

INFLUENCIA DE LA LOCALIZACIÓN DE LA FUENTE SONORA EN LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS EN LA CATEDRAL METROPOLITANA DE VALENCIA

**Radha Montell¹, Alicia Giménez¹, Salvador Cerdá², Jaume Segura³,
Rosa Cibrián⁴, Arturo Barba¹**

¹E.T.S.I.Industriales., Univ. Politécnica de Valencia, Camí de Vera s/n

²E.T.S.I.Arquitectura, Univ. Politécnica de Valencia

³Institut de Robòtica, Universitat de València, Polígon de la Coma s/n

⁴Facultad de Medicina. Universidad de Valencia

{radmonse@upvnet.upv.es, agimenez@fis.upv.es, salcerjo@mat.upv.es, jsegura@uv.es,
rosa.m.cibrian@uv.es, arbarse@doctor.upv.es}

Resumen

El estudio de la acústica en las catedrales tiene especial interés debido a sus particulares características. En estos recintos, tanto el habla como la música son eventos significativos, por lo que es importante conocer el comportamiento acústico en ambos casos. En este trabajo se ha analizado a nivel experimental la acústica de la Catedral de Valencia, de estilo gótico-neoclásico. Se ha estudiado el efecto que tiene la posición de la fuente en el comportamiento de diferentes parámetros referentes tanto al habla como a la música. Las posiciones de fuente estudiadas han sido: el Altar Mayor, el Coro y el Púlpito.

Palabras clave: Edificios patrimoniales, posición de la fuente, parámetros acústicos.

Abstract

Studying acoustics in cathedral-like spaces has a particular interest because of their special characteristics. In these types of halls, both music and speech are significant events, therefore it is important to know how sound behaves in both cases. In this work, an experimental study of the acoustics of the Valencia Cathedral –gothic-neoclassic style– has been analyzed. We have studied the effect of source position on the behavior of different acoustic parameters related to both speech and music. The studied sound source positions are: the High Altar, the choir and the pulpit.

Keywords: Patrimonial buildings, source position, acoustic parameters.

PACS no. 43.55.Gx, 43.55.Mc, 43.60.Jn, 43.58.Ta

1 Introducción

La acústica en recintos de culto siempre ha tenido un papel importante ya que siempre han sido salas de reunión donde se escucha tanto palabra como música. Asimismo, al igual que con la arquitectura, la acústica que se produce en ellas tiene un efecto sobrecogedor. Han sido muchos los investigadores que han estudiado la acústica de iglesias y en concreto de Catedrales. En [1] [2] presentan un estudio acústico de los recintos de culto de estilo Mudejar-Gótico de Sevilla y en [3] estudian la inteligibilidad en estas iglesias; en [4] realizan un estudio de los dos espacios que conforman la Catedral-Mezquita de

Córdoba; en [5] se ha estudiado experimentalmente el efecto de los espacios acoplados de la Catedral de San Paul (Londres); en [6] se realiza una caracterización acústica de las catedrales de Perú y en [7] se presentaron las mediciones de nueve iglesias románicas analizando la distribución de los parámetros acústicos.

La acústica de las catedrales debe ser apropiada tanto para la inteligibilidad de la palabra así como tener una adecuada reverberación para la música. No obstante, estos dos tipos de señales presentan requerimientos opuestos de reverberación y otros parámetros. Es conocido que no todo el espacio es igual de reverberante y que el emplazamiento de la fuente es un elemento clave que puede modificar tanto la inteligibilidad como la reverberación. Así pues, surgen varios espacios clave donde el tipo de señal emitida se encuentra bien definida. Estos espacios son: el coro, situado en la sillería de madera, presenta mayor absorción que el resto de la sala; el púlpito, diseñado especialmente para reflejar el sonido de la voz y mejorar así la inteligibilidad de la palabra; y el órgano, emplazado para crear una elevada reverberación. En la actualidad, la mayoría de las iglesias incorporan sistemas de refuerzo acústico y una alternativa a ellos, como actuación de mejora acústica, podría ser la modificación del emplazamiento de la fuente sonora.

La Catedral de Valencia [8] empezó a construirse en el terreno de la antigua Mezquita Mayor en el 1262 y se proclama como terminada el 1769. Es de estilo gótico aunque en el siglo XVIII sufrió una remodelación de su interior donde se revistió con estilo neoclásico. Actualmente, se ha desmontado gran parte del revestimiento, quedando así elementos de los dos estilos. Su estructura consta de una planta gótica de tres naves, con crucero cubierto con cimborrio, girola y ábside poligonal. En la Tabla 1 pueden verse algunos valores referentes a sus medidas y en la Figura 1 y 2 se muestra la planta y una fotografía de la nave central con el altar al fondo.

Tabla 1. Datos Catedral de Valencia

Volumen	Longitud	Anchura (en transepto)
55924.49m ³	94m	53.65m

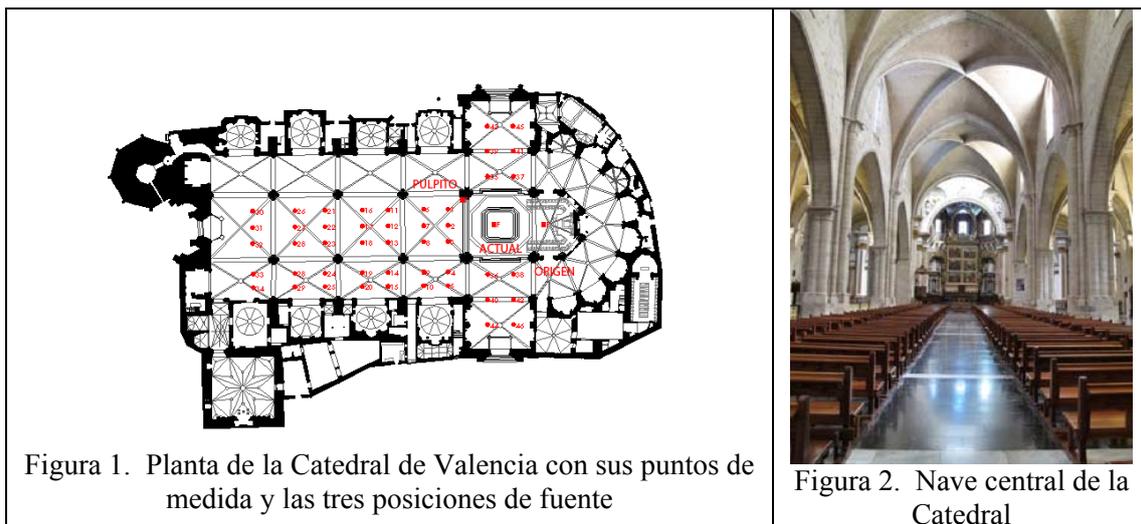


Figura 1. Planta de la Catedral de Valencia con sus puntos de medida y las tres posiciones de fuente

Figura 2. Nave central de la Catedral

En este artículo se presenta el estudio acústico realizado de la Catedral de Valencia tanto para su uso como recinto de conciertos como para la escucha de la palabra. Se presenta un estudio comparativo del comportamiento de los parámetros acústicos en cada una de las posiciones de la fuente. Se ha

comparado tanto por frecuencias como por posiciones, y haciendo uso de los JND para identificar las diferencias perceptibles. Para ello, se han establecido 3 posiciones de fuente y 47 posiciones de receptor. Este trabajo se encuentra englobado en la investigación que se realiza dentro del proyecto BIA2008-05485.

2 Método experimental

La metodología experimental empleada ha seguido los requerimientos de la ISO-3382 [8]. No obstante, se ha incrementado considerablemente el número de puntos de medida que recomienda la norma para conseguir una caracterización acústica, así como permitir futuras investigaciones sobre el comportamiento de la transmisión sonora en recintos singulares como es la Catedral de Valencia.

