



## SIMULACIÓN ACÚSTICA DE LA IGLESIA DE SANTA ANA DE MORATALAZ

Reference PACS: 43.55.Gx; 43.55.Ka; 43.58.Ta

**Bueno, Ana; León, Ángel Luís; Galindo, Miguel<sup>1</sup>**

*Universidad de Sevilla, Dpto. de Construcciones Arquitectónicas I <sup>1</sup>Dpto. Física Aplicada II, ETS  
Arquitectura, IUACC.*

*Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla –SPAIN.*

*Tel.: + 34 954556595. Fax: +34 954557018. <sup>1</sup>Tel. + 34 954556672. Fax: +34 954557892.*

*[anabueno@us.es](mailto:anabueno@us.es), [leonr@us.es](mailto:leonr@us.es), [mgalindo@us.es](mailto:mgalindo@us.es)*

### ABSTRACT

The church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid (1965-1971), designed by architect Miguel Fisac, is a place of worship in which acoustics played an important role in shaping the spatiality of the temple. This paper presents the results of the simulation of the sound field of this enclosure using the software CATT-Acoustics, the virtual model calibration based on the impulse responses, obtained from acoustic measurements made in situ, and the correspondence between the measured and simulated parameters.

### RESUMEN

La iglesia de Santa Ana de Moratalaz de Madrid (1965-1971), proyectada por el arquitecto Miguel Fisac, es un espacio de culto en el que la acústica fue uno de los elementos configuradores de la espacialidad del templo. En este trabajo se presentan los resultados de la simulación del campo sonoro de este recinto utilizando el programa informático CATT-Acoustics, la calibración del modelo virtual a partir de las respuestas al impulso obtenidas en la medición acústica realizada in situ, y la correspondencia entre los parámetros medidos y los simulados.

### INTRODUCCIÓN. DESCRIPCIÓN DE LA IGLESIA

La iglesia parroquial de Santa Ana (1965-1971) del barrio madrileño de Moratalaz (Figuras 1-5), fue el primer templo que el arquitecto Miguel Fisac proyectó conforme a las directrices litúrgicas marcadas por el Concilio Vaticano II. El fomento de la participación plena y activa de los fieles, el carácter simbólico de las celebraciones y la importancia de la palabra y la predicación, constituyeron aspectos principales de la reforma litúrgica marcada por este concilio, y que Miguel Fisac contempló en su arquitectura eclesial postconciliar. En este contexto, donde los fieles deben escuchar y entender el acto litúrgico, el arquitecto Miguel Fisac se plantea, desde este momento, el problema acústico como una constante a tratar y resolver en su arquitectura religiosa.

La iglesia de Santa Ana presenta una ordenación en planta con forma de ovalo, para conseguir una eficaz agrupación de la asamblea en torno al presbiterio, pues el arquitecto pensaba que esta era la forma que esa misma asamblea tomaría, alrededor de una serie de focos, si se encontrara en un espacio libre. Como la *acústica ha sido el elemento configurador en el aspecto del templo* [1] y el problema del sonido constituyó una de las preocupaciones de su autor, Fisac dispuso en la cara posterior del óvalo unas superficies convexas, que él llamó *muros dispersivos*, cuya misión era evitar concentraciones acústicas que perturbaran la audición.

La razón de ser del muro que conforma el presbiterio, surge por la adecuación del mismo a los distintos momentos de la celebración litúrgica, que Fisac materializa y distribuye apoyándose en tres concavidades practicadas en dicho muro. En la primera concavidad se estableció el lugar para el ambón y la sede (liturgia de la palabra), en la segunda el altar (para la Consagración y Comunión) y la reserva del Santísimo Sacramento en la tercera concavidad.

