

El sonido en la arquitectura religiosa de M. Fisac tras el Concilio Vaticano II. Propuestas de rehabilitación acústica

TESIS DOCTORAL, julio 2013

ANA MARÍA BUENO LÓPEZ



El sonido en la arquitectura religiosa de M. Fisac tras el Concilio Vaticano II. Propuestas de rehabilitación acústica

TESIS DOCTORAL que presenta Ana María Bueno López, arquitecta,
para optar al título de Doctor
Julio 2013

El sonido en la arquitectura religiosa de M. Fisac tras el Concilio Vaticano II. Propuestas de rehabilitación acústica

TESIS DOCTORAL, julio 2013

Doctorando:

ANA MARÍA BUENO LÓPEZ

Directores:

Dr. ÁNGEL LUIS LEÓN RODRÍGUEZ

Dr. MIGUEL GALINDO DEL POZO



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS I**

Agradecimientos

A mis directores de tesis, doctores Ángel Luis León y Miguel Galindo, profesores de la Universidad de Sevilla, por su apoyo, entusiasmo y paciencia, y por transmitirme tantos conocimientos en acústica arquitectónica. Siempre agradeceré su esfuerzo y dedicación con este trabajo de investigación, implicándose desde los levantamientos planimétricos y las mediciones acústicas *in situ*, hasta la revisión de la última página de este documento.

Al catedrático de la Universidad de Sevilla, Dr. Juan José Sendra, por su apoyo incondicional a esta tesis doctoral y conseguir tiempo, cuando no tenía, para aportar su valiosa opinión.

Al catedrático de la Universidad de Sevilla, Dr. Jaime Navarro, por iniciarme en la investigación de la arquitectura religiosa postconciliar y por contar conmigo para el grupo de investigación de acústica aplicada adscrito a la Universidad de Sevilla.

Al profesor Dr. Teófilo Zamarreño, por su amabilidad y disposición para ayudar en todo momento. Mi especial agradecimiento por apostar, desde el principio, por este trabajo de investigación y por su inestimable esfuerzo para aportar su opinión, una vez finalizado.

Al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla, por facilitar los recursos materiales, técnicos y humanos para la realización de las mediciones acústicas; a los párrocos, a las religiosas del colegio Asunción Cuestablanca y demás personal de las iglesias y del colegio, por su amabilidad y facilidades para llevar a cabo las mismas y por darnos su incondicional Sí, antes de explicarles el trabajo a realizar en las iglesias. Mi agradecimiento a todos, porque sin las mediciones acústicas *in situ*, esta investigación no hubiera podido realizarse.

A los arquitectos, Bernardino Morillo, por su optimismo y su disponibilidad para ayudar en cualquier circunstancia y lugar; a Pedro Bustamante, por su generosidad y su tiempo; al Dr. Rafael Suárez, por su asesoramiento y ayuda bibliográfica; a Enedina Alberdi y Francisco López, por la información facilitada.

A la profesora Dra. Sara Girón, por su apoyo y cariño.

A Jesús Calabria de la empresa Geniux Audio, S.L., por su valioso asesoramiento en los sistemas electroacústicos.

A la Fundación Fisac por su ayuda en la recopilación de datos.

A mi familia, en especial a mis hijos y a mi padre, por sus muestras de cariño, comprensión y aliento en todo momento, y por la ayuda prestada cuando ha estado en sus manos; muchas gracias por todo.

A mi marido, Ángel, por confiar en mí y darme el impulso que necesitaba para cambiar mi rumbo profesional y hacer esta tesis doctoral, apreciando las ventajas y asumiendo los inconvenientes de esa decisión. Muchas gracias por tu optimismo, paciencia y generosidad durante estos años de investigación.

A mi madre y a mi hija Valme, por compartir conmigo parte de este trabajo en la tierra y por pedir, en el Cielo, la fuerza necesaria para terminarlo.

A mi madre
y a mis hijos
Ana, Ángel y Valme

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	4
1. ARQUITECTURA, LITURGIA Y ACÚSTICA EN LA IGLESIA CRISTIANA	7
1.1. EL TEMPLO Y LA IGLESIA	7
1.2. LAS IGLESIAS PALEOCRISTIANAS (SIGLOS I a VI)	9
1.2.1. LAS IGLESIAS CONSTANTINIANAS DE TIPO BASILICAL O ROMANO	11
1.2.2. LAS IGLESIAS CONSTANTINIANAS DE PLANTA CENTRAL O TIPO BIZANTINO	14
1.3. LA EDAD MEDIA (SIGLOS V a XV)	15
1.4. EL RENACIMIENTO (SIGLOS XV y XVI)	21
1.5. EL CONCILIO DE TRENTO (1545-1563)	27
1.6. EL BARROCO (SIGLOS XVII y XVIII)	29
1.7. EL NEOCLASICISMO Y EL ECLECTICISMO (SIGLOS XVIII y XIX)	33
1.8. EL MOVIMIENTO LITÚRGICO (1833-1963)	35
1.9. LAS IGLESIAS DEL SIGLO XX	38
1.10. EL CONCILIO VATICANO II (1962-1965)	54
1.10.1. LA REFORMA LITÚRGICA DEL CONCILIO VATICANO II	56
1.10.2. EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO DE IGLESIA TRAS EL CONCILIO VATICANO II	60
2. LA ARQUITECTURA RELIGIOSA DE MIGUEL FISAC	65
2.1. MIGUEL FISAC SERNA	65
2.2. CONSIDERACIONES GENERALES DE SU ARQUITECTURA	66
2.3. TRAYECTORIA PROFESIONAL	69
2.4. LA ARQUITECTURA RELIGIOSA	86
2.4.1. LAS IGLESIAS PRECONCILIARES	87
2.4.2. LAS IGLESIAS POSTCONCILIARES	108
2.5. OBRA RELIGIOSA DE MIGUEL FISAC. LISTADO	125
3. ACÚSTICA EN RECINTOS DE CULTO. INVESTIGACIONES ANTERIORES	127
4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN. ELECCIÓN DE LA MUESTRA	149
4.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	149
4.2. ELECCIÓN DE LA MUESTRA	150
5. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	151
5.1. TOMA DE DATOS GENERALES	151
5.2. MEDICIONES ACÚSTICAS <i>IN SITU</i> Y VALORACIÓN ACÚSTICA DE LAS MISMAS	152
5.2.1. MEDICIONES ACÚSTICAS <i>IN SITU</i>	152
5.2.1.1. Equipos e instrumentación de medida	153
5.2.1.2. Condiciones de medición: UNE-EN ISO 3382-1:2010	158
5.2.2. VALORACIÓN DE LAS MEDICIONES ACÚSTICAS	159
5.3. ELABORACIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DEL CAMPO SONORO	161
5.3.1. SOFTWARE DE SIMULACIÓN INFORMÁTICO	163

5.3.1.1. CATT-Acoustic v.8.0k	163
5.3.1.2. <i>CATT TUCT (The Universal Cone-Tracer)</i>	167
5.4. AJUSTE DE LOS MODELOS INFORMÁTICOS	171
5.5. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO DE LOS RECINTOS EN LAS HIPÓTESIS DE IGLESIA VACÍA Y OCUPADA	172
5.6. PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA DE CADA IGLESIA	174
5.7. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO DE LAS PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN	174
5.8. ANÁLISIS Y VALORACIÓN INDIVIDUAL DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS DE LAS PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN PARA CADA IGLESIA	175
5.9. ANÁLISIS Y VALORACIÓN GLOBAL DE COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DEL CONJUNTO DE IGLESIAS EN SU ESTADO ACTUAL Y TRAS LAS PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN	176
6. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA	177
6.1. IGLESIA PARROQUIAL DE SANTA ANA DE MORATALAZ, MADRID	179
6.1.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN	180
6.1.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL	184
6.1.2.1. MEDICIÓN <i>IN SITU</i> . ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	184
6.1.2.2. AJUSTE DEL MODELO INFORMÁTICO	193
6.1.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN <i>IN SITU</i> Y LA SIMULACIÓN	195
6.1.2.4. VALORACIÓN GLOBAL	203
6.1.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA	204
6.1.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA	204
6.1.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LA PROPUESTA	205
6.1.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO	206
6.1.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	208
6.1.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)	217
6.1.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO	219
6.1.3.7. CONCLUSIONES	221
6.2. IGLESIA DEL COLEGIO DE LA ASUNCIÓN CUESTABLANCA, MADRID	223
6.2.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN	224
6.2.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL	228
6.2.2.1. MEDICIÓN <i>IN SITU</i> . ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	228
6.2.2.2. AJUSTE DEL MODELO INFORMÁTICO	237
6.2.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN <i>IN SITU</i> Y LA SIMULACIÓN	240
6.2.2.4. VALORACIÓN GLOBAL	247
6.2.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA	248
6.2.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA	248
6.2.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LA PROPUESTA	249
6.2.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO	252
6.2.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	255

6.2.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)	267
6.2.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO	270
6.2.3.7. CONCLUSIONES	271
6.3. IGLESIA PARROQUIAL SANTA MARÍA MAGDALENA, SANTAMARCA, MADRID	273
6.3.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN	274
6.3.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL	277
6.3.2.1. MEDICIÓN <i>IN SITU</i> . ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	277
6.3.2.2. AJUSTE DEL MODELO INFORMÁTICO	287
6.3.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN <i>IN SITU</i> Y LA SIMULACIÓN	290
6.3.2.4. VALORACIÓN GLOBAL	298
6.3.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA	300
6.3.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA	300
6.3.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LA PROPUESTA	301
6.3.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO	302
6.3.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	304
6.3.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)	313
6.3.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO	316
6.3.3.7. CONCLUSIONES	317
6.4. IGLESIA PARROQUIAL DE SANTA CRUZ DE OLEIROS, LA CORUÑA	319
6.4.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN	320
6.4.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL	324
6.4.2.1. MEDICIÓN <i>IN SITU</i> . ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	324
6.4.2.2. AJUSTE DEL MODELO INFORMÁTICO	333
6.4.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN <i>IN SITU</i> Y LA SIMULACIÓN	335
6.4.2.4. VALORACIÓN GLOBAL	347
6.4.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA	347
6.4.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA	347
6.4.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LA PROPUESTA	349
6.4.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO	351
6.4.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	354
6.4.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)	367
6.4.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO	370
6.4.3.7. CONCLUSIONES	372
6.5. IGLESIA PARROQUIAL DE NUESTRA SEÑORA FLOR DEL CARMELO, MADRID	373
6.5.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN	374
6.5.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL	378
6.5.2.1. MEDICIÓN <i>IN SITU</i> . ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	378
6.5.2.2. AJUSTE DEL MODELO INFORMÁTICO	387
6.5.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN <i>IN SITU</i> Y LA SIMULACIÓN	389
6.5.2.4. VALORACIÓN GLOBAL	395
6.5.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA	396
6.5.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA	396

6.5.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LA PROPUESTA	397
6.5.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO	398
6.5.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	400
6.5.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)	409
6.5.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO	412
6.5.3.7. CONCLUSIONES	413
6.6. IGLESIA PARROQUIAL DE SANTIAGO, PUMAREJO DE TERA (ZAMORA)	415
6.6.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN	416
6.6.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL	419
6.6.2.1. MEDICIÓN <i>IN SITU</i> . ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	419
6.6.2.2. AJUSTE DEL MODELO INFORMÁTICO	428
6.6.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN <i>IN SITU</i> Y LA SIMULACIÓN	430
6.6.2.4. VALORACIÓN GLOBAL	438
6.6.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA	439
6.6.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA	439
6.6.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LA PROPUESTA	440
6.6.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO	441
6.6.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS	443
6.6.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)	450
6.6.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO	453
6.6.3.7. CONCLUSIONES	453
7. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA GLOBAL DE LA MUESTRA DE IGLESIAS	455
7.1. ASPECTOS SUBJETIVOS DEL OYENTE	457
7.2. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO	480
7.3. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y DE AFORO	486
7.4. CORRELACIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y TIEMPO DE REVERBERACIÓN	488
7.5. EL MODELO ENERGÉTICO μ	491
8. CONCLUSIONES	497
9. RESUMEN	501
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	503
ANEXO 1. CONCEPTOS DE ACÚSTICA DE SALAS	523
ANEXO 2. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO. RESULTADOS A FRECUENCIAS BAJAS, MEDIAS Y ALTAS	555
ANEXO 3. COEFICIENTES DE ABSORCIÓN Y DISPERSIÓN SONORA (DVD)	565
ANEXO 4. RESULTADOS MEDICIÓN <i>IN SITU</i> Y SIMULACIONES INFORMÁTICAS (DVD)	567

INTRODUCCIÓN

El primer documento aprobado por el Concilio Vaticano II, la constitución *Sacrosanctum Concilium*, supuso una reforma en la sagrada liturgia cristiana que, indirectamente, marcaría una nueva perspectiva para la concepción del espacio sacro.

Esta reforma litúrgica fomentó la participación plena y activa de los fieles, estableció el carácter simbólico de las celebraciones y subrayó la importancia de la palabra y la predicación del sacerdote, que, a partir de este momento, oficia mirando a los fieles y les habla en su lengua.

Para el arquitecto Miguel Fisac, que a fecha de celebración del concilio cuenta con una dilatada experiencia profesional y destaca por sus intervenciones en arquitectura religiosa, los aspectos marcados por la reforma litúrgica le hacen replantear y modificar sus razones y argumentos de proyecto, para la creación de nuevos espacios religiosos.

A partir de ese momento, elementos definidores de su arquitectura religiosa preconiliar, como el *muro dinámico* y el *muro estático*, o la convergencia y focalización en el altar, evolucionan para recoger la aplicación de los nuevos conceptos litúrgicos establecidos por el concilio.

Sus iglesias postconciliares plasman esa redefinición de la liturgia con una disposición asamblearia de la planta (para facilitar la participación de los fieles), en torno a un presbiterio (que contiene los elementos simbólicos precisos para las celebraciones) y se introduce la acústica como un elemento configurador de la espacialidad del templo. El hecho de que los fieles deban escuchar y entender el acto litúrgico tiene, para Fisac, unas implicaciones formales y acústicas muy importantes, que le hacen cambiar por completo la concepción del templo.

Así, las soluciones arquitectónicas presentadas en sus iglesias tras este concilio ecuménico, constituyen un claro exponente de eficacia, adecuación y simplicidad proyectual obtenida al aplicar la reforma litúrgica de forma literal, considerando, a su vez, el problema acústico de estos espacios eclesiales como una constante a tratar y resolver.

Con estas premisas, la presente tesis doctoral plantea dos objetivos básicos: el primero, analizar el comportamiento acústico en la arquitectura religiosa realizada por Fisac con posterioridad al Concilio Vaticano II, así como su relación con sus singulares características constructivas, espaciales y materiales de revestimiento. El segundo objetivo es realizar propuestas de rehabilitación acústica, compatibles con el concepto arquitectónico, que contribuyan a mejorar la calidad sonora de dichos recintos eclesiales. De esta manera, continuaremos con la investigación que Fisac inició en el campo de la acústica, empleando los recursos técnicos y materiales disponibles en la actualidad, cincuenta años después de la celebración del citado concilio.

Este trabajo de investigación se enmarca dentro de la línea de investigación experimental sobre acústica de salas que viene desarrollando el grupo de investigación (TEP-130) adscrito al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla.

1

ARQUITECTURA, LITURGIA Y ACÚSTICA EN LA IGLESIA CRISTIANA

La arquitectura de las iglesias cristianas, a lo largo de sus veinte siglos de historia, ha ido respondiendo a las necesidades y actividades que en ellas se desarrollaron, convirtiéndose en el resultado espacial de la manera de entender, el pueblo cristiano, la liturgia en cada momento histórico¹.

A pesar de que las primeras iglesias cristianas fueron concebidas como simples espacios de reunión, donde la liturgia se posicionaba como centro y razón de ser de la celebración, lo cierto es que a lo largo de los siglos, la arquitectura eclesial evolucionó según los distintos tipos arquitectónicos, llegando incluso, en un determinado momento de la historia, a perder prácticamente, toda referencia con la liturgia primitiva.

Al ser la lectura, la predicación y la escucha de la palabra de Dios parte integrante de esa liturgia, las condiciones acústicas de las iglesias deberían haber sido consideradas para que el recinto cumpliera adecuadamente su función, pues la comprensión de la palabra y la inteligibilidad del discurso serían cruciales. Sin embargo, el problema acústico en las iglesias tuvo siempre un papel secundario frente a aspectos arquitectónicos, estéticos o formales. Al introducirse la música sacra en las celebraciones litúrgicas, la contradicción se duplica, pues palabra y música religiosa, requieren diferentes tiempos de reverberación. Hasta la aparición del auditorio a principios del pasado siglo, la iglesia es el lugar que ve nacer y acoge, temporalmente, a la música².

Mediante un recorrido histórico de la iglesia cristiana, desde su origen en tiempos de Jesucristo hasta la segunda mitad del siglo XX, analizaremos su arquitectura, la relación de ésta con la liturgia y realizaremos consideraciones generales sobre su acústica. Aunque el problema acústico en las iglesias fue considerado, ligeramente, tras el Concilio de Trento (1545-1563), por la importancia que dio a la predicación, será a partir de la reforma litúrgica del Concilio Vaticano II (1962-1965), al fomentar la participación plena y activa de los fieles en las celebraciones y plantear la inteligibilidad del discurso como un aspecto prioritario, cuando las condiciones acústicas empiecen a considerarse en los proyectos de los recintos eclesiales.

1.1. EL TEMPLO Y LA IGLESIA

Como comentó el padre Pedro Farnés Scherer³, en 1989, los templos son signo de la presencia de Dios entre los hombres, e Israel tuvo sus templos en los lugares de las diferentes manifestaciones de Dios a los antiguos patriarcas, como el templo de Betel, el de Siló, la Tienda de la Reunión en el desierto en tiempos del éxodo o las sinagogas en la época del exilio en Babilonia. Todos estos templos, o lugares de la morada de Dios, en el Antiguo Testamento culminan en el templo de Jerusalén.

¹ Suárez, R., Sendra, J.J. y Alonso, A. (2013). Acoustics, Liturgy and Architecture in the Early Christian Church. From the *domus ecclesiae* to the basilica. *Acta Acustica*, 2(99), p. 292-301.

² Navarro, J. y Sendra, J.J. (1996). La iglesia como lugar de la música. En A. Casas, S. Huerta, E. Rabasa y R. Aroca (Eds.). *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Madrid, 19-21 de septiembre de 1996* (p. 381-387). Madrid: Instituto Juan de Herrera.

³ Bergamo, M. y del Prete, M. (1997). *Espacios celebrativos: Estudio para una arquitectura de las iglesias a partir del Concilio Vaticano II*. Bilbao: Ega. p. 26.

Aunque el Nuevo Testamento relata cómo Jesús, desde niño, acude al templo de Jerusalén (figura 1.1), signo de la presencia de Dios y lugar de oración, el templo que el propio Jesucristo encontrará años más tarde, se había convertido en lugar de negocios. Así, Jesús dijo: *Destruid el templo, y en tres días lo levantaré... Él hablaba del Templo de su cuerpo*⁴. Los discípulos comprendieron estas palabras tras su Resurrección; se trataba del Cuerpo de Cristo.



Figura 1.1. Maqueta del Segundo Templo de Jerusalén en tiempos de Jesucristo.

La Última Cena de Jesucristo fue la primera Eucaristía cristiana y supuso el nacimiento de la liturgia cristiana. Asimismo, Cristo había dicho: *...donde están dos o tres congregados en mi nombre, allí estoy yo en medio de ellos*⁵, por lo que, más que el edificio, lo importante del culto cristiano era el hecho de reunirse los fieles. Así, los primeros cristianos comienzan a reunirse en asamblea, unidos unos con otros formando la Iglesia, para conmemorar la muerte y resurrección de Cristo. Pero, a su vez, los primeros cristianos eran judíos que reconocieron a Jesucristo como el Mesías prometido, por lo que el culto que practicaban era el culto litúrgico judío al que añadieron la Eucaristía.

Como indican Cirillo y Martellotta⁶, los judíos adoraban a Dios en el templo y en la sinagoga. El culto más antiguo corresponde al templo, cuyas ceremonias descritas en los libros de la Biblia, reflejan datos sobre las dimensiones del templo, la presencia de un altar y del arca (donde se guardaban las Tablas de la Ley), las ofrendas diarias, el sacrificio de animales, etc. Esta práctica cultural estaba acompañada por música litúrgica y por el canto de los salmos. El culto en la sinagoga se desarrolló durante el cautiverio babilónico, donde la carencia de templos indujo a los judíos a reunirse para rezar y recibir las enseñanzas. Orientadas hacia Jerusalén, constaban de arca y una plataforma elevada (llamada *bema*) en el centro de la sala con sillas para las enseñanzas ofrecidas por los ancianos, facilitando la participación de los fieles.

Templo y sinagoga representaron dos enfoques diferentes de culto: en el primero, con una ceremonia establecida, los fieles asistían de forma pasiva, mientras que en el segundo, la asamblea era parte del culto, por lo que las características acústicas del lugar debían proporcionar buena inteligibilidad del discurso y facilitar la participación de los asistentes.

El Nuevo Testamento narra cómo, tras la ascensión de Jesús a los cielos, los apóstoles acudían al templo y a la sinagoga para orar y predicar, comenzando un lento proceso de fusión de ambas tradiciones. No obstante, también se reunían para celebrar la Eucaristía en casas particulares y, cuando la comunidad aumentó de tamaño, buscaron lugares más amplios.

Por ello es interesante destacar que mientras las demás religiones hablaban de templo, los primeros cristianos denominaron a sus lugares de reunión *ecclesias*, ya que Cristo había denominado *ecclesia* (reunión) a la nueva comunidad de creyentes. No debe confundirse la *Iglesia* como congregación de los fieles cristianos fundada por Jesucristo, con la *iglesia* o edificio donde el conjunto de fieles se reúnen.

⁴ Evangelio de San Juan, 2, 19-21.

⁵ Evangelio de San Mateo 18, 20.

⁶ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006). *Worship, acoustics and architecture*. Brentwood, Essex: Multi-Science Publishing CO. LTD. p. 9-10.

1.2. LAS IGLESIAS PALEOCRISTIANAS (siglos I a VI)

Existen varias teorías, surgidas en el pasado, sobre el origen de las iglesias cristianas en época preconstantiniana, como la que sostiene que en Roma, la iglesia cristiana surgió a partir de las primitivas ceremonias celebradas en las catacumbas, o cementerios subterráneos. Otras fuentes mantienen que la primera iglesia fue una casa normal romana de grandes dimensiones. En el primer caso, el historiador Krautheimer⁷ o los estudios de investigación de R. Vielliard⁸, demuestran que la *iglesia de las catacumbas* no tiene base real alguna, ya que se usaron sólo como lugar de enterramiento, y las capillas que se encuentran en su interior cumplían funciones funerarias. En el segundo, los estudios arqueológicos nunca han desvelado elemento alguno que pueda justificar tal uso religioso.

Se disponen de pocos datos sobre las iglesias construidas antes del fin de las persecuciones declarado en el año 313 con el Edicto de Milán, pero se tiene la certeza que los cristianos tendrían sus propios lugares de culto y reunión, de dimensiones reducidas, por ser las comunidades cristianas también pequeñas, como la comunidad de Éfeso, formada por doce hombres, que se describe en los Hechos de los Apóstoles⁹.

Las primeras comunidades judeo-cristianas se congregaban, para la oración individual y familiar, en las casas de algunas familias de la comunidad, o bien, en lugares con un significado especial en la vida de Cristo: la casa de Pedro en Cafarnaum, la casa de Lázaro en Betania, el Cenáculo de Jerusalén, la casa de María y la de José en Nazaret, etc. Estos recintos se transformaron en sinagogas, en los cuales la investigación arqueológica ha encontrado pavimentos de mosaicos, inscripciones murales, ornamentos, lámparas, recipientes para la liturgia, y una articulación en varias cámaras con diferentes funciones referentes a la enseñanza, a la iniciación, al bautismo, al culto, a la reunión y a los servicios para la comunidad¹⁰. En el siglo II, la liturgia distinguía dos partes en las celebraciones religiosas: una primera, con la lectura de las escrituras, el sermón y la oración común, con la participación de los fieles; y, la segunda, constituida por la propia misa¹¹.

