

## VALIDACIÓN DE MODELOS SIMULADOS DE RECINTOS. ANÁLISIS ESPACIAL.

PACS: 43.55.Ka

San Martín, R.; Arregui, A.; Machín, J.; Arana, M.  
Universidad Pública de Navarra. Departamento de Física.  
Campus de Arrosadía. 31006. Pamplona. Spain  
Tel.: 948 168451  
Fax: 948 169565  
E-mail: ricardo.sanmartin@unavarra.es

### ABSTRACT

The use of measured and simulated data is common when evaluating the acoustic properties of enclosures. For example, to spatially analyze the values of the parameters in an auditorium already built, the usual strategy is to obtain experimental results on a few receptors and use these data to validate a simulated model. Based on acoustic parameter measurements made in every seat of the Auditorium of the Conservatory of Music of Navarra, in this paper we analyze both the capacity and limitations of simulation software to predict the values of these parameters.

### RESUMEN

Cuando se evalúan las propiedades acústicas de recintos es habitual la utilización de datos medidos y simulados. Por ejemplo, para analizar espacialmente los valores de los parámetros en un auditorio ya construido, la estrategia habitual consiste en obtener resultados experimentales en unos pocos receptores y utilizar estos datos para validar un modelo simulado. Sobre la base de las medidas de parámetros acústicos realizadas butaca por butaca en el Auditorio del Conservatorio Superior de Música de Navarra, en esta comunicación se analiza tanto la capacidad como las limitaciones de un programa de simulación para predecir los valores de esos parámetros.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los parámetros acústicos descritos en la Norma ISO 3382 [1] sirven como referencia para la caracterización acústica de recintos destinados tanto a la transmisión de lenguaje oral como musical. Pueden ser derivados a partir de respuestas al impulso medidas o simuladas, teniendo ambas estrategias sus ventajas e inconvenientes. En una sala ya construida, conocer los valores medidos de los parámetros acústicos parece indispensable de cara a realizar una evaluación objetiva del recinto bajo las condiciones existentes. Por otro lado, es evidente que para un análisis espacial muy detallado – por ejemplo, en cada butaca de las zonas de

audiencia – la simulación es una herramienta inestimable, cuando no imprescindible, que nos permite evaluar resultados en un tiempo razonable.

Dejando a un lado facetas relacionadas con la comodidad o la rapidez, es incuestionable que la elección de uno u otro procedimiento para evaluar un local debe basarse en la fiabilidad de los datos obtenidos. Y parece que en ese aspecto los resultados de una medición directa llevan ventaja sobre los procedentes de una simulación. Sin embargo, no debe olvidarse que ambas estrategias tienen sus limitaciones y que tanto el conocimiento como la experiencia del operador juegan un papel fundamental en ambos casos.

Las medidas tienden a ser consideradas más precisas puesto que el modelo geométrico, la absorción del aire o los coeficientes de absorción y difusión de los materiales, principales fuentes de incertidumbre en las simulaciones, son inherentes a la propia sala y están, por definición, incluidos completamente. Asimismo, fenómenos ondulatorios como la difracción o la difusión también son consustanciales al campo sonoro real medido. Por otro lado, los programas de simulación, al menos aquellos basados en acústica geométrica, generalmente excluyen en sus cálculos informaciones relativas a la fase de la onda. Por eso sus resultados solo deben considerarse válidos para frecuencias superiores a la frecuencia de Schroeder ( $F_S \sim 2000\sqrt{T_{60}/V}$ ), donde los modos de la sala se superponen y los efectos ondulatorios debidos a la fase pueden desestimarse sin pérdidas significativas de información sobre el campo acústico [2].

