOUHANEAU, J. (1997). *Acoustique des salles et sonorisation*. Paris: Technique & Documentation.

JUNTA DE ANDALUCÍA. CONSEJERÍA DE CULTURA Y MEDIO AMBIENTE (1990). *Arquitectura teatral y cinematográfica. Andalucía 1800-1990*. Sevilla: Autor.

KNUDSEN, V. O. y HARRIS, C. M. (1988). *Acoustical designing in Architecture* (5ª ed.). Nueva York: Acoustical Society of America.

KUTTRUFF, H. (1991). *Room Acoustics* (3ª ed.). Londres: Elsevier Science Publishers LTD.

LARA, S. (1991). *El teatro romano de Sagunto: génesis y construcción.* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

LAWRENCE, A. (1970). *Architectural Acoustics.* Londres: Applied Science Publishers Limited.

LAWRENCE, A. (1989). *Acoustics and the built environment.* Londres: Elsevier Science Publishers Ltd.

LEÓN, A. L. (1998). *La acústica de los teatros a través de la historia.* Actas del II Congreso Nacional de Historia de la Construcción. La Coruña, 22-24 Octubre, pp. 263-271.

LEÓN, A. L., NAVARRO, J., SENDRA, J. J., ZAMARREÑO, T., ALGABA, J. y GALINDO, M. (2000). *La valoración acústica en los proyectos de rehabilitación de teatros. El ejemplo andaluz.* Publicación Oficial del II Congreso Iberoamericano de Acústica [CD Rom]. Madrid, 16 a 20 de Octubre.

LÓPEZ GARCÍA, V. (1970). *Acústica.* Madrid: Index.

LLINARES, J. y LLOPIS, A. (1987). *Acústica Arquitectónica.* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

MARSHALL, A. H. (1990). Recent developments in acoustical desing process. *Applied Acoustics.* 31, pp. 7-28.

MARSHALL, L. G. (1994). An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 96 (4), pp. 2251-2261.

MEHTA, M., JOHNSON, J. y ROCAFORD, J. (1999). *Architectural Acoustics. Principles and desing.* Nueva Jersey: Prentice-Hall, Inc.

MEISSER, M. (1973). *Acústica de los edificios.* Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A.

MESTRE, V. y GARCÍA SENCHERMES, A. (1983). *Curso de Acústica en Arquitectura.* Madrid: COAM.

NBE-CA-88. *Norma básica de la edificación sobre condiciones acústicas en los edificios.*

OKANO, T. (2000). Image shift caused by strong lateral reflections, and its relation to inter-aural cross correlation. *The Journal of the Acoustical Society of America.* 108 (5), pp. 2219-2230.

PÉREZ MIÑANA, J. (1969). *Compendio práctico de Acústica.* Barcelona: Labor, S.A.

PEVSNER, N. (1979). *Historia de las tipologías arquitectónicas.* Barcelona: Gustavo Gili (traducción del original inglés: *A History of Buildings Types.* Nueva Jersey: Princeton University Press, 1976).

PIERCE, J. R. (1985). *Los sonidos de la música.* Barcelona: Prensa Científica, S.A. (edición original en inglés: Scientific American Books, 1983)

RAMÍREZ, J. A. (1996). *Cómo escribir sobre arte y arquitectura.* Barcelona: Ediciones del Serbal.

RECUERO, M. (1992). *Acústica Arquitectónica. Soluciones prácticas.* Madrid: Paraninfo, S.A.

RECUERO, M. y GIL, C. (1993). *Acústica Arquitectónica* (2ª ed.). Madrid: Izquierdo, S.A.

RUZZA, L. y TANCREDI, M. (1987). *Storie degli spazi teatrali* (2 tomos). Roma: Euroma.

SABINE, W. C. (1992). *Collected papers on Acoustics.* Los Altos (California): Peninsula Publishing (edición original en 1922. Massachusetts, Cambridge: Harvard University Press).

SAUNDERS, G. (1790). *Treatise on theatres.* Londres (facsímil por Benjamin Blom, New York, 1968).

SCHROEDER, M. R. (1965). New method of measuring reverberation time. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 37, pp. 409-412.

SCHULTZ, T. J. (1980). Reverberation time data for some North American concert halls, unoccupied. *Bolt Beranek and Newman Tech. Inf. Rep.,* 98 (January).

SENDRA, J. J. (1999). *Computational Acoustics in Architecture.* Southampton, Boston: WIT Press.

SENDRA, J. J. y NAVARRO, J. (1997). *La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias: del Paleocristiano al Tardobarroco.* Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

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

SENDRA, J. J., ZAMARREÑO, T. y NAVARRO, J. (1999). *La acústica de las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla.* Sevilla: Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA (1995). Acoustic quality of concert halls. State of the art and research trends. *Actas de la Conferencia Internacional sobre Calidad Acústica en Salas de Concierto.* Madrid 24-25 de Octubre de 1994. Madrid: Sociedad Española de Acústica.

TRIVEDI, N. K. y MEHROTRA, D. (1991). Optimum RT of music studios suited to Indian music. *Applied Acoustics,* 32, pp. 169-177.

TORRES, R. R., KLEINER, M. y DALENBÄCK, B. (2000). Audibility of "diffusion" in room acoustics auralization: an initial investigation. *Acustica*, 86, pp. 919-927.

UNE-EN-ISO 3382 (1997). *Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.*

VITRUVIO, M. L. (1970). *Los diez libros de Arquitectura.* Barcelona: Iberia, S.A. (traducción directa del original en latín).

WEISSE, K. (1956). *Acústica de los locales.* Barcelona: Gustavo Gili, S.A.

Este libro se terminó de imprimir
el 16 de marzo de 2007
en Pedro Cid, S.A.

Los autores son miembros de un grupo de investigación interdisciplinar del Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla, que desarrolla trabajos de investigación en el ámbito de la Acústica de Salas desde hace más de veinte años. Han actuado como consultores acústicos del Plan de Rehabilitación de Teatros de Andalucía, promovido por la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía. En el año 2002 organizaron en Sevilla el *Forum Acusticum Sevilla 2002*, el Congreso Internacional de Acústica de la *European Acoustics Association*, teniendo el encargo de organizar en el año 2007, también en Sevilla, el *International Symposium on Room Acoustics*. En la actualidad desarrollan el proyecto coordinado de investigación del Plan Nacional I+D+i "Establecimiento de parámetros acústicos determinantes de la calidad en salas de concierto y auditorios. Propuestas para su aplicación a los proyectos de nueva planta o rehabilitación" (BIA2003-09306-CO4-02).