La iglesia más antigua que se conoce está en Dura Europos, a orillas del río Éufrates. La casa, construida durante el siglo I, se remodeló durante la primera mitad del siglo III como *Domus ecclesiae* (figura 1.2), con una gran nave y un baptisterio propio¹².

Conforme las comunidades cristianas aumentan de tamaño y prolifera el deseo de sacralizar el recinto de las celebraciones, las *Domus ecclesiae* (Casa de la Iglesia), o lugares de reunión sin significado transcendental, se van transformando en *Domus Dei* (Casa de Dios), es decir, en lugares representativos del culto divino. Las dimensiones de las iglesias de la catedral de Aquilea (año 319) reflejan que debían acoger a comunidades cristianas mayores, apreciándose en ellas, un presbiterio diferenciado, separado por un cancel, de la zona destinada a los fieles. Dos hileras de columnas dividían el espacio para la asamblea, en una nave central y dos naves laterales.

⁷ Krautheimer, R. (2000). *Arquitectura paleocristiana y bizantina* (6 Ed.). Madrid: Ediciones Cátedra.

⁸ Citado por Bergamo, M. y del Prete, M. (1997). Opus cit. p. 89.

⁹ Hechos de los Apóstoles, 19, 7.

¹⁰ Bergamo, M. y del Prete, M. (1997). Opus cit. p. 91.

¹¹ Rigueti, M. (1956). *Historia de la liturgia*. Madrid: Editorial Católica (Corrección y adaptación por Carlos Etchevarne, 2002). URL: http://www.holytrinitymission.org/books/spanish/historia_liturgia_m_righetti_2.htm [Última consulta: 15 mayo 2013].

¹² Zahner, W. (2009). La construcción de iglesias en Alemania durante los siglos XX y XXI. En busca de una casa para Dios y para el hombre. En E. Fernández Cobián (Ed.). *Arquitecturas de lo sagrado: Memoria y proyecto* (p. 38-71). La Coruña: Netbiblo.

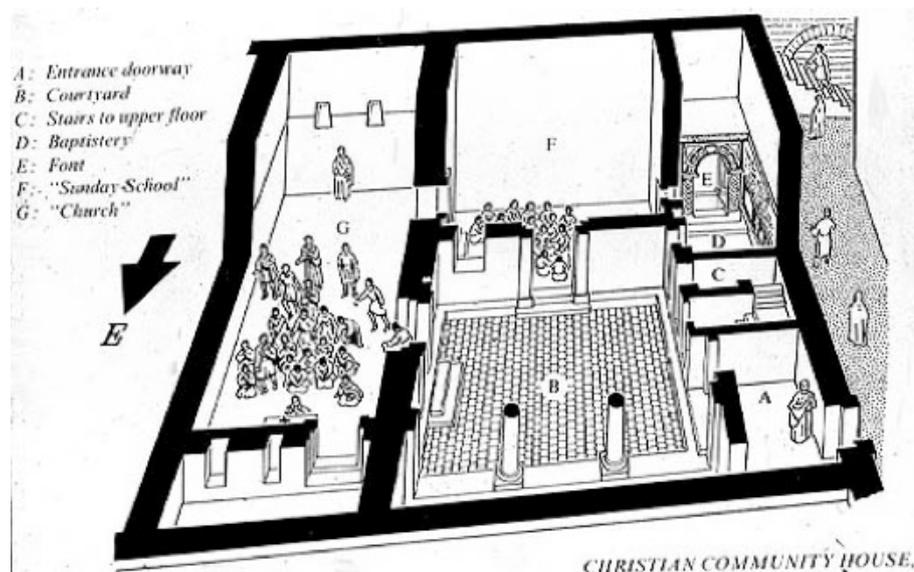


Figura 1.2. Domus ecclesiae. Dura Europos, Siglo III.

Los arquitectos Suárez *et al.*¹³ analizaron las condiciones acústicas de la *Domus ecclesiae* y de la iglesia norte de Aquilea, mediante la simulación informática del campo sonoro de las naves en su estado original.

Con la *Domus* llena de asistentes, obtuvieron un reducido tiempo de reverberación, con valores para $T_{30, \text{mid}}$ y EDT_{mid} ¹⁴ en torno a 1 s, y una buena inteligibilidad de la palabra, con resultados de D_{50} y STI alrededor de 0,6. El volumen del recinto era reducido y, además, la pequeña anchura de la nave potenciaba las reflexiones laterales sobre la asamblea. Estas condiciones acústicas debieron favorecer la participación plena y activa de los congregados, durante las lecturas de los textos, el rezo de oraciones y los cantos de los salmos, los cuales fueron la primera manifestación de la música sacra occidental.

Por el contrario, las condiciones acústicas para la predicación en la iglesia norte de Aquilea, debieron ser menos favorables, en comparación con la *Domus ecclesiae*, con similares revestimientos en paredes y techos que ésta e igualmente ocupada por los fieles. El aumento de volumen del recinto originó tiempos de reverberación más altos ($T_{30, \text{mid}}=1,32$ s), sobre todo la impresión subjetiva de la reverberación ($\text{EDT}_{\text{mid}}=2,13$ s) por la disminución de las reflexiones tempranas. Los resultados de los parámetros acústicos relativos a la inteligibilidad de la palabra denotan una disminución de la misma ($D_{50}=0,39$, en la nave central, y $\text{STI}=0,5$). Para mejorar la inteligibilidad del discurso en las *Domus Dei*, los textos sagrados se recitaban más despacio para adaptarlos al tiempo de reverberación de los recintos.

Sin embargo, la tipología más antigua de iglesia cristiana parece ser la de las antiguas iglesias sirias, encontrándose en ellas restos de un cristianismo primitivo, que se presenta como una versión cristianizada de la sinagoga judía. La iglesia se orientaba al este, lugar por donde sale el sol y símbolo de la parusía de Jesucristo. Constaba de altar para la Eucaristía y de plataforma elevada (*bema*), situada en el centro de la iglesia, desde donde el obispo proclamaba la Palabra de Dios (tomada del Arca). Por la importancia de escuchar al orador, la inteligibilidad del discurso sería un aspecto importante en estos lugares de culto, a lo que contribuirían los techos de madera. Un ejemplo representativo es la basílica de Qalbloze (figura 1.3).

¹³ Suárez, R., Sendra, J.J. y Alonso, A. (2013). Opus cit.

¹⁴ La terminología y los conceptos de los parámetros de acústica se explican en el anexo 1. *Conceptos de acústica de salas*.

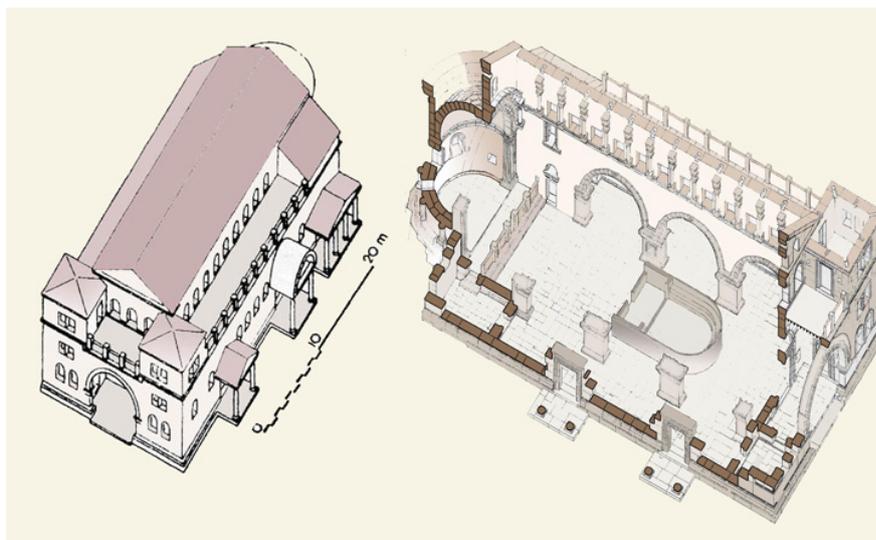


Figura 1.3. Basílica en Qalbloze. Siria, año 460.

1.2.1. LAS IGLESIAS CONSTANTINIANAS DE TIPO BASILICAL O ROMANO

En el año 313, tras la promulgación del Edicto de Milán que otorgaba libertad de culto a los cristianos, aparecieron oficialmente las iglesias como edificios públicos. Es en este mismo año cuando el emperador Constantino, se declara protector de la religión cristiana y comienza a promover su difusión en Roma y en los territorios sometidos al dominio de ésta.

En este momento, la Iglesia cristiana centra sus esfuerzos en la expansión de la fe y en la conversión de almas. Aparecen así numerosos edificios para culto que los historiadores han denominado como *basílica cristiana* o *basílica constantiniana*, y que surge a partir del modo de organizar la celebración litúrgica según los objetivos apostólicos de la época, configurándose con una planta longitudinal derivada de la basílica civil romana. Son iglesias de dimensiones importantes para dar cabida a una comunidad creciente de fieles.

En esta primera época del cristianismo en occidente, la planta central, derivada del templo romano circular, era considerada como una forma de orígenes paganos, por lo que sólo los *martyria* (donde se guardaba el cuerpo o las reliquias de un santo) y los baptisterios (lugar para la celebración del bautismo) adoptaron dicha forma. La planta longitudinal fue adoptada para la iglesia destinada a acoger a la congregación de fieles, con lo que se advierte la importancia de las diversas funciones ejercidas en los edificios religiosos¹⁵.

Cuatro elementos principales configuran la planta de la basílica: el atrio, el nártex, la nave y el presbiterio. *El atrio era un patio columnado en "impluvium" con una fuente en el medio; el nártex era un cuerpo transversal que unía el atrio con la basílica propiamente dicha, la cual estaba compuesta por dos naves laterales bajas y una central más elevada y luminosa, cuya longitud duplicaba a su anchura*¹⁶. En el presbiterio, en ocasiones provisto de ciborio¹⁷, se situaba el altar, los ambores, los asientos para los celebrantes y en un extremo en posición elevada, la cátedra del obispo, desde donde realiza la predicación.

En el interior, hileras de columnas separaban la nave central de las laterales, de forma que durante las celebraciones litúrgicas, los fieles ocupan sólo la nave central, la cual les permite la participación activa y la visión de los focos litúrgicos, utilizándose las naves laterales para la deambulación.

¹⁵ Argan, G.C. (1973). *La tipología arquitectónica*. Buenos Aires: Nueva Visión. p. 31.

¹⁶ Fernández Cobián, E. (2005). *El espacio sagrado en la arquitectura española contemporánea*. Santiago de Compostela: Colegio Oficial de Arquitectos de Galicia. p. 38.

¹⁷ En los primitivos templos cristianos, baldaquín que corona un altar o tabernáculo.

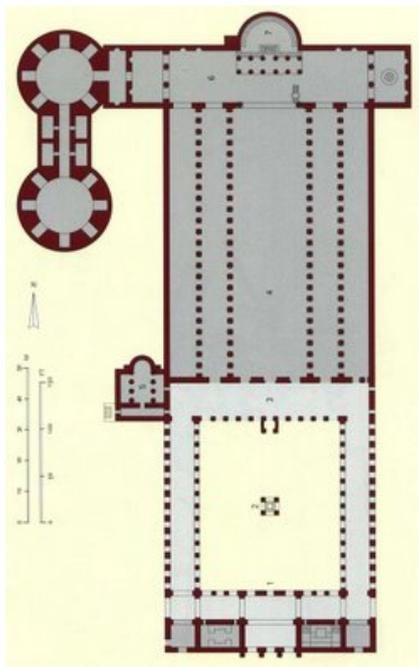


Figura 1.4. Planta de la basílica de San Pedro. Roma, año 329.

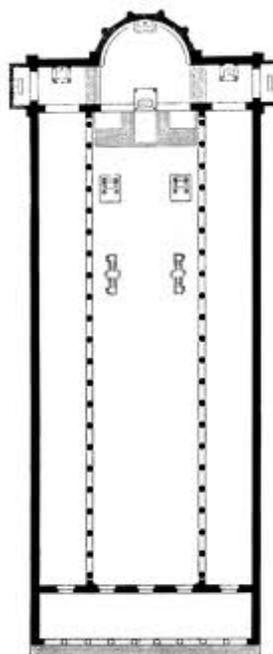


Figura 1.5. Planta de la basílica de Santa María Maggiore. Roma, siglo V.

Siguiendo la tradición de orar con los brazos dirigidos a oriente, las iglesias se orientaban, según su eje longitudinal, en dirección este-oeste, disponiéndose el ábside en la zona oriental con el altar mirando al pueblo. Más tarde, y por razones aún desconocidas, los sacerdotes comenzaron a celebrar la eucaristía mirando también a oriente y con ello, de espaldas al pueblo situado en la nave, hecho que perduró hasta la reforma litúrgica del Concilio Vaticano II.

La estructura de la basílica se resolvía mediante cubierta ligera de madera a dos aguas sobre la nave central, que transmite pequeños empujes a un sistema adintelado. La cubierta de las naves laterales consistía en un cobertizo, mientras que el ábside se cubría con una bóveda. Los muros, en ocasiones sin revestir, se realizaban con mampostería ordinaria intercalando hiladas de ladrillo.



Figura 1.6. Dibujo de la basílica de San Pedro. Roma, año 329.



Figura 1.7. Interior de la basílica de Santa María Maggiore. Roma, siglo V.

Un estudio acústico realizado sobre las cuatro grandes basílicas romanas¹⁸: San Pedro (figura 1.4 y 1.6), Santa María Maggiore (figura 1.5 y 1.7), San Juan de Letrán y San Pablo Extramuros, muestra que las condiciones acústicas en el interior de la iglesia de Santa María Maggiore (uno de las pocas basílicas paleocristianas que quedan en la actualidad) fueron bastante favorables, a lo cual

¹⁸ Shankland, R.S. y Shankland, H.K. (1971). Acoustic of St. Peter's and Patriarchal Basilicas in Rome. *Journal of the Acoustical Society of America*, 50, p. 389-396.

contribuyeron unas dimensiones bien proporcionadas (con nave central no demasiado estrecha ni larga ni alta), el techo de madera y los muros horadados.

Los arquitectos Sendra y Navarro¹⁹ señalan que *a veces, sobre la nave principal de esas primeras iglesias, se disponía un techo plano de madera con casetones,... lo que reforzaba su carácter de difusor del sonido, principalmente para las medias frecuencias (las más importantes para la inteligibilidad de la palabra hablada), pues, además de comportarse como una membrana elástica, las irregularidades de su superficie provocaban que las reflexiones sonoras producidas en él fuesen del tipo difuso (y no especular), para aquellas frecuencias cuya longitudes de onda son similares al tamaño de la irregularidad. La difusión sonora es una cualidad apreciada en la acústica de locales. A todo ello, en las basílicas mayores había que añadir la presencia de importantes volúmenes acoplados al principal, por su influencia en la absorción sonora de este último.*

Sin embargo, para Cirillo y Martellotta²⁰, este tipo de basílica es más adecuada, desde el punto de vista acústico, para cantos y para música que para la palabra. La forma rectangular permite reflexiones laterales significativas combinadas con una gran difusión debido a las columnas, nichos y al techo de madera con casetones. La inteligibilidad de la palabra se reduce por la distancia entre el sacerdote y la parte trasera de la asamblea y por el elevado valor del tiempo de reverberación. Por razones prácticas y simbólicas, el suelo del presbiterio, con el altar principal y asiento para el obispo, estaba elevado para mejorar la visibilidad y, en consecuencia, la inteligibilidad del discurso.

Las condiciones acústicas de la basílica paleocristiana también han sido determinadas mediante simulación informática por los arquitectos Suárez *et al.*²¹. El estudio se centra en dos tipos de basílicas: la primera se trata de una basílica de tres naves dedicada a la liturgia diaria y la segunda corresponde a la iglesia de San Juan de Letrán en Roma (año 324 aprox.), basílica paleocristiana de cinco naves dedicada a la liturgia festiva.

En la basílica de tres naves, con la fuente sonora situada en el ábside y la nave central ocupada por los fieles, obtuvieron valores de $T_{30, \text{mid}}$ y EDT_{mid} en torno a 2,75 s, y valores medios de 0,24 para D_{50} y de 0,45 para STI. Los resultados de estos parámetros acústicos relativos a reverberación e inteligibilidad denotan condiciones menos favorables para la predicación y la comunicación oral en el interior del recinto. Según estos investigadores, el uso de la cantilación, textos cantados solemnemente en frases pequeñas enfatizando la puntuación, fue el recurso empleado para modular la frecuencia del discurso y mejorar la inteligibilidad de las basílicas.

En el modelo basilical de mayor tamaño, con cinco naves²², poca ornamentación y paredes reflectantes, se produce un aumento del tiempo de reverberación ($T_{30, \text{mid}}=3,25$ s y $\text{EDT}_{\text{mid}}=4,5$ s) y una disminución de la inteligibilidad, con la fuente situada en el ábside ($D_{50}=0,2$ y $\text{STI}=0,44$). En estas grandes basílicas, el aumento de la distancia entre fuente y receptor y la falta de reflexiones tempranas sobre la audiencia, no favorecieron la inteligibilidad del discurso, propiciando la introducción de la liturgia musical, que alcanzaría su apogeo en el medievo con el canto gregoriano.

Además de las basílicas romanas de San Pedro, Santa María Maggiore y San Juan de Letrán, son ejemplos de este período, la basílica de Santa Sabina, también en Roma, y la basílica del Santo Sepulcro de Jerusalén (año 325-326). Sin embargo, lo que ha llegado hasta nuestros días de estos edificios es fruto de sucesivas modificaciones, las más antiguas de las cuales son anteriores a la época de san Gregorio Magno en el siglo VI.

¹⁹ Sendra, J. J. y Navarro, J. (1997). *La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias del paleocristiano al tardobarroco*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. p. 15-16.

²⁰ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006). *Opus cit.* p. 11-12.

²¹ Suárez, R., Sendra, J.J. y Alonso, A. (2013). *Opus cit.*

²² En la simulación informática del campo sonoro, sólo las tres naves centrales estaban ocupadas por los fieles.

1.2.2. LAS IGLESIAS CONSTANTINIANAS DE PLANTA CENTRAL O TIPO BIZANTINO

Coetánea a la basílica romana desarrollada en Occidente, en las áreas de influencia bizantina surge otro tipo de iglesia al modificar, en el tipo basilical, aquellas características que no se adaptaban a la liturgia cristiana. Así, en Oriente, la arquitectura eclesial plantea un esquema de planta central, en el que cada elemento responde a su simbología y a su significado ritual.

Los arquitectos bizantinos eliminan los inconvenientes derivados de las hileras de columnas, planteando sobre una planta central un sistema estructural basado en grandes cúpulas, pechinas, arcos sustentantes, semicúpulas absidales y bóvedas. Para su construcción emplean piedras muy ligeras, porosas y elementos de cerámica huecos para los rellenos interiores, decorando el interior con mosaicos, mármoles, pinturas y otros ornamentos. Los empujes de las grandes cúpulas los contrarrestan con otras más pequeñas, llevando las presiones progresivamente a los contrafuertes del muro exterior, lo que les permite en los muros no estructurales abrir grandes huecos con vidrieras para la iluminación interior.

En el centro de la basílica, bajo la enorme cúpula, referencia y símbolo de la divinidad, se disponen los focos litúrgicos: la mesa para el sacrificio, el ambón para las lecturas y los asientos para los celebrantes; mientras que el pueblo se congrega a su alrededor. Este esquema de planta central configura un espacio centrípeto, idóneo para acoger a la congregación reunida en asamblea.

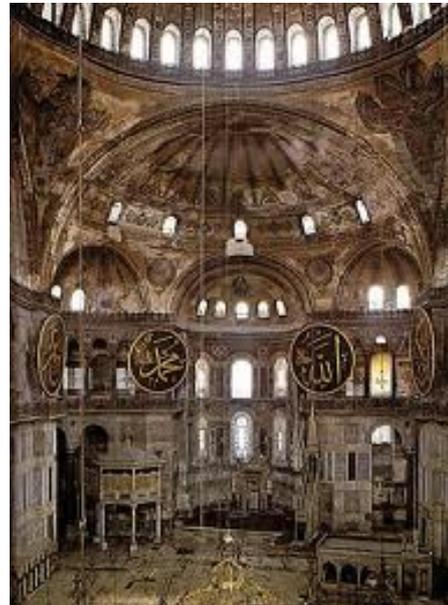


Figura 1.8. Interior de la Iglesia de Santa Sofía. Constantinopla, año 360.

Santa Sofía de Constantinopla (figura 1.8), construida por primera vez en la época constantiniana en el año 360 d.c., y tras varios incendios y terremotos, construida por cuarta vez en época de Justiniano por los arquitectos Artemio de Tralles e Isidoro de Mileto en el año 537 d.c., constituye el ejemplo más importante de este tipo de iglesia cristiana. Sin embargo, sus excesivas dimensiones (sólo el espacio central cubierto por la cúpula y el correspondiente a los ábsides ocupa una superficie de más de 2000 m²) y su capacidad para 2500 personas, no la caracterizan como un prototipo de este período, sino como un ejemplo singular²³.

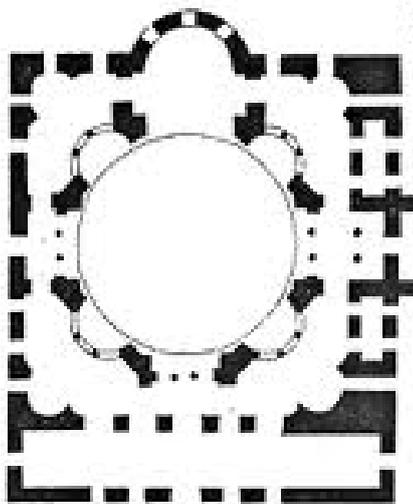


Figura 1.9. Planta e interior de la Iglesia de San Sergio y San Baco. Constantinopla, año 536.

²³ Bergamo, M. y del Prete, M. (1997). Opus cit. p. 112-113.

Otras iglesias de planta centrada de menores dimensiones como San Sergio y San Baco (figura 1.9), Santa Irene (figura 1.10) y la de los Doce Apóstoles, construidas en época constantiniana aunque con posteriores reestructuraciones justinianas, muestran la relación directa entre liturgia y arquitectura.

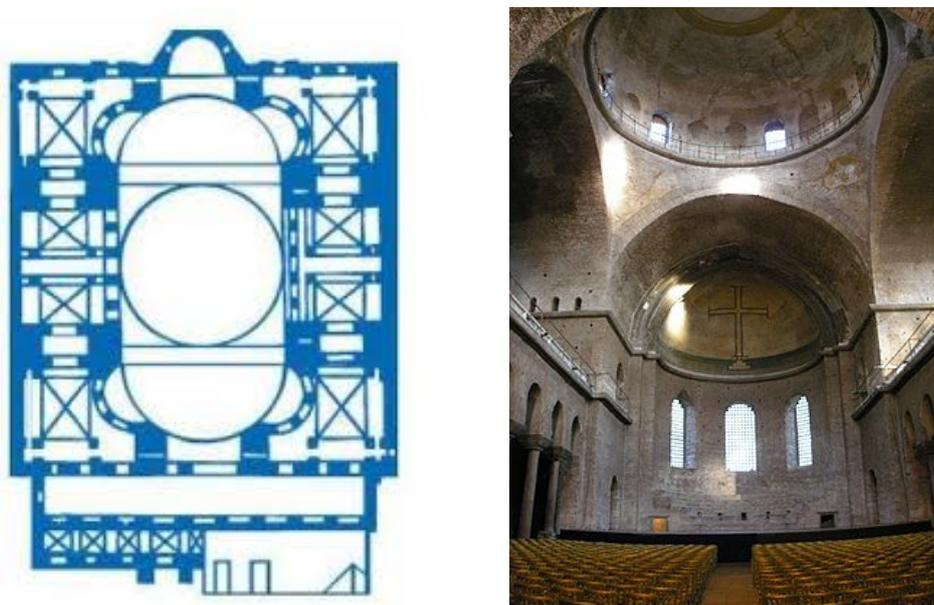


Figura 1.10. Planta e interior de la Iglesia de Santa Irene. Constantinopla, siglo IV.