En comparación, las simulaciones presentan una serie de ventajas relativas a la precisión de los datos obtenidos que no deben despreciarse. Por un lado, la señal sonora emitida por la fuente es directamente la función Dirac y no una aproximación. No existe ruido de fondo, por lo que el rango dinámico es ilimitado a todas las frecuencias. Este hecho elimina posibles incertidumbres relacionadas con los procesos de truncamiento y compensación del ruido de fondo, procedimientos ineludibles cuando se trata de respuestas al impulso medidas [3]. También los errores relativos al cálculo del inicio de la respuesta al impulso, perfectamente definido geoméricamente en un modelo simulado, o a posibles retardos en los filtros necesarios para el análisis en bandas, pueden descartarse en una simulación. Y por último, la fuente sonora, además de no necesitar ser calibrada para la medida del parámetro G, no genera distorsión a altos niveles y, lo más relevante, es perfectamente omnidireccional también a altas frecuencias, donde una fuente sonora dodecaédrica real genera lóbulos de directividad añadiendo incertidumbre en la cadena de medida asociada a la variable 'orientación de la fuente' [4] [5].

Pese a todo, el principal factor a tener en cuenta a la hora de evaluar la calidad de un programa de simulación es la concordancia de los resultados obtenidos con los medidos 'in situ' [6]. De hecho, con el propósito de descubrir las fuentes de error más comunes para que los desarrolladores de software pudieran corregirlas en futuras versiones, se desarrolló una serie de estudios, denominados Round Robin [7][8][9] que comparaban, bajo condiciones controladas en un conjunto pequeño de posiciones fuente-receptor, valores medidos y simulados en distintas salas. En esta comunicación se pretende profundizar en la habitual comparación entre valores medidos y simulados de parámetros acústicos mediante una confrontación butaca por butaca en un auditorio de tamaño medio.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

Los resultados presentados en esta comunicación proceden de una caracterización exhaustiva realizada en el Auditorio del nuevo Conservatorio Superior de Música de Navarra (Pamplona - Spain), donde se midieron y simularon en estado vacío los parámetros acústicos monoaurales EDT,  $T_{30}$ ,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ ,  $T_S$  y G en cada una de las 375 butacas destinadas a la audiencia para tres posiciones de fuente en el escenario.

El recinto (Fig. 1.izda), revestido con dos tipos de madera, tiene un volumen de unos 4000 m<sup>3</sup> con el área de audiencia dividida en dos partes. El dispositivo experimental utilizado para la realización de las medidas cumple los requisitos de la norma ISO 3382-1: PC Toshiba provisto de interface de audio Digidesign VX con software WinMLS 2004 Professional, amplificador Electro-Voice Q44-II (2x450W), altavoz dodecaédrico DO12, fuente de alimentación de ocho canales Norsonic tipo 335, micrófonos GRAS 40AC omnidireccionales, termómetro, higrómetro y cableado tipo LEMO con conectores SpeakOn. Como señal de excitación, se utilizaron sweeps logarítmicos de 20 s de duración.

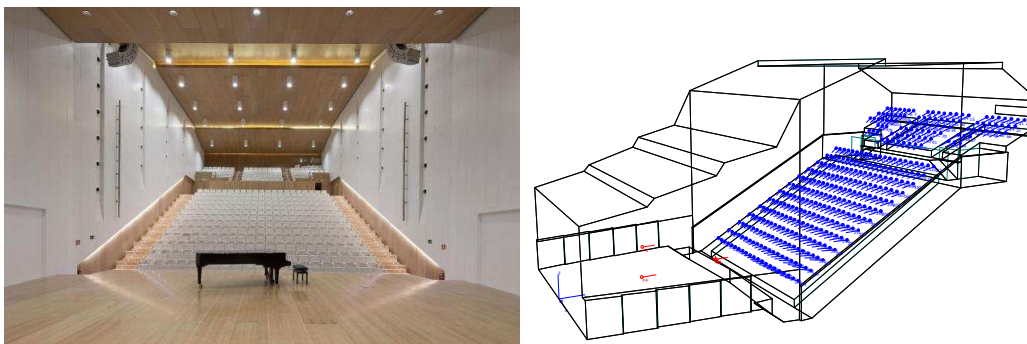


Figura 1. Fotografía del auditorio (izda.) y disposición de fuentes y receptores (dcha.)

Por su parte, las simulaciones se realizaron con el programa de simulación acústica de salas ODEON v.12, utilizando un modelo geométrico simplificado de 105 superficies (Fig. 1.dcha) y recreando las condiciones de medida en cuanto a posiciones de fuentes y receptores. Los coeficientes de absorción de los materiales fueron inicialmente seleccionados de acuerdo a las fichas técnicas proporcionadas por los fabricantes de los materiales utilizados como revestimientos y a una inspección visual de la sala. Estos coeficientes fueron posteriormente afinados con el objetivo de igualar los valores promedio del  $T_{30}$  tanto medidos como simulados.

