

HACIA UNA ACÚSTICA PARA LA ARQUITECTURA

PACS: 43.55.Ka

Beckers, Benoit; Serra Florensa, Rafael
Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, ETSAB, UPC.
Diagonal 649, 7ª pl.
08028 Barcelona. España
Tel: 34 934 016 422
Fax: 34 934 016 426
E-Mail: benoitbeckers@hotmail.com

ABSTRACT

A new software, "Radit2d" (authors: Benoit Beckers & Luc Masset, 2002) has been taught to students in architecture for three years, in our programs of masters and doctorate, resulting in a notable increment of the acoustical quality in their auditoriums and theatres design. Furthermore, we think that this didactic approach may indicate a different way for further investigation in room acoustics, based in a more architectural approach. This article pretends to illustrate such an idea, remembering the principal steps of room acoustics history and withdrawing its necessary evolution, till a complete integration between signal theory and geometrical thought.

RESUMEN

Un nuevo programa informático, "Radit2d" (autores: Benoit Beckers & Luc Masset, 2002) ha sido enseñado a estudiantes de arquitectura durante los tres últimos años, en nuestros programas de master y doctorado, conduciéndolos a notables mejorías en sus diseños acústicos de auditorios y teatros. Creemos que este acercamiento didáctico abre una vía diferente, más arquitectónica, para la investigación en acústica de salas. Este artículo pretende ilustrar tal idea, recordando las principales teorías de la acústica de salas y dibujando su necesaria evolución, hasta una integración completa entre la teoría de la señal y el pensamiento geométrico.

1. ARQUITECTURA Y CONSTRUCCIÓN

Pondremos la acústica de salas al servicio de la construcción o bien de la arquitectura, según adoptemos las prácticas de este arte o bien de aquel conjunto de técnicas: bien razonando caso por caso con fórmulas y ábacos estrechamente vinculados con determinadas técnicas constructivas, bien acompañando cualquier proyecto de arquitectura, desde sus primeros trazos, sus primeros garabatos, hasta su completa realización.

Arquitectura y construcción son dos enfoques sobre un mismo problema, no siempre complementarios ni siempre enfrentados, pero claramente separados en la práctica y, lo que nos importa aquí, a este doble enfoque general corresponden dos teorías acústicas bien

diferenciadas y, en cuanto a ellas, seguramente irreconciliables: la *teoría geométrica*, esencialmente arquitectónica, y la *teoría estadística*, esencialmente constructiva.

La noción de *reverberación* da un ejemplo muy revelador de cuán importante resulta distinguir claramente los trasfondos diferentes de ambas teorías. El tiempo de reverberación es un parámetro muy útil, que se puede medir, y que corresponde a una percepción precisa. Por ello, puede parecer, *a priori*, evidente considerarlo en un enfoque arquitectónico. Sin embargo, no se ha logrado nunca evaluarlo satisfactoriamente en una simulación mediante un método puramente geométrico: su esencia estadística no lo permite... Resulta luego imposible vincular directamente su noción con las decisiones geométricas del proyecto de arquitectura, las cuales, sin embargo, tienen sobre él una influencia determinante. La consecuencia lógica debería ser: abandonar este parámetro al enfoque constructivo, donde tiene su sitio, y reemplazarlo, en el enfoque arquitectónico, por otra aproximación a la misma idea, pero que sea de naturaleza geométrica. Al no conformarse con ello, los acústicos han producido decenas de fórmulas¹, buscando cada vez abarcar un poco más de geometría, sin conseguir nunca nada satisfactorio. Finalmente, prevalece la fórmula más antigua, la de Sabine, que su simplicidad y su uso generalizado para la caracterización de los materiales hacen insoslayable en el enfoque constructivo, donde debería permanecer siempre estrechamente enmarcada. Para la arquitectura, no sirve.