2.1 Descripción proceso de medida.

El sistema de adquisición de medidas consta de un PC portátil en el que se han instalado los programas de adquisición y análisis con una tarjeta de sonido profesional. La tarjeta de sonido (Vxpocket v2) está conectada mediante un bus de tipo II, tiene dos entradas analógicas mono balanceadas con convertidores de 24 bits y frecuencia de muestreo de hasta 48 kHz. Esto permite obtener una respuesta en frecuencias plana de 20 Hz a 20 kHz con precisión $\pm 0,15$ dB y relación señal ruido de 94 dB.

Se ha utilizado tres tipos de micrófonos. Para la medida de los parámetros monoaurales hemos utilizado micrófonos G.R.A.S. tipo 40 AK (Sensitividad a 250Hz 50 mV/Pa, Rango de frecuencias: 3.15 Hz-20 kHz, Límite superior de rango dinámico (3% Distorsión): 164 dBre. 20 μ Pa, Límite inferior de rango dinámico: 14 dB, re. 20 μ Pa). Para la medida de los parámetros espaciales se ha utilizado el micrófono multipatrón AT4050/CM5 (rango de frecuencias: 20–20000 Hz, sensibilidad: 15.8 mV, patrones polares: cardioide, omni direccional, figura-de-ocho) y su correspondiente fuente de alimentación *phantom*. Finalmente, se ha hecho uso de la cabeza HMS III.0 (rango de frecuencias: 3 Hz-20 kHz, -3 dB/+0.1 dB; rango dinámico: typ. >118 dB, max SPL 145 dB) para el cálculo de los parámetros binaurales. La fuente de alimentación, GRAS 12AA, polariza los micrófonos con una tensión de 200 V. y los preamplificadores son G.R.A.S tipo 26AK (Rango de frecuencias: 2Hz-20 kHz, Noise: A-weight $< 2.5\mu$ V).

El sistema de emisión de la señal consta de un amplificador M-1000 (Power output level RL=4 Ω : 520W+520W). Su elevada potencia nos permite minimizar el efecto del ruido de fondo. Con una distorsión armónica total inferior al 1% y relación señal/ruido de 100 dB, tiene una respuesta en frecuencias plana ($\pm 0,5$ dB entre 10 Hz y 35 kHz). Asimismo, se utilizó una fuente dodecaédrica DO12 (Rated power 600W, Sound Power >120 dB, Rango de frecuencias: 80 Hz-6.3 kHz, directividad: casi esférica).

El programa de adquisición y análisis usado ha sido el WinMLS [9]. Se ha generado la señal sweep como excitación para el cálculo los parámetros de la respuesta impulsiva de la sala. Las medidas han sido realizadas con dos fuentes consecutivamente, alternando la emisión de la señal para minimizar el error en el cambio de posición del micrófono receptor. La fuente se ha situado en tres posiciones: en la zona del altar actual, donde ahora se encuentra el ara del altar mayor y justo debajo del cimborrio; en el coro, donde se encontraba el altar originalmente; y en el púlpito. Los puntos de medidas establecidos se dividen en dos zonas: nave central y lateral derecha y transepto izquierdo (se asume simetría, excepto en el caso de la fuente en el púlpito). En la Figura 1 se muestra la planta de la Catedral con los puntos de medida y las posiciones de la fuente.

2.2 Descripción parámetros acústicos

Los parámetros estudiados se pueden clasificar según las sensaciones subjetivas [10] [11] en:

- Parámetros de reverberación: T30, EDT.
- Parámetros energéticos: G, C50 (habla) y C80, Ts (música).
- Parámetros de inteligibilidad: RASTI.
- Parámetros espaciales: IACCE, LF.

No se incluyen las definiciones de los parámetros pero si las expresiones utilizadas para el cálculo de los valores promedio de las figuras de mérito, según se muestra en la tabla 2. Se ha representado cada uno de los parámetros seleccionados promediados por frecuencias, comparando las tres posiciones de fuente (actual, origen y púlpito). Las barras de error representan la desviación típica.

Tabla 2. Figuras de Mérito

$TR_{mid} = \frac{1}{2}(TR^{500\text{ Hz}} + TR^{1\text{ kHz}})$	$IACC_{E3} = \frac{1}{3}(IACC_E^{500\text{ Hz}} + IACC_E^{1\text{ kHz}} + IACC_E^{2\text{ kHz}})$
$G_{mid} = \frac{1}{2}(G^{500\text{ Hz}} + G^{1\text{ kHz}})$	$LF_{E4} = \frac{1}{4}(LF^{125\text{ Hz}} + LF^{250\text{ Hz}} + LF^{500\text{ Hz}} + LF^{1\text{ kHz}})$
$C_{80} = \frac{1}{3}(C_{80}^{500\text{ Hz}} + C_{80}^{1\text{ kHz}} + C_{80}^{2\text{ kHz}})$	$C_{50} = 0.15 \cdot C_{50}^{500\text{ Hz}} + 0.25 \cdot C_{50}^{1\text{ kHz}} + 0.35 \cdot C_{50}^{2\text{ kHz}} + 0.25 \cdot C_{50}^{4\text{ kHz}}$

2.3 Cálculo de variación por posición mediante JND

Tabla 3. JND de los parámetros estudiados

Parámetro	JND	Parámetro	JND	Parámetro	JND
T30	5%	G	1dB	IACC	0.08
C50	1dB	C80	1dB	LF	0.05

Se ha calculado, promediando por posiciones, el valor de la figura de mérito correspondiente a ese parámetro según se indica en la Tabla 2. Para cada una de las posiciones fuente, se representa la variación del parámetro en forma de mapa de color, superpuesto sobre la planta de la Catedral. Para cada parámetro pueden observarse las zonas donde la diferencia respecto el valor medio es mayor de un JND según los valores mostrados en la Tabla 3. El rango de valores en la escala de color para cada parámetro X corresponde con el par:

$$[(valor_medio_X - JND_X), (valor_medio_X + JND_X)] \quad (1)$$

El valor medio de cada parámetro se calcula teniendo en cuenta los valores de las tres posiciones de la fuente y las posiciones de medida correspondientes a las tres zonas (nave central, nave lateral derecha y transepto izquierdo).

Debido a la asunción de la simetría en los casos de la fuente en la posición actual y original, los valores correspondientes a las zonas de la nave lateral izquierda y del transepto derecho se han completado con sus simétricos solo con intención de visualizar toda la planta.

2.4 Diferencia normalizada

A partir de los valores de las figuras de mérito, promediados por posiciones, se ha cuantificado la diferencia entre posiciones de fuente, para poder conocer la diferencia en JNDs entre el valor obtenido con una fuente respecto a otra. Para esto, se ha calculado la diferencia normalizada de cada parámetro X según la expresión (2) $\# X = \frac{\Delta X}{JND_X}$ (2)

$$\# X = \frac{\Delta X}{JND_X} \quad (2)$$

Donde $\#X$ es la diferencia normalizada de una posición receptor, ΔX es la diferencia entre el valor obtenido con la fuente en la posición indicada respecto el valor obtenido con la fuente en la posición actual, y JND_X denota el JND del parámetro acústico X . La representación de estos valores se ha realizado en forma de mapa de color. De esta forma, se puede observar el número de JNDs de diferencia que presenta un determinado parámetro entre una posición y otra.

3 Resultados

3.1 Variación de los parámetros por frecuencia y posición.

En la Figura 2 se presentan los resultados de los parámetros promediados por frecuencias. En ésta se puede observar que las diferencias entre las distintas posiciones de fuente no son significativas. El tiempo de reverberación medio para cada una de las posiciones es 4.67, 4.77 y 4.64 s respectivamente. Este valor indica una elevada reverberación, lo que implica alta riqueza pero baja claridad, como podemos observar en la gráfica de C50 y C80. Observando las barras de la desviación típica se puede apreciar una elevada variabilidad en C50 y C80. Esto indica que la claridad varía ampliamente en función de la posición del receptor. Este detalle se puede apreciar en la Figura 8. En general, se puede observar que con la fuente en la posición actual los valores medios son inferiores a los del caso de la fuente en la posición origen y mayores que los de la fuente en púlpito en el caso de T30, EDT y Tc. En cuanto a la claridad, con la fuente en el púlpito se consiguen valores más elevados.