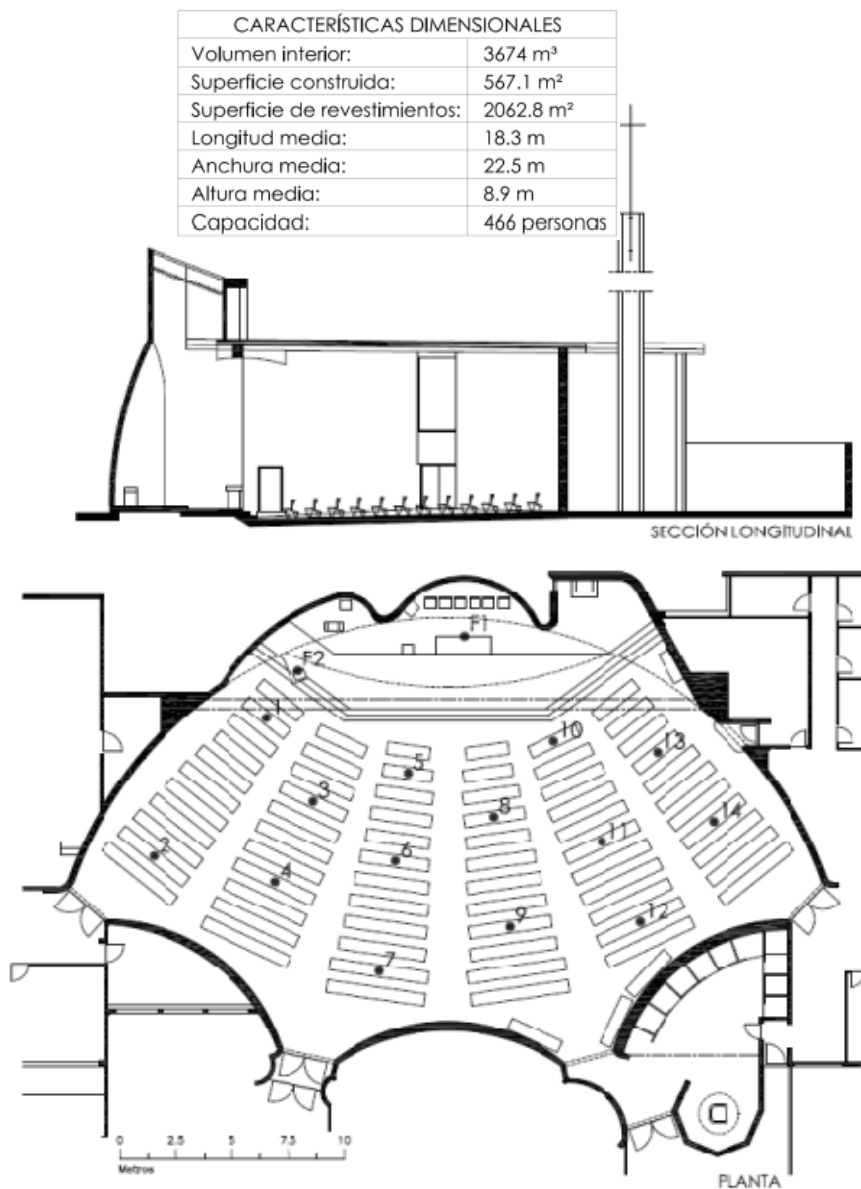


Figura 1. Sección longitudinal y planta: posiciones de fuentes y receptores.

En la iglesia, al igual que la totalidad del conjunto parroquial, el material empleado es el hormigón visto, ejecutado in situ en todos los paramentos verticales. La cubierta se resuelve mediante vigas hueso de hormigón prefabricado visto, según patente del arquitecto, dispuestas en la nave paralelamente al eje longitudinal que une el presbiterio y muros dispersivos. La cubierta, de piezas prefabricadas apoyada en los muros de carga perimetrales del templo, se interrumpe al llegar al presbiterio para dar lugar a un gran lucernario que se eleva en altura. El mobiliario principal lo constituyen los bancos de madera, agrupados en seis franjas dispuestas en forma de abanico.



Figura 2. Presbiterio.



Figura 3. Muros dispersivos.



Figura 4. Lucernario sobre el presbiterio.



Figura 5. Lucernario y vigas hueso.

### MEDICIÓN ACÚSTICA *IN SITU*

Las medidas se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN-ISO 3382-1 [2] con la iglesia desocupada de fieles. Se utilizaron dos posiciones de fuente situadas a 1.5 m sobre el nivel del suelo, que corresponden a las ubicaciones naturales del oficiante (ver Figura 1). La primera situada en el altar y la segunda sobre el ambón. Los catorce puntos de recepción se situaron sobre la zona de bancos utilizados por los fieles a 1.2 m sobre el nivel del suelo. Se monitorizaron las condiciones ambientales durante el periodo de medida. La temperatura se mantuvo en torno a los 30°C y la humedad relativa alrededor del 22%. El espectro del ruido de fondo se registró promediando durante cuatro minutos en el punto 6, que dio lugar a un índice NR de 30.