Históricamente, distinguimos, a principios del siglo XX, dos tendencias enfrentadas en la acústica de salas. Resumiendo, y simplificando apenas, podemos oponer una “escuela americana”, que desarrolla los métodos de W. C. Sabine², en un enfoque puramente estadístico, constructivo, y una “escuela francesa”, que basa sus diseños en el método manual de trazado de rayos, según una tradición geométrica decimonónica, heredera de los matemáticos Monge y Poncelet y de los grandes dibujantes de arquitectura, como Viollet-le-Duc y Choisy. En muchas salas americanas de entonces, la despreocupación acústica por la geometría desemboca en grandes cúpulas y otras formas cóncavas, las cuales, si bien respetan los vagos criterios espaciales del enfoque estadístico en cuanto al volumen y a las superficies de absorbentes, generan ecos y focalizaciones, a menudo insalvables. En cambio, las salas francesas de la época pecan por una excesiva aridez sonora, ya que las primeras reflexiones, demasiado bien conducidas, van todas a morir en el público que las disfruta absorbiéndolas...

Llegados allí, tenemos, por una parte, fórmulas sencillas, pero cuyo dominio de aplicación y cuya precisión no se pueden determinar, y por otra unos procedimientos geométricos correctos, efectivos y útiles, pero insuficientes, y penosos de realizar manualmente. Básicamente, esa es la acústica que aún se enseña en las escuelas de arquitectura...

Con el desarrollo de la informática, a partir de los años sesenta, se dio la posibilidad de potenciar los métodos geométricos: el de las *fuentes imágenes* y, luego, el *trazado de rayos*³. En las siguientes décadas, se exploraron diferentes opciones, desde el trazado determinista o aleatorio⁴ de rayos hasta unos modelos *híbridos* que caen en el error, según opinamos, de buscar una imposible fusión entre la teoría geométrica y la teoría estadística. Es que el sueño de poder simular el tiempo de reverberación perseguía ahora a los programadores, llevándoles a comprometer la sencillez y limpidez de su modelo de partida, y su fructífera analogía lumínica. En efecto, es en la *renderización* de imágenes que los algoritmos de “*ray tracing*” hallaron su principal inspiración, la cual constituye, para los acústicos, una rica fuente de emulación: prueba de ello es el recién interés despertado en la acústica por la *radiosidad*⁵.

Se han desarrollado muchos programas de trazado de rayos para la acústica de salas y, sin embargo, nunca entraron en el dominio y en la práctica de la arquitectura. La razón principal era la lentitud de los cálculos: estos programas podían servir, eventualmente, para el análisis (pero jamás se publicaron artículos exhaustivos sobre este asunto...) pero no para el diseño, donde se hace imprescindible un mínimo de interactividad.

2. LOS MODELOS Y SUS HIPÓTESIS

Ahora bien, ni el modelo geométrico ni el modelo estadístico remiten a la naturaleza del sonido, que sólo un tercer modelo, el ondulatorio, abarca en su propio marco teórico, de modo que los dos otros enfoques han de buscar en éste sus justificaciones y los límites de su autonomía. La acústica moderna empieza con la lenta elaboración de la *teoría ondulatoria* del sonido, que remonta al siglo XVII (Descartes, Mersenne,...), como la de la luz, y que culmina en el XIX, con el establecimiento de la ecuación de propagación del sonido (Rayleigh, Helmholtz), a semejanza de lo que se hizo en otros campos de la física (propagación del calor, ecuaciones de Maxwell,...).

Pero la ecuación de Helmholtz no se deja manipular fácilmente, y los algoritmos de simulación basados en su resolución mediante los métodos de elementos finitos⁶, diferencias finitas⁷ o elementos fronteras están aún muy lejos de ofrecer resultados interesantes para la acústica de salas. La notación ondulatoria permite, en la actualidad, cálculos particulares (por ejemplo: el estudio de superficies difusoras), valoraciones cualitativas y - lo más importante - ha dado nombre y descripción a toda una serie de fenómenos - difracciones, interferencias, ondas estacionarias,... - que desaparecen en los dos enfoques más limitados, pero mucho más efectivos, que hemos discutido hasta ahora, los cuales pueden sin embargo aprovecharse de sus resultados particulares (por ejemplo: introduciendo las características de una superficie difusora en un modelo de trazado de rayos).

Lo más interesante, para nosotros, es observar cómo los enfoques geométrico y estadístico se justifican dentro de la teoría ondulatoria, de dos maneras muy distintas.

La teoría geométrica es la más antigua: es probable que los griegos la manejaran para diseñar sus teatros y odeones⁸, y se trazaron conscientemente rayos sonoros en los primeros tratados de acústica de sala, en el siglo XVII. Luego, se desarrolló con la óptica geométrica, su hermana, y, hasta cierto punto, podríamos establecer cierto paralelo entre ambas: igual cayeron casi en desuso, como vencidas por los progresos de las correspondientes teorías ondulatorias, antes de renacer, a finales del siglo XX, gracias al sustento de la informática...