En la Figura 3 se muestra la variación del parámetro G en función de la distancia fuente-receptor. A pesar de la dispersión puede observarse una ligera caída. Una posible explicación para esta poca variación puede ser debida a los elementos arquitectónicos que favorecen la dispersión del sonido como las columnas, el techo y las rugosidades de la piedra con que está construida.

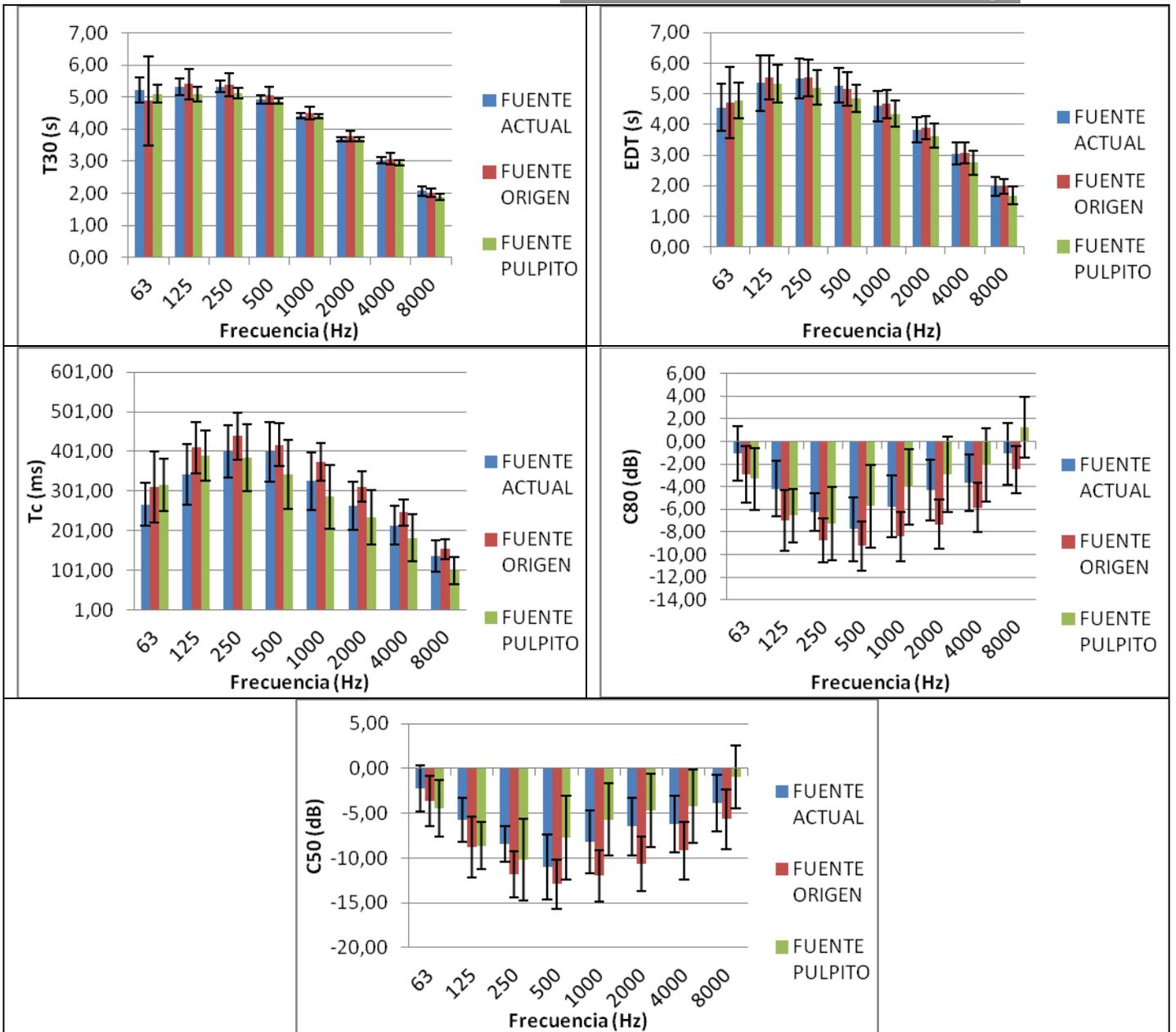


Figura 2. Parámetros promediados por frecuencia con las tres posiciones de fuente

En la Figura 5 y Figura 5 se muestran los parámetros RASTI, IACCE3 y LF promediados por posiciones según la definición de las figuras de mérito de la Tabla 2. Para el parámetro RASTI puede observarse una clara mejora cuando la fuente se encuentra en el púlpito tanto en la nave central como en el transepto.

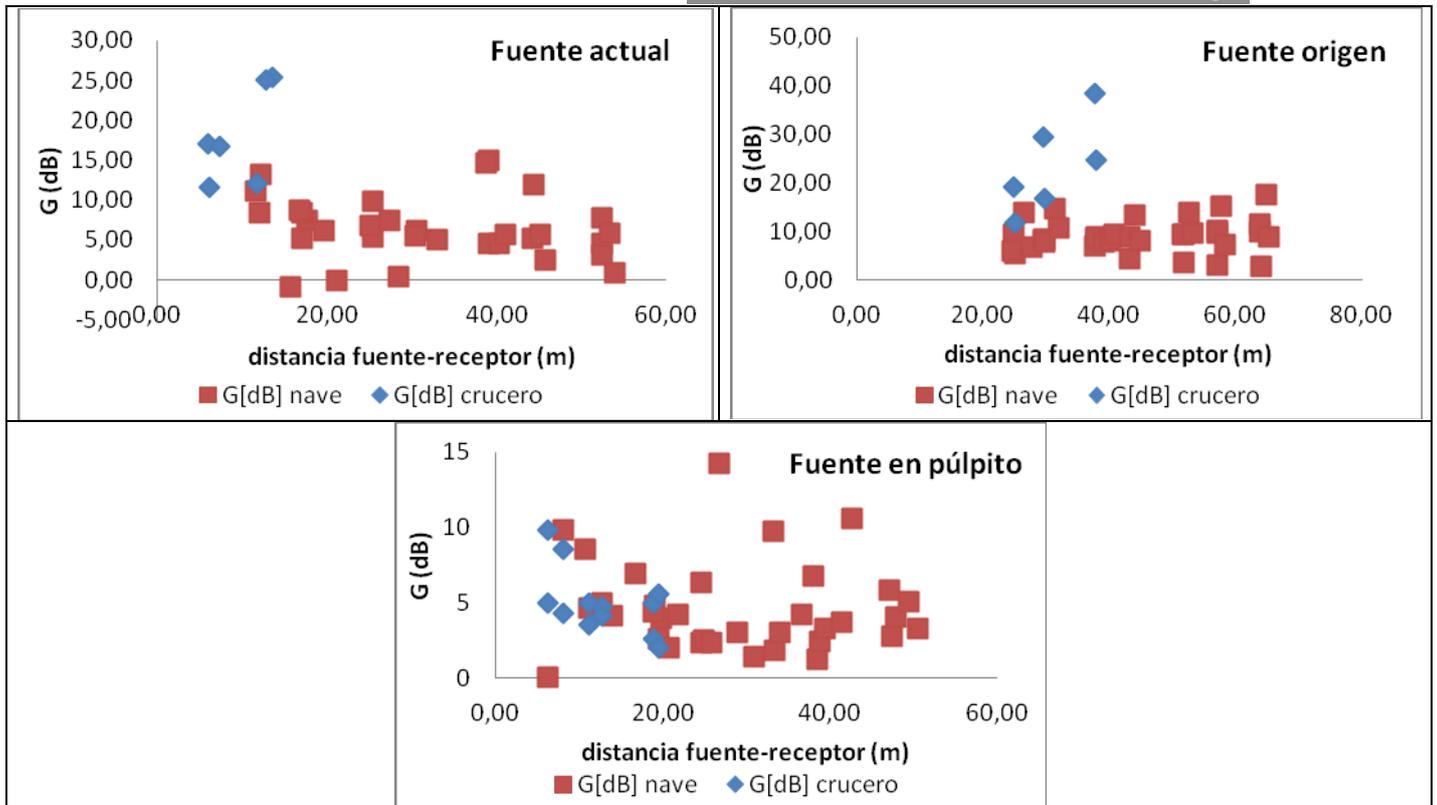


Figura 3. Variación del Parámetro G con la distancia fuente-receptor.