Sobre la configuración espacial de estas iglesias desarrolladas entre los siglos IV y VI, se debe reflexionar hoy día, ya que como se verá más adelante, el Concilio Vaticano II propondrá un retorno a la estructura litúrgica primitiva, persiguiendo la participación del pueblo, huyendo del exclusivismo clerical y prefiriendo la calidad y el fervor de los fieles, a las grandes dimensiones de la asamblea.

Sin embargo, esta tipología de planta central, mucho más adaptada para la participación de los fieles en la liturgia cristiana, debía presentar un peor comportamiento acústico por dos motivos que seguramente desconocían los arquitectos bizantinos que las proyectaron: el primer problema era las desfavorables concentraciones sonoras que normalmente provocan las formas cóncavas como cúpulas, semicúpulas absidiales, bóvedas, etc., que conformaban estos espacios; el segundo era que se trataba de espacios más reverberantes por el empleo de materias menos absorbentes que los utilizados en las cubiertas basilicales romanas, unido a que se trataba de recintos de mayor volumen.

Concretamente, para la basílica de Santa Sofía, en su configuración como iglesia del siglo VI, Weitze *et al.*²⁴ estimaron un tiempo de reverberación a frecuencias medias de 11 s.

1.3. LA EDAD MEDIA (siglos V a XV)

En la Edad Media se produjo la incorporación a la Iglesia de un gran número de cristianos, llegando a existir, en la época del emperador Carlomagno, una gran variedad de ritos litúrgicos. Por ello, el papa Gregorio VII promovió la primera reforma litúrgica de la historia, con el fin de unificar el culto y los textos litúrgicos. Se conoce como la reforma gregoriana. Para Fernández Cobián²⁵, esta reforma consiguió la unificación de la cristiandad, pero produjo al mismo tiempo un cambio en la mentalidad que, siglos más tarde, desembocaría en la Reforma Protestante²⁶ y en el Concilio de Trento²⁷.

²⁴ Weitze, C.A., Rindel, J.H., Christensen, C.L., Gade, A.C. (2002). *The acoustical history of Hagia Sophia revived through computer simulation*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

²⁵ Fernández Cobián, E. (2005). *Opus cit.* p. 40-41.

²⁶ Se conoce con el nombre de Reforma Protestante, al movimiento religioso de tendencia renovadora que se produjo en Europa en el siglo XVI y que originó, a su vez, el rompimiento de la unidad cristiana y la consiguiente formación de otras Iglesias, independientes de la autoridad papal: las Iglesias Protestantes.

²⁷ El Concilio de Trento fue un concilio ecuménico de la Iglesia Católica Romana, desarrollado en periodos discontinuos

Se fue perdiendo poco a poco el sentido de la *Ecclesia*, estableciéndose una clara división entre el clero que oficiaba las celebraciones litúrgicas y el público que asistía a ellas. Con la aparición del misal romano, los sacerdotes comienzan a recitar los textos en voz baja. Desde el ambón, se leen en latín (idioma desconocido para el pueblo), la epístola y el evangelio, y la propia Iglesia reconoce que al principio de la Edad media, se reduce la predicación en las celebraciones litúrgicas²⁸.

El pueblo, que ya no participa en la liturgia y tampoco comprende las lecturas, se aleja de las escrituras y se convierte en un espectador de lo que sucede en el presbiterio. La exposición de las Sagradas Especies tras la consagración, constituye la razón principal para la asistencia a las celebraciones, favoreciéndose así una devoción individual y privada.

En este contexto, la arquitectura eclesial reflejó este conjunto de circunstancias. El presbiterio, con el altar al fondo del ábside, se hace más grande para acoger a un gran número de clérigos. Un iconostasio²⁹ o una pared, lo separa físicamente de la nave ocupada por los fieles, dejando al pueblo una visión escasísima del interior del mismo, impidiéndole toda posibilidad de participación y perdiéndose la relación que establece una liturgia compartida por fieles y presbíteros. Incluso muchas iglesias cuentan con un coro en la nave central, para uso exclusivo de clérigos o monjes, reflejando la importancia dada a los cantos litúrgicos y a la música religiosa y acusando aún más la separación entre clero y pueblo, con lo que la clericalización del culto es absoluta.

El románico fue el estilo arquitectónico que se desarrolló en Europa entre los siglos XI y XII y parte del siglo XIII. La iglesia románica, con una organización en planta de tipo basilical, plantea como novedad la resolución de las cubiertas con piedra, así como la perfecta conjunción entre construcción y decoración. En relación a la nueva materialización de las cubiertas, en este periodo de la Edad Media caracterizado por luchas civiles y revueltas, fueron frecuentes los incendios de los armazones de madera de muchas iglesias. Es por ello, que los constructores románicos se plantearon modificar la forma de cubrir sus edificios, erigiendo una arquitectura abovedada realizada en piedra, sistema más duradero y resistente al fuego. En general, la arquitectura románica es una arquitectura robusta, firme, casi sin ornamento, con pocos huecos y realizada con materiales incombustibles.

Ejemplos representativos de este período arquitectónico son la iglesia de San Martín de Tours (figura 1.11), en Frómista (Palencia), construida en el año 1100, y la iglesia de San Vicente (figura 1.12), en Cardona (Barcelona), construida en el año 1040, dentro del recinto amurallado del Castillo de Cardona.

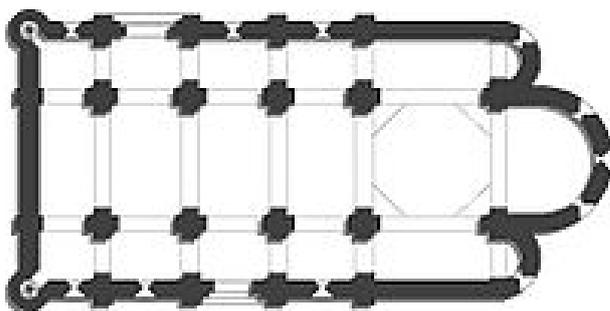


Figura 1.11. Planta y exterior de la iglesia de San Martín de Tours. Frómista (Palencia), 1100.

Este hecho supuso un empeoramiento de las condiciones acústicas en estos templos románicos frente a las anteriores iglesias paleocristianas, donde los techos planos de madera (absorbentes por efecto membrana y difusores), ofrecían un mejor comportamiento desde el punto de vista acústico, que las bóvedas pétreas (reflectantes, de dura superficie y focalizadoras) de la iglesia medieval³⁰.

durante veinticinco sesiones, entre el año 1545 y el 1563, y que tuvo lugar en la ciudad italiana de Trento.

²⁸ Jungmann, J.A. (1951). *El Sacrificio de la Misa. Tratado histórico-litúrgico*. Madrid: Herder. p. 579.

²⁹ Mampara con imágenes sagradas pintadas, que lleva tres puertas, una mayor en el centro y otra más pequeña a cada lado, y aísla el presbiterio y su altar del resto de la iglesia.

³⁰ Sendra, J. J. y Navarro, J. (1997). Opus cit. p. 17- 18.



Figura 1.12. Interior de la iglesia de San Vicente. Cardona (Barcelona), 1040.

En los espacios abovedados con radios de curvaturas comprendidos entre $H/2$ y $2H$ (siendo H la altura máxima del recinto), se produce el fenómeno de la focalización sonora: concentraciones del sonido en determinados puntos en detrimento de otras zonas más sordas, cualidad ésta poco apropiada para lograr unas buenas condiciones acústicas.

Además de las cubiertas, los paños de muros pétreos con bajos coeficientes de absorción, la escasez de ornamentos, la apertura de pocos huecos y el pequeño tamaño de éstos, propiciaban en el interior de las iglesias unos tiempos de reverberación muy altos, y con ello, una inteligibilidad deficiente para la palabra hablada. Sólo cerca del orador la palabra era inteligible, por lo que los sacerdotes se escuchaban entre ellos mismos, pero los fieles difícilmente podían entenderles, cuando además los sacerdotes celebraban de espaldas a ellos y en una lengua

desconocida para el pueblo. Sin embargo, la resonancia resultaba muy positiva para la interpretación de los cantos gregorianos, influyendo la acústica en el desarrollo de la música, ya que la iglesia medieval fue la principal causa de que la música siga una dirección determinada, la polifonía³¹.

Entre los siglos XII y XV de la Edad Media, se desarrolló la arquitectura gótica, aportando como innovación la ligereza de las estructuras y la iluminación abundante de sus interiores, en oposición a la solidez imponente de las construcciones románicas.

La catedral, como sede de la cátedra del obispo, constituye la construcción más representativa y el símbolo de la arquitectura gótica. Además de templo, donde tienen lugar las celebraciones religiosas, la catedral era también un lugar civil, donde tienen lugar representaciones teatrales, conmemoraciones, reuniones de gremios, etc. Otras artes como la escultura, la pintura, la música o la arquitectura, están presentes en la catedral gótica y contribuyen a la evangelización de los fieles.

La organización en planta de la iglesia gótica no difiere demasiado de las iglesias románicas: consta de tres o cinco naves, crucero sobresaliente y más centrado que en las catedrales románicas, presbiterio, coro (que constituye un volumen cerrado), girola (a veces puede ser doble) y capillas laterales.

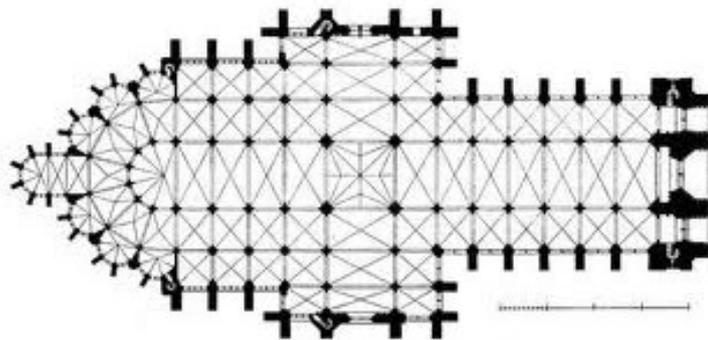


Figura 1.13. Planta de la catedral de Amiens, 1220.

La arquitectura gótica presentó innovaciones técnicas que le permitieron levantar estructuras esbeltas y livianas con materiales pétreos. Mediante el uso de arcos ojivales, bóvedas de crucero,

³¹ Sendra, J. J. y Navarro, J. (1997). Opus cit. p.18.

contrafuertes y arbotantes, consiguieron construir fachadas con muros esbeltos y aumentar en número y tamaño las aberturas en los muros, favoreciendo la penetración de la luz. En consonancia con el espíritu de la época, y el tono religioso de la arquitectura, surgieron los vitrales, como medio de expresión artística que cumple la función decorativa y la función educadora simultáneamente, dotando a los ambientes de una atmósfera acorde al espiritualismo dominante.

La verticalidad, la elevación, la gran altura e increíble esbeltez de la arquitectura gótica, simboliza el deseo de ascensión hacia Dios.

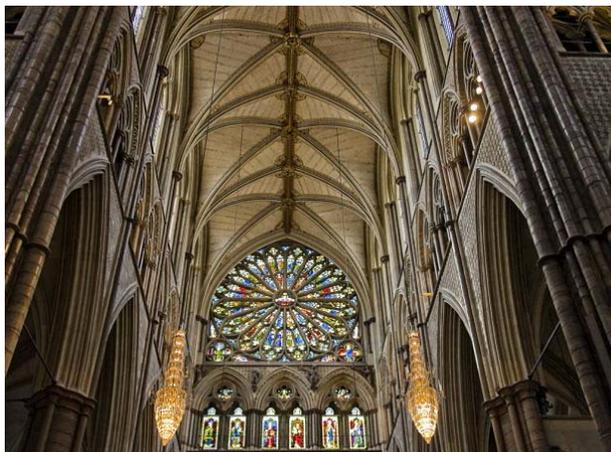


Figura 1.14. Interior de la Abadía de Westminster. Londres, 1245.

Los arquitectos Sendra J.J. y Navarro, J.³², describen ampliamente el comportamiento acústico de las catedrales de estilo gótico, que en líneas generales, se recoge a continuación.

Por un lado, las bóvedas pétreas y la gran altura de la nave principal en relación a su anchura, y por otro, la gran superficie de muros reflectantes, provocaban una altísima reverberación y, al mismo tiempo, la aparición de ecos³³.

Sin embargo, cuando la superficie de vidrieras era importante, aumenta la absorción sonora para los sonidos graves, al comportarse como masas vibrantes, produciendo el efecto favorable de disminución de los tiempos de reverberación a dichas frecuencias bajas³⁴.



Figura 1.15. Sainte-Chapelle. París, 1248.

Asimismo, la disposición de capillas laterales, sobre todo si éstas son profundas, mejoran las condiciones acústicas de las iglesias, ya que actúan como difusores para los sonidos cuya longitud de onda es similar a la dimensión de la irregularidad, esto es, para los sonidos graves. Además, la ornamentación de estas capillas ayuda a aumentar la absorción sonora, resultando tiempos de reverberación más bajos. Sin embargo, la gran longitud de las naves y, con ello, el aumento de la distancia entre fuente sonora y receptores, repercute de forma negativa en la claridad.

A pesar de las observaciones anteriores, en las iglesias góticas, sólo el público que asistía a celebraciones litúrgicas y que permanecía de pie durante las mismas (aún no se disponían asientos para los fieles), constituía la principal absorción sonora. No obstante, para las grandes celebraciones, se disponían tapices y colgaduras cubriendo

³² Sendra, J. J. y Navarro, J. (1997). Opus cit. p. 21-28.

³³ **Eco:** En el caso del oído humano, para que el eco sea percibido es necesario que se supere la persistencia acústica, en caso contrario el cerebro interpreta el sonido emitido y el reflejado como un mismo sonido. Los estudios realizados por Gustave Lyon sostienen que el mínimo retardo necesario entre ambos sonidos es, aproximadamente, de 1/15 segundos para sonidos secos (sonido de palabra) y de 1/10 segundos para sonidos complejos (sonido musical).

Se conoce como **persistencia acústica** al fenómeno por el cual el cerebro humano interpreta como un único sonido dos sonidos diferentes recibidos en un corto espacio de tiempo.

En acústica de salas, la aparición en un punto de escucha de dos frentes de onda (sonido directo y sonido reflejado) con un desfase de tiempo superior al de la persistencia acústica, hará que se perciban dos sonidos consecutivos y, por tanto, eco; en caso contrario, se percibirá un sonido prolongado o reverberación.

³⁴ **Recuero, M. y Gil, C. (1993).** *Acústica arquitectónica* (2 Ed.). Madrid: Izquierdo S.A.

grandes superficies de muros, lo que hacía aumentar la absorción sonora, disminuir los tiempos de reverberación, especialmente a medias y altas frecuencias, mejorando la inteligibilidad y en general, el comportamiento acústico de la iglesia.

Se muestran como ejemplos la catedral de la ciudad francesa de Amiens (figura 1.13) y la abadía de Westminster de Londres (figura 1.14), construidas en el año 1220 y 1245, respectivamente. No obstante, el principal exponente de la arquitectura gótica fue *Sainte-Chapelle* de París (figura 1.15), consagrada en 1248.

Paralelamente a la arquitectura gótica, hacia el siglo XIII, aparecen órdenes mendicantes como los franciscanos o los dominicos (fundadas por San Francisco de Asís en el año 1209 y por Santo Domingo de Guzmán en el año 1215, respectivamente), que preocupadas por la falta de evangelización de la época, establecieron sus propias normas de construcción de las iglesias, dando prioridad vital a la predicación, y con ello, a la calidad acústica de estos espacios.

A pesar de que las características constructivas de estas iglesias dependían de las tradiciones arquitectónicas del lugar donde se implantaban, el tipo de iglesia mendicante se caracterizó por un esquema en planta de tipo basilical, preferentemente de una sola nave y, en ocasiones, con capillas laterales. En la cubierta, un techo plano de madera, no excesivamente alto, se disponía sobre arcos transversales, siendo abovedado, a priori, sólo el presbiterio, aunque a veces se sustituían los techos de madera por estructuras abovedadas.

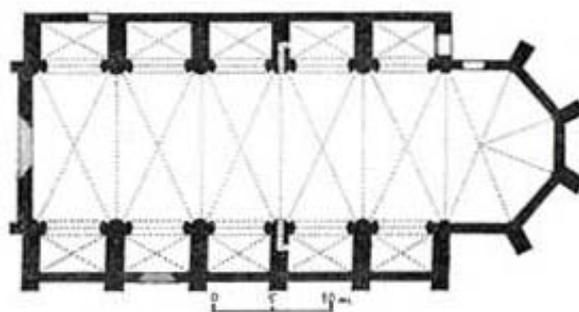


Figura 1.16. Planta de la iglesia de San Francisco. Teruel, 1392.

Este tipo eclesial, marcado por la austeridad y la pobreza, con la nave no demasiado larga y sin apoyos intermedios, permitía la visibilidad del presbiterio desde cualquier punto de la nave, haciendo a los fieles partícipes de las celebraciones litúrgicas.



Figura 1.17. Interior de la iglesia de San Francisco. Betanzos (La Coruña), 1387.

En la cubierta, el uso de la techumbre de madera, absorbente por efecto membrana y difusor del sonido, contribuyó a que las condiciones acústicas para la predicación fuesen mejores, favoreciendo la inteligibilidad de los sermones que estas órdenes religiosas realizaban en la lengua vernácula.

Además, la predicación se separa de la propia liturgia y en palabras de Jungmann³⁵, *esta desvinculación se refleja hasta en el hecho de alejarse el púlpito del presbiterio*, aunque en este acercamiento a los fieles también habría que considerar razones acústicas.

Documentos del siglo XII revelan la existencia del púlpito en algunas iglesias, pero será a partir del siglo XV, cuando se convierta en un elemento común en las iglesias. Desde este balcón elevado situado cerca de los feligreses, éstos recibían mayor cantidad de energía acústica directa. Muchas veces, los púlpitos iban provistos de tornavoz, un techo inclinado que a modo de reflectante aumentaba el número de reflexiones tempranas sobre los fieles, evitando que se dirigiesen a las

³⁵ Jungmann, J.A. (1951). Opus cit. p. 582.

superficies más alejadas como el techo. La mejora de la inteligibilidad de la palabra, con el púlpito sin tornavoz, fue comprobada en dos iglesias por Carvalho³⁶. Al colocar la fuente sonora en el púlpito, los valores de RASTI aumentaban por la reducción de la distancia entre la fuente y los receptores. Por tanto, el púlpito no fue un recurso acústico directo, sino una forma indirecta de mejorar la inteligibilidad de la palabra, al reducir la distancia entre orador y oyentes.

Ejemplos representativos de templos franciscanos, lo constituyen la iglesia de San Francisco de Teruel (figura 1.16), construida en 1392 y la iglesia de San Francisco de Betanzos, en la provincia de La Coruña (figura 1.17), construida en 1387.

Finalmente, uno de los acontecimientos de mayor trascendencia en la historia de la arquitectura española, que tiene lugar entre los siglos XII y XIV, es la aparición de la arquitectura mudéjar, que surge como mezcla de las corrientes artísticas cristianas (románicas y góticas) y musulmanas de la época y que sirve de eslabón entre las culturas cristianas y el islam.

Este fenómeno, exclusivamente hispano, se caracterizó por la sencillez y modestia de sus estructuras arquitectónicas y de sus materiales, pero logra un gran realce mediante el trabajo ornamental del ladrillo, yeso, madera y azulejos. Aunque algunas se construyeron en mampostería, la mayoría de las iglesias mudéjares usaron el ladrillo para sus muros, fácil de conseguir en el territorio peninsular. Las formas y volúmenes arquitectónicos de la mayoría de los templos mudéjares, se asemejan a las del románico pétreo, pero, ahora, la cubierta de las naves se realiza con armaduras y artesonados de madera, abovedando sólo el presbiterio. Las figuras 1.18 y 1.19 muestran iglesias con estas características arquitectónicas.

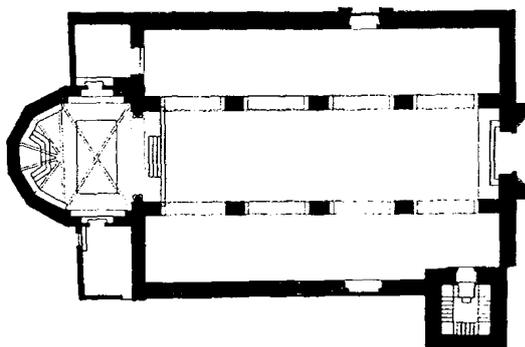


Figura 1.18. Planta de la iglesia de San Marcos. Sevilla. S XIV.

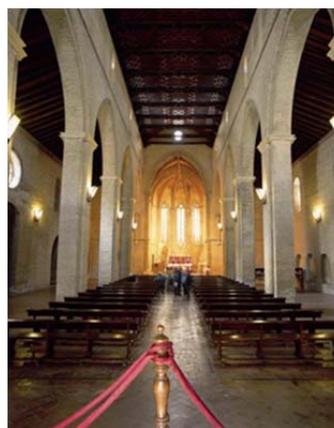


Figura 1.19. Interior de la iglesia de Santa Marina. Sevilla, siglo XIII.

La arquitectura eclesial mudéjar es un arte rural que satisface las necesidades religiosas y litúrgicas de las pequeñas comunidades. El tamaño medio de las naves, tanto en altura como en longitud, y el empleo de cubiertas de madera, propician que sus condiciones acústicas sean bastante mejores que las de las iglesias románicas y góticas.

El comportamiento acústico de este tipo eclesial ha sido ampliamente estudiado en la Universidad de Sevilla³⁷ y por Galindo, M.³⁸ analizando diez y doce iglesias sevillanas de estilo gótico-mudéjar, respectivamente, construidas entre los siglos XIII y XV, todas ellas con planta de tres naves, cubierta de madera y presbiterio abovedado. El resultado de las medidas acústicas realizadas *in situ*, enmarca a estas iglesias como singulares en cuanto a su comportamiento acústico, atribuyéndolo al techo de

³⁶ Carvalho, A. (1999). Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches. *Applied Acoustics*, 58, p. 33-49.

³⁷ Sendra, J.J, Zamarreño, T. y Navarro, J. (1999). *La acústica de las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

³⁸ Galindo, M. (2011). *La acústica de las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla. Un modelo de la energía acústica*. Berlín: Editorial Académica Española.

madera (que aporta una absorción adicional a bajas frecuencias y, en virtud de su estructura geométrica, también difusión en un amplio rango de frecuencias) y a la ornamentación del recinto.

1.4. EL RENACIMIENTO (siglos XV y XVI)

La arquitectura renacentista se inició en Italia, cuna del clasicismo romano, y supuso una ruptura en la historia de la arquitectura, buscando su inspiración en una interpretación propia del arte clásico.

En este período se busca un tipo de templo que compagine la grandiosidad de los edificios clásicos y el carácter aéreo de la arquitectura gótica; pues si la primera imponía por su solidez, la segunda se distinguía por la luminosidad de sus interiores. Si los arquitectos góticos lograron, o buscaron, desmaterializar el cuerpo del edificio y borrar los límites espaciales, el arquitecto renacentista se inspirará en las formas geométricas básicas, que se encontraban en los edificios clásicos. El círculo y el cuadrado, el cubo y la esfera, el cilindro, etc. son las formas más adecuadas, gracias a su perfecta regularidad y racionalidad. La dinámica lineal y ascendente del gótico será desplazada por la lógica claridad del clasicismo.

Para Fernández Cobián, E.³⁹ la arquitectura eclesial del Renacimiento supone el *ocaso de la liturgia*, pues esa fascinación por el templo antiguo supuso la búsqueda de la arquitectura perfecta y de la belleza por sí misma, sin atender a las necesidades derivadas del culto y la liturgia cristiana. Si bien, los arquitectos renacentistas consideraban que la creación de formas bellas y espacios geoméricamente puros suponía un homenaje a Dios, en la práctica proyectaron las iglesias sin considerar su objetivo primordial y su razón de ser, acoger a la comunidad reunida para la celebración litúrgica, con lo que la liturgia dejó de tener valor alguno.