En la Figura 2.izda se muestran los coeficientes de absorción finalmente seleccionados para los cuatro materiales principales que componen la sala; dos tipos de madera ocupando el 26% y 56% de la superficie total, las butacas de cuero tapizado cubriendo un 14% y un resonador utilizado como revestimiento en la zona de separación del área de audiencia (3% de la superficie total). Tras la calibración, tal y como muestra la Figura 2.dcha, el tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ) promedio medido y simulado no se separó en más de una *just noticeable difference* (jnd) en todas las bandas exceptuando la de 8 kHz, donde la propia absorción del aire en el modelo simulado impedía alcanzar los valores medidos incluso minimizando la absorción de todos los materiales. Cabe destacar la escasa variación espacial de los valores simulados en todas las bandas de frecuencia frente a la mayor desviación espacial en la banda de 63 Hz para los valores medidos, cercana a 3 jnd, pese a que el valor promedio es similar en todos los casos.

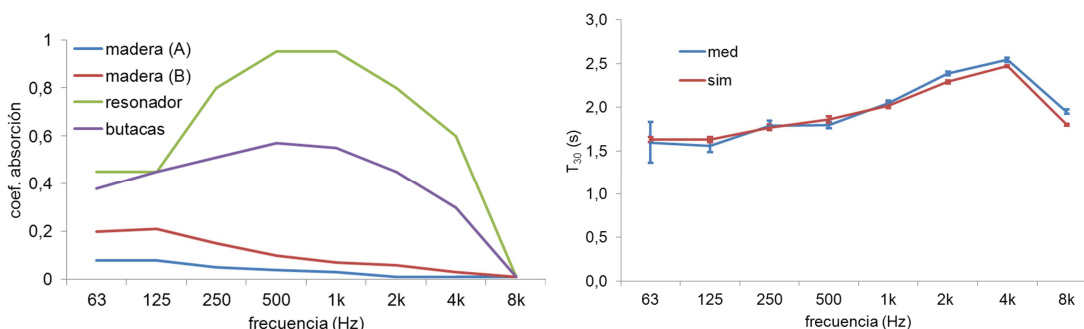


Figura 2. Coeficientes de absorción de los materiales (izda.) y tiempos de reverberación promedio medidos y simulados (dcha.)

Este proceso de “calibración” es utilizado habitualmente cuando la sala a modelizar se encuentra físicamente disponible. Sin embargo, los mismos valores del parámetro objetivo ( $T_{30}$ ) pueden lograrse con afinaciones en cada material muy diferentes entre sí, provocando desigualdades en los diferentes campos sonoros simulados que se reflejarían en el resto de parámetros. Por ello, algunos autores no lo consideran adecuado [10] y abogan por que las simulaciones deben basarse únicamente en datos físicos y bases de datos conteniendo los datos de entrada típicos, incluyendo un análisis de las fuentes de incertidumbre que establezca su impacto en la precisión de los resultados obtenidos.

### 3.- ANÁLISIS ESPACIAL

#### 3.1 Valores promedio y variabilidad espacial del resto de parámetros

En la Figura 3 se muestran los valores promedio tanto medidos como simulados de los parámetros EDT,  $C_{80}$  y G en los 375 receptores con respecto a una de las posiciones de fuente. Asimismo, la variabilidad espacial en el recinto es analizada en ambos casos por medio de la desviación estándar (STD) de los resultados obtenidos para cada parámetro.