En cada punto de recepción se obtuvieron las respuestas al impulso (RI) obtenidas a partir de barridos de señales de onda sinusoidales, donde la frecuencia se incrementa exponencialmente con el tiempo. El rango de frecuencias se ajustó para cubrir las bandas de octava desde 63 a 16000 Hz, así como la duración del barrido, para conseguir relaciones señal-ruido mayores de 45 dB. A partir de estas RI se derivan los valores de los parámetros acústicos.

El proceso de generación, adquisición y análisis de la señal se llevó a cabo con el programa WinMLS2004 mediante una tarjeta de sonido VX Pocket v2 de Digigram. La señal generada alimenta al amplificador de potencia INTER-M 1000 y se reproduce en el recinto por una fuente omnidireccional AVM DO-12. La respuesta al impulso se captura por varios tipos de micrófono.

Para las RI recurrimos a un micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5 en su configuración omnidireccional conectado a la fuente de polarización ARTcessories. Para la

obtención de parámetros relacionados con la anchura percibida de la fuente y la envolvente del oyente se utilizó el micrófono multipatrón en su configuración omnidireccional y de figura de ocho. Con objeto de medir parámetros relacionados con la impresión espacial se empleó el simulador de torso HMS III de Head Acoustics junto con el acondicionador de señal OPUS de 01dB. Con el registro del espectro del ruido de fondo y la inteligibilidad de la palabra, se empleó un micrófono omnidireccional B&K 4165 con preamplificador B&K 2669, junto con un acondicionador de señal OPUS de 01dB. Cuando se estima la inteligibilidad mediante el índice RASTI, se usó una fuente de construcción propia que simula el patrón de directividad de la cabeza humana. Además se ajustó la señal al nivel estándar de la voz humana, que corresponde con 67 dB(A) a un metro de la fuente. El nivel de emisión de la fuente se fijaba utilizando un sonómetro integrador B&K 2231.

## SOFTWARE EMPLEADO PARA LA SIMULACIÓN DEL CAMPO SONORO

Se elaboró un modelo tridimensional, que reproducía el interior de la iglesia desde el punto de vista geométrico, empleando un programa informático de CAD. Posteriormente, se efectuó la exportación de la geometría levantada al programa de simulación acústico *CATT-Acoustic* v8.0k, en el cual se asignan los coeficientes de absorción y dispersión acústica a las distintas superficies interiores que revisten interiormente la iglesia. También se definen las posiciones de fuentes, sus niveles de emisión y directividades así como las ubicaciones de los receptores, de forma que las distancias emisor-receptor no superen en más de 20 cm las determinadas a partir de las respuestas al impulso medidas. Por último se incorporan las condiciones de temperatura (30°C), humedad relativa (22%) y densidad del aire (1.15 kg/m<sup>3</sup>). El modelo del recinto, con un volumen de 3.674 m<sup>3</sup>, estaba compuesto por un total de 257 planos, que constituyen una superficie de revestimientos de 2063 m<sup>3</sup>.

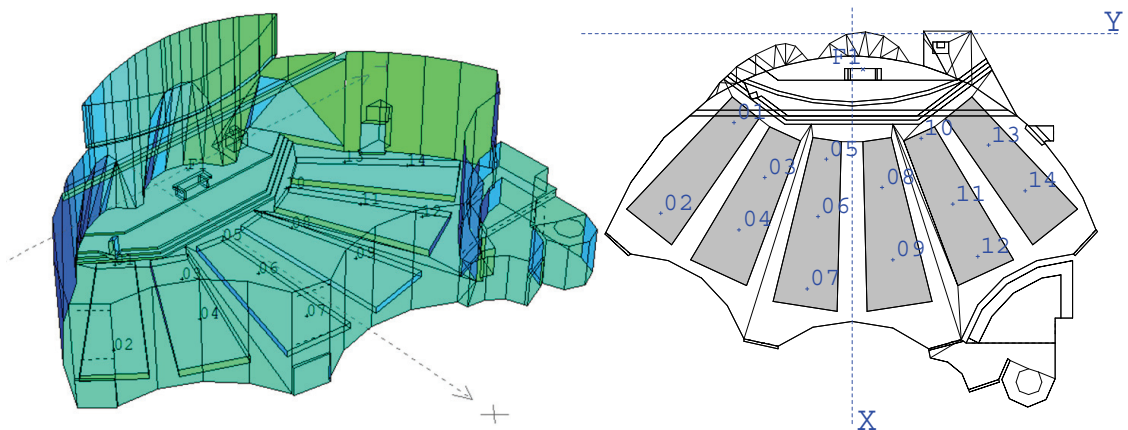


Figura 6. Modelo tridimensional de la iglesia de Santa Ana de Moratalaz.