Con IACCE3, en la posición central de la nave se observa que el valor se aproxima a 1, lo cual confirma la similitud de la señal que reciben ambos oídos en esta zona. En las zonas laterales, este valor decrece y pasa a encontrarse en el rango óptimo propuesto por Beranek, entre 0.33 y 0.59. Este decremento implica una mayor amplitud de la fuente sonora. Comparando la posición origen y púlpito con la actual se observa una disminución en todas las posiciones de la sala y, por tanto, mayor espacialidad de la fuente. Podemos apreciar que existe una correlación entre el parámetro IACCE y LF. A mayor IACCE se aprecia menor LFE. En algún caso, el IACC puede disminuir a causa de las columnas y otros elementos sin incrementar el LF. En este caso, las zonas con valores óptimos para LF (mayor que 0.19) coinciden con las zonas de valores óptimos para IACCE. Comparando el parámetro LF entre las posiciones de fuente se puede ver que en la zona central, el valor aumenta en los casos original y púlpito respecto el caso actual. En la zona lateral de la nave en cambio, disminuye con la fuente en origen y aumenta con la fuente en púlpito. Respecto al transepto, en ambos casos disminuye.

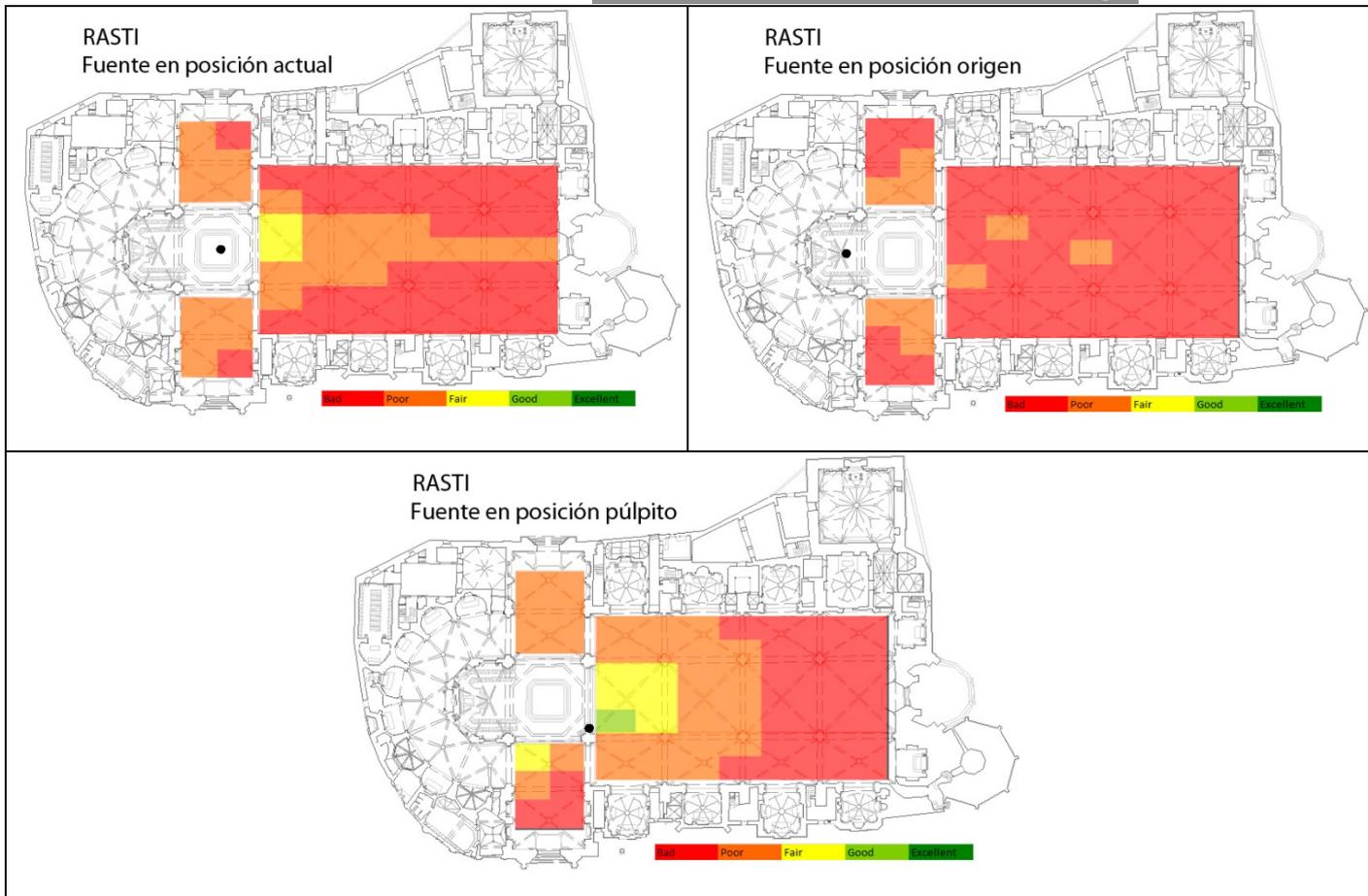


Figura 4. Variación del parámetro RASTI promediado por posiciones

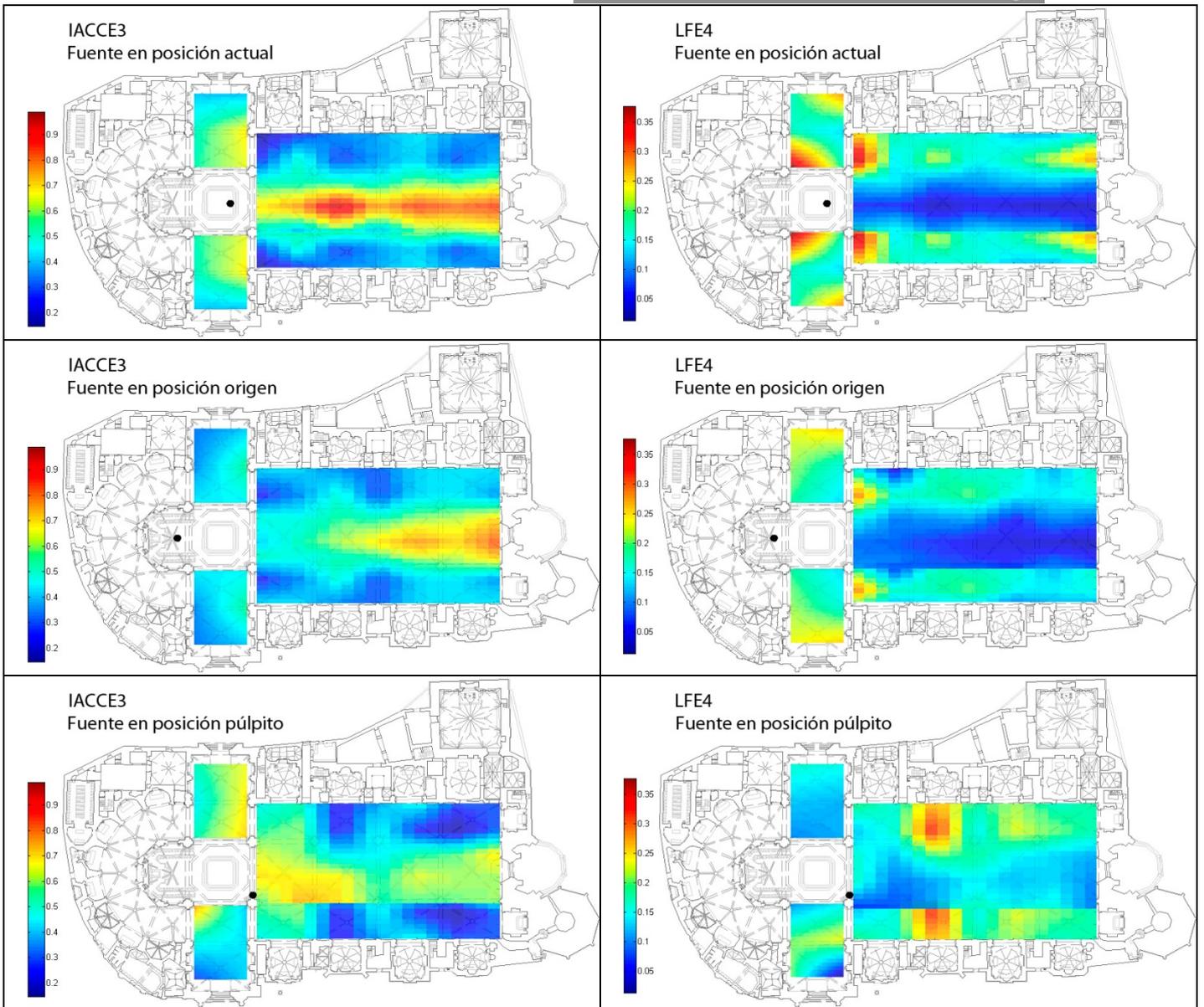


Figura 5. Variación de los parámetros IACCE y LF promediados por posiciones.