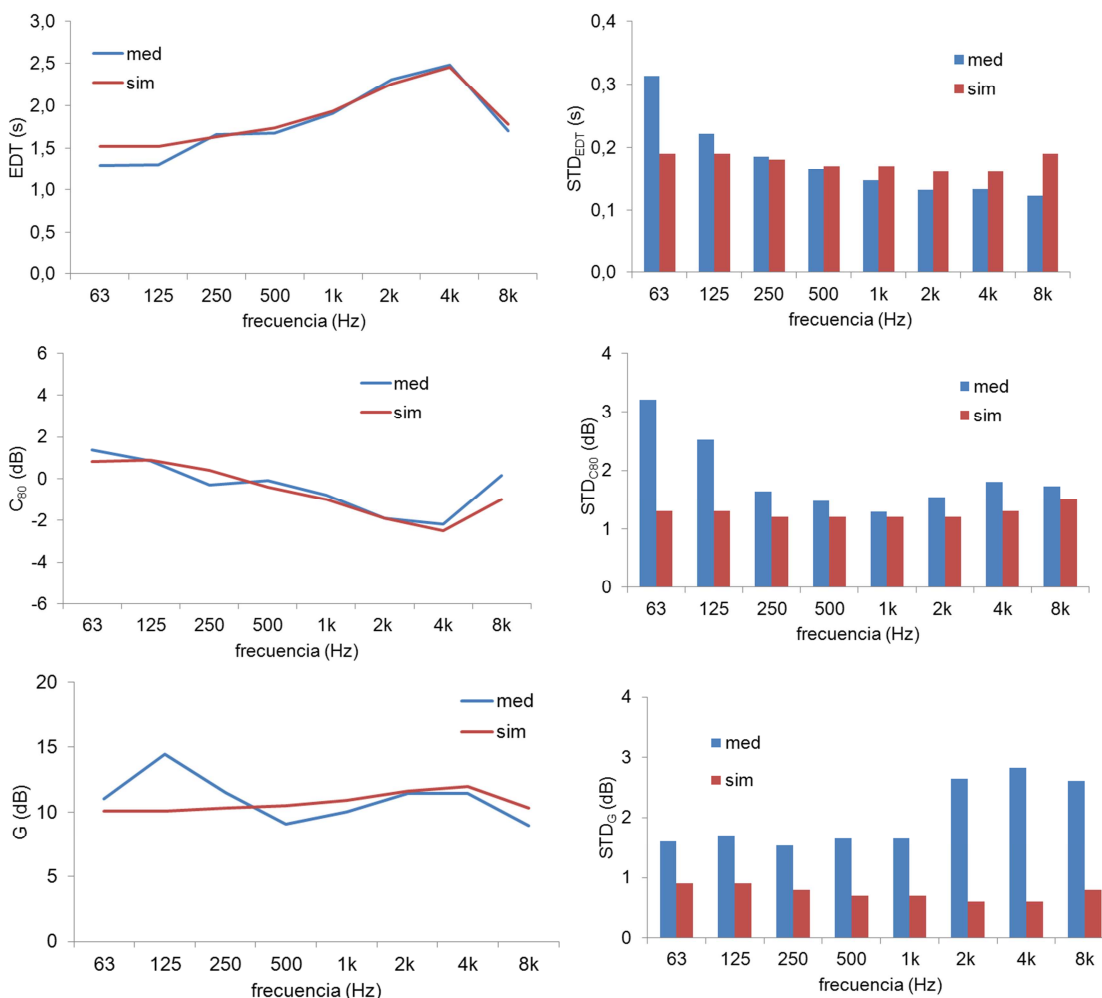


Figura 3. Valores promedio y desviaciones standard (STD) de los parámetros acústicos EDT,  $C_{80}$  y G en los 375 receptores medidos y simulados

Con respecto al EDT, los valores no difieren más de 1 jnd exceptuando las bandas de frecuencia inferiores. En las bandas de 63 y 125 Hz, la diferencia alcanza los 3,3 jnd, un valor

que advierte de una desigualdad apreciable en las curvas de caída obtenidas por medio de ambos métodos. Asimismo, se distingue una mayor variabilidad espacial con respecto a los valores simulados en bajas frecuencias, particularidad acentuada para todas las bandas en los parámetros  $C_{80}$  y  $G$ . Sin embargo, para la claridad musical, los valores promedio están dentro del margen recomendado (salvo a 8 kHz, donde la diferencia es de 1,2 jnd), lo que indicaría un buen acuerdo entre los valores obtenidos y validaría, en un procedimiento habitual, el modelo simulado. Por último, en cuanto a los valores promedio y las desviaciones del parámetro  $G$ , puede advertirse un comportamiento diferente. Las diferencias se sitúan en torno al jnd, destacando la de la banda de 125 Hz, que supera los 4 jnd. En cuanto a las desviaciones, se invierte la tendencia del resto de parámetros, al menos en cuanto a las medidas, siendo mayores a altas que a bajas frecuencias.