Para el cálculo de la simulación del campo sonoro se ha empleado un nuevo *software* desarrollado por *CATT-Acoustic: The Universal Cone-Tracer CATT TUCT* v1.0f. Se trata de un nuevo motor de cálculo para la simulación acústica y auralización de recintos, integrado con *CATT-Acoustic*, que no dispone de herramientas para la realización de los modelos geométricos de los espacios a analizar, o para modificar las propiedades acústicas de las superficies que lo forman, por lo que necesita de *CATT-Acoustic* para la realización de las fases previas a la simulación, anteriormente descritas.

En el algoritmo usado el sonido directo y las reflexiones especulares de primer orden son siempre tratados de un modo determinista, no haciéndose necesario el uso de técnicas de trazado de rayos. Idéntico tratamiento reciben las reflexiones difusas de primer orden, para lo cual se introduce como novedad un proceso aleatorio de división de rayos (*random split-up*). El sonido reflejado de manera difusa es estudiado en función de la frecuencia.

Otra de las características novedosas incluidas en TUCT es la eliminación de cualquier tipo de recreación idealizada de la cola reverberante en la última parte del ecograma. La contrapartida

es la necesidad de considerar un mayor número de conos para asegurar la precisión suficiente en la respuesta al impulso que exige su uso en auralización.

Las condiciones para el cálculo de la simulación realizada con *CATT TUCT v1.0f* fueron las siguientes:

- Algoritmo de cálculo: 2, cálculo completo, auralización detallada.
- Número de rayos/conos: 30.000
- Ecograma / respuesta al impulso: 6 s
- Absorción del aire: activada
- Tiempo de cálculo: 35 horas, 11 minutos

## CALIBRACIÓN DEL MODELO

El objetivo de esta fase es conseguir un modelo tridimensional con un comportamiento acústico lo más parecido al que posee realmente el espacio eclesial y cuyas características acústicas, fueron determinadas con las mediciones realizadas *in situ*. Para ello, en el modelo se modifican los coeficientes de absorción y difusión de los materiales con más incertidumbre, para ajustar el tiempo de reverberación estimado en dicho modelo, con los valores medidos *in situ* para las distintas bandas de octava. Como criterio válido de calibración [3], se estima que la coincidencia es adecuada si difieren menos del umbral perceptible *Just Noticeable Difference* (JND) que corresponde a un 5% de los valores medidos.

Resulta de utilidad, para este objetivo, la estimación interactiva del tiempo de reverberación (*Interactive RT Estimate*), una acción que se precisa, principalmente en las primeras etapas del proyecto, de cara a la asignación de las propiedades acústicas de las superficies.

Este ajuste del tiempo de reverberación se ha realizado empleado el motor de cálculo *CATT TUCT v1.0f*, hasta obtener la calibración del mismo a partir de los valores del tiempo de reverberación medidos *in situ* ( $T_{30}$ ), en la hipótesis vacía de fieles y con la fuente en posición 1, coincidente con el altar.

En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de absorción y difusión sonora de los materiales de revestimiento existentes en el recinto eclesial. En ella se destacan los materiales que han sido ajustados para la calibración del tiempo de reverberación  $T_{30}$ .

Para los coeficientes de absorción se han escogido los valores suministrados por la literatura [4], [5]. En los tres materiales ajustados, los valores del coeficiente de absorción para las frecuencias medias y altas también corresponden con los internacionalmente establecidos, mientras que es en las bajas frecuencias donde se ha realizado el ajuste. Este hecho es debido al comportamiento en frecuencia del tiempo de reverberación medido (Figura 7). El techo de la iglesia, formado por las vigas hueso de hormigón prefabricado, que salvan una gran luz, hace que este se comporte a modo de resonador, aumentando la absorción a bajas frecuencias. De igual forma podemos pensar en el caso del lucernario, con lamas de aluminio anodizado, y las vidrieras que constituyen grandes superficies con capacidad de vibración. Es por ello que los valores del coeficiente de absorción a bajas frecuencias de estos elementos se han aumentado, especialmente en la banda de octava de 125 Hz.