3.2 Variación de los parámetros respecto su valor medio

En la Figura 6, Figura 7 y Figura 8 se presentan las variaciones de los parámetros respecto su valor medio en función de 1 JND. Con T30 se observa que en la zona central posterior, con la fuente en la posición actual, la diferencia supera el JND y esta se incrementa cuando la fuente se encuentra en la posición original. Las esculturas y molduras de la zona del altar y a la sillería del coro, así como a las reflexiones del techo que son bajas cuando la fuente se encuentra en la posición actual contribuyen a este resultado. En el caso de la fuente en el púlpito todos los valores se encuentran dentro del JND de diferencia respecto el valor medio.

Para el parámetro G, se observa una gran variabilidad. Se pueden apreciar dos zonas muy diferenciadas; la nave central frente a las laterales si la fuente está en el altar origen y en menor medida con la fuente en el altar central y una mayor homogeneidad con la fuente en el púlpito.

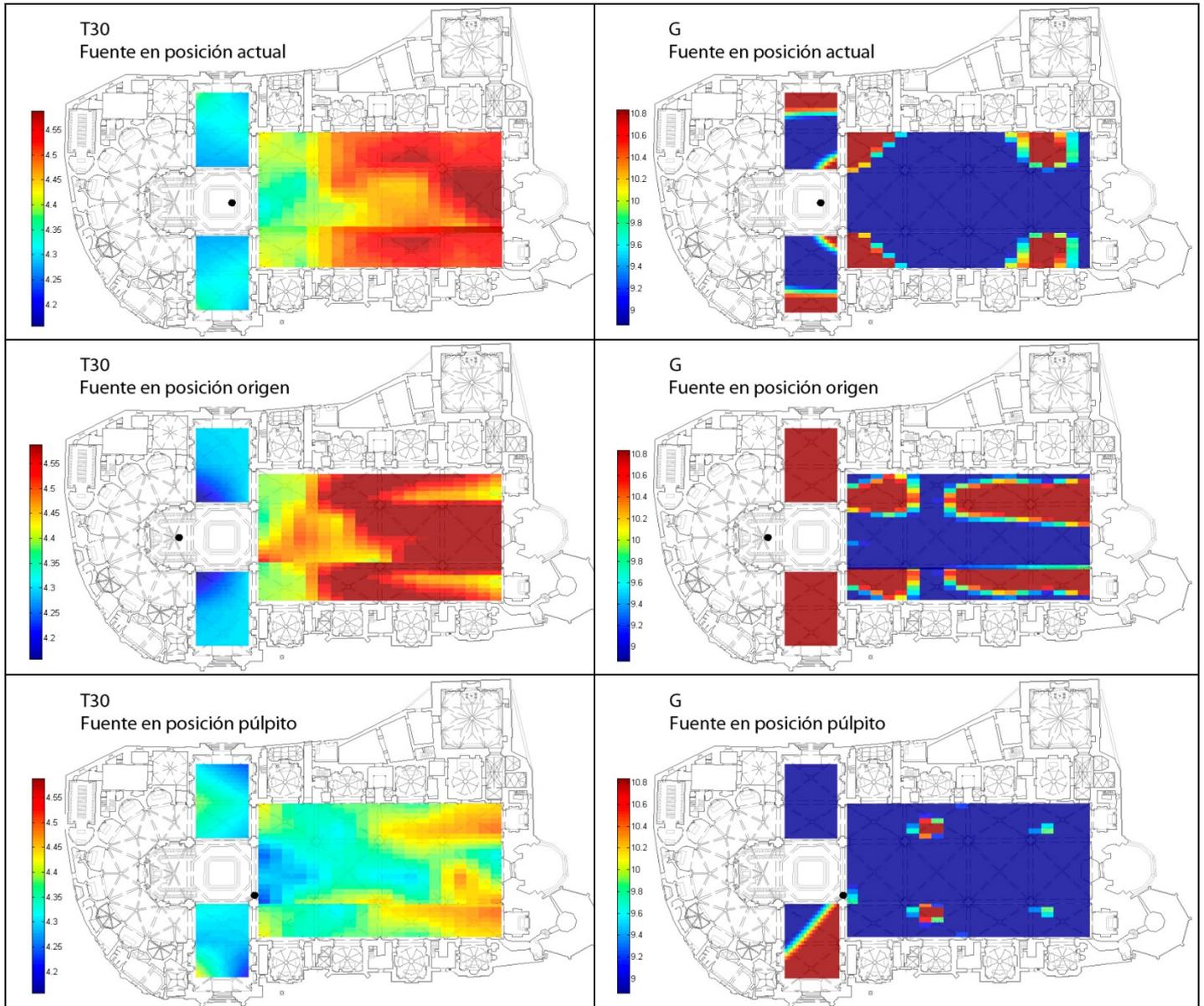


Figura 6. Variación dentro de 1 JND de T30 y G respecto a su valor medio

En el parámetro Claridad, se observan diferencias notables con la ubicación de la fuente. Mayor uniformidad con la fuente en posición origen y en púlpito.

Con los parámetros espaciales, IACCE y LF, para las fuentes en el altar las dos zonas claramente diferencias y la simetría se mantienen. No así para el caso del púlpito