Las condiciones de validez de la simplificación geométrica del modelo ondulatorio son bastante claras: podemos decir, por ejemplo, que la reflexión especular sobre un reflector plano será preponderante siempre que las dimensiones implicadas de éste se hallen por lo menos dos o tres veces superiores a la longitud de onda del sonido estudiado. En general, las consideraciones ondulatorias imponen ciertas correcciones a los resultados geométricos (difracción, interferencias,...), pero estos primeros resultados son los que más precisamos para diseñar la forma de un recinto, orientar eventuales reflectores, ponderar la importancia acústica de determinada superficie,...

En cambio, son excesivamente escasos los estudios de la acústica ondulatoria realizados adrede para alimentar los algoritmos geométricos: apenas si podemos señalar unos pocos trabajos sobre la difusión o la absorción por la audiencia, y, más grave, no hay nada exhaustivo - que sepamos - sobre el importante tema de las focalizaciones...

Curiosamente, el enfoque estadístico, posterior a la teoría ondulatoria, ha mantenido siempre relaciones más estrechas con ella. Existió desde el principio una complementariedad discutible pero constantemente reafirmada entre ésta, que sabe explicar lo que no sabe hacer y aquel, que sabe hacer lo que no sabe explicar... Y eso que las bases ondulatorias de las fórmulas estadísticas no son nada evidentes, y sus condiciones de aplicación particularmente oscuras. El principal problema, con la fórmula de Sabine (y con todos sus epígonos), no es que ofrezca resultados imprecisos, sino que sea imposible, en un caso particular, evaluar su grado de imprecisión.

Ahora bien, este tipo de afinidad entre una teoría impotente y su afanoso lazarillo no constituye un caso aislado en la ciencia decimonónica. Encontramos⁹, por ejemplo, una relación muy similar entre la geometría neoplatónica defendida por los matemáticos franceses (Monge, Poncelet,...) y la teoría del "rendu réaliste" (es decir: de la *renderización manual*) construida en la misma época y en el mismo país por dibujantes técnicos, los cuales, lejos de

polemizar con sus compatriotas geómetras, se valían de sus depuradas teorías para hacer todo lo que estas desdeñaban, pero con resultados más vistosos, si no tan elegante...

3. LA CUARTA TEORÍA

Hacia la mitad del siglo XX, se produce una gran revolución en la acústica de salas: los instrumentos de producción y de medición del sonido – altavoces y micrófonos, luego fuentes y analizadores digitales – se desarrollan a gran velocidad, e invaden todas las actividades de la acústica.

Pero estas nuevas técnicas no nacen de la nada: vienen acompañadas por el desarrollo de las telecomunicaciones, y traen con ellas un enfoque nuevo, el de la *teoría de la señal*. El esquema básico de este modelo – para el cual la acústica entera no es más que un campo de aplicación marginal – es el de la “caja negra” con su entrada y su salida. Y, en efecto, cuando medimos *en* un recinto (y no *el* recinto), sólo conocemos la entrada (la fuente del sonido producido, por ejemplo, por un altavoz) y la salida (la señal transformada, registrada por un micrófono), cuya razón nos da la función de transferencia característica del efecto de la sala entre estos dos puntos. El recinto en sí es un misterio, una *alteración* del mensaje emitido que, como lo observaba uno de los pioneros de esta nueva aplicación¹⁰, “no se ha de considerar como tal, sino como una transformación eventualmente benéfica de la señal”. Eso complicaba mucho la meta habitual de la teoría de la señal: eliminar, o por lo menos reducir al mínimo las alteraciones, consideradas todas ellas nefastas...

Cuatro teorías, pues, conforman la acústica actual: una propia de los arquitectos (la geométrica), otra de los físicos (la ondulatoria), otra de los técnicos (la estadística), la última, finalmente, de los ingenieros¹¹. ¿Cómo unificarlas o, por lo menos, articularlas? A esta pregunta se intenta actualmente responder en torno a los dos polos anteriormente identificados: el constructivo y el arquitectónico.