No obstante, junto a este hecho, se realizó, previamente, una primera estimación del coeficiente de absorción atendiendo a la superficie real de los materiales ajustados. Es reconocido [6], que simular como una superficie recta, una superficie con irregularidades debe afectar no sólo al coeficiente de dispersión sino también al de absorción. Es por tanto el efecto combinado de resonador y las irregularidades de las superficies el que nos llevó a la estimación de los coeficientes de absorción presentados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Coeficientes de absorción sonora ( $\alpha$  arriba) y coeficientes de difusión sonora ( $s$  abajo) de los materiales existentes en el recinto eclesial (%)

| MATERIAL                 | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|--------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| TERRAZO, GRANITO         | 1      | 1      | 1      | 1       | 2       | 2       |
| HORMIGÓN VISTO           | 10     | 10     | 10     | 10      | 10      | 10      |
| VIGAS HUESO DE HORMIGÓN* | 16     | 6      | 2.8    | 2.8     | 2.8     | 2.8     |
| LUCERNARIO*              | 34     | 15     | 4      | 3       | 2       | 2       |
| VIDRIERAS*               | 24     | 10     | 4      | 3       | 2       | 2       |
| PUERTA MADERA            | 14     | 10     | 6      | 8       | 10      | 10      |
| TELA                     | 3      | 4      | 11     | 17      | 24      | 35      |
| BANCO MADERA VACÍO       | 16     | 18     | 16     | 16      | 17      | 7       |
| BANCO MADERA OCUPADO**   | 30     | 40     | 50     | 60      | 70      | 80      |

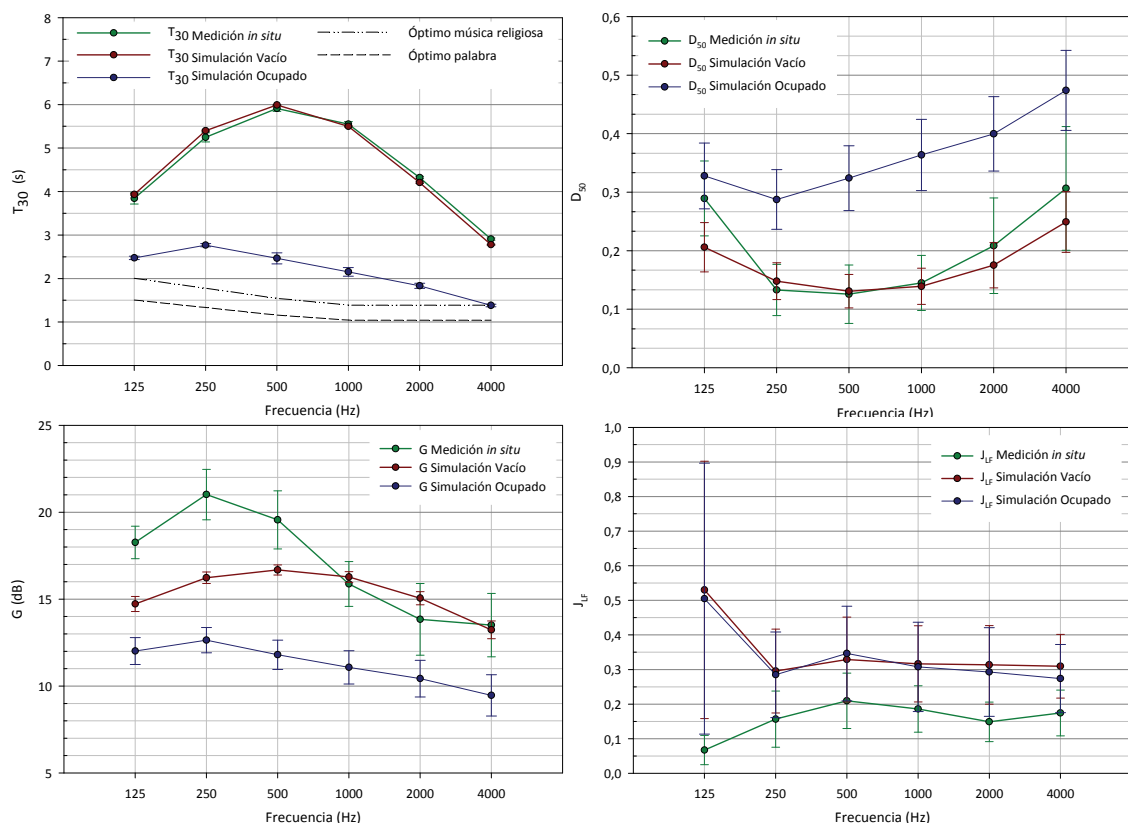
\* Materiales calibrados.