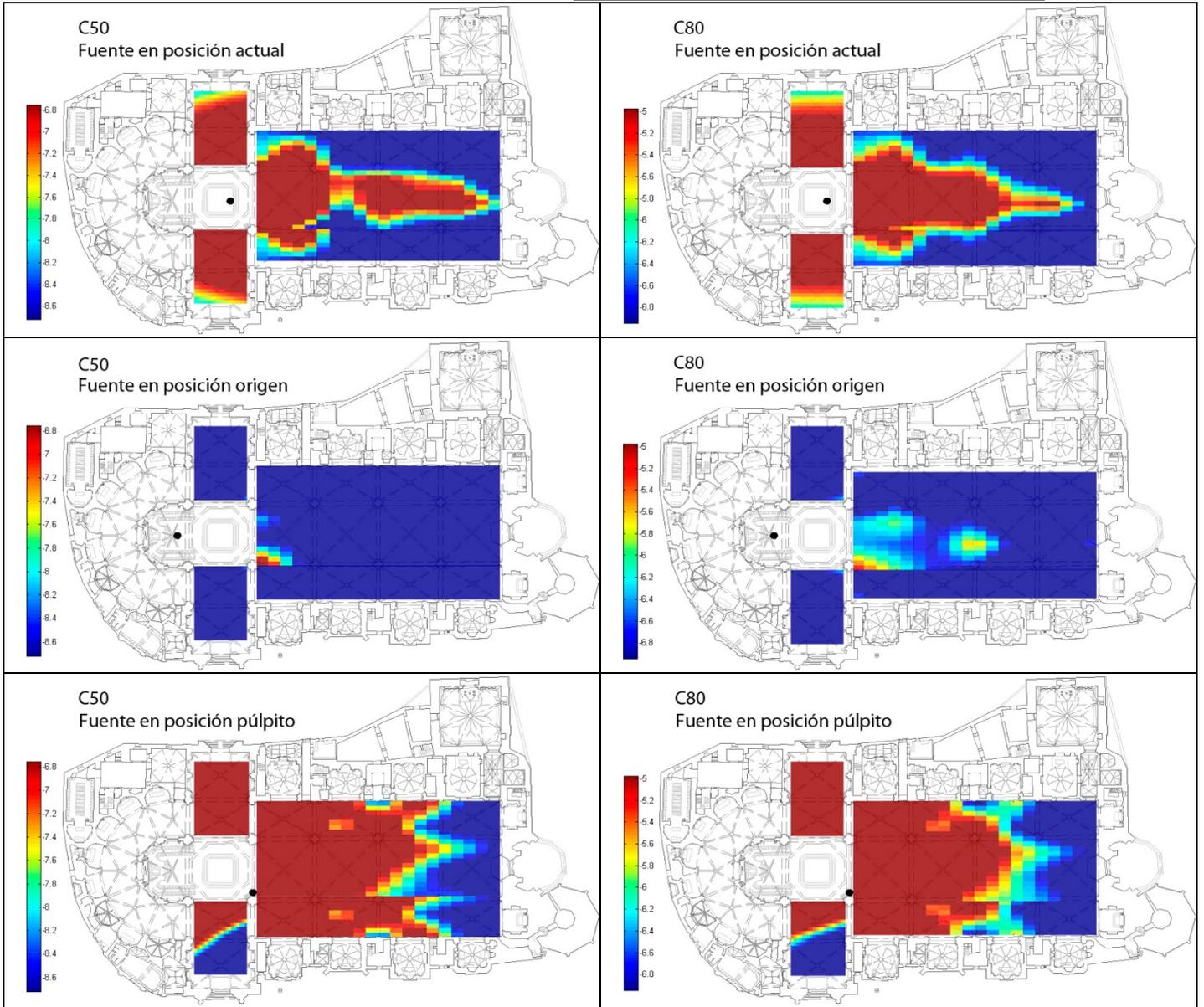


Figura 7 Variación dentro de 1 JND de C50 y C80 respecto a su valor medio

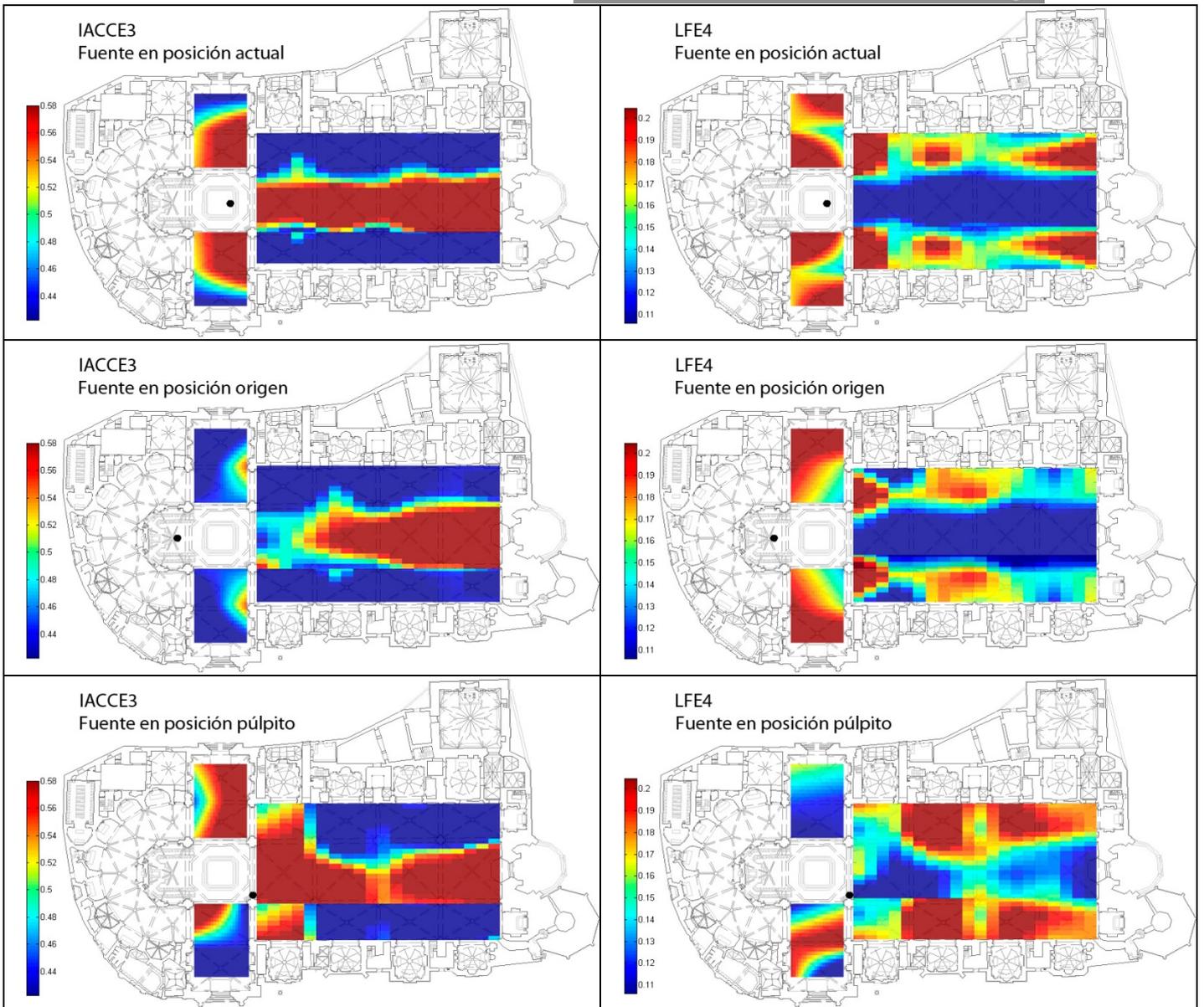


Figura 8. Variación dentro de 1 JND de IACCE y LF respecto a su valor medio

3.3 Diferencia normalizada

En la Figura 9, **Error! Reference source not found.** y Figura 11 se representa la diferencia normalizada entre los valores de la posición de la fuente indicada y la posición actual tomada como referencia, es decir, el número de JND que existe entre una posición y la otra.

En el parámetro T30 se observa que, en prácticamente toda la sala, la diferencia no es significativa, pues no supera el JND de diferencia. Por tanto, el cambio de posición de la fuente no implica un cambio notable en el tiempo de reverberación.

Respecto al parámetro G, se observa una gran diferencia. Como hemos indicado los valores de este parámetro son muy diferentes en las tres ubicaciones de la fuente.