### 3.2 Análisis espacial mediante mallas de receptores

La disponibilidad de valores medidos en cada una de las butacas del recinto nos permite realizar una comparación más precisa y analizar las causas tanto de las semejanzas como de las diferencias en los valores mostrados en la sección anterior. Así por ejemplo, para el tiempo de reverberación se comprueba en la Figura 4.a que el ajuste entre los valores medidos y simulados es prácticamente perfecto en la banda de 1 kHz, donde apenas un 2% de los receptores se separan más de 1 jnd. Cabe recordar en este momento que el  $T_{30}$  fue el parámetro utilizado para la calibración y que su variabilidad espacial a frecuencias medias es escasa salvo en el caso de recintos con fuertes acoplamientos.

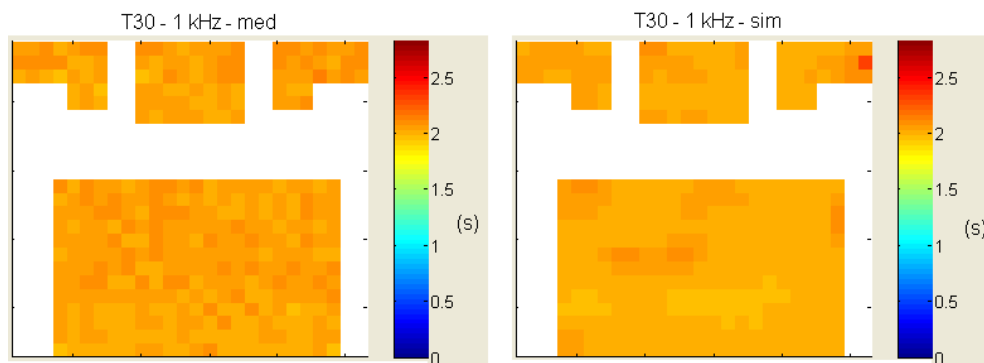


Figura 4.a)  $T_{30}$  medido (izda) y simulado (dcha) en los 375 receptores para la banda de 1 kHz

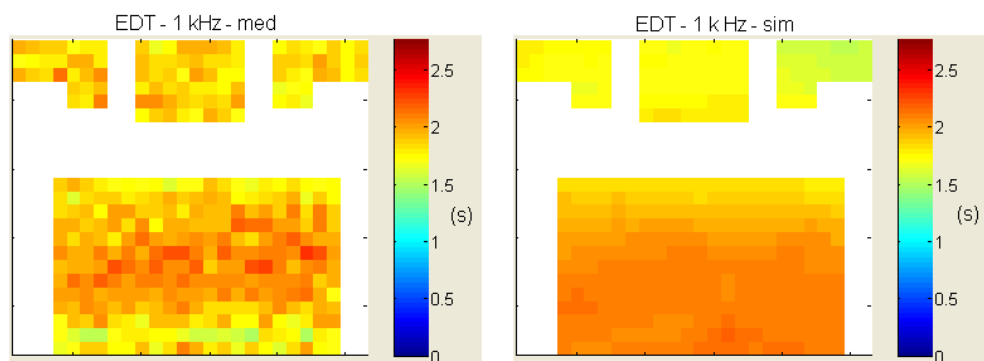


Figura 4.b) EDT medido (izda) y simulado (dcha) en los 375 receptores para la banda de 1 kHz