\*\* Banco ocupado al 100% (suponemos 2 personas/m2).

Para los coeficientes de dispersión se ha admitido un valor por defecto del 10% en todas las bandas de octava analizadas, para el caso de los bancos de madera vacíos/ocupados se han escogido los valores de [3] y [5] respectivamente. Para el lucernario y el techo de vigas hueso de hormigón armado los valores se han estimado a partir del tamaño de las irregularidades.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados de algunos parámetros acústicos obtenidos mediante la simulación y se contrastan con los obtenidos a partir de las RI medidas *in situ* en el recinto.



**Figura 7.** Comportamiento en frecuencia de algunos parámetros acústicos promediados espacialmente, correspondientes a la medición *in situ*, Simulación Estado Actual Vacío y Ocupado (Fuente 1).

En la Figura 7 se presentan los valores de los parámetros acústicos que proporcionarán información sobre los aspectos subjetivos de reverberación (tiempo de reverberación,  $T_{30}$ ), inteligibilidad de la palabra (definición,  $D_{50}$ ), nivel sonoro subjetivo (fuerza acústica,  $G$ ) e impresión espacial mediante el ancho aparente de la fuente (energía lateral precoz,  $J_{LF}$ ). Con objeto de dar una visión del comportamiento espacial, también aparecen representados las desviaciones estándar.

Los resultados de los parámetros calculados en la simulación acústica, relacionados con la sensación de reverberación, inteligibilidad de la palabra, claridad musical y nitidez del sonido son muy afines a los obtenidos en las medidas experimentales, a partir de la respuesta al impulso, para todas las bandas de octava estudiadas. Podemos afirmar, por tanto, que el comportamiento acústico del modelo calibrado con el tiempo de reverberación  $T_{30}$ , es muy similar al comportamiento acústico real del recinto en su estado original. Este grado de aproximación entre valores medidos y simulados se pone de manifiesto si admitimos los umbrales perceptibles recomendados JND [2] para los valores promediados en frecuencia, y los aceptamos como válidos para cada banda de octava. Existe un consenso [4] que admite que para las simulaciones acústicas se tomen por aceptables diferencias menores de 2 JND. En el caso presentado en la Figura 7, la definición presenta diferencias menores a un JND en todas las frecuencias.

La técnica de trazado de conos (*cone tracing*), en la que se fundamenta el algoritmo de cálculo del *software* de simulación, presenta una limitación en cuanto a precisión, a frecuencias inferiores a  $4f_s$ , siendo  $f_s$ , la frecuencia de Schröder que se define por la ecuación:

$$f_s \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (\text{Hz})$$

donde  $T$ (s) es el tiempo de reverberación medio del recinto y  $V$ (m<sup>3</sup>) el volumen del mismo.

En nuestro caso, la frecuencia de Schroeder del recinto original es  $f_s = 69$  Hz, con lo que los resultados de las simulaciones serán más fiables para frecuencias superiores a 276 Hz, es decir, para bandas de octava superiores a 500 Hz. Cuando el recinto se encuentra con los bancos de madera totalmente ocupados la frecuencia pasa a ser  $f_s = 50$  Hz, lo que permite resultados fiables en la banda de octava de 250 Hz. Esto no implica de los resultados de frecuencias inferiores deben ser rechazados, sino que deben ser tomados con precaución.

Mención especial merece la fuerza sonora de la iglesia, donde se obtienen buenos resultados a partir de los 500 Hz. Es en las bajas frecuencias, las bandas con valores más cuestionables, donde los resultados difieren más allá de 2 JND. Este hecho es debido a que el valor de  $G$  se ha estimado a partir de la respuesta al impulso, pues no fue posible realizar una calibración de toda la cadena de medida. Además, el programa toma por defecto como sonido directo toda aportación energética dentro del intervalo de 5ms a partir de la llegada del sonido directo, lo que implica una baja resolución para estas frecuencias implicadas.