El primero está ahora en auge, debido al desplazamiento de las preocupaciones sociales y de los recursos económicos hacia una acústica urbana, de las viviendas y de los locales comerciales. Las normas, definidas en el enfoque constructivo, hacen de puente entre éste y las mediciones que organizan, y sólo se basan en fórmulas estadísticas que tienden a crecer según van siendo informadas por la teoría de la señal. Pero no pueden con la geometría, porque empiezan por simplificarla drásticamente, en un volumen global y una suma de superficies, y, cuando se presenta una configuración problemática, no pueden más que intentar añadir nuevos términos¹², inoperantes en la siguiente configuración ...

En cuanto al polo arquitectónico, ha sufrido mucho de unas prácticas bien comprensibles, pero muy destructoras a la larga: como sólo las grandes salas – las más complejas – suelen disponer de un presupuesto acústico, el siglo XX ha intentado continuamente estudiarlas directamente, sin preocuparse por configuraciones más sencillas donde hubiera podido afinar sus herramientas y sus ideas geométricas... El resultado, es que disponemos ahora de parámetros de medición muy sofisticados (piénsese en el IACC, en el EDT,...), cuya relación con las formas arquitecturales que explican sus valores nunca ha sido estudiada de manera seria y exhaustiva...

Sin embargo, existe una afinidad muy profunda entre el modelo geométrico y la teoría de la señal, y viene de que ésta – paradójicamente – carece por completo del menor pensamiento geométrico: progresa a ciegas y, por lo tanto, necesita imperiosamente de la geometría, pero de una manera mucho más sana que la teoría estadística, porque totalmente desprovista de la menor pretensión en simplificar la configuración espacial... En efecto, para la teoría de la señal, la información geométrica es totalmente externa a su proceder, pero necesaria en su totalidad para explicar los componentes principales de sus funciones de transferencia: una aplicación paralela de una simulación geométrica nos explicará la procedencia de tal pico del ecograma, mientras que la medición de éste nos informará exactamente sobre el valor energético del trayecto geométrico correspondiente.

En resumen: el enfoque constructivo dirige ahora los progresos prácticos de la acústica, pero no puede resolver los problemas geométricos que más interesan al proyecto de arquitectura. Para ello, el enfoque arquitectónico, integrando la teoría de la señal, debería permitir grandes avances, y quizás abrir en el futuro un terreno más propicio al desarrollo de una teoría ondulatoria mejor informada por la arquitectura, cuyos métodos renovados puedan inspirarse de unos primeros resultados realmente arquitectónicos que aquel enfoque geométrico habrá inspirado.

4. EL PROGRAMA “RADIT2D”

El programa que presentamos ahora¹³ está inspirado en las consideraciones que acabamos de resumir: realizado para los arquitectos - estudiantes o profesionales -, se basa en el modelo geométrico, pero, al rechazar los largos cálculos del trazado de rayos, es realmente interactivo. Por lo tanto, se trata del primer *programa de diseño acústico para la arquitectura*.

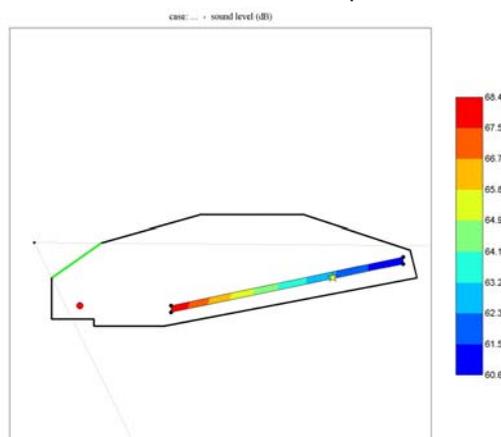
Se basa, esencialmente, en dos ideas muy sencillas: la interactividad y la posibilidad de un continuo vaivén entre dos representaciones gráficas complementarias.

LA INTERACTIVIDAD

La exigencia de programas rápidos, que permitan un verdadero diálogo con el usuario, ha penetrado recientemente en el campo de la acústica¹⁴. Sin embargo, Radit2d es el primer programa - según creemos - que permite modificar la geometría de un recinto controlando inmediatamente las consecuencias acústicas de tal operación. Para ello, se realiza el cálculo más sencillo posible: el de la primera reflexión especular. De todos modos, la primera fuente-imagen resultante es la única que se hace servir en el trazado manual de rayos: esta práctica antigua y penosa, pero aún vigente, por fuerza, entre los acústicos se haya así, gracias al programa, transformada en un juego sencillo y rápido,

Orientar un reflector o diseñar un escenario que refleje todo el sonido emitido hacia el público se convierten luego en operaciones muy sencillas, y las diferentes contribuciones, debidamente castigadas por los factores de absorción, se suman instantáneamente en un mapa libremente deformable cuyos colores indican los niveles en decibelios de cada reflexión o de su suma.