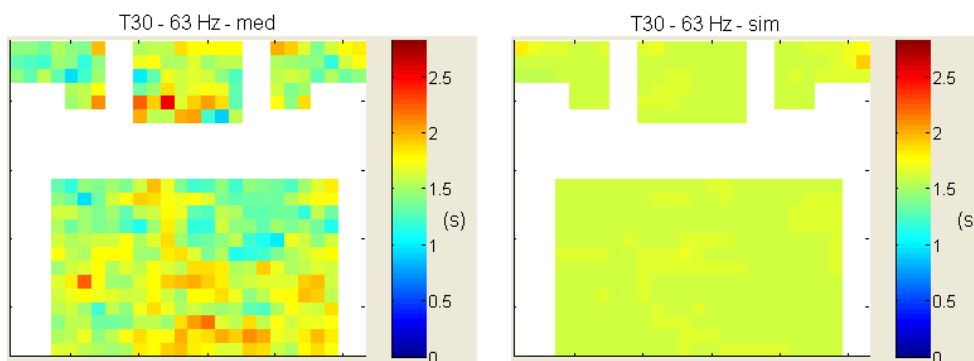


Figura 4.c)  $T_{30}$  medido (izda) y simulado (dcha) en los 375 receptores para la banda de 63 Hz

No ocurre lo mismo si analizamos mediante una malla de alta resolución los valores del EDT en la misma banda de frecuencia (Figura 4.b). Pese a que los valores medios y las desviaciones presagiaban un buen ajuste (ver Figura 3), los valores en un 52 % de los receptores se diferencian en más de 1 jnd, percibiéndose además desviaciones apreciables dependiendo de la zona de audiencia analizada. La mayor homogeneidad en los valores simulados es un hecho que se repite para todos los parámetros y frecuencias, siendo generalmente más notable a frecuencias bajas, como puede observarse si analizamos el  $T_{30}$  a 63 Hz (Figura 4.c), donde en el 72% de los receptores la diferencia entre el valor medido y el simulado supera el margen recomendado de 1 jnd. La causa de este fenómeno puede achacarse a la no inclusión de la fase en el modelo simulado. Sin embargo, no debe obviarse el impacto de las incertidumbres también en las medidas realizadas, habitualmente mayores a bajas frecuencias. Esta variabilidad, que puede alcanzar el segundo entre butacas adyacentes y puede ser provocada asimismo por una escasa relación señal ruido durante la medida o por procedimientos de truncamiento demasiado sensibles, no está justificada al menos desde el punto de vista de la sensibilidad del oyente medio.

### 3.3 Valor de los parámetros en función de la distancia a la fuente

Mientras el tiempo de reverberación, al menos el  $T_{30}$ , es un parámetro global que se relaciona con la sala y no con una posición determinada, el resto de los parámetros muestran mayores desviaciones. La Figura 5 representa los valores de  $C_{80}$  y G para la banda de 500 Hz en función de la distancia de cada receptor a la fuente emisora. En el caso de la claridad musical, ambos modelos siguen la misma tendencia, sobre todo en la zona de la audiencia más cercana a la fuente (hasta 18 m aproximadamente), si bien la dispersión es claramente mayor en los valores medidos. Cabe resaltar que si se representaba esta dispersión mediante únicamente la desviación estándar, tal y como se vio en la sección 3.1, estas desigualdades no se detectan, al ser similares en ambos casos.

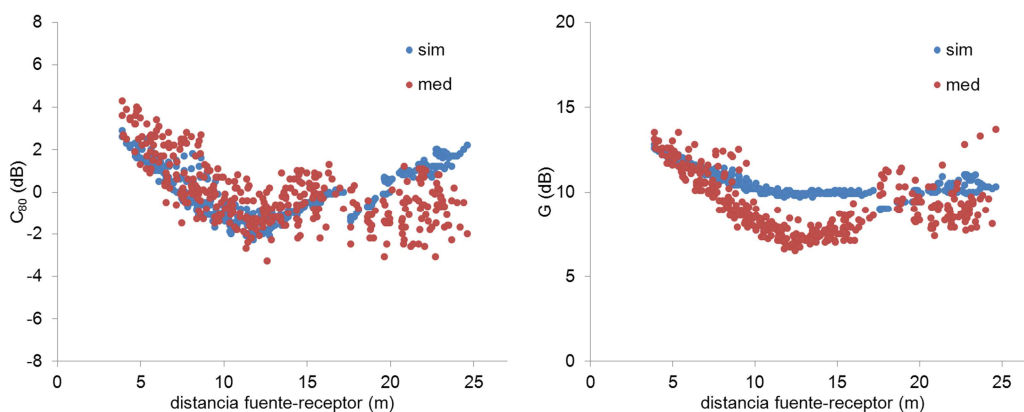


Figura 5. Valores de  $C_{80}$  (izda) y G (dcha) en función de la distancia fuente-receptor para los 375 receptores medidos y simulados en la banda de 500 Hz.