Los peores resultados los encontramos con los parámetros relacionados con el ancho aparente de la fuente, la envolvente y la audición binaural, representados aquí únicamente por  $J_{LF}$ . Las diferencias superan ligeramente 2 JND en la mayoría de bandas de octava analizadas.

El software de simulación empleado calcula también algunos índices, que no aparecen en los anexos de la citada norma. En la Figura 8 presentamos uno de ellos: el índice de transferencia de la palabra (STI) [7] relacionado con la evaluación de la inteligibilidad de la palabra. Se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor, junto con la escala de inteligibilidad subjetiva. Se muestran tanto los valores medidos como los simulados en la configuración desocupada/ocupada. Los resultados de la simulación en la configuración desocupada son muy parecidos a los resultados de la medida experimental, que en su conjunto permitan calificar la inteligibilidad de la sala entre pobre y mala para toda la zona destinada a los fieles. Los resultados son comparables a los obtenidos a partir de la

evaluación de  $D_{50}$ . La presencia de los mismos supondría una mejora en la inteligibilidad y un salto cualitativo de la misma a aceptable.

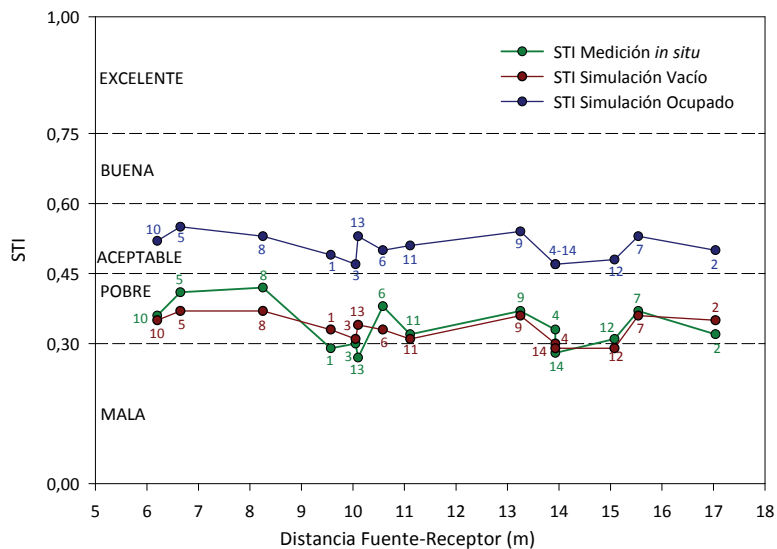


Figura 8. STI frente a la distancia para cada receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad.

Por último, destacar, que el comportamiento frente a la distancia, aquí representado únicamente por sus desviaciones estándar, presenta tendencias y valores por punto de recepción muy similares para los parámetros de sala cuando los estimamos con número único, (valores promedio recomendados). De nuevo los valores más dispares, tiene lugar con la sensación subjetiva de la impresión espacial.

## CONCLUSIONES

Se ha probado un nuevo motor de cálculo que no utiliza corrección estadística de la cola reverberante, lo que supuso un aumento del tiempo de cálculo considerable para el algoritmo escogido. El recinto utilizado es una iglesia de pequeñas dimensiones y muy reverberante. El modelo se calibra a partir de las respuestas al impulso medidas ajustando los coeficientes de absorción y dispersión menos conocidos para que el tiempo de reverberación simulado no difieran más de un JND respecto del simulado. Los resultados obtenidos son satisfactorios tanto en su comportamiento en frecuencia como en su dispersión espacial. Las mayores discrepancias surgen en aquellos parámetros que describen las sensaciones relacionadas con el ancho aparente de la fuente, la envolvente y la audición binaural.

## REFERENCIAS

- [1] Memoria del proyecto recogida en E. Delgado, Santa Ana de Moratalaz, 1965-1971. Miguel Fisac, Colegio de Arquitectos de Almería, (2007).
- [2] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Medición de parámetros acústicos en recintos parte 1 salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR 2010.
- [3] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches", J. Acoust. Soc. Am. 126(3), 1207-1218 (2009)
- [4] M. Vorländer, Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [5] T. J. Cox and P. D'Antonio, Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application. Spon, London, 2004
- [6] F. Martellotta, "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome", J. Acoust. Soc. Am. 126(3), 1175-1186 (2009).
- [7] T. Houtgast, H.J.M. Steeneken, "Evaluation of Speech Transmission Channels by Using Artificial Signals" Acustica 25, 355-367, (1971).