En el Renacimiento se consolidan dos tipos de templo: el modelo de planta basilical, propia de la arquitectura paleocristiana, y el modelo de planta central, inspirado en el Panteón de Roma y en las iglesias bizantinas.

Durante el *Quattrocento* las figuras más destacadas fueron Brunelleschi y Alberti, desarrollando su actividad en la Toscana italiana.

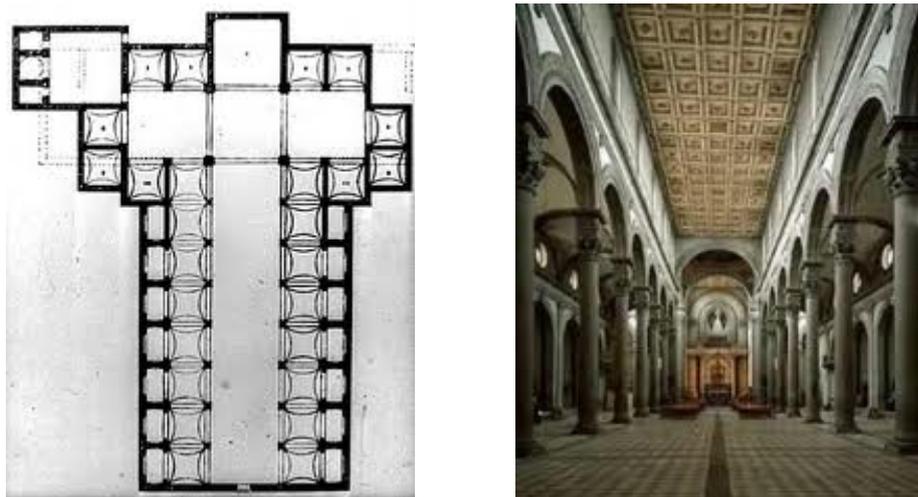


Figura 1.20. Planta e interior de la iglesia de Lorenzo. Florencia, 1419-1421.

En Florencia, Brunelleschi, al proyectar la iglesia de San Lorenzo (1419-1421) y la iglesia del *Santo Spirito* (1434-1446), retoma el tipo de iglesia basilical de los primeros cristianos, disponiendo en planta tres naves, a las que añade capillas laterales (figuras 1.20 y 1.21). En ellas, busca la armonía empleando criterios geoméricos en la composición de los espacios, destacando las proporciones de

³⁹ Fernández Cobián, E. (2005). Opus cit. p. 44-46.

la nave central, cuya altura es el doble de su anchura. En ambas iglesias, la cubierta de la nave principal consiste en un techo plano de madera artesonado con casetones, mientras que las naves laterales disponen de bóvedas de arista y el crucero se corona con una cúpula.

Las armoniosas proporciones y la horizontalidad de estos templos, marcada por la cubierta plana de la nave principal, unido al artesonado de madera y una gran ornamentación, elementos éstos difusores para los sonidos medios y agudos, respectivamente, deberían haber resultado muy favorables desde el punto de vista acústico, suponiendo una mejora sobre su predecesor, el templo gótico, caracterizado por las bóvedas de crucería y las grandes superficies de muros pétreos.

Las medidas acústicas *in situ*, llevadas a cabo por Cirillo y Martellotta⁴⁰ en estas dos iglesias, aportan datos fiables sobre sus verdaderas condiciones acústicas. Para la iglesia de San Lorenzo obtuvieron valores del tiempo de reverberación altos a frecuencias bajas, con calidez BR (*Bass Ratio*) relativamente alta ($BR=1,11$, $T_{mid}=8,4$ s y $T_{low}=9,4$ s), que los autores justifican porque el techo de madera apenas vibra. La absorción del aire es significativa a altas frecuencias comparada con la carencia de absorción a frecuencias medias. En la iglesia del Santo Espíritu, los bajos valores de la calidez BR ($BR=1,05$, $T_{mid}=11,6$ s y $T_{low}=12,1$ s) lo atribuyen a la poca absorción a bajas frecuencias del falso techo con artesonado. El gran volumen interior da lugar a una significativa absorción del aire a altas frecuencias.

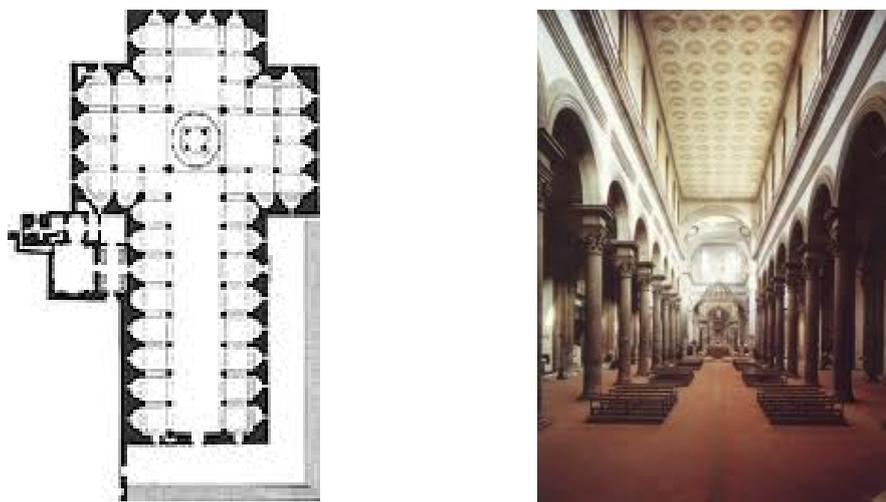


Figura 1.21. Planta e interior de la iglesia del *Santo Spirito*. Florencia, 1434-1446.

Alberti, al proyectar la iglesia de San Andrés en Mantua (1472), rectifica la solución empleada por Brunelleschi según el tipo de basílicas clásicas de techo plano, buscando su modelo en las construcciones abovedadas de las grandes termas romanas, que permite dar más anchura a las naves. En esta iglesia funde los modelos de tipo basilical y planta centrada, ideando una iglesia de cruz latina de una sola nave con capillas laterales y crucero con cúpula, en la que la gradación lumínica está perfectamente lograda al concentrarse la luz en el crucero y el presbiterio. Soluciona la cubierta mediante una gran bóveda de cañón de medio punto con casetones y contrarresta los empujes de la misma con las capillas laterales, que ocupan el lugar reservado antes a las naves laterales. Las columnas de modelos anteriores, Alberti las sustituye por enormes pilastras (figura 1.22).

⁴⁰ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006). Opus cit. p. 123-130.



Figura 1.22. Planta e interior de la iglesia de San Andrés. Mantua, 1472.

Aunque los casetones de la bóveda alivian el fenómeno de la focalización sonora descrito anteriormente, la configuración de iglesias de este tipo, supone un nuevo empeoramiento en la calidad acústica del espacio. Las condiciones acústicas de esta iglesia también fueron determinadas *in situ* por Cirillo y Martellotta⁴¹. El alto valor obtenido para el BR ($BR=1,22$, $T_{mid}=9,5$ s y $T_{low}=11,7$ s) lo atribuyen a la presencia de superficies de revestimiento duras y a la carencia de delgadas superficies de madera.

En general en esta época, la calidad acústica de las iglesias no era prioritaria. Alberti, gran teórico además de arquitecto, en su tratado de arquitectura *De Re Aedificatoria*⁴² (1485), expresa que las iglesias deben estar abovedadas, dada su dignidad y su mayor garantía de perdurar en el tiempo, aunque en otras partes del mismo, se advierte que conocía el comportamiento acústico de las bóvedas frente a los techos planos de madera.

Al igual que otros arquitectos renacentistas, Brunelleschi y Alberti también proyectaron iglesias de planta central. De hecho, tanto el propio Alberti como sus compañeros Serlio y Palladio, en sus tratados de Arquitectura, defienden sus preferencias por la planta circular como la más bella y perfecta, y por tanto, más adecuada para adorar a Dios.

Como apuntamos para las iglesias bizantinas, el tipo eclesial de planta central cubierto con una cúpula, presenta inconvenientes desde el punto de vista acústico, al multiplicarse los efectos focalizadores del sonido en las formas cóncavas; aunque si las superficies interiores no son reflectantes y las distancias entre celebrante y fieles son cortas, se minora este problema.

En esta discusión renacentista entre planta central o longitudinal para las iglesias, Ackerman, J.⁴³ explica que si bien *la planta central era visual y filosóficamente deseable, en realidad se adaptaba mal a una liturgia y unas costumbres que habían evolucionado a lo largo de los siglos en iglesias de naves largas*. Cuando los clérigos se oponían a esquemas de planta central, no lo hacían desde una actitud meramente conservadora de las formas medievales, sino en previsión de los inconvenientes que plantearía *la colocación de los integrantes del coro o la celebración de los servicios litúrgicos en un espacio cilíndrico, con un altar situado bien en el centro, bien en una capilla lateral*.

Wittkober, R.⁴⁴ estudió el problema direccional de los edificios de planta centralizada y su idoneidad litúrgica, pues en ellos la relación forma-función conllevaba numerosos conflictos. Los edificios de planta central del Renacimiento, bien en forma circular, en forma desarrollada a partir de un contorno poligonal o en forma de cruz griega, poseen desde cada punto, una direccionalidad común hacia el centro de dichas estructuras. Al ser el altar el centro espiritual del templo, debía situarse en

⁴¹ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006). Opus cit. p. 131-134.

⁴² Alberti, L.B. (1485). *De Re Aedificatoria*, libro VII.

⁴³ Ackerman, J. S. (1987). *Palladio*. Madrid: Xarait. p. 130.

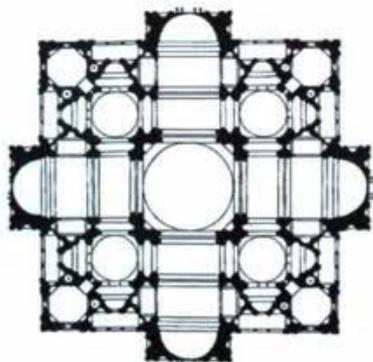
⁴⁴ Wittkower, R. (1979). *Sobre la arquitectura en la edad del humanismo: Ensayos y escritos*. Barcelona: Gustavo Gili. p. 87.

el lugar más destacado, es decir, en el centro de las plantas de organización central. Este hecho era incompatible con la liturgia de la época, pues imposibilitaba la separación entre clérigos y fieles durante las celebraciones, inconveniente que los arquitectos intentaron solucionar no acentuando los altares murales, para dar todo su valor a la planta central.

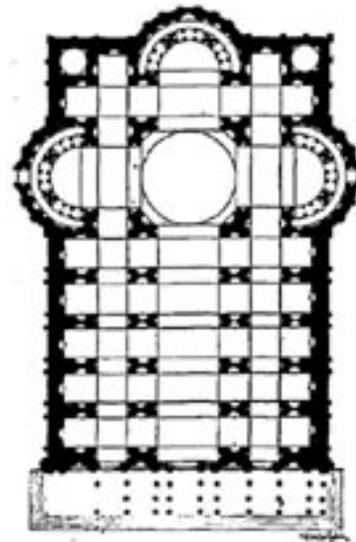
Para Wittkober, R. estas dificultades explican el fracaso de las iglesias de tipo centralizado durante el Renacimiento, quedando la mayoría de los proyectos sobre el papel, y las que se construyeron, fueron calificadas como inadecuadas.

En el *Cinquecento*, cuya producción artística se centró en Roma, se fijan los modelos clásicos del Renacimiento. Predominan las plantas centralizadas y los edificios que conservan la simetría.

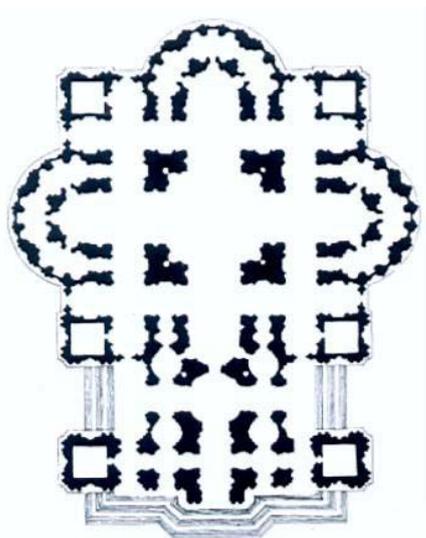
Bramante será el auténtico iniciador de la arquitectura del *Cinquecento* y el primer arquitecto de San Pedro del Vaticano (1506). Aunque no llegara a realizarse, Bramante propuso sustituir la vieja basílica constantiniana del siglo IV, por un grandioso templo de planta central y forma de cruz griega, planteando cubrir los cuatro brazos de la amplísima cruz con bóvedas de cañón y el crucero con un alto tambor sobre pechinas. Proyecta así un templo no ligado a la cruz latina, símbolo de la Pasión de Cristo, sino al esquema centralizado de la cruz griega para albergar, bajo el cóncavo firmamento de la enorme cúpula, la asamblea de los cristianos, la *Ecclesia* universal.



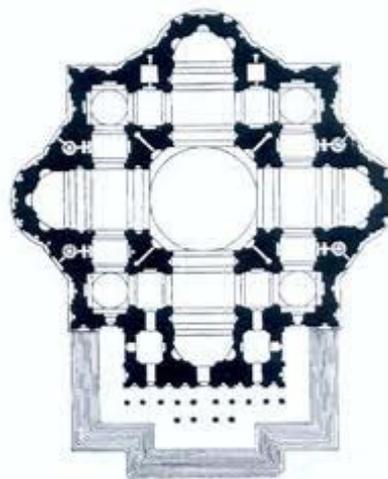
Proyecto de Bramante, 1506.



Proyecto de Rafael, 1514.



Proyecto de Sangallo el Joven, 1539.



Proyecto de Miguel Ángel, 1546.

Figura 1.23. Proyectos de la basílica de San Pablo. Roma.

Al morir Bramante, sus sucesores en las obras de la basílica de San Pedro, primero el arquitecto Rafael (1514) y posteriormente Sangallo el Joven (1539), intentarán acomodar el proyecto al sistema de cruz latina, siendo finalmente Miguel Ángel (1546), quien volvería al esquema central *bramantesco* (figura 1.23)

El estudio acústico⁴⁵, mencionado anteriormente, sobre las cuatro basílicas romanas, entre ellas la basílica de San Pedro (figura 1.24), refleja los buenos resultados del tiempo de reverberación considerando el enorme volumen de dicha basílica. Señalan los autores que la causa principal del buen comportamiento acústico general de esta basílica se debe a la existencia de volúmenes acoplados, los cuales provocan un gran incremento de la absorción sonora. Son cinco los volúmenes principales acoplados: el crucero, cubierto con la cúpula de Miguel Ángel, la nave central, los dos transeptos y el ábside. Son también espacios acoplados las naves y capillas laterales y otros elementos abovedados.

Exponen que en la basílica, el sonido se propaga desde un volumen hacia el volumen adyacente, y desde éste, o no retorna al primero o lo hace muy amortiguado y retrasado tras sucesivas reflexiones en las superficies delimitadoras, muy decoradas y ornamentadas, del segundo. Atribuyen también a estos espacios acoplados los bajos valores del tiempo de reverberación a frecuencias bajas, pues se favorece el fenómeno de la difracción del sonido. A frecuencias medias la curva tonal se mantiene plana, produciéndose, a frecuencias altas una caída apreciable del tiempo de reverberación, debido a la absorción del aire.



Figura 1.24. Perspectiva e Interior de la actual basílica de San Pedro. Roma.

Años más tarde, Martellotta⁴⁶ contradice la hipótesis de Shankland y Shankland, demostrando que los bajos valores de reverberación, se deben a las características de absorción sonora de los paramentos ricamente decorados. Con la ayuda de programas de simulación informática, comprueba que, aunque el tratamiento superficial, con profusa decoración, de la nave principal y de las capillas laterales es similar, las propiedades de absorción sonora de los revestimientos de las mismas deben incrementarse según el grado de exposición a las ondas sonoras. Por el contrario, los efectos de acoplamiento explican la dependencia de la reverberación según la posición fuente-receptor, haciendo que la percepción del sonido difiera bastante de un punto a otro punto de la iglesia, lo que justifica que esta basílica pueda sonar como una gran catedral, durante las celebraciones solemnes, y también, como una pequeña iglesia, durante los servicios diarios celebrados en volúmenes secundarios.

⁴⁵ Shankland, R.S. y Shankland, H.K. (1971). Opus cit.

⁴⁶ **Martellotta, F. (2009).** Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *Journal of Acoustical Society of America*, 126, (3), p. 1175-1186.

En la segunda mitad del siglo XVI, el arquitecto Palladio, construyó, en la ciudad de Venecia, dos importantes iglesias: *San Giorgio Maggiore* (1565) y la iglesia de *Il Redentore* (1577).

Aunque los escritos de Palladio, especialmente sus "*Cuatro libros de la arquitectura*" (1570), revelan su preferencia por las plantas centrales, debido a su belleza y perfección, estas dos iglesias presentan una planta de tipo basilical con algunas matizaciones.



Figura 1.25. Planta e interior de la iglesia de San Giorgio Maggiore. Venecia, 1565.

El mismo Palladio⁴⁷, en 1570, en su cuarto libro de la arquitectura, describe la concepción de la iglesia *San Giorgio Maggiore* (figura 1.25):

También son dignas de alabanza las iglesias cuya planta tiene forma de cruz. Tienen la entrada en el extremo que forma el pie de la cruz. En la parte opuesta se sitúa el altar mayor y el coro. Y en las naves transversales, que se extienden como brazos, hay dos entradas más o dos altares. Dado que este edificio ha sido erigido en forma de cruz, pone a la vista del visitante el madero en el que se funda el secreto de nuestra salvación. En esta forma he construido la iglesia de S. Giorgio Maggiore en Venecia.

Es en la iglesia de *Il Redentore* (fig 1.26), donde Palladio conjuga todas sus ideas en materia de arquitectura religiosa. Preparó dos proyectos uno de planta central y otro longitudinal, pero la influencia del Concilio de Trento y las características litúrgicas cristianas de la época, que se adaptaban mejor en una forma alargada, hizo que la comisión eligiera la planta de tipo longitudinal. Como apunta Wundram⁴⁸, en este proyecto Palladio había creado un espacio longitudinal con una interpretación centralizada, combinando con gran maestría las tres funciones del edificio: *un espacio longitudinal para las procesiones, el coro de las tres conchas para la iglesia votiva y el coro monacal para las funciones litúrgicas de los capuchinos, mantenedores del templo.*

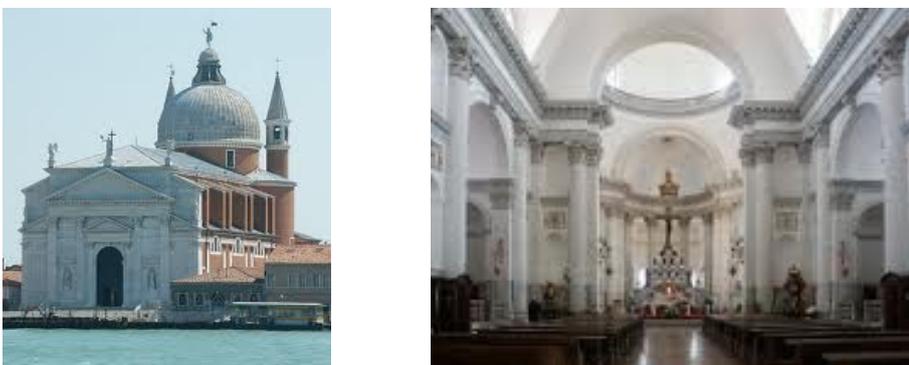


Figura 1.26. Exterior e interior de la iglesia de *Il Redentore*. Venecia, 1577.

⁴⁷ Wundram, M. y Pape, T. (1990). *Andrea Palladio, 1508-1580: Arquitecto entre el Renacimiento y el Barroco*. Colonia: Benedikt Taschen. p. 154.

⁴⁸ Wundram, M. y Pape, T. (1990). *Opus cit.* p. 163.

1.5. EL CONCILIO DE TRENTO (1545-1563)

Convocado con la intención de responder a la reforma protestante impulsada por Martín Lutero y Juan Calvino, supuso una reorientación general de la Iglesia y definió con precisión sus dogmas esenciales. Los decretos del Concilio, confirmados por el papa Pío IV el 26 de enero de 1564, fijaron los modelos de fe y las prácticas de la Iglesia hasta mediados del siglo XX. Celebrado en la ciudad italiana de Trento, fue el decimonoveno concilio ecuménico de la Iglesia católica apostólica romana, desarrollado en tres etapas y un total de veinticinco sesiones, entre 1545 y 1563 (figura 1.27).



Figura 1.27. Sesión del Concilio de Trento.

Además de la resolución de cuestiones doctrinales, teológicas y disciplinarias fundamentales para los católicos romanos, el concilio también impartió, entre sus dirigentes, un sentido de cohesión y dirección que se convirtió en un elemento esencial para la revitalización de la Iglesia durante la Contrarreforma⁴⁹.

Este concilio afrontó problemas dogmáticos, como la precisión de la fe católica contra los errores del protestantismo, estableció que la misa es un sacrificio que renueva el de la cruz, afirmó la presencia real de Cristo en las dos

especies eucarísticas e intentó incrementar la participación de los fieles en la liturgia, acercando el altar al pueblo mediante la supresión del iconostasio y el coro, permitiendo así la visión del presbiterio y el seguimiento de la celebración eucarística. Además, se estableció que los sacerdotes debían catequizar sobre los misterios del culto, se recomendó la eucaristía generalizada, se ordenó conservar la eucaristía para llevarla a los enfermos y exponerla a los fieles para su adoración, etc. Sin embargo, no estableció el uso de la lengua vernácula en las celebraciones de manera habitual, sino sólo de forma ocasional, en contraposición con la reforma protestante.

En diciembre de 1563, hacia el final de sus sesiones, el concilio consideró el problema del templo y las imágenes. El obispo de Milán, Carlos Borromeo (1538/1584), gran divulgador del Concilio de Trento, en su obra *Instruktionen Fabricae et Supellectilis Ecclesiasticae* (1577) recogió las indicaciones del concilio acerca de la construcción del edificio-iglesia. En él, además de establecer indicaciones sobre el lugar donde deben construirse, cómo debe ser la fachada, el altar, la conexión entre sacristía y presbiterio o la entrada de luz en el interior de la nave, defiende la planta en forma de cruz latina, símbolo del cristianismo, frente a la planta central, muy popular entre los arquitectos del Renacimiento, pero más propia de templos para ídolos paganos. Incluso, San Carlos Borromeo, estableció el tipo de iglesia contrarreformista con planta de cruz latina y de una sola nave.

El ejemplo tridentino más representativo que refleja las directrices marcadas de este concilio fue la iglesia de *Il Gesú* en Roma (figura 1.28), comenzada por Giacomo Barozzi da Vignola en 1568. Con una planta de cruz latina más corta y más ancha, y un único espacio formado por la nave y el presbiterio (sin verjas ni iconostasio) austero y bien iluminado, constituyó un espacio adecuado para la predicación, donde los fieles podían seguir y participar en las ceremonias. Los resultados del tiempo de reverberación, obtenidos por Cirillo y Martellotta⁵⁰ en las medidas acústicas *in situ* llevadas a cabo en esta iglesia, muestran valores decrecientes en frecuencias que son característicos de una sala con superficies de revestimientos duros y reflectantes del sonido, aunque los bancos de

⁴⁹ La Contrarreforma o Reforma Católica fue la respuesta a la reforma protestante de Martín Lutero, que había debilitado a la Iglesia. Denota el período de resurgimiento católico desde el pontificado del papa Pío IV en 1560 hasta el fin de la Guerra de los Treinta Años, en 1648. Sus objetivos fueron renovar la Iglesia y evitar el avance de las doctrinas protestantes.

⁵⁰ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006). Opus cit. p. 139-142.

madera para los fieles, con poca separación entre ellos, contribuyen a la absorción de una parte del sonido. Los valores obtenidos por estos autores fueron $T_{mid}=5,2$ s, $T_{low}=5,6$ s y $BR=1,07$.

Otro ejemplo manierista o tridentino es la iglesia jesuita de *San Fedele* de Milán, proyectada por Tibaldi. Curiosamente, en estas iglesias se dispuso una cubierta abovedada, por decisiones externas, siendo conscientes de la deficiente inteligibilidad que provocaría el eco.

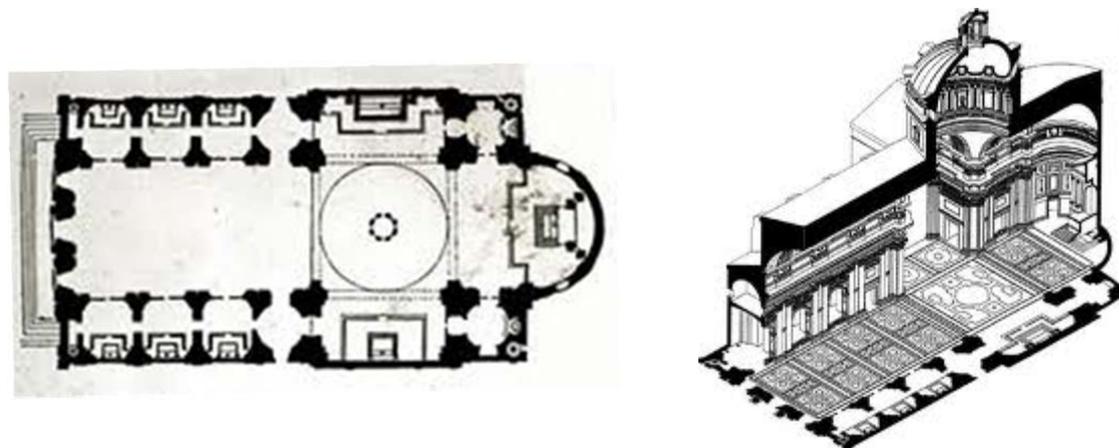


Figura 1.28. Planta y volumetría de la iglesia de *Il Gesú*. Roma, 1568.

Las determinaciones del Concilio de Trento, especialmente la importancia que dio a la predicación para contrarrestar los problemas que la reforma protestante estaba produciendo en la iglesia católica romana, constituirían el cambio sustancial en la consideración del problema acústico en las iglesias. Sendra, J.J. y Navarro, J.⁵¹, justifican este hecho, presentando cuatro documentos (uno de ellos franciscano y los otros tres jesuitas), que reflejan cómo intervienen las condiciones acústicas en la elección de la cubierta de la iglesia, prefiriéndose la cubierta plana de madera por su contribución al buen comportamiento acústico, y la iglesia de una sola nave, que facilita la visibilidad y la audición del predicador. La inteligibilidad de la palabra hablada o cantada era primordial.

Paralelamente, la Reforma Protestante provocó la revitalización de la liturgia y fomentó la importancia de las enseñanzas de la Biblia. Se buscaba Intimidad y claridad frente a reverberación, para permitir la inteligibilidad de la palabra y facilitar la participación durante los cantos. Por ello, la iglesia protestante y la iglesia anglicana limitaron el tamaño de sus iglesias al alcance de la voz del predicador, la forma se modificó para mejorar la visibilidad e introdujeron los bancos en sus iglesias (posteriormente lo haría la iglesia católica). Este hecho, beneficiará las condiciones acústicas del interior, ya que al aumentar la absorción y difusión sonora del espacio, se disminuyen los tiempos de reverberación, mejorando la inteligibilidad de la palabra. Incluso, a las grandes iglesias existentes añadieron galerías, para permitir mayor número de personas sentadas e incrementar la absorción del sonido. Sin embargo, el resultado, desde el punto de vista acústico, fueron salas secas, adecuadas para la predicación pero que desalentaban la participación en los cantos litúrgicos, aunque este aspecto se compensaba por la cercanía de los cantantes respecto a los fieles.

En el año 2002, Desarnaulds y Carvalho⁵², realizaron un estudio sobre las condiciones litúrgicas de las celebraciones católicas y protestantes, y su relación con las características arquitectónicas y acústicas de sus iglesias. El análisis estadístico de 190 iglesias suizas muestra que, las diferencias litúrgicas entre iglesias católicas y protestantes fueron más significativas en el pasado (tras la Reforma Protestante), resultando especificaciones acústicas y arquitectónicas según la confesión religiosa. De hecho, arquitectónicamente, las iglesias católicas eran más largas, más altas y, por tanto, de mayor volumen que las iglesias protestantes. A nivel acústico, las iglesias católicas mostraban,

⁵¹ Sendra, J. J. y Navarro, J. (1997). Opus cit. p. 52-62.

⁵² Desarnaulds, V. y Carvalho, A. (2002). *Liturgical conditions of catholic and reformed celebrations and their relationship with architectural and acoustical characteristics of churches*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

normalmente, mayor tiempo de reverberación y, en consecuencia, peor inteligibilidad para la palabra que las iglesias protestantes. Estas deficiencias de tipo acústico y arquitectónico confirman que, la iglesia católica fue más apropiada para la música, mientras que la iglesia protestante lo fue para el discurso hablado. Sin embargo, la comparación actual de ambas liturgias, realizada sobre ocho iglesias protestantes y ocho iglesias católicas suizas, no muestra diferencias muy significativas entre católicos y protestantes, debido a la importancia que el Concilio Vaticano II de la Iglesia Católica (celebrado entre 1962-1965 y que veremos más adelante), otorgó a la predicación y a la liturgia de la palabra, adaptándose las condiciones acústicas de iglesias católicas como lo habían hecho las iglesias protestantes tras la reforma, varios siglos antes.

Tras el Concilio de Trento, además del esquema longitudinal aplicado sobre todo en iglesias de dimensiones importantes, la planta central se adoptó para capillas y espacios más reducidos. Aparece un nuevo tipo de planta centralizada, con forma oval, que conseguía la unidad visual y parecía que poseía buenas condiciones acústicas. Será en la segunda mitad del siglo XVII y en el siglo XVIII, cuando se desarrollen trabajos sobre el comportamiento acústico de espacios con forma oval, como el *Phonurgia Nova*, publicado en 1673, por el jesuita Athanasius Kircher, o el *Essai sur l'architecture théâtrale*, del francés Pierre Patte, que publicado en 1774, propone la planta oval como la forma ideal para el acondicionamiento acústico de los teatros, precisamente por sus propiedades focalizadoras. El matemático y arquitecto español, Benito Bails, en su obra *Elementos de matemáticas* (Tomo IX, dedicado a la Arquitectura Civil), recogerá aspectos del tratado de Patte, que serán de aplicación para la organización de asambleas parlamentarias en espacios ovales, a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX.

Al contrario de lo que se conoce hoy, se pensaba que las formas cóncavas frente a las convexas, eran más favorables desde el punto de vista acústico, por la capacidad de las primeras de concentrar el sonido, mientras que las segundas lo dispersaban.

Son ejemplos de iglesias de planta oval, la capilla del colegio San Hermenegildo de Sevilla, cuya construcción comenzó en 1616, o la iglesia de planta pseudo-oval del hospital de los *Incurabili* de Venecia, que Sansovino proyectó en 1565.

1.6. EL BARROCO (siglos XVII y XVIII)

En la arquitectura barroca, los conceptos de volumen y simetría vigentes en el renacimiento son reemplazados por el dinamismo y la teatralidad. El resultado de este nuevo modo de diseñar los espacios es una edificación de proporciones ciclópeas en la que, más que la exactitud de la geometría, prima la superposición de planos y volúmenes, un recurso tendente a lograr diferentes efectos ópticos y contrastes cromáticos y lumínicos, tanto en las fachadas como en el diseño de los interiores. Hay que añadir, además, el interés por el movimiento, la integración de las artes plásticas y el papel destacado de la decoración.

En el templo barroco será prioritario el espacio y su percepción visual, dejando en un segundo plano las necesidades y características de la liturgia. Es el lugar del sermón y de la eucaristía, con lo que el espacio se polariza en dos elementos principales: el púlpito (lugar de la predicación y la enseñanza de la iglesia) y el sagrario (lugar de la presencia real de Cristo en las especies eucarísticas). Se introducen grandes retablos, los cuales tienen un programa iconográfico doctrinal muy recargado, y según indicaciones conciliares, bajo el retablo y formando su base, se sitúa el altar con el sagrario.

A pesar de las indicaciones del Concilio de Trento, que defiende la planta de las iglesias en forma de cruz latina, también se desarrollará el modelo de planta central, integrándose ambos esquemas recíprocamente, de forma que según Norberg-Schulz⁵³, los dos tipos característicos post-tridentinos pueden definirse como *iglesias longitudinales centralizadas e iglesias de planta central alargada*. Así,

⁵³ Norberg-Schulz, C. (1989). *Arquitectura Barroca*. Madrid: Aguilar, S.A. p. 22.

en las iglesias longitudinales, la cúpula actúa de elemento centralizador, y las iglesias de planta central se organizan según un eje longitudinal.



Figura 1.29. Planta e interiores de la iglesia Santa María *in Campitelli*. Roma, 1663-1667.

Son ejemplos destacados de planta longitudinal centrada barroca, la iglesia de Santa María *in Campitelli* de Roma (figura 1.29), obra del arquitecto Carlo Rainaldi y construida entre los años 1663 y 1667, así como la iglesia de Santa María de la Divina Providencia de Lisboa, obra de Guarini, que fue destruida por un terremoto en el año 1755.

Normalmente, la planta central se adopta para capillas y espacios reducidos, proliferando las plantas elípticas y ovaladas, convirtiéndose en uno de los rasgos arquitectónicos típicos del barroco. Las iglesias de planta oval de los arquitectos Bernini y Borromini constituyen claros ejemplos de planta central alargada, donde además, las formas redondeadas reemplazan a las anguladas, los muros parecen curvarse de adentro hacia afuera y viceversa, en sucesión cóncava y convexa, dotando al conjunto de un fuerte dinamismo. Ejemplos de iglesia de planta oval en Roma son la iglesia de *San Andrea al Quirinale* (1658-1670), obra de Bernini y la iglesia de *San Carlo alle Quattro Fontane* (1634-1641), proyectada por Borromini (figura 1.30 y 1.31).

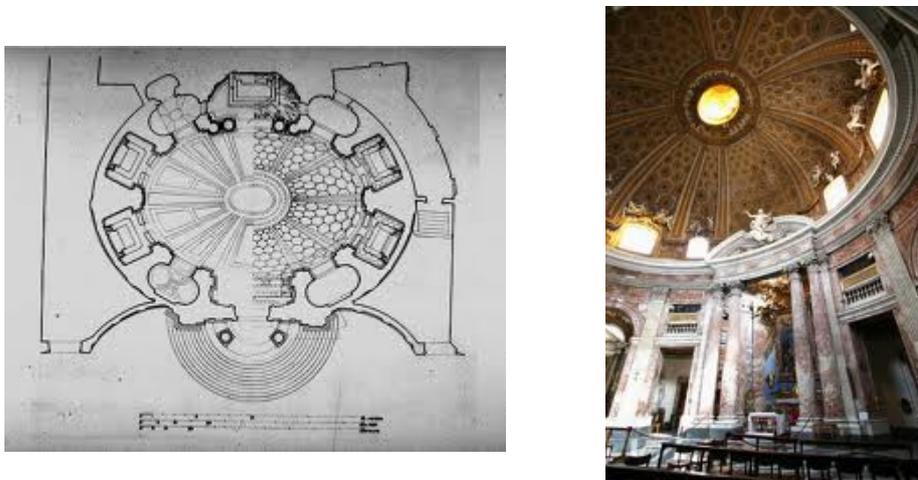


Figura 1.30. Planta e interior de la iglesia *San Andrea al Quirinale*. Roma, 1658-1670.

En *San Andrea al Quirinale*, Bernini consigue un espacio no centrípeto en una planta central con forma oval. Para ello alarga el eje transversal del óvalo y coloca en sus extremos pilastras en lugar de capillas; la cornisa, consistente en un anillo liso, al llegar a la capilla que alberga el altar, se interrumpe para formar el edículo columnado, ensalzando el altar como centro espiritual del templo. Ilumina el espacio central y oscurece las capillas laterales quedando aisladas del cuerpo principal y separa el coro como otra unidad independiente. Para Wittkober, R.⁵⁴, esta definición clara e inequívoca de forma y función, fue de vital importancia, pues preparó el camino para la solución de las plantas centralizadas de acuerdo con las demandas litúrgicas, que los arquitectos renacentistas no habían conseguido.

⁵⁴ Wittkober, R. (1979). Opus cit. p. 92-94.

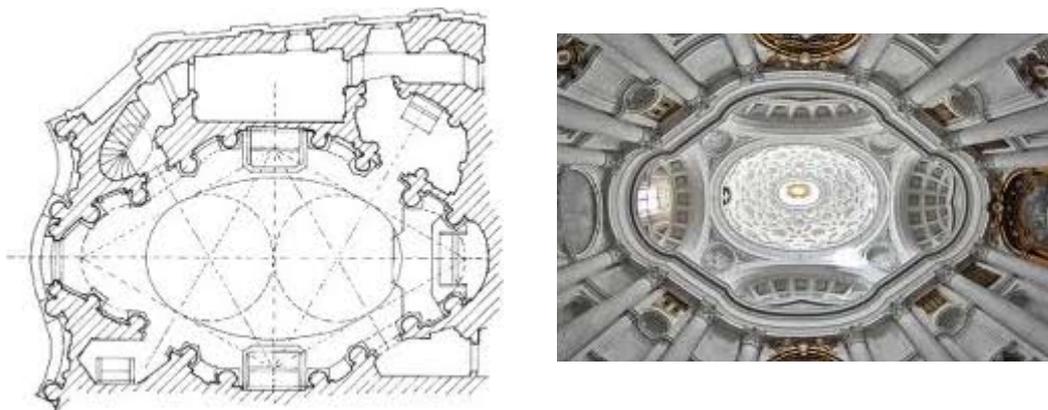


Figura 1.311. Planta e interior de la iglesia *San Carlo alle Quattro Fontane*. Roma, 1634-

Otro ejemplo de planta centralizada generada a partir de la intersección de dos triángulos equiláteros que crean un hexágono, es la iglesia *Sant'Ivo della Sapienza* (figura 1.32), capilla de la universidad de Roma, construida por Borromini entre 1642 y 1660. A este hexágono se le intersectan también una serie de círculos que generaran un conjunto de formas espaciales, alternando espacios cóncavos y convexos.

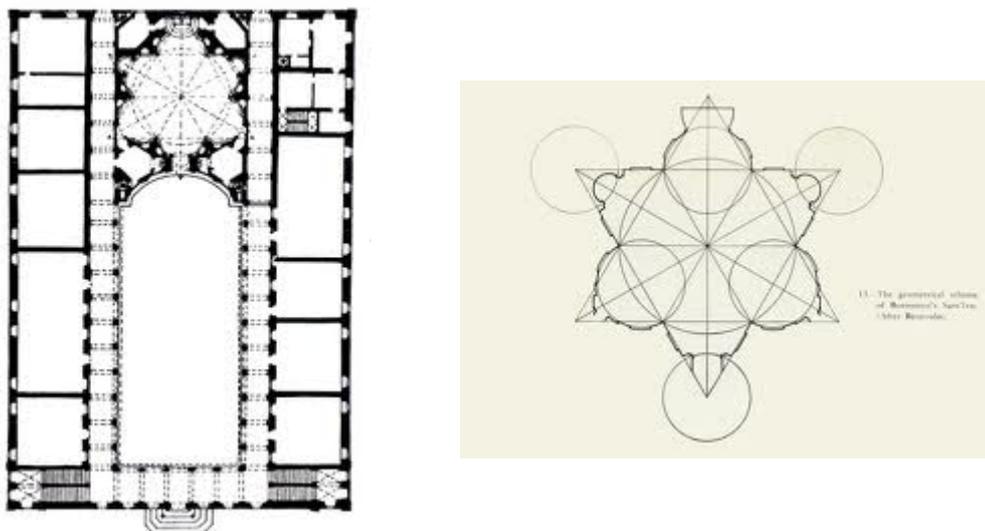


Figura 1.32. Planta de conjunto de la iglesia *Sant'Ivo della Sapienza* en la Universidad de Roma y esquema geométrico de la iglesia. Roma, 1642-1660.

Las propiedades acústicas de las iglesias barrocas son bastante mejores que las predecesoras, las iglesias renacentistas. Para Cirillo y Martellotta⁵⁵ en los adecuados valores de los tiempos de reverberación de las iglesias barrocas influyen las pequeñas dimensiones de las mismas (en comparación con las medievales o renacentistas), la rica decoración, realizada en yeso, de sus paramentos y la estricta separación de los bancos para los fieles. Sendra, J.J. y Navarro, J.⁵⁶ atribuyen este buen comportamiento acústico a la ornamentación, al dinamismo del espacio arquitectónico y a la mayor presencia de capillas laterales. En el interior, las molduras, pilastras, entablamentos, retablos, cornisas, etc., ricamente decorados, actúan como difusores de sonidos agudos a alta frecuencia. Asimismo, con la alternancia de formas cóncavas y convexas, se eliminan los efectos focalizadores de las formas cóncavas y se contribuye a una difusión del sonido a medias y bajas frecuencias. La potenciación de las capillas laterales de los templos, aunque desvirtúan el carácter unitario del espacio litúrgico, aumentan la difusión de los sonidos graves.

⁵⁵ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006). Opus cit. p. 21.

⁵⁶ Sendra, J. J. y Navarro, J. (1997). Opus cit. p. 83.

En cuanto a la inteligibilidad del discurso, Carvalho⁵⁷, al estudiar el RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) en cuarenta y una iglesias de distintos estilos arquitectónicos, construidas entre los siglos VI y XX, comprobó que la inteligibilidad de la palabra fue decreciendo a lo largo de los siglos hasta el renacimiento, donde obtuvo los valores más bajos de RASTI. Las iglesias barrocas estudiadas registraron los resultados más altos de RASTI, reflejando una clara mejora de la inteligibilidad, respecto a los estilos arquitectónicos predecesores, que volvería a empeorar en las iglesias neoclásicas.

La influencia de la arquitectura barroca iniciada en Roma llegó a Centroeuropa con ejemplos como la iglesia de San Carlos Borromeo, en Viena (Austria, 1715-1737), obra del arquitecto J.B. Fischer von Erlach, o la iglesia de peregrinación de Cristo Flagelado, en Wies-bei-Steingaden, (Alemania, 1745-1757), proyectada por Zimmermann. La arquitectura barroca en el centro de Europa, cuna de grandes compositores de la época, será considerada como el escenario perfecto para la audición de la música barroca⁵⁸.

En España, la arquitectura eclesial barroca posterior a la Contrarreforma tomará casi siempre como modelo la planta de la iglesia // *Gesú* de Roma, proyectada por Vignola. Según Chueca Goitia⁵⁹, la arquitectura barroca española es una arquitectura herreriana decorada, en la que plantas y estructuras presentan la rigidez característica herreriana. En Andalucía, la arquitectura barroca estuvo influenciada por el arte mudéjar, dejando huellas en los ornamentos los oficios propios de dicho estilo mudéjar. Será en la segunda mitad del siglo XVIII, cuando la arquitectura española refleje la influencia del barroco italiano.

En relación a las condiciones acústicas de la arquitectura barroca eclesial en España, la excesiva decoración generalizada en el interior de cada iglesia, influyó favorablemente, en cuanto que aumentaba la difusión sonora en el interior de la misma (figura 1.33).



Figura 1.33. Interior de la capilla de San José. Sevilla, 1762-1766.

Como documentan Sendra y Navarro⁶⁰, si a la calidad acústica que presentan en sí mismas las iglesias barrocas, unimos la costumbre de la época de ornamentar las iglesias para las grandes celebraciones religiosas (beatificaciones y canonizaciones, exequias y funerales, oficios en Semana Santa, etc.), con tapices y colgaduras de tejidos aterciopelados y adamascados, además de la masiva asistencia de público, vestidos a su vez con grandes y pesados ropajes, se produce una mejora en las condiciones acústicas de estas iglesias, en especial para la interpretación musical, debido a la absorción sonora de todos estos elementos.

⁵⁷ Carvalho, A. (1999). Opus cit.

⁵⁸ Durante siglos, los compositores concibieron su música para ser interpretada en las iglesias. Citemos como ejemplos destacados la iglesia luterana de estilo gótico-tardío, Thomaskirche de Leipzig, para la que J.S. Bach compuso gran parte de obra coral y dos de sus obras maestras: La Pasión según San Mateo y Misa en si menor, o las composiciones de Mendelssohn para la catedral de San Pablo de Londres.

⁵⁹ Chueca, F. (1985). *Historia de la Arquitectura occidental. Tomo VII: Barroco en España*. Madrid: Dossat. p. 88.

⁶⁰ Sendra, J. J. y Navarro, J. (1997). Opus cit. p. 91-97.

1.7. EL NEOCLASICISMO Y EL ECLECTICISMO (siglos XVIII y XIX)

A mediados del siglo XVIII, los hallazgos arqueológicos de las ciudades de Herculano y Pompeya, entre 1711 y 1748, marcarán el comienzo de un nuevo estilo arquitectónico, el neoclasicismo, que reproducirá las formas generadas por los griegos y romanos, prolongándose hasta principios del siglo XIX.

Tras el barroco, el neoclasicismo representa una simplificación: las líneas rectas dominan sobre las curvas, existen menos contrastes de volúmenes, menos adornos, los dinteles y las columnas dóricas y jónicas remplazan los arcos, y en las fachadas se alzan los frontones triangulares. Se trata de formas más sencillas, la simetría se generaliza, hay mayor racionalidad compositiva, sobriedad decorativa y orden, en consonancia con los valores de la Ilustración⁶¹.

Para Chueca, F.⁶², en el neoclasicismo coexisten una serie de tendencias con gran riqueza de matices que sorprenden por su misma contradicción. Por un lado, existe un neoclasicismo basado en la filosofía y, por otro, un neoclasicismo de arqueólogo que estudia los monumentos de la antigüedad. Pero el neoclasicismo fue una etapa totalmente diferente al Renacimiento por sus situaciones históricas y contextos. Éste conservaba la fe y la creatividad religiosa de la Edad Media, y existía la convicción de que la antigüedad clásica y cristianismo podían fundirse en la perfección de la obra divina. Sin embargo, cuando surge el neoclasicismo, el espíritu medieval ha sido superado por el Humanismo, la Reforma Protestante, el racionalismo, y las dudas y el espíritu crítico de la Ilustración.

Será la arquitectura civil con sus edificios públicos (teatros, bibliotecas, museos, palacios, etc.) la que transformará las ciudades, frente a la arquitectura religiosa más escasa y que pierde su hegemonía como rectora de las demás artes.

El templo no responde a un tipo determinado y propio, sino que repite formas pasadas y las envuelve con un vestido arquitectónico ajeno. La elección de esas formas responde a una actitud romántica y no religiosa, con lo que la arquitectura pierde su carácter sagrado y se olvida de las necesidades litúrgicas de las iglesias.

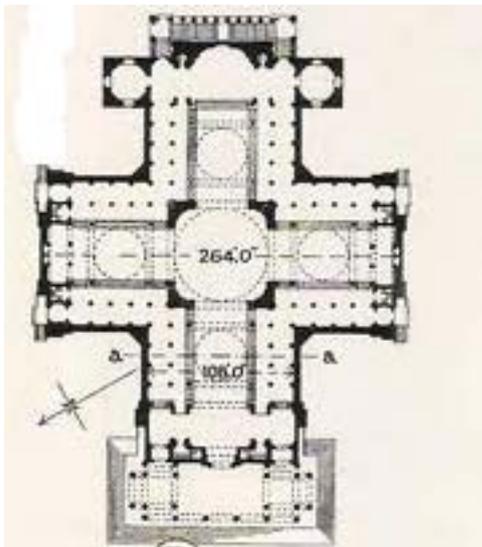


Figura 1.34. Planta de la iglesia de Santa Genoveva. París, 1791.

En la iglesia de Santa Genoveva (Pantheon) en París, su autor, el arquitecto Jacques-Germain Soufflot (aunque tras su muerte, fue terminada por J.B. Rondelet en 1791), planteó, en una planta de cruz griega, una iglesia abovedada sobre una estructura de columnas de un templo griego. Utilizó bóvedas de estilo bizantino pero con ligereza gótica, concentrando las cargas sobre las columnas (figura 1.34).

También en París, en 1807, el arquitecto Pierre Vignon, comenzó la reconstrucción de la iglesia de la Magdalena, emulando, en el exterior, a un templo clásico corintio períptero octástilo, más romano que griego. En contradicción con el exterior, una única nave en el interior, en la que se distinguen tres tramos cuadrados, separados visualmente por grandes columnas corintias, y cubiertos por cúpulas con lucernarios para la iluminación natural, recuerdan a una gran sala termal (figura 1.35).

⁶¹ Movimiento filosófico y cultural del siglo XVIII, que acentúa el predominio de la razón humana y la creencia en el progreso humano.

⁶² Chueca, F. (2005). *Historia de la arquitectura occidental. Neoclasicismo*. Madrid: Dossat. p. 2-3.



Figura 1.35. Exterior e interior de la iglesia de la Magdalena. París, 1807.

También el Panteón de Agripa, en Roma, servirá de inspiración en la iglesia de *San Simeone Picolo* (siglo XVIII) en Venecia o la iglesia de *San Francesco di Paola* (1817-1846) en Nápoles, obras de los arquitectos G.A. Scalfarotto y Pietro Bianchi, respectivamente.

En España, Juan de Villanueva realizó la iglesia del Caballero de Gracia en Madrid (1782-1795), obra de gran belleza y perfección, donde incorpora con inteligencia y sin mimetismos lo mejor de los elementos arquitectónicos clásicos: columnas, bóvedas y cúpula. La planta responde al tipo basilical pero, por la estrechez del solar, las naves laterales han sido sustituidas por hileras de columnas separadas de los muros laterales. Estas columnas corintias sostienen una gran bóveda de cañón con casetones, cuyo interior refleja la admiración del arquitecto por la arquitectura romana (figura 1.36).



Figura 1.36. Interior de la iglesia del Caballero de Gracia. Madrid, 1782-1795.

En el monasterio de Santo Domingo de Silos (Burgos), el arquitecto Ventura Rodríguez recibe el encargo de renovar su iglesia, en estado ruinoso e incómoda para la liturgia. En el mismo lugar ocupado por el templo románico, levanta una construcción neoclásica entre los años 1751 y 1792, cuya planta se organiza a partir de una elipse, y evoluciona hacia una cruz latina, adosando capillas laterales entre los brazos de la cruz. Destaca la cúpula sobre alto tambor y las bóvedas de los brazos de la cruz, elementos éstos construidos en piedra, así como la notable sobriedad, esbeltez y sencillez en la combinación de líneas arquitectónicas y decorativas, de una elegancia y majestad clásicas.

Este retorno a las formas clásicas de monumentalidad, empleando estructuras abovedadas y cúpulas, unido a la simplicidad en el ornamento, supuso un retroceso en las condiciones acústicas de las iglesias respecto a sus predecesoras, las iglesias barrocas.

Con el fin de estudiar el comportamiento acústico de la iglesia del monasterio de Santo Domingo de Silos, en la que se llevan a cabo grabaciones nacionales e internacionales de canto gregoriano interpretados por los propios monjes de la abadía, Recuero, M. y Gil, C.⁶³ realizaron mediciones acústicas *in situ*. Aunque el canto gregoriano está concebido para su interpretación en recintos reverberantes, los mencionados autores destacan los excesivos tiempos de reverberación, especialmente a frecuencias bajas, lo que hace imprescindible la corrección de éstos para el uso de la palabra; indican que los niveles de distribución sonora son aceptables, incluso para frecuencias altas; y, por último, señalan niveles excesivos de ruido de fondo producidos por el tráfico, el motor del órgano y el sistema de calefacción.

⁶³ **Recuero, M. y Gil, C. (1987).** Experimental study of the acoustics in the church of the monastery of Santo Domingo de Silos. *Acústica*, 62, p. 241-248.

El declive de la arquitectura clasicista se inició en la primera mitad del S.XIX, debido a que el Neoclasicismo del S. XVIII limitaba la creatividad del arquitecto a las normas clásicas, pudiéndose decir que a partir de 1848, coincidiendo con la derrota de las tropas napoleónicas, se produce un cambio en la actitud de los arquitectos, que buscan crear un estilo, interpretando las formas del pasado a la manera de cada artista.

Será el eclecticismo historicista el que rompa el rígido esquema académico permitiendo la creatividad y libertad compositiva. El término eclecticismo⁶⁴ define la actitud de compaginar diferentes estilos históricos.



Figura 1.37. Exterior de la iglesia de Santa Clotilde. París, 1846-1857.

A la arqueología del neoclasicismo se une la admiración por la Edad Media, prefiriéndose para las construcciones religiosas el neogótico y el neorrománico. Una peculiaridad de los *revivals* fue la posibilidad de elegir aquella opción que, a gusto del arquitecto, mejor se adaptase a sus fines, pudiendo construir a la vez en diversos estilos sin aparentes problemas de coherencia estilística. No hay que olvidar que en la formación y desarrollo de estos estilos medievales está siempre presente la necesidad de crear algo nuevo, un estilo moderno. Para ello también van a aprovechar los hallazgos tecnológicos de la sociedad industrial y de la arquitectura del hierro. La figura 1.37 muestra la iglesia de Santa Clotilde de París (1846-1857), primera iglesia neogótica construida en esta ciudad, obra del arquitecto de origen alemán Franz Christian Gau.

Figuras, como el francés Chanteaubriand, en su obra *Genio del Cristianismo* (1802), y el inglés Pugin, en *Los verdaderos principios de la arquitectura apuntada o cristiana* (1841), defenderán el estilo gótico como el ideal para las iglesias cristianas, con lo que volverán a florecer los inconvenientes litúrgicos y acústicos analizados en el apartado correspondiente a la Edad Media.

1.8. EL MOVIMIENTO LITÚRGICO (1833-1963)

Se conoce como Movimiento Litúrgico la corriente renovadora que, a mediados del siglo XIX, comenzó a trabajar en la restauración de la vida litúrgica del pueblo cristiano. Su inicio coincide con la instauración de la vida monástica en la abadía benedictina de Solesmes (Francia) en 1833, y su final con la promulgación de la constitución sobre Sagrada Liturgia, *Sacrosanctum Concilium*, por el Concilio Vaticano II, el 4 de diciembre de 1963.

El Movimiento Litúrgico posiciona a la liturgia en el centro de la vida espiritual del cristiano. Buscaba el origen de la liturgia, reconociendo las raíces de la fe y la vida, en la última cena del Señor (figura 1.38). En un principio, la liturgia comenzará a ser vivida por grupos de monjes en sus abadías, minoría con formación teológica, bíblica y de la lengua latina, extendiéndose rápidamente entre personas del entorno, llegando la pastoral litúrgica a ser vivida en parroquias, colegios y otras comunidades. Inicialmente se facilitan los textos litúrgicos, traducidos en diversas lenguas, y aparecen los primeros misales para fieles. Poco a poco, se intenta que los fieles, además de entender la celebración, participen en ella con sus oraciones y cantos, dando lugar a las misas dialogadas, planteando introducir la lengua vernácula en



Figura 1.38. La Última Cena. Pintura mural realizada por Leonardo da Vinci. Iglesia Santa María delle Grazie, (Milán), 1495-1497.

⁶⁴ Del griego *eklego*, escoger.

la liturgia para facilitar su comprensión a los fieles. Se trataba de que el espíritu litúrgico penetrara en las manifestaciones religiosas del pueblo cristiano.

Ahora la comunidad cristiana acude a la iglesia, no para rezar de forma individual y con una actitud contemplativa, sino que siendo *ecclesia*, se constituye como asamblea en torno al altar, verdadero símbolo de reunión de fieles; las oraciones del pueblo son las oraciones litúrgicas y el espacio que acoge este conjunto debe facilitar la participación recíproca, así como la visión del misterio pascual de Cristo.

El origen del Movimiento Litúrgico lo encontramos, a principios del siglo XIX, en Francia, donde la liturgia romana había sido sustituida por numerosas y distintas liturgias particulares. Será Dom⁶⁵ Guéranguer (1805-1875), fundador y primer abad de Solesmes (figura 1.39), entusiasta de la liturgia romana, incluso antes de ser benedictino, quien convierte la abadía en un centro de estudios litúrgicos, extendiéndose esta afición por el estudio de la liturgia romana a las abadías que dependen de Solesmes, como Beuron y María-Laach en Alemania, Maredsous en Bélgica, Silos en España (figura 1.40) y otros monasterios fundados por Dom Guéranguer en Francia.



Figura 1.39. Abadía benedictina de Solesmes (Francia).

Puede decirse que el Movimiento Litúrgico, con un cierto aire de romanticismo, surge en estas abadías benedictinas, a veces en conexión con los miembros del Movimiento de Juventud católico y del Movimiento Bíblico⁶⁶. Aunque al principio estas ideas sólo llegan a un entorno próximo, el trabajo de gran cantidad de personas siguiendo los pasos de Dom Guéranguer para difundir la liturgia, llevará a una auténtica pastoral litúrgica, consiguiéndose, tras larga porfía con los defensores de las liturgias locales, la adopción de la liturgia romana en todas las diócesis de Francia. Importante e influyente será la guía de

la liturgia *L'Année Liturgique*⁶⁷ escrita por Dom Guéranguer y publicada en 1841, como una semilla que hiciera germinar la vida litúrgica en el pueblo fiel.

El Movimiento Litúrgico trabajó por recuperar el canto gregoriano, enalteciendo la música sacra litúrgica, formándose incluso coros, primero en Solesmes y después en otras abadías benedictinas.

Paralelamente, en la abadía de Mont-César en Bélgica, sería Dom Lambert Beauduin (1873-1960), considerado el padre de la pastoral litúrgica, quien dio el impulso al Movimiento Litúrgico pastoral en este país y luego en todo el mundo.

En Alemania, irradia desde la abadía de Maria-Laach, con su abad Dom Ildefonso Herwegen (1874-1946). Es de destacar la influyente obra de Odo Casel (1886-1948), *Mysterienlehre* o doctrina de los misterios, por profundizar en las bases teológicas de la liturgia, así como la labor del teólogo alemán Romano Guardini, que profundizó sobre la relación de la liturgia con la antropología, la sociología, la filosofía y el arte. En 1928, en el castillo alemán de Rothenfelds, participó junto al arquitecto Rudolf Schwarz, en las reuniones de la asociación de juventudes católicas *Quickborn*, donde se debatieron interesantes propuestas para la renovación arquitectónica del templo cristiano, basadas en la participación de los fieles en la acción litúrgica.

⁶⁵ Título honorífico que se da a algunos religiosos cartujos y benedictinos. Se usa antepuesto al apellido.

⁶⁶ Con el nombre de Movimiento Bíblico se ha entendido, desde finales del s. XIX, las iniciativas del Magisterio de la Iglesia, de autores católicos e incluso de grupos, encaminadas a difundir la Sagrada Escritura entre el pueblo con la ayuda de los exegetas y estudiosos de la Biblia, que habrían de hacer asequible a todos su lectura.

⁶⁷ Constaba de comentario histórico y doctrinal del ciclo litúrgico y santoral en 15 volúmenes.

En España, el Movimiento Litúrgico surge en las abadías benedictinas de Silos (Burgos) y Montserrat (Barcelona).

La actividad de estas abadías y del Movimiento Litúrgico frenará, en España, con el inicio de la Guerra Civil (1936-1939), y en Europa, con la II Guerra Mundial (1939-1945), resurgiendo al término de cada una de ellas, aunque con menor fuerza.

En el siguiente apartado, veremos que, durante la primera mitad del siglo XX, junto a otras circunstancias que marcan el desarrollo de la arquitectura, las ideas que defiende el Movimiento Litúrgico transformarán la forma y el aspecto del templo para adecuarlo a las nuevas necesidades litúrgicas. Aunque la acústica, en este momento, debería haber sido un instrumento primordial para conseguir los

objetivos de esta renovación litúrgica, lo cierto es que la consideración del problema acústico en las iglesias fue, prácticamente, inexistente en este momento. Por razones de visibilidad, al reducirse el tamaño de las iglesias y la distancia entre el celebrante y los fieles, indirectamente, la acústica de los recintos de culto se vio beneficiada, pero el resultado de las condiciones acústicas de los mismos sería secundario.



Figura 1.40. Claustro de la Abadía Benedictina de Santo Domingo de Silos. Burgos.

1.9. LAS IGLESIAS DEL SIGLO XX

El conjunto de corrientes o estilos de arquitectura, que se desarrollaron en todo el mundo a lo largo del siglo XX, agrupados bajo el amplio término de *arquitectura moderna* o *arquitectura contemporánea*, supuso un cambio radical en la concepción de la propia arquitectura. Estas tendencias surgieron en Europa a raíz de la Revolución Industrial, por la necesidad de dar respuesta a un nuevo planteamiento de los problemas, concretándose, tras la Primera Guerra Mundial, con el nombre de Movimiento Moderno.

La arquitectura del primer cuarto del siglo XX se caracterizó por la simplificación de las formas, la ausencia de ornamento y la renuncia consciente a la composición académica clásica, que fue sustituida por una estética con referencias a las distintas tendencias del denominado *arte moderno* (cubismo, expresionismo, neoplasticismo, futurismo, etc.). La modernidad supuso una ruptura con el pasado, un comenzar de nuevo, pero fue, sobre todo, el uso de los nuevos materiales como el acero y el hormigón armado, así como la aplicación de las tecnologías asociadas, el hecho determinante que cambió para siempre la manera de proyectar y construir los edificios o los espacios para la vida y la actividad humana. Los nuevos materiales permitieron una arquitectura sincera y la lógica constructiva, donde cada elemento realiza su función propia: portante, de cubierta o de cerramiento, sin ocultar su carácter.

Las iglesias del siglo XX no permanecieron ajenas a este cambio de circunstancias teóricas y prácticas que influyeron en los demás tipos edificatorios, con la particularidad añadida de tener que satisfacer un programa en el que intervienen factores difícilmente evaluables sólo desde la razón. Aunque en el neoclasicismo y el eclecticismo, la arquitectura eclesial perdió el protagonismo arquitectónico que había gozado en el Renacimiento y en el barroco, y por otro lado, al final del siglo XIX, la secularización del pensamiento humano era evidente, lo cierto es que el siglo XX nos mostró una gran cantidad de ejemplos, investigaciones y proyectos utópicos que tuvieron al templo como base, regalándonos una arquitectura eclesial reflejo de las características básicas de este momento. Al respecto Capitel, A.⁶⁸ afirma que *el siglo definitivamente laico ha sido también bastante religioso en lo que a la arquitectura se refiere*.

A lo largo del recorrido histórico realizado por la arquitectura del templo cristiano, vemos que una característica común a todas las épocas es la monumentalidad de la arquitectura religiosa, así como la clara identificación y cualificación del espacio para el culto. Sin embargo, la arquitectura sagrada del comienzo de la modernidad, al partir de cero sin recursos figurativos ni significados, produjo en el público un cierto desconcierto por los sistemas compositivos, el minimalismo y la pureza de las formas; hasta ahora el templo había sido una edificación singular, se reconocía como tal, debía expresar su dedicación a la divinidad y ser un recurso para catequizar. Cuando la arquitectura sagrada incluya los principios del Movimiento Litúrgico, será cuando cambie el panorama arquitectónico religioso.

No obstante, hubo arquitectos que se resistieron a olvidarse del pasado, al proyectar espacios religiosos, como fue el caso del arquitecto esloveno Joze Plecnik, quien no se ciñe a los rectos principios de la modernidad pero tampoco se ancla en la tradición. Según comenta Gil, P.⁶⁹, fue un hombre de profundas creencias religiosas que llevaba una vida marcada por la austeridad y la espiritualidad, que en su amplia producción religiosa investigó sobre *la esencia de las formas clásicas y tradicionales; en la relación entre esas mismas formas y los efectos psicológicos que producen*. Algunos de sus proyectos para iglesias reflejan la unión de signos regionalistas y de la arquitectura de los primeros cristianos, mientras que en otros aprovecha el carácter persuasivo del clasicismo para ofrecer soluciones representativas, pero sin considerar los efectos acústicos.

⁶⁸ Capitel, A., prólogo del libro Gil, P. (1999). *El templo del siglo XX*. Barcelona: Ediciones del Serbal.

⁶⁹ Gil, P. (1999). *El templo del siglo XX*. Barcelona: Ediciones del Serbal. p. 15.



Figura 1.41. Exterior y planta de la iglesia del Sagrado Corazón. Praga, 1921-1932.

Así, en la iglesia del Espíritu Santo en Viena (1908-1912), Plecnik emplea el concepto primitivo de asamblea para desarrollar un espacio participativo, con planta casi cuadrada, en la que enfatiza el sentido transversal aunque mantiene aún marcado el eje del altar. Esta idea de espacio comunitario vuelve a plantearla en la iglesia del Sagrado Corazón de Praga (1921-1932), y en la de Nuestra Señora de Lourdes de Zagreb (1928), distribuyendo altares sin orden aparente, en la primera, y pilares dispuestos de forma aleatoria, en la segunda (figuras 1.41 y 1.42). En el proyecto no construido para la catedral de Sarajevo (1935), Plecnik combina la gran escala de una catedral con la adaptación al culto de la planta central, donde investiga, al igual que en épocas pasadas, acerca del espacio centralizado frente a una situación no centralizada del altar. Plantea una planta circular, conformada por nichos rectangulares, y una sección en forma de cono truncado y cubierta con cúpula rebajada, es decir, parte de un esquema rígido y estudiado en épocas anteriores, pero aprovecha los recursos de la técnica para aportar nuevas soluciones (figura 1.43).

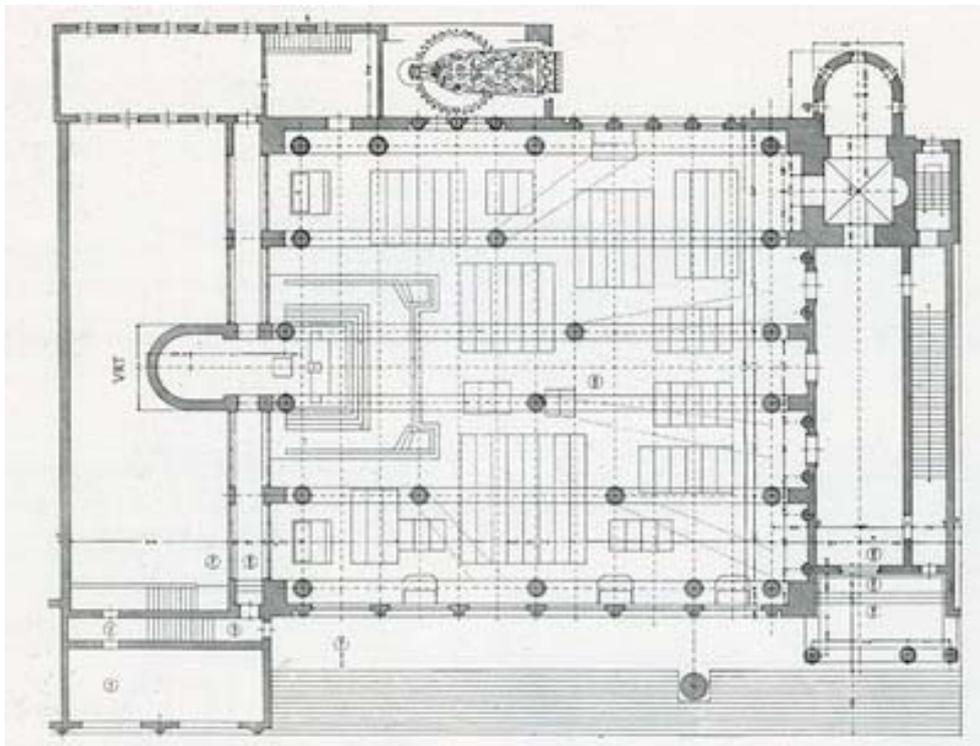


Figura 1.42. Planta de la iglesia de Nuestra Señora de Lourdes. Zagreb, 1928.

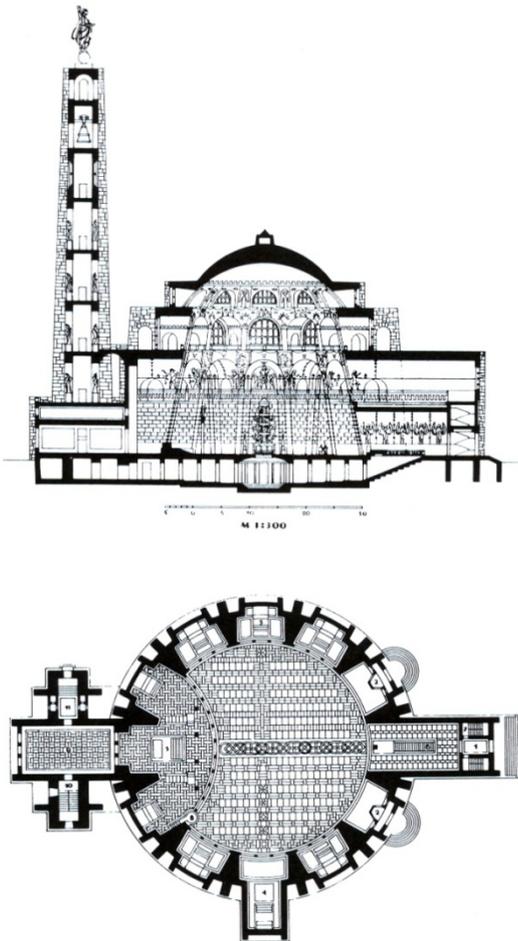


Figura 1.43. Catedral católica de *Saint Joseph*, Sarajevo. Proyecto, 1935.

existentes, de tal modo que la arquitectura eclesial empezó a sentirse como problema, un problema que se agudizará en 1918, tras las traumáticas experiencias vividas durante la Primera Guerra Mundial.

El sacerdote y teólogo alemán Johannes van Aken, en su escrito *Christozentrische kirchenkunst* (El cristocentrismo del arte religioso), publicado en 1922, recogió las pautas arquitectónicas para la construcción de iglesias, indicando que *el altar, como Cristo místico, debería ser el punto de partida y el punto central de la construcción y de la decoración de la iglesia.*



Figura 1.44. Interior y baptisterio de la iglesia de San Juan Bautista. Neu-Ulm, 1922-1926.

Por otro lado, y como consecuencia de la Revolución Industrial, la nueva situación social generó unas nuevas necesidades pastorales y litúrgicas, al tiempo que el Movimiento Litúrgico iba extendiéndose y adquiriendo un carácter oficial, a lo cual contribuyeron decretos promulgados por el papa Pío X. En palabras de Fernández Cobián, E.⁷⁰ *se abrió entonces el esperado debate conceptual, sacramental y litúrgico, a partir del cual comenzaría a cuestionarse (punto por punto) toda la planimetría del templo.* Recomendaba el Papa la construcción de iglesias de tamaño mediano, con un único espacio interior, como contrapunto a la grandiosidad de las catedrales, y en consonancia con la participación activa de los fieles en los sagrados misterios, convirtiéndose la parroquia en la protagonista de la arquitectura eclesial. Continúa Fernández Cobián, E. afirmando que en Alemania las construcciones religiosas *se consideraron durante todo el siglo XX como el mejor ejemplo de arquitectura adaptada a la liturgia.* Inicialmente la discusión se centró en torno a las figuras del altar y la pila bautismal. La importancia creciente de los sacramentos de iniciación cristiana invitaba a una renovación de sus ritos específicos, y en el caso concreto del bautismo, a concederle una mayor presencia en el ámbito del templo. La discusión teológica y los primeros tanteos de ubicación alternativa hicieron considerar la inadecuación planimétrica de muchas de las iglesias

⁷⁰ Fernández Cobián, E. (2005). Opus cit. p. 102.

Los principios de van Acken influyeron en la extensa arquitectura religiosa del arquitecto alemán Dominikus Böhm. Destaca la iglesia de San Juan Bautista, en Neu-Ulm (1922-1926), que se considera el primer edificio alemán construido bajo directrices del Movimiento Litúrgico. En esta iglesia, Böhm sitúa la pila bautismal en el centro de la nave, en consonancia con la importancia dada a los sacramentos de iniciación cristiana (figura 1.44).

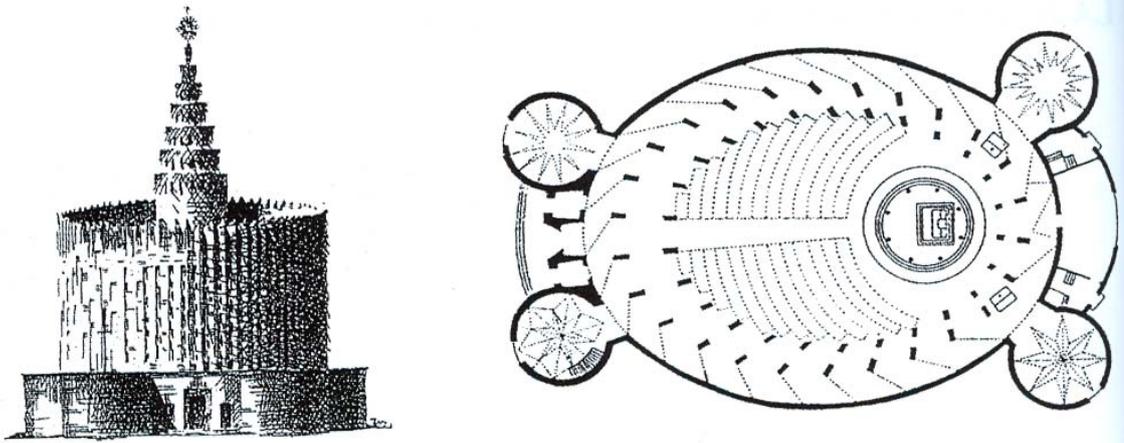


Figura 1.45. *Messopferkirche* (iglesia de la Misa, proyecto *Circumstantes*, 1922).

Representativos son también el proyecto para la *Messopferkirche* (iglesia de la Misa, proyecto *Circumstantes*, 1922, figura 1.45), la capilla episcopal de Bischofsheim (1926), la iglesia de San Engelberto (figura 1.46) en Colonia-Riehl (1928-1932) y la iglesia de San José (figura 1.47) en Hindenburg (1930), la cual influyó en obras religiosas españolas, como la basílica Nuestra Señora de Arantzazu en Oñati (Guipúzcoa) de Luis Laorga y Sáenz de Oíza (1950-1955).



Figura 1.46. Exterior e interior de la iglesia de San Engelberto. Colonia-Riehl, 1928-1932.



Figura 1.47. Iglesia de San José. Hindenburg, 1930.

Aunque sus obras denotan una influencia gótica, la figura de Dominikus Böhm fue relevante en la arquitectura católica alemana, tanto por el uso de nuevas técnicas y materiales constructivos, como por las innovaciones litúrgicas que introdujo en sus planteamientos, si bien, las implicaciones acústicas de los mismos no fueron consideradas.

Su compatriota, el arquitecto y teólogo Otto Bartning, fue el protagonista de la arquitectura religiosa protestante en Alemania. En 1922, realizó la *Sternkirche* (Templo Estelar), un proyecto ideal no construido, de planta centralizada, donde la liturgia constituyó la razón determinante del proyecto (figura 1.48).

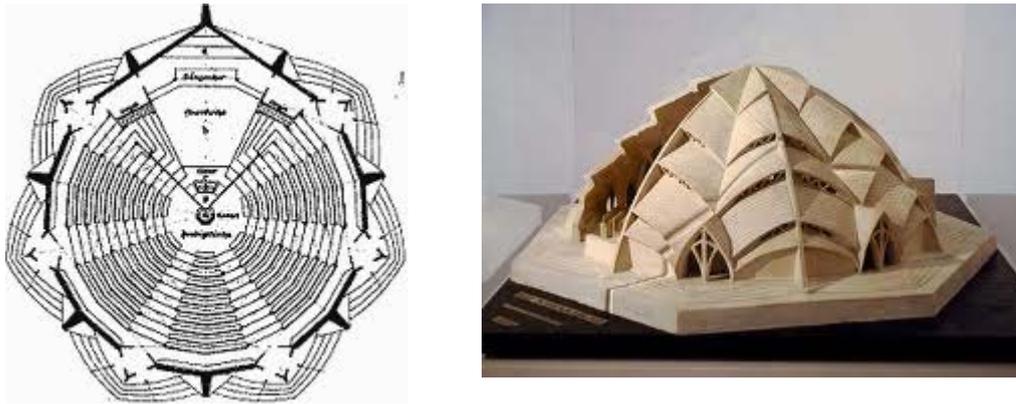


Figura 1.48. *Sternkirche* (Templo Estelar). Proyecto, 1922.

Tras la Segunda Guerra Mundial, Alemania tuvo que acometer la ardua tarea de reconstruir el país, especialmente los espacios para el culto religioso. Las claves de la arquitectura del Movimiento Moderno fueron las protagonistas en la construcción de las nuevas iglesias con un ajustado presupuesto: racionalidad, funcionalidad, empleo de nuevas técnicas, nuevos materiales, y por último, adaptación a los principios de un Movimiento Litúrgico cada vez más difundido.

En este momento, destacan los arquitectos Rudolf Schwarz y de Emil Steffann, ambos vinculados a los teólogos Romano Guardini y a Johannes van Acken.

Rudolf Schwarz, discípulo de Dominikus Böhm y vinculado al Movimiento Litúrgico a través de Romano Guarini, publicó en 1938 una obra teórica titulada *Von Bau der Kirche* (La construcción de la iglesia), que serviría de base para sus posteriores construcciones eclesiales. En ella analiza siete modelos de proyecto de iglesias, cuatro de planta central y tres de planta longitudinal, considerando las formas con las reacciones psicológicas y el comportamiento cultural de los fieles. Para él, la planta centralizada representa la unión de toda la comunidad con Cristo, representado en el altar, y la planta longitudinal representa el camino, ya que la orientación común de todos los fieles mejora la atención en el altar, y simboliza el itinerario de los fieles hacia Dios (figura 1.49).

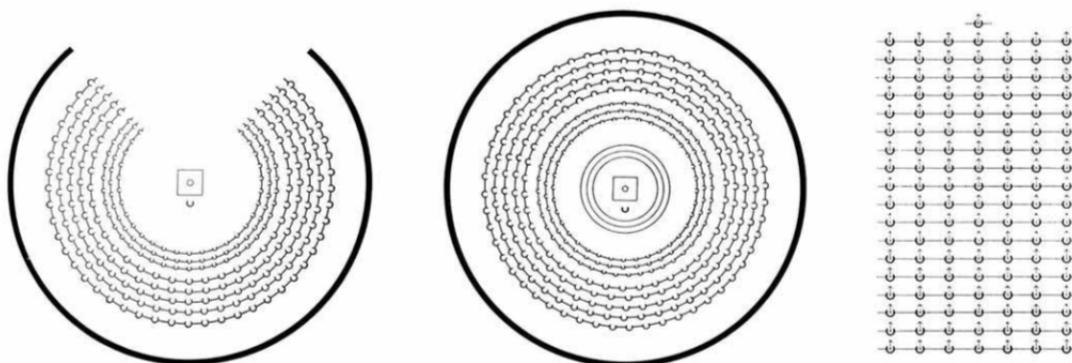


Figura 1.49. Rudolf Schwarz. Esquemas teóricos sobre configuración del espacio de culto: el anillo abierto, el anillo cerrado y el camino (recogidos en su libro *Von Bau der Kirche*), 1938.

En la segunda mitad del siglo XX, Schwarz proyectó y construyó un conjunto de templos con diferentes formas en planta: cuadrada, parabólica, formas ovoidales, combinación de varias formas, etc., según los condicionantes propios de cada proyecto, pero en todos ellos hubo un denominador común: la reflexión y la adecuación a la liturgia, y el reflejo de los principios de la modernidad en su arquitectura eclesial. Al igual que su maestro, Dominikus Böhm, el análisis de sus obras religiosas no desprenden preocupación por la calidad acústica del interior.



Figura 1.50. Interior de la iglesia de Nuestra Señora Reina del Cielo. Saarbrücken, 1954-1961.



Figura 1.51. Interior de la iglesia de Santa Ana. Durèn, 1951-1956.



Figura 1.52. Froleichnamskirche (Templo del Día del Corpus), Aquisgrán, 1928-1930.

Mencionemos como ejemplos la iglesia de San Miguel en Francfort (1952-1956), la iglesia de Santa Cruz en Bottrop (1953-1957), iglesia de Nuestra Señora Reina del Cielo en Saarbrücken (1954-1961), iglesia de la Sagrada Familia en Oberhausen (1955-1958) o la iglesia de Santa Ana en Durèn (1951-1956), que representó una evolución espacial del templo del Día de Corpus (*Froleichnamskirche*), que el arquitecto construyó en Aquisgrán entre 1928 y 1930, en colaboración con su compañero Hans Schwippert (figuras 1.50, 1.51 y 1.52).

Para Gil, P.⁷¹, el templo del Día de Corpus representa un prototipo para entender los modos de expresión modernos del templo del siglo XX. Con un esquema en planta de tipo longitudinal, Schwarz prescinde de elementos heredados de las antiguas basílicas cristianas tales como los soportes que dividen el espacio o los núcleos secundarios de culto, para ensalzar el altar único, dando respuesta a los nuevos aires litúrgicos del momento. Se trata de una caja prismática, configurada por la luz, los materiales y los paramentos desnudos, cuya expresión arquitectónica conecta con los principios del Racionalismo.

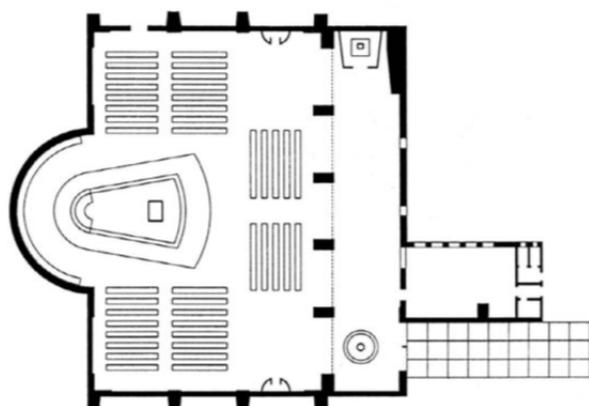


Figura 1.53. Planta de la iglesia de San Lorenzo. Munich-Gern, 1955.

ábside para el coro. La pila bautismal y la reserva del Santísimo se disponen en la nave lateral, que sirve de acceso al espacio cuadrado principal. Esta disposición de los focos litúrgicos, inusual en

Otra obra magistral de la arquitectura religiosa alemana es la iglesia de San Lorenzo en Munich-Gern (figura 1.53), construida en 1955 por Emil Steffann, Mehlen y Siegfried Östreicher. El propio Emil Steffann define su estilo arquitectónico por su *pobreza y sencillez, por el equilibrio y la autenticidad de los materiales*⁷². Construida con paramentos verticales en ladrillo revestido, por ser más económico que el hormigón armado, y cubierta de tablonos de madera de pino sin empalmes, en esta iglesia la comunidad se reúne en torno al altar, formándose tres brazos para los fieles y un

⁷¹ Gil, P. (1998). El culto a la modernidad. Templos del siglo XX. *Arquitectura Viva*, 58, p. 17-22.

⁷² Zahner, W. (2009). Opus cit.

aquella época y que tuvo que ser autorizada por el cardenal de Munich, Julius Döpfner, revela cómo estos arquitectos se anticiparon en el tiempo a la configuración del espacio que, más tarde, el Concilio Vaticano II propondría indirectamente con la reforma litúrgica.

En el Reino Unido, el ejemplo más representativo de esta época fue la catedral católica de Cristo Rey, conocida como la catedral metropolitana de Liverpool (1959-1967), obra del arquitecto Frederick Gibbert. Como hiciera Jozse Plecnik en la catedral de Sarajevo, Gibbert plantea una planta circular conformada por capillas laterales, pero para conseguir un auténtico espacio litúrgico con la comunidad reunida en torno al altar, desvía a éste ligeramente del centro en una dirección y coloca a los fieles rodeándolo excepto en dicha dirección, donde dispone al fondo el sagrario. Gibbert utilizó los recursos ofrecidos por la época, en cuanto a nuevas técnicas y materiales se refiere, siendo considerada en su momento como una auténtica catedral contemporánea (figura 1.54).



Figura 1.54. Exterior e interior de la catedral metropolitana de Liverpool, 1957-1967.

No obstante, será la ermita Notre Dame du Haut, construida en Ronchamp (Francia), entre los años 1953 y 1955, por el arquitecto suizo Le Corbusier, una obra singular que se convertirá, para muchos, en paradigma de la arquitectura religiosa del siglo XX. El maestro suizo recibió el encargo por parte del padre Alain Couturier, impulsor, junto con el padre Regamey, de la renovación del arte sacro en Francia en la década de los 50. Aunque al principio se muestra reacio por el cariz que tomó el proyecto para la basílica de Sante Baume y que finalmente abandonó, Le Corbusier acepta el proyecto al obtener la promesa de los padres antes mencionados, de gozar de total libertad en la ejecución del proyecto.

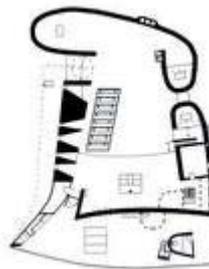


Figura 1.55. Exterior y planta de la ermita Notre Dame du Haut. Ronchamp, 1953-1955.

En el mismo lugar donde se encontraba un santuario del siglo XII, donde se veneraba a la Virgen, destruido por un incendio en 1913 y los bombardeos de la Segunda Guerra Mundial, debía levantar una ermita con una nave principal, tres capillas para celebración de oficios independientes, una sacristía, una oficina y un gran espacio exterior con presbiterio al aire libre, para las celebraciones, que dos veces al año tendrían lugar con multitud de peregrinos (figuras 1.55 y 1.56).

Aunque su primera toma de datos del proyecto recoge la situación de la primitiva capilla, Le Corbusier proyectó esta pequeña iglesia católica partiendo de cero, escuchando a la naturaleza, reflexionando sobre el lugar, observando el recorrido del sol desde la colina y, paradójicamente, contemplando algunas recomendaciones litúrgicas del clero. El templo, orientado en dirección este-

oeste, se configura mediante una serie de planos cóncavos y convexos que se yuxtaponen, se unen y se separan, realizados en mampostería encalada en blanco, mostrando las fachadas este y sur la exuberante cubierta de hormigón armado.



Figura 1.56. Interior de la ermita Notre Dame du Haut. Ronchamp, 1953-1955.

En el interior, el arquitecto emplea la luz con maestría, dotando al templo de un carácter sacro sin igual y creando atmósferas distintas que invitan a la oración y el recogimiento, aunque el protagonismo de los focos de luz en la capilla, en comparación con el altar, fue objeto de crítica por parte del clero.

No cabe duda que esta capilla de Ronchamp constituyó una obra maestra arquitectónica del siglo XX, recibiendo multitud de elogios y, también, críticas. Conviene resaltar, al igual que hiciera Fernández Cobián, E.⁷³, en el contexto de este trabajo de investigación, que la mayoría de las críticas no se refieren al edificio sino al hecho de ensalzarlo como paradigma de la arquitectura religiosa del siglo XX. En efecto, Ronchamp se trata de una intervención maestra y singular, que se desvía de la estrategia pastoral de la Iglesia, del programa y de la significación del templo y donde no se plantea la organización del espacio litúrgico.

Sin embargo, en opinión de Vincens, I.⁷⁴, Ronchamp *ensaya soluciones que se anticipan a la reforma litúrgica*, donde *la arquitectura crea orden*: el altar se dispone al final del eje que regula la acción arquitectónica del edificio, donde el sacerdote celebra el culto de cara al pueblo; se define un lugar específico para la proclamación de la Palabra; fuera del eje principal, se ubican una cruz y la Virgen, constituyendo este conjunto un espacio pluridireccional con distintos ámbitos.

En nuestra opinión, también debe considerarse que el objetivo del proyecto era construir una ermita de peregrinación, cuyo concepto y finalidad es diferente al de una iglesia parroquial.

En 1960, Le Corbusier recibe el encargo de realizar la iglesia parroquial de *Saint Pierre*, en Firminy (Francia). En un solar con unas condiciones topográficas interesantes, el arquitecto planteó un volumen en forma de cono truncado sobre una base de planta cuadrada. Sirviéndose de lucernarios direccionales y una organización en varios niveles, lograba acentuar en el templo los diferentes momentos litúrgicos, aunque finalmente el proyecto original de Le Corbusier no llegó a realizarse (figura 1.57).

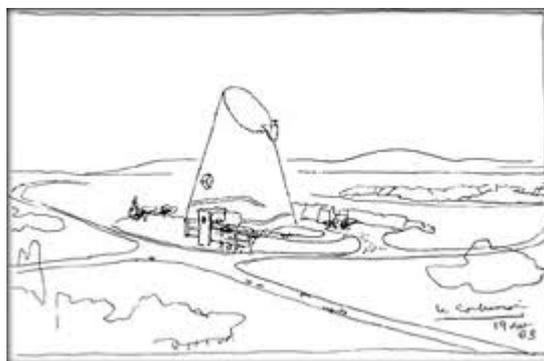


Figura 1.57. Iglesia parroquial de *Saint Pierre*, Firminy. Proyecto, 1960.

Sin embargo, será en el proyecto no construido para la capilla del hospital de Venecia (1965-1969),

⁷³ Fernández Cobián, E. (2005). Opus cit. p. 132.

⁷⁴ Vincens, I. (1998). El espíritu de las formas. arquitectura religiosa y programa litúrgico. *Arquitectura Viva*, 58, p. 30-33.

donde Le Corbusier, junto al arquitecto chileno Guillermo Jullian de la Fuente, logra un auténtico espacio litúrgico libre de soluciones tipológicas predefinidas. La descripción que el arquitecto Rodrigo Pérez de Arce⁷⁵ realiza sobre la capilla se transcribe a continuación:

Dominado por el colosal lucernario sobre el altar, el espacio interior está bañado perimetralmente por la luz reflejada proveniente del agua en movimiento y teñida por los colores del muro del zócalo. El valor del reflejo proviene de una observación de la Chiesa dei Miracoli en Venecia, posada sobre el agua. El efecto del agua reflejada sobre los palacios venecianos los hace parecer transparentes... La capilla es el único cuerpo que aúna verticalmente los ámbitos de los muelles, islas, zócalos y agua con los ámbitos aéreos de los áticos y lucernarios. Hay sutiles depresiones en los pisos en torno al altar principal y la capilla de monjas.

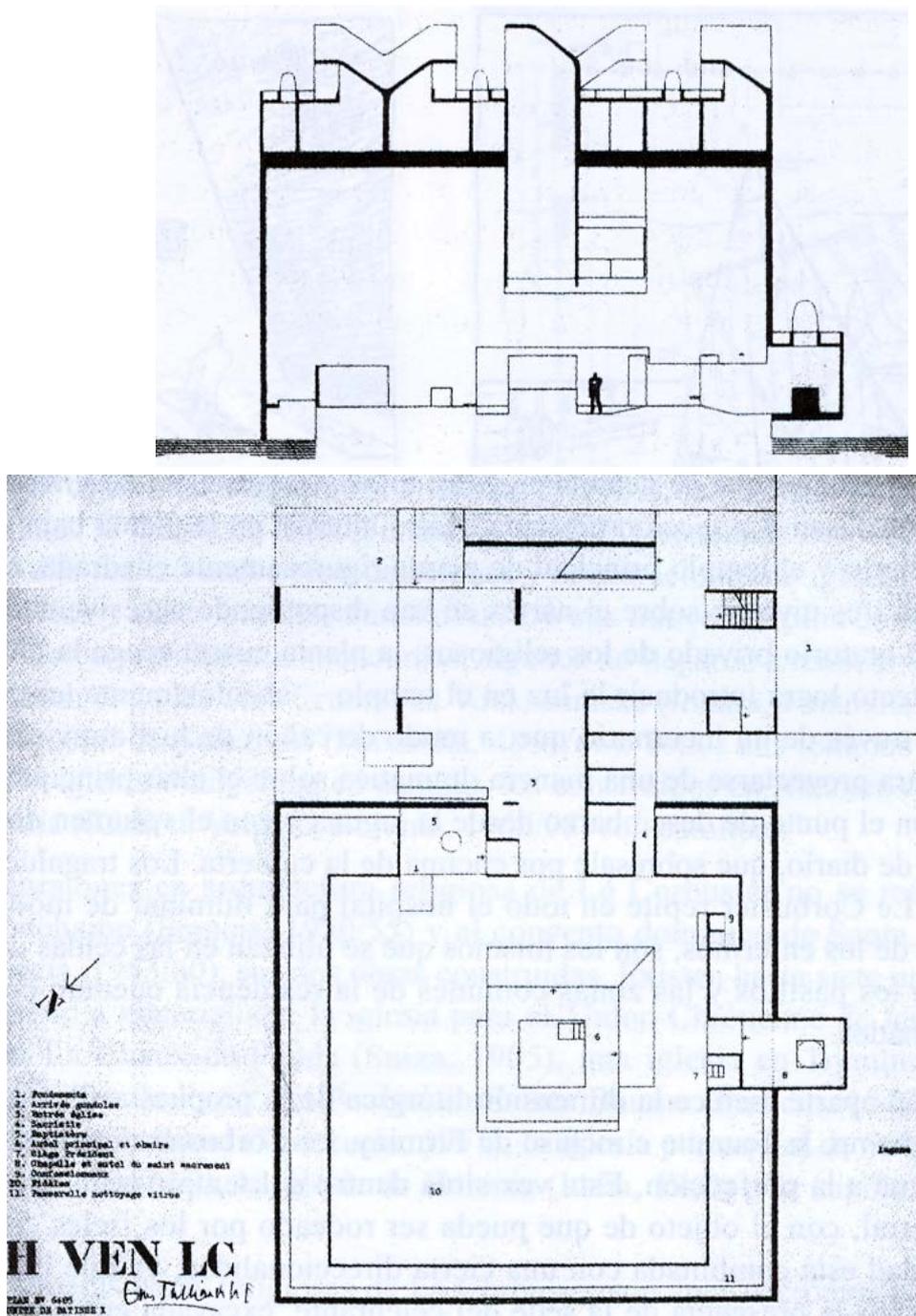


Figura 1.58. Planta y sección de la capilla del hospital de Venecia. Proyecto, 1965-1969.

⁷⁵ Pérez de Arce, R. (2000). *Guillermo Jullian: Obra abierta*. Santiago de Chile: Ediciones ARQ. p. 106-112.

Le Corbusier sitúa el altar cuadrado en el centro del templo, de forma que los fieles, en un plano más alto, se disponen a su alrededor. En línea con el altar, dispone la sede para el oficiante horadada en el muro y el sagrario suspendido sobre el vacío. El baptisterio y los confesionarios se disponen en el anillo perimetral de agua. Frente a este espacio centralizado, las capillas secundarias de diario y residencia responden a un esquema de planta longitudinal y transversal, respectivamente (figura 1.58).

En Italia, las ideas del Movimiento Litúrgico empezaban a difundirse en torno a los años 50. Una figura destacada fue el arzobispo de Bolonia, el cardenal Giacomo Lecaro, quien promovió, en los suburbios de su diócesis, la construcción de iglesias coherentes con la liturgia que fomentaran la participación activa del pueblo. Para la construcción de estas iglesias invitó a arquitectos relevantes del momento como Alvar Aalto, Le Corbusier y Kenzo Tange, pero sólo aceptó Aalto, quien realizaría la iglesia parroquial Santa María Asumpta en Riola di Vergato (1966-1978), la cual se finalizó tras su fallecimiento (figura 1.59).



Figura 1.59. Interior de iglesia parroquial de Santa María Asumpta. Riola di Vergato, 1966-1978.

Las medidas acústicas *in situ*, llevadas a cabo por Cirillo y Martellotta⁷⁶ en esta iglesia, refleja el efecto del uso de superficies duras de revestimiento, las cuales originan tiempos de reverberación altos a bajas y medias frecuencias. Sólo a la frecuencia de 125 Hz los valores se atenúan por la vibración de la superficie de la pared de fondo, que oculta la instalación de aire acondicionado.

El arquitecto Giovanni Michelucci dedicó grandes esfuerzos a la arquitectura religiosa, dejándonos una extensa obra que, aunque vista en conjunto carece de homogeneidad, posee una característica común que es el seguimiento de los principios del Movimiento Litúrgico. Su obra más conocida es el templo de San Juan Bautista en Campi Bisenzio, al lado de la autopista del Sol, cerca de Florencia (1960-1964). Para la configuración del templo, Michelucci se apoyó en citas y textos bíblicos y, valiéndose de los recursos de las nuevas técnicas y materiales, proyectó el templo como una gran tienda de campaña en proceso de montaje, en la que los soportes mantienen en equilibrio la *tela*. La forma de la iglesia en planta fue concebida como un recorrido, haciendo referencia a la idea de tránsito del cristiano por la vida terrenal (figura 1.60).

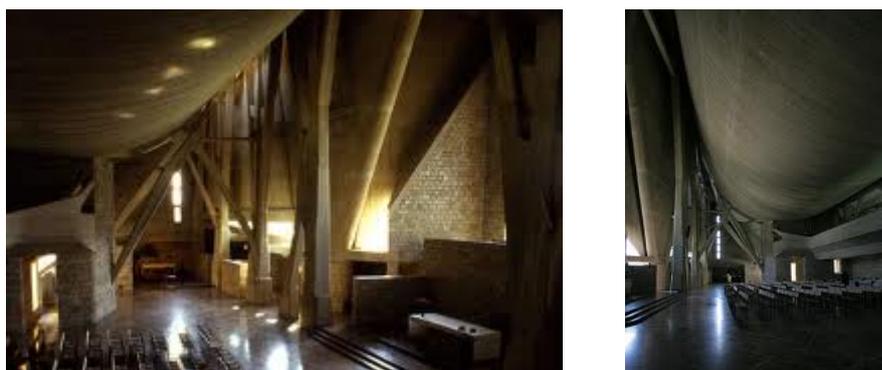


Figura 1.60. Interior de iglesia de San Juan Bautista. Campi Bisenzio, 1960-1964.

Las condiciones acústicas de esta iglesia también fueron determinadas *in situ* por Cirillo y Martellotta⁷⁷. La presencia de superficies duras y reflectantes origina valores altos del tiempo de reverberación a medias y bajas frecuencias, mientras que la absorción del aire atenúa los valores a frecuencias altas. El EDT es sistemáticamente menor que el tiempo de reverberación, indicando este hecho, la contribución de las reflexiones tempranas sobre los cerramientos de superficies duras que

⁷⁶ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006). Opus cit. p.185-188.

⁷⁷ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006). Opus cit. p.181-184.

rodean fuentes y receptores. Los valores obtenidos por estos autores fueron $T_{mid}=7,7$ s, $T_{low}=8,4$ s, $BR=1,09$ y $EDT_{mid}=7,1$ s.

En los países nórdicos, desde comienzos del siglo XX, se venían realizando interesantes ejemplos de arquitectura eclesial de la mano de arquitectos relevantes como Gunnar Asplund, Sigurd Lewerentz o Alvar Aalto.



Figura 1.61. Exterior e interior del centro parroquial en Seinäjoki, 1951-1966.

A pesar de su condición agnóstica, la trayectoria arquitectónica de Alvar Aalto cuenta con un gran repertorio de iglesias de nueva planta, remodelaciones y restauraciones, así como capillas funerarias. Sus obras maestras las realizaría para la iglesia evangélica, tras la Segunda Guerra Mundial, en su Finlandia natal: la iglesia de las Tres Cruces en Vouksenniska (1955-1958) y el centro parroquial de Seinäjoki (1951-1966), mostrado en la figura 1.61.



Figura 1.62. Templo ortodoxo griego. Milwaukee, 1956.

En cuanto a los proyectos eclesiales de maestros del Movimiento Moderno, como Mies van der Rohe, Frank Lloyd Wright o Louis I. Kahn, es de destacar que el primer arquitecto sólo realizó la capilla del Instituto de Tecnología de Illinois (1949), mientras que Wright, que comenzó a construir templos en Estados Unidos a finales del siglo XIX, en la década de los cincuenta proyectó dos iglesias basándose en el segundo modelo proyectual de Schwarz: iglesia de la Ciencia y el templo

ortodoxo griego de Milwaukee (figura 1.62), ambos en 1956.

Los templos proyectados por Kahn surgían a partir de formas que responden a un esquema central. Su método proyectual se iniciaba eligiendo formas que después matizaba, transformaba y evolucionaba con los detalles del programa, para finalizar meditando sobre la compatibilidad entre forma y programa. Añadía, además, orden y un tratamiento maestro de la luz. Destaca la iglesia unitaria de Rochester, cuyo proyecto comenzó en 1958 y su construcción concluyó en 1969 (figura 1.63).

En España, a comienzos del siglo XX, la arquitectura religiosa desarrollada por Antoni Gaudí, siguió las directrices del Movimiento Litúrgico, pues el arquitecto conoció y meditó la obra *L'Anne Liturgique* de Dom

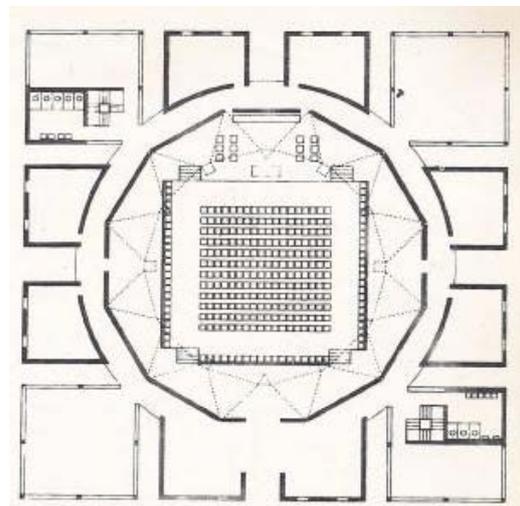


Figura 1.63. Templo unitario. Rochester, 1969.

Guéranger, impulsor de la liturgia romana en Francia.



Figura 1.64. Basílica de la Sagrada Familia, Barcelona, 1883.

Antoni Gaudí dedicó prácticamente toda su vida profesional a la construcción del templo de la Sagrada Familia, *el símbolo plástico del adiós a la catedral y el intento de continuación de algo que ya no tenía vida: la catedral como monumento*⁷⁸. En 1883, aceptó el encargo de continuar un proyecto neogótico existente, al que añadió elementos y formas modernos que, sin afectar al trazado de la planta, reflejaban su genialidad y su experiencia. Finalmente, no pudo concluir el trabajo y el templo resultó inacabado (figura 1.64)⁷⁹.

La capilla-cripta en la colonia Güell en Barcelona, cuya primera piedra se colocó en 1908, está considerada por algunos expertos como una de las más originales y perfectas de las que Gaudí llevó a cabo. La cripta se construyó semienterrada, con una forma en planta que recuerda a un ovoide irregular. Sus logros formales fueron excepcionales: una fachada irregular y rústica que se integra perfectamente con la naturaleza de su entorno; el empleo de abundantes formas geométricas onduladas; la mezcla de la piedra basáltica con ladrillos vistos y cerámica; los paraboloides hiperbólicos siguiendo el sistema de la *volta* catalana que conforman las bóvedas de la cripta y cuyo centro es sustentado por cuatro pilares inclinados; así como los nervios concurrentes de ladrillo que forman el techo, elementos de origen gótico que han evolucionado según el pensamiento de Gaudí (figuras 1.65 y 1.66).



Figura 1.65. Capilla en la colonia Güell. Barcelona, 1908.



Figura 1.66. Interior de la cripta en la colonia Güell. Barcelona, 1908.

En esta capilla-cripta cada elemento decorativo, incluidos los bancos para los fieles, tiene un profundo simbolismo religioso estudiado con toda meticulosidad. Al producirse el fallecimiento de Eusebi Güell, se interrumpió la construcción de la obra y las torres no llegaron a realizarse.

Tras la Guerra Civil Española, las enormes migraciones de habitantes del campo a las grandes ciudades hacen necesaria la construcción de multitud de parroquias sencillas y austeras, según las posibilidades económicas del momento, para atender las necesidades pastorales. Puede decirse que en el siglo XX, en España, la iglesia parroquial fue la protagonista de la arquitectura eclesial, frente a otros tipos como la catedral, la iglesia conventual, el oratorio, etc. Para facilitar el acceso a los especialistas más competentes en las distintas parcelas del arte, la Iglesia adoptó dos sistemas de trabajo: el concurso y la formación de equipos especializados. Al igual que sucediera en siglos anteriores, algunas órdenes predicadoras, como los dominicos, promocionaron el arte en general.

⁷⁸ Fernández Arenas, A. (1963). *Iglesias nuevas en España*. Barcelona: Polígrafa. p. 27.

⁷⁹ A fecha de redacción de este trabajo, continúan las obras de construcción de la basílica de la Sagrada Familia.

Ejemplo representativo lo constituyó la diócesis de Vitoria en la década de los 50, donde su obispo, Francisco Peralta, consciente de la necesidad de construcción de nuevas parroquias en el ensanche, formó equipos de arquitectos para la construcción de las mismas⁸⁰. Estos grupos de profesionales, protagonistas de la arquitectura española del momento, fueron: Alejandro de la Sota y Miguel Fisac, Rafael de La Hoz y José María García de Paredes, Corrales y Molezún, Francisco Javier Sáenz de Oíza y José Luis Romany, y, por último, Javier Carvajal, que finalmente se agruparía con García de Paredes. Se redactaron cuatro proyectos de iglesias, de las cuales sólo se construyeron dos: la parroquia de Nuestra Señora de los Ángeles, proyectada por Carvajal-García de Paredes, y la parroquia de la Coronación de Nuestra Señora, obra de Fisac⁸¹.

Fernández Cobián, E.⁸² especifica que Peralta, conocedor del ambiente de renovación litúrgica que se estaba viviendo en Italia, propuso como condiciones en los proyectos: modernidad, en el sentido de actualidad; adecuación a la nueva liturgia, con espacios amplios y libres para que los fieles no fueran simples espectadores sino participantes de la ceremonia religiosas; austeridad y sinceridad, acorde con la vida cristiana y las condiciones económicas del momento.

A finales de los años 50, la diócesis de Cuenca convocó un concurso para la construcción de la iglesia parroquial de San Esteban Protomártir, con una alta participación y cuyas propuestas fueron analizadas posteriormente por el arquitecto Luis Moya. Obtuvieron el primer premio los arquitectos José Luis Esteve Balzola y José Luis Roskiki Urribarri, mientras que el segundo premio lo obtuvo Miguel Fisac.

En este momento, uno de los arquitectos más relevantes, por su contribución al desarrollo del espacio eclesial en España, será Miguel Fisac, cuya obra se estudiará en profundidad en el capítulo segundo.

Una figura controvertida, dentro del panorama de la arquitectura religiosa española del siglo XX, fue Luis Moya, considerado como el último arquitecto clasicista español. Ante la escasez de materiales, en un momento histórico en que España estaba empobrecida por la Guerra y aislada económicamente, recurrió a técnicas tradicionales de tipo artesanal, desarrollando el sistema conocido como *bóvedas tabicadas*, sobre las que escribió un libro en 1947. Alejándose de la corriente constructiva de la época, siguió utilizando el arte clásico con aportes tradicionales españoles y una planificación enteramente moderna.



Figura 1.67. Interior de la capilla de la Universidad Laboral. Gijón, 1945-1957.

Su primera obra religiosa destacada fue la capilla del escolasticado de Nuestra Señora del Pilar de Carabanchel, en Madrid (1942-1944). Con una planta en forma de cruz griega y naves con bóvedas rebajadas en cuyo encuentro se alza una cúpula nervada, el arquitecto organiza este espacio centralizado con una configuración de tipo basilical, para dar respuesta a las necesidades litúrgicas.

La iglesia parroquial de San Agustín en Madrid (1945-1959), las capillas para las universidades laborales de Zamora (1947-1953) y Gijón (1945-1957, figura 1.67), el proyecto de la catedral de San Salvador (El Salvador, 1953) y la iglesia parroquial de Nuestra

⁸⁰ Según comenta Eduardo Delgado, el obispo de la diócesis de Vitoria, Francisco Peralta, encargó a su amigo el arquitecto Javier Carvajal, la realización de los cinco proyectos, pero éste propuso repartir los encargos entre los mejores arquitectos de su generación.

Delgado, E. (2007). *Santa Ana de Moratalaz, 1965-1971. Miguel Fisac*. Almería: Colegio de Arquitectos. p. 35-36.

⁸¹ De la Sota y Fisac presentaron cada uno un proyecto aunque firmados conjuntamente, construyéndose aquel que proyectó Fisac.

⁸² Fernández Cobián, E. (2005). *Opus cit.* p. 167-168.

Señora la Grande en Torrelavega (Cantabria, 1956-1962), responden a una planta elíptica cubierta por una gran cúpula con arcos nervados, elemento presente en la mayor parte de su arquitectura sagrada⁸³.

Entre los años 1959 y 1964 construyó, en colaboración con José Antonio Domínguez Salazar, la capilla para el colegio de Santa María del Pilar, en Madrid. Se trata de una obra arquitectónicamente moderna, con planta octogonal, donde vuelve a combinar la idea centralizada con la basilical. Destaca la cubierta de más de 700 m² en forma de *silla de montar*, donde utiliza el sistema de bóveda tabicada (figura 1.68).



Figura 1.68. Capilla del colegio Santa María del Pilar. Madrid, 1959-1964.

La primera incursión en arquitectura religiosa de los arquitectos Rafael de la Hoz y José María García de Paredes fue la capilla del colegio mayor Santo Tomás de Aquino, en Madrid (1951-1957), que aunque no plantea novedades litúrgicas, es una iglesia con un alto nivel formal, con un volumen donde los planos de ladrillo se alternan con ventanales rasgados que dirigen la luz hacia el presbiterio, sin producir deslumbramiento (figura 1.69).

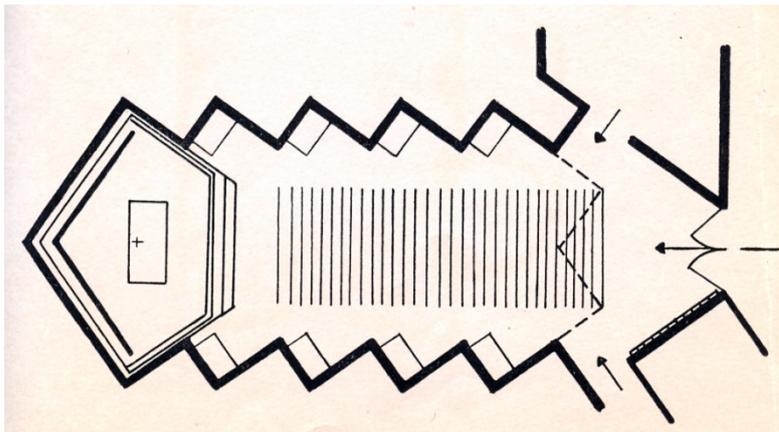


Figura 1.69. Capilla del colegio mayor Santo Tomás de Aquino. Madrid, 1951-1957.

En la diócesis de Vitoria, José María García de Paredes y Javier Carvajal construyeron la iglesia parroquial de Nuestra Señora de los Ángeles (1957-1960). La morfología del solar contribuyó a crear la iglesia con forma triangular, cuyos paramentos convergentes centralizaban la atención en el altar. En uno de los lados e independiente de la nave principal, se dispusieron la capilla del Santísimo, el baptisterio y los confesionarios.



Figura 1.70. Iglesia parroquial de Nuestra Señora de los Ángeles. Vitoria, 1957-1960.

⁸³ El estudio de la obra religiosa de Luis Moya se recoge en Fernández Cobián, E. (2005). *El espacio sagrado en la arquitectura española contemporánea*. Santiago de Compostela: Colegio Oficial de Arquitectos de Galicia.

Posteriormente, el arquitecto José María García de Paredes recibió el encargo de realizar el convento de Santa María de Belén (*Stella Maris*) para la orden de los Carmelitas Descalzos. Construido entre los años 1961 y 1965, en un pequeño solar de planta rectangular en el paseo de la Alameda de Málaga, el arquitecto situó la iglesia ocupando toda la planta baja y el convento, incluyendo claustro y jardín, en las plantas superiores. Estructuralmente, el conjunto lo resolvió empleando cerchas metálicas en la planta superior, de las cuales colgaban las dos plantas inferiores. Con una perfecta integración en el entorno urbano, el interés arquitectónico radica en la riqueza espacial interior, obtenida mediante el empleo de formas simples y materiales austeros. Se trata de un espacio único longitudinal y focalizado, con iluminación natural suave en el presbiterio y franjas verticales en los paramentos de la nave. El único ornamento en la iglesia lo constituyen unos faroles poliédricos colgantes, dispuestos con el mismo ritmo que preside la ordenación del espacio y que acotan la sala en altura (figura 1.71). Faroles similares, inspirados en el farol tradicional granadino, fueron dispuestos por García de Paredes en el auditorio Manuel de Falla de Granada, aunque en mayor cuantía y tamaño. Un estudio acústico⁸⁴ realizado sobre este auditorio abrió una línea de investigación relativa a la función de los faroles en la acústica de la sala.



Figura 1.71. Exterior e interior de la iglesia *Stella Maris*. Málaga, 1961-1965.

Propuesta radicalmente distinta fue la iglesia parroquial Nuestra Señora de Fuencisla, en Almendrales (Madrid, 1962-1965), donde García de Paredes retoma las ideas presentadas en el concurso para la iglesia de San Estéban Protomártir de Cuenca.

Según el arquitecto, se trata de una *iglesia multipolar*, donde el espacio interno se divide según una cuadrícula de 4.20 x 4.20 m, disponiendo una malla de pilares metálicos muy ligeros que sostienen una cubierta formada por elementos troncopiramidales que, a su vez, proporcionan iluminación cenital homogénea al interior. Se trata de un espacio isótropo, donde se fomenta la reunión sobre la devoción privada y donde el bosque de pilares circulares, de pequeño diámetro, no afecta la visibilidad sobre el presbiterio (figura 1.72).



Figura 1.72. Iglesia parroquial de Nuestra Señora de Fuencisla. Almendrales (Madrid), 1962-1965.

Conocedor de la obra de Romano Guardini, *El espíritu de la liturgia*, el arquitecto José Luis Fernández del Amo cuenta con una amplia trayectoria arquitectónica religiosa que fue evolucionando y adaptándose a los cambios litúrgicos. Tras obtener el título de arquitecto en 1942, dedicó varios años a la reconstrucción de las iglesias devastadas por la guerra en la zona de la Alpujarra de Granada. Al servicio del Instituto Nacional de Colonización construyó diecinueve pueblos, incluyendo sus iglesias.

⁸⁴ Garrido, J.A., Zamarreño, T. y Girón, S. (2012). Virtual models for the prediction of acoustic fields of Manuel de Falla Auditorium in Granada, Spain. *Applied Acoustics*, 73(9), p. 921-935.



Figura 1.73. Iglesia parroquial. Vegaviana (Cáceres), 1954-1958.

Son ejemplos las iglesias rurales de Vegaviana (Cáceres, 1954-1958, figura 1.73), de Villalba de Calatrava (Ciudad Real, 1955-1959), de El Realengo (Alicante, 1957) y de A Cruz do Incio (Lugo, 1960-1964). Su arquitectura religiosa, lejos de ser una manifestación ostentosa y monumental, se caracteriza por la búsqueda del rigor funcional, el uso de materiales sobrios, unas adecuadas dimensiones de la nave para los fieles. Es lugar de encuentro de todas las artes y, lo más importante, es un ejemplo de adaptación a los fines litúrgicos.

Hubo arquitectos que se inspiraron en los avances tecnológicos para dotar a la arquitectura de monumentalidad, empleando la estructura como potente herramienta de diseño. Fue el caso del arquitecto español Félix Candela que, aunque trabajó fundamentalmente en Méjico, en Madrid realizó la iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe (1962-1965) en colaboración con los arquitectos Enrique de la Mora Palomar y José Ramón Aspiazu Ordóñez.

Con una planta en forma de octógono, situó el altar elevado en el centro, dispuso gradas alrededor de éste para los fieles, y un pasillo perimetral para circulaciones. La característica peculiar, presente en toda la arquitectura de Félix Candela, es la definición de la cubierta, la cual determina la configuración completa del edificio. Aquí se trata de una cubierta laminar realizada en hormigón, cuya forma recuerda a las cubiertas textiles empleadas por los pueblos indígenas (figura 1.74).



Figura 1.74. Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe. Madrid, 1962-1965.

Finalmente, el arquitecto Rodolfo García-Pablos González-Quijano, dedicó más de tres décadas a la construcción de arquitectura religiosa. El templo de los Sagrados Corazones de Madrid (1961-1964), fue proyectado antes del Concilio Vaticano II, pero su construcción finalizó una vez concluido dicho concilio, por lo que supuso un punto de inflexión en su trayectoria profesional (figura 1.75).



Figura 1.75. Iglesia de los Sagrados Corazones. Madrid, 1961-1964.

Esta iglesia de grandes dimensiones, con capacidad para más de mil personas sentadas y planta en forma de hexágono, está resuelta con una estructura metálica oculta por el falso techo, que se despega de los paramentos de ladrillo visto y parece flotar sobre las vidrieras, que coronan dichos paramentos verticales. Para Blanco, S.⁸⁵ *las tablillas que dibujan el falso techo parecen hacer visibles las ondas sonoras que surgen desde el altar, concentrando la atención sobre el sacerdote*. En definitiva, esta iglesia constituye un ejemplo de modernidad, funcionalidad y adecuación al programa, austeridad, sinceridad en los materiales, integración de las artes, industrialización, así como de configuración del espacio interior mediante la geometría y el tratamiento de la luz.

⁸⁵ Blanco Agüeira, S. (2009). Rodolfo García-Pablos: el proyecto del espacio sagrado. En E. Fernández Cobián (Ed.). *Arquitecturas de lo sagrado: Memoria y proyecto* (p. 242-249). La Coruña: Netbiblo.

Tras esta pincelada sobre la arquitectura eclesial y la liturgia en las primeras seis décadas del siglo XX, nos encontramos con múltiples y variadas propuestas realizadas por maestros de la arquitectura contemporánea, las cuales presentan un alto nivel proyectual e incluyen nuevas soluciones estructurales, fruto de los avances de las técnicas constructivas y del empleo de nuevos materiales. Valorar su idoneidad, desde el punto de vista acústico de forma genérica, no es posible, pues no responden a una tipología concreta ni siguen tendencias con características comunes. *No existe una planta moderna, definible en una forma geométrica como ocurría en estilos de épocas anteriores, donde la sala basilical, la cruz griega o latina y la planta redonda eran tipos únicos y definibles, aún en casos en que pudiera darse una combinación de los tres*⁸⁶.

Sin embargo, como reflexión general, podemos destacar que la búsqueda de formas simples, la ausencia de ornamento, unido al uso de materiales como el hormigón visto o los grandes paños de superficies enaladas, no contribuyen, a priori, a obtener unas buenas condiciones acústicas en el interior de las iglesias, por tratarse de materiales con bajos coeficientes de absorción sonora, que propiciarán tiempos de reverberación altos y, con ello, una inteligibilidad deficiente para la palabra y la claridad musical. No obstante, la mayoría de estas iglesias poseen un volumen pequeño o mediano, lo que contribuye a una disminución de los tiempos de reverberación y una mejora de la inteligibilidad.

A pesar de que a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, con la aparición del auditorio, nació la disciplina denominada Acústica Arquitectónica, y de que Sabine desarrolló sus teorías y estudios sobre el tiempo de reverberación, en la mayoría de estos edificios no se pusieron en práctica los conocimientos y avances acústicos de la época, quizás por ser un tema novedoso y todavía desconocido en el campo de la Arquitectura y en los métodos de trabajo de los arquitectos.

1.10. EL CONCILIO VATICANO II (1962-1965)

Convocado por el papa Juan XXIII en el mes de enero de 1959, el Concilio Vaticano II⁸⁷ fue uno de los eventos históricos que marcaron el siglo XX. Este XXI concilio