Las diferencias en cuanto a tendencias y dispersión en el caso del parámetro G son mucho mayores. Mientras los valores medidos se sitúan entre 6,5 y 13,7 dBs, el rango de los valores simulados es sensiblemente inferior, variando entre 8,9 y 12,8 dB. Sin embargo, en este caso, son los resultados simulados los que deben ser considerados más fiables ya que el sistema de medida<sup>1</sup> utilizado para la obtención de G, no reflejado en el estándar ISO 3382, es una aproximación que, aunque omite la calibración de la fuente emisora disminuyendo la complejidad de la medida, puede aumentar la variabilidad en los valores del parámetro.

### 3.4 Directividad de la fuente dodecaédrica

La alta resolución espacial de las medidas realizadas sobre la zona de audiencia nos permite analizar la posible falta de omnidireccionalidad de la fuente sonora real y su influencia en los parámetros acústicos derivados de la respuesta al impulso. Además, las peculiaridades de este fenómeno, que se manifiesta a altas frecuencias, nos llevan a considerar que un programa de simulación – cuya principal limitación se encuentra a bajas frecuencias – puede ser una herramienta adecuada para la comparación, al considerar la radiación siempre de forma omnidireccional.

La Figura 6 muestra el valor del parámetro  $C_{80}$  tanto medido (izda.) como simulado (dcha.) para la banda de 2 kHz, donde la fuente dodecaédrica utilizada comienza a comportarse de forma marcadamente directiva. Pese a que las gráficas son similares, con un área de inferior claridad en torno a la zona media de la parte baja de la audiencia, puede apreciarse una diferencia muy clara que no aparece si analizamos los valores medios y las desviaciones de la sección 3.1., prácticamente coincidentes para este parámetro y banda frecuencial.

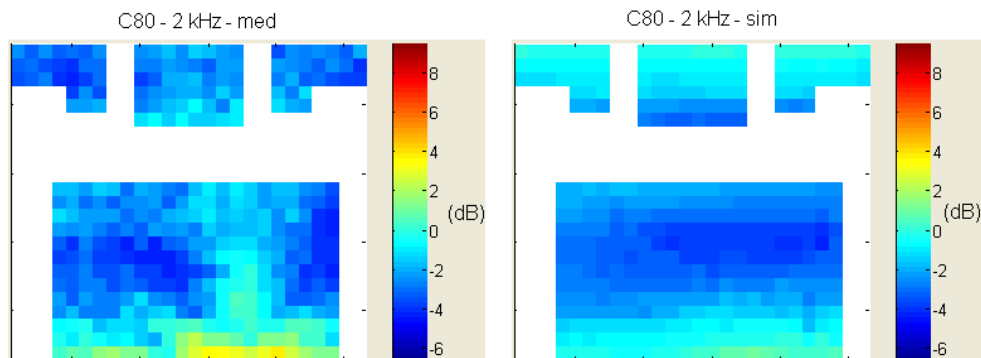


Figura 6)  $C_{80}$  medido (izda) y simulado (dcha) en los 375 receptores para la banda de 2 kHz