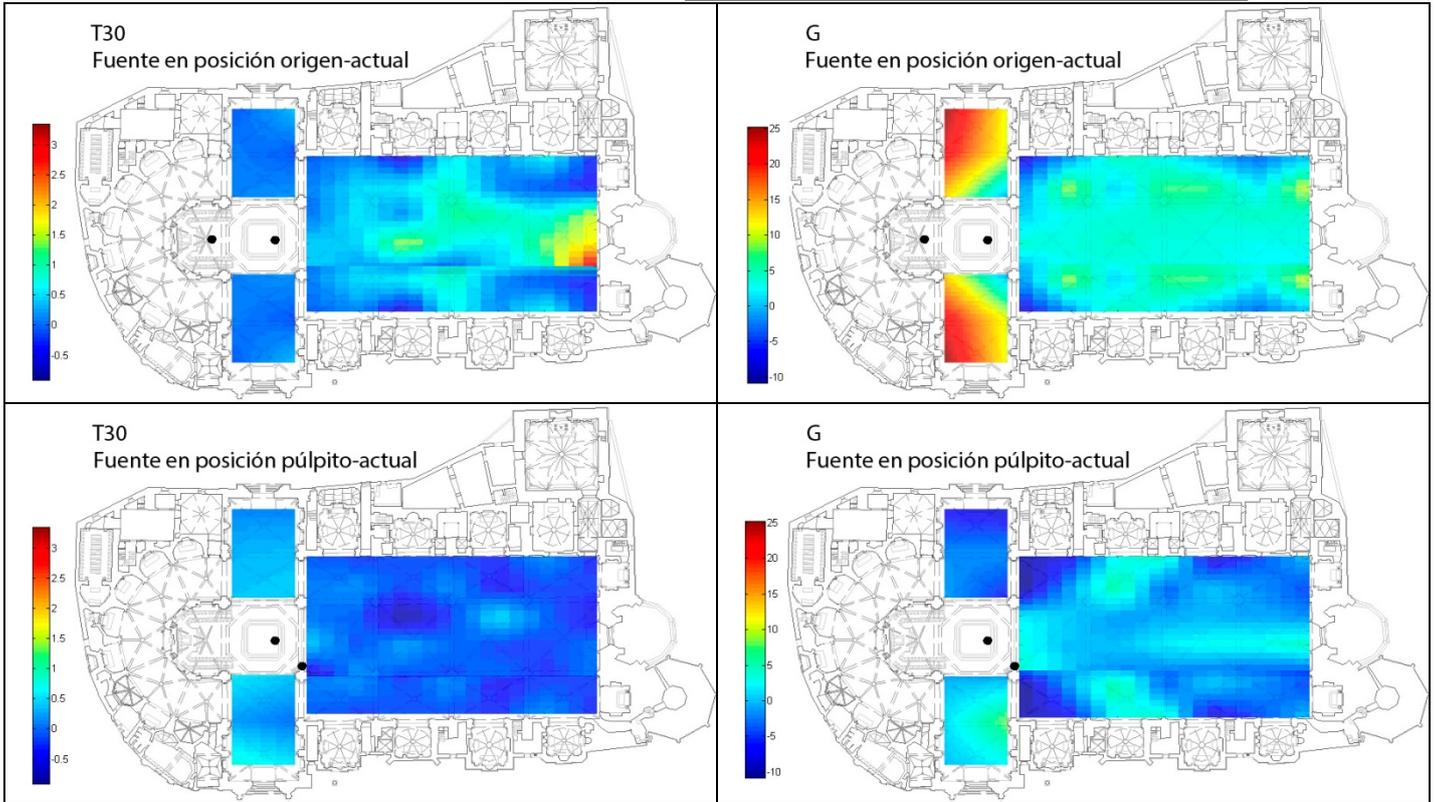
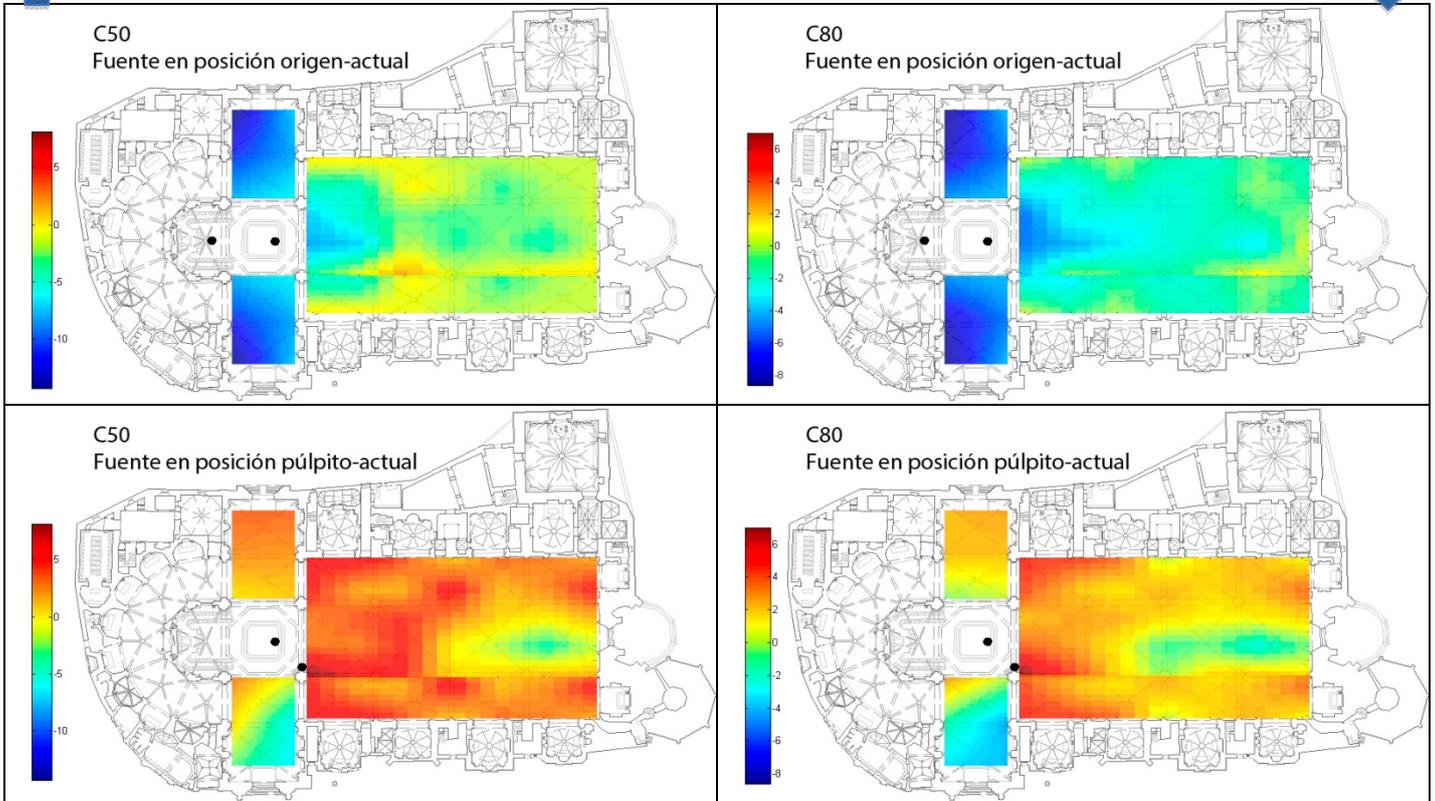


Figura 9. Diferencia normalizada de T30 y G

Figura 10. Diferencia normalizada de C50 y C80



Respecto a la claridad, podemos observar que la diferencia entre la fuente en el púlpito y en la posición actual presenta una menor diferencia que la diferencia entre la fuente en la posición origen y la actual.

Para los parámetros espaciales, las menores diferencias se aprecian para LF para fuente púlpito-actual y en la nave central para fuente origen actual y respecto al IACC la variabilidad es mayor.