Trabajamos en un corte del recinto, figurado por un polígono, traza de sus paredes ortogonales al corte: es, desde luego una seria limitación geométrica (prácticamente, trabajamos casi siempre en planta o en alzado), pero, a este precio, podemos añadir tantos vértices como queramos al polígono, y desplazar cada uno de ellos con el ratón, viendo como, casi instantáneamente, el mapa (cubriendo el público) se modifica en función de las nuevas orientaciones. Del mismo modo, también podemos desplazar la fuente (el pequeño disco rojo), de manera interactiva.

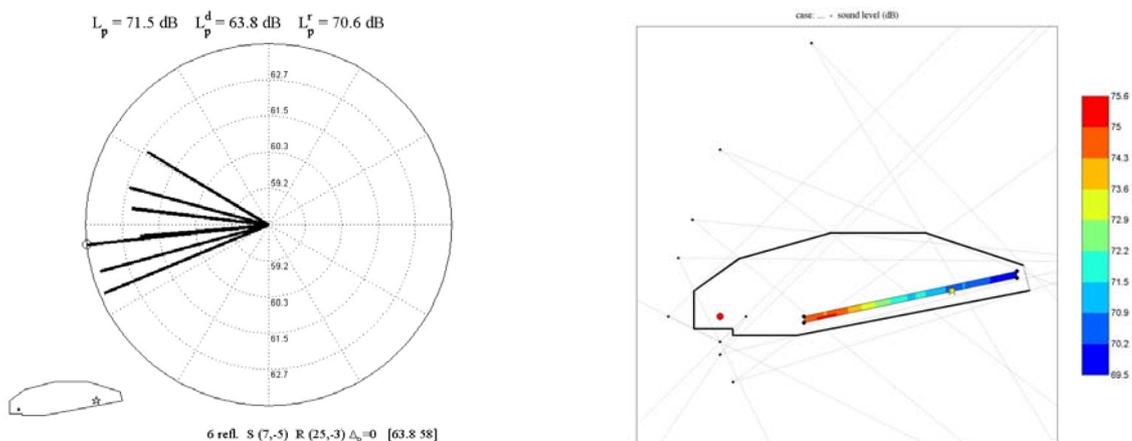


Unas funciones añadidas permiten una serie de cálculos que hacen del programa, más allá de su uso profesional, una magnífica herramienta didáctica.

LAS DOS REPRESENTACIONES

A pesar de sus cálculos limitados, el programa no da toda su información en el mapa de las curvas de nivel. Para complementarlo, se ha recurrido a una representación típica de la teoría de la señal: el diagrama polar¹⁵.

Ubicamos donde nos interesa un receptor, un “micrófono” (la estrellita amarilla) y, para este punto del recinto, podemos extraer una información mucho más completa.



En el diagrama polar de la izquierda, vemos todas las reflexiones que alcanzan el receptor, y podemos conocer su atraso (en milisegundos) y su ángulo con respecto al sonido directo, su nivel sonoro y la pared donde se produjo, con su respectivo coeficiente de absorción.

Con eso, tenemos suficiente para desarrollar el proyecto de una sala, desde sus primeros trazos hasta una elaboración formal avanzada, guiándonos conscientemente por las consideraciones acústicas fundamentales del modelo geométrico: dirección de las primeras reflexiones, control de los atrasos y, en su caso, búsqueda de reflexiones laterales que aumenten la sensación de *espacialidad*¹⁶.

Desde luego, las calidades primeras del programa - su simplicidad de uso, su velocidad y su interactividad - no pueden enseñarse en un documento escrito, pero lo poco que acabamos de mencionar debería bastar para convencer al lector del interés didáctico, gráfico y teórico de combinar los enfoques de la teoría geométrica y de la teoría de la señal, hacia una acústica al servicio de la arquitectura...