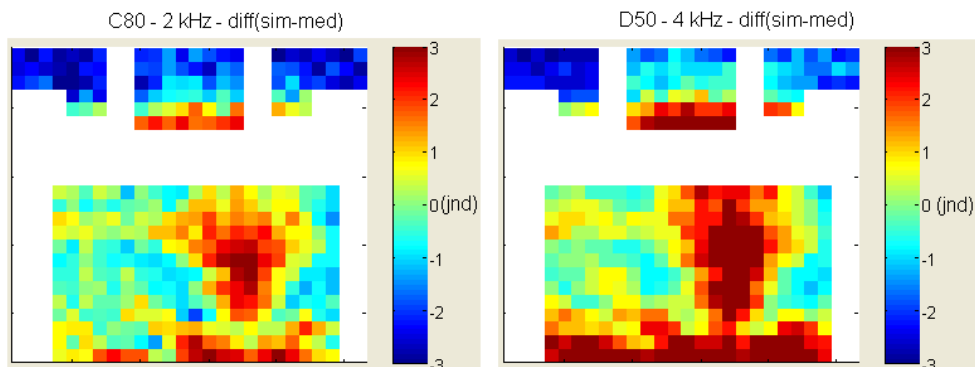


Figura 7) Diferencia entre valores simulados y medidos (ref: 1 jnd) para los parámetros  $C_{80}$  en la banda de 2 kHz (izda) y  $D_{50}$  en la banda de 4 kHz (dcha)

<sup>1</sup> El nivel de referencia a 10m de la fuente en campo libre se estima a partir de los 5 primeros ms de la respuesta al impulso medida en la sala, lo que provoca una gran dependencia del parámetro con el nivel de sonido directo.

Representando la diferencia entre ambas mallas de receptores (Figura 7. izda.) bajo el marco de referencia del jnd, puede verse cómo se presenta un marcado lóbulo de directividad sobre la zona media, provocando diferencias superiores incluso a los 3 jnd en algunos receptores. De hecho, en más del 50% de los receptores los valores medidos y simulados se separan más de 1 jnd (un 20% se separan más de 2 jnd) debido a la directividad de la fuente sonora en esa banda de frecuencia. En un parámetro más sensible a esa variable, como el  $D_{50}$ , a una frecuencia más alta, 4 kHz, esos porcentajes alcanzan el 60 y 30% respectivamente, como se representa en la Figura 7. dcha.

### CONCLUSIONES

Pese a que los parámetros acústicos procedentes de respuestas al impulso medidas son generalmente tomados como 'verdaderos' y sirven de referencia, deben tenerse en cuenta otros factores a la hora de validar un modelo simulado. La directividad de las fuentes dodecaédricas, los algoritmos de procesamiento de las respuestas al impulso o las bajas relaciones señal-ruido pueden provocar diferencias notables entre valores medidos y simulados, no únicamente atribuibles a las limitaciones de los programas de simulación basados en acústica geométrica.

### REFERENCIAS

- [1] International Standard Organization (2009). ISO 3382-1:2009(E) Acoustics-Measurement of room acoustic parameters. Part1: Performance spaces.
- [2] Schroeder, M. R., Kuttruff, K. H., On frequency response curves in rooms. Comparison of experimental, theoretical, and Monte Carlo results for the average frequency spacing between maxima, J. Acoust. Soc. Am. Volume 34, Issue 1, pp. 76-80 (1962)
- [3] Lundeby, A., Vigran, T. E., Bietz, H., Vorländer, M., Uncertainties of Measurements in Room Acoustics, Acustica, Volume 81, pp. 344-355 (1995)
- [4] San Martín R., Witew I.B., Arana M., Vorländer M., Influence of the source orientation on the measurement of acoustic parameters, Acta Acustica united with Acustica, Volume 93, 387-397 (2007)
- [5] San Martín R., Arana M., Uncertainties caused by source directivity in room-acoustic investigations, J. Acoust. Soc. Am. Volume 123, pp. EL133-138 (2008)
- [6] Christensen, C. L., Koutsouris, G., Rindel, J. H., The ISO 3382 parameters. Can we measure them? Can we simulate them? Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics (ISRA), Toronto, Canada, 2013.
- [7] Vorländer, M., International round robin on room acoustical computer simulation, Proceedings of 15<sup>th</sup> International Congress on Acoustics (ICA), Trondheim, Norway, 1995.
- [8] Bork, I., A comparison of room simulation software – the 2<sup>nd</sup> round robin on room acoustical computer simulation, Acta Acustica united with Acustica, Volume 86, pp. 943-956, (2000)
- [9] Bork, I., Report on the 3<sup>rd</sup> round robin on room acoustical computer simulation, Acta acustica united with acustica, Volume 91, "part I, measurements" 740-752, "part II, calculations" pp. 753-763 (2005)
- [10] Vorländer, M., Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties, J. Acoust. Soc. Am. Volume 133, pp. 1203-1213, (2013)