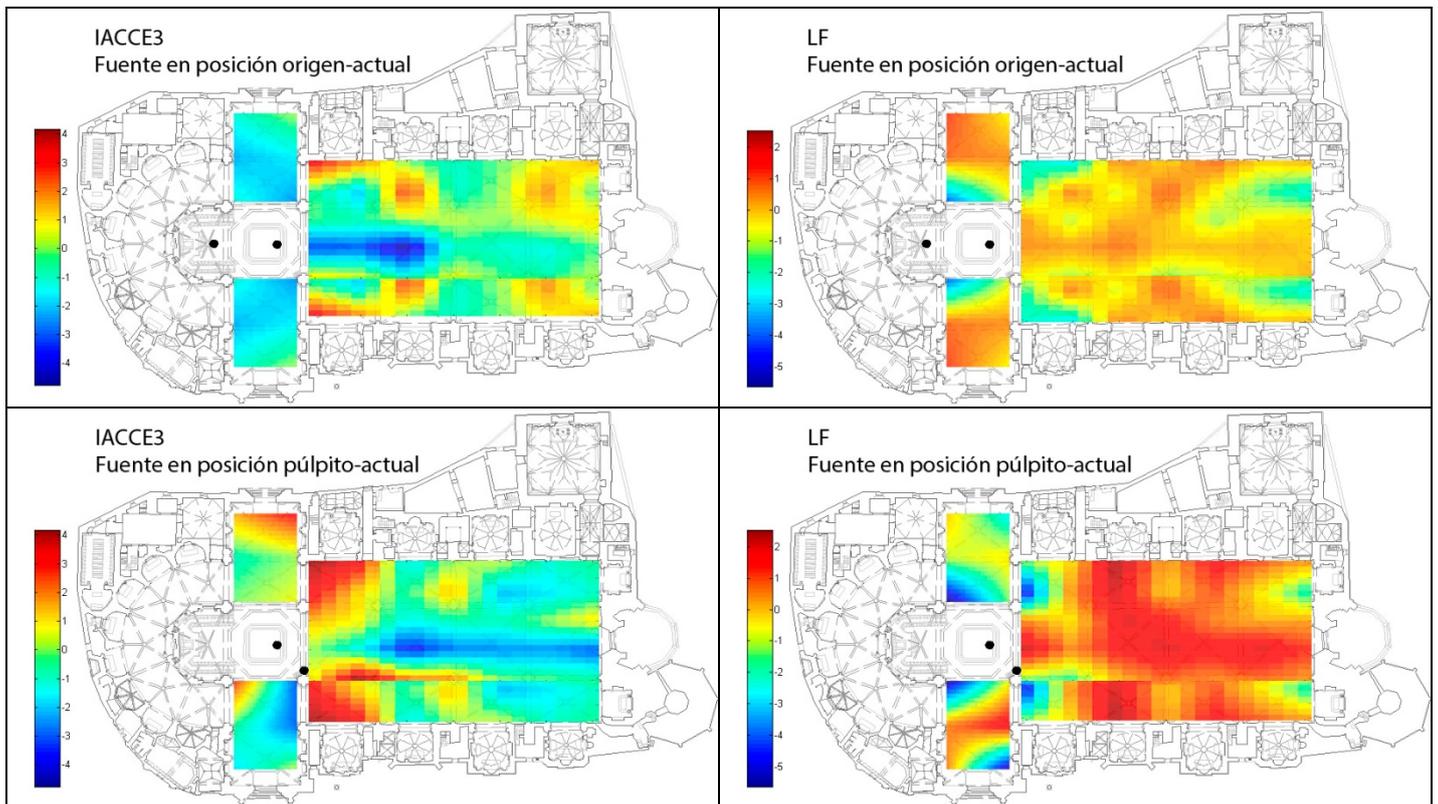


Figura 11. Diferencia normalizada de IACCE y LF

4 Conclusiones

En este trabajo se han presentado los resultados de las mediciones de la Catedral Metropolitana de Valencia. El objetivo principal ha sido comparar el efecto de la posición de la fuente en el conjunto de los parámetros escogidos. Para ello se han fijado tres posiciones: altar actual, altar original (coro) y púlpito. Se han estudiado los parámetros T30, EDT, C50, C80, Tc, promediados por frecuencias. Además, se han calculado para un subconjunto de parámetros T30, C50, C80, RASTI, IACCE, LF y G el promedio por posiciones del receptor y se ha representado en un mapa de color para señalar las posiciones donde el valor presentaba una diferencia mayor o igual a 1 JND respecto el valor medio del parámetro. Finalmente, se ha calculado la diferencia normalizada para cuantificar la diferencia en los valores obtenidos con una posición de fuente respecto la posición actual. Como conclusión general se puede destacar:

- La posición de la fuente influye muy poco en el valor global de los parámetros T30 y EDT pero si que afecta a los de los otros parámetros estudiados. Así:
 - El tiempo de reverberación es elevado, superior a 4.60 s, en todas las posiciones de la fuente, lo que implica alta riqueza sonora pero baja claridad, que viene corroborado por

valores de C50 en el intervalo (-5 , -12) dB y de C80 entre (-6 , -9)db para las frecuencias de interés para el habla y la música.

- En general en la posición original del altar, se percibe un incremento de los parámetros respecto la posición actual del mismo, pero la claridad (C50 y C80) es mayor cuando la fuente se encuentra en el púlpito que cuando está en la posición actual. Así mismo, el RASTI mejora en general cuando la fuente se encuentra en el púlpito
 - En general, el IACC disminuye cuando la fuente está en la posición original o en el púlpito, lo que implica una mayor amplitud aparente de la fuente, en estas posiciones.
 - Se observa una correlación entre IACCE y LF.
 - Para LF, el mayor valor (y más óptimo) en la nave central se obtiene cuando la fuente se encuentra en el púlpito y para el transepto cuando se encuentra en la posición actual.
 - El valor de G varía mucho con la posición de la fuente y decrece ligeramente con la distancia fuente-receptor.
- La variación de los parámetros respecto a su valor medio respecto a la posición del receptor muestra que:
 - Para T30 con la fuente en la posición origen se incrementa la zona donde la diferencia es mayor de 1 JND, y es debido principalmente al efecto reverberante de la puerta de entrada.
 - Para el resto de parámetros, los valores son muy dispares y en prácticamente toda la superficie los valores superan el JND de diferencia, lo que implica que la diferencia entre posiciones de fuente o de receptor será apreciable.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante el proyecto de investigación BIA2008-05485. Así mismo agradecemos a la Catedral de Valencia su colaboración en el proceso de medida y en especial a D. Jaime Sancho Andreu.

Referencias

- [1] J. J. Sendra, T. Zamarreno y J. Navarro, «Acoustics in churches,» *Computational Acoustics in Architecture*, pp. 133-165, 1999.
- [2] M. Galindo, T. Zamarreño y S. Girón, «Acoustic analysis in Mudejar-Gothic churches: experimental results,» *J. Acoust. Soc. Am.*, nº 117, pp. 2873-2888, 2005.
- [3] T. Zamarreño, S. Girón y M. Galindo, «Assessing the intelligibility of speech and singing in Mudejar-Gothic churches,» *Applied Acoustics*, nº 69, pp. 242-254, 2008.
- [4] R. Suárez, J. Sendra, J. Navarro y A. León, «The Acoustics of the Cathedral-Mosque of Cordoba. Proposals for Architectural Intervention,» *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 90, nº 2, pp. 362-375, 2004.
- [5] J. Anderson y M. Bratos-Anderson, «Acoustic Coupling Effects in St Paul's Cathedral,» *Journal*



- of Sound and Vibration*, vol. 236, nº 2, pp. 209 - 225, 2000.
- [6] C. R. Jiménez Sianderas, «Caracterización del Patrimonio Acústico de las Catedrales de Lima y Cusco».
- [7] E. Cirillo y F. Martellotta, «Acoustics of Apulian-Romanesque churches: An experimental survey,» *Build. Acoust.*, vol. 9, pp. 271-288, 2002.
- [8] J. S. Sivera, *La Catedral de Valencia*, 1909.
- [9] I. 3382:1997, «“Acoustics. Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters”,» International Organization for Standardization (ISO), 1997 .
- [10] M. S. Developments. [En línea]. Available: <http://www.winmls.com/>.
- [11] A. Giménez y A. Marín, «Analysis and assessment of concert halls,» *Applied Acoustics*, vol. 4, nº 25, 1988.
- [12] L. Beranek, *Concert Hall and Opera Houses*, New York: Springer Verlag, 2004.