Referencias:

¹ En un artículo sintético de 1973, R. Condamines ya recopilaba más de 80 fórmulas para el tiempo de reverberación... Desde entonces, este número se ha multiplicado; ver: “Les critères physiques de la qualité acoustique des salles”, R. Contamines, Revue d’acoustique n°26, pp. 192-204, 1973.

² Las notas reunidas por Wallace Clement Sabine, en torno a 1900, se publicaron luego en los célebres: “Collected Papers on Acoustics”, W. C. Sabine, Harvard University Press, 1924.

³ El primer artículo de referencia sobre el trazado de rayos en acústica es: “Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique”, A. Krokstad, S. Strøm and S. Sørsdal, J. Sound Vib. 8(1), pp. 118-125, 1968.

⁴ La primera aplicación a la acústica de un método probabilista de trazado de rayos está descrita en: “Monte Carlo applications to acoustical field solutions”, J.K. Haviland and B.D. Thanedar, J. Acoust. Soc. Am., vol. 54, n°6, pp. 1442-1448, 1973.

⁵ “Improved algorithms and methods for room sound-field prediction by acoustical radiosity in arbitrary polyhedral rooms”, E.-M. Nosala, M. Hodgson, I. Ashdown, J. Acoust. Soc. Am. 116(2), August 2004.

⁶ Por ejemplo: “Finite element approximation for low-frequency sound in a room with absorption”, E.R. Geddes and J.C. Porter, J. Acoust. Soc. Am., vol. 83, n°4, 1988.

⁷ Por ejemplo: “Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems”, D. Botteldooren, J. Acoust. Soc. Am. 98 (6), pp. 3302-3308, 1995.

⁸ El estudio acústico más completo sobre el teatro griego sigue siendo, a pesar de su antigüedad: "L'acoustique des théâtres antiques, ses enseignements", F. Canac, Éditions du CNRS, Paris, 1967.

⁹ Ver: "Geometría sensible", B. Beckers, Tesis doctoral, UPC, Barcelona, junio de 2005.

¹⁰ Para seguir las aplicaciones incipientes de la teoría de la señal a la acústica de salas, son especialmente interesantes los escritos de los ingenieros soviéticos V. Furduev y L.B.Preizer; ver: "Evaluation objective de l'acoustique des salles, 5^o congrès international d'acoustique de Liège, pp. 41-54, 1965 y también: "Statistics of high-level reflections in auditoriums", Soviet Physics-Acoustics, vol. 11, n^o4, pp. 407-411, 1966 (original en ruso: 1964).

¹¹ El libro más completo sobre la teoría de la señal aplicada a la acústica de salas sigue siendo el de Y. Ando, tan interesante por su coherencia como característico por sus oscuridades: "Concert Hall Acoustics", Y. Ando, Springer Series in Electrophysics 17, Berlin, 1985.

¹² Por ejemplo, H. Arau propone una fórmula para el tiempo de reverberación que distribuye las absorciones según tres ejes (arriba-abajo, delante-detrás, izquierda-derecha); ver: "An Improved Reverberation Formula", H.Arau, Acustica, vol. 65, pp. 163-179, 1988.

¹³ El programa **Radit2d** (*"Room Acoustic Design by the Image Theory"*), autores: Benoit Beckers & Luc Masset (Universidad de Liège, Bélgica), es disponible, con un manual detallado en castellano, en la página <http://upc.edu/aie> (soft), y es de libre utilización.

¹⁴ Ver, por ejemplo, el siguiente artículo, donde se trata de permitir al usuario recorrer un espacio cuyas características acústicas han sido previamente calculadas: "A beam tracing method for interactive architectural acoustics", T. Funkhouser, N. Tsingos, I. Carlbom and others, J. Acoust. Soc. Am. 115(2), February 2004.

¹⁵ Encontramos una primera utilización del diagrama polar en un artículo muy precoz de W. Junius: "Raumakustische Untersuchungen mit Neueren Messverfahren in der Liederhalle Stuttgart", W. Junius, Acustica, vol.9 n^o4, 1959.

¹⁶ Sobre la importancia de las reflexiones laterales para la calidad acústica de los auditorios, remito al excelente libro de M. Barron, el más completo hasta la fecha: "Auditorium acoustics and architectural design", M. Barron, E&FN SPON, London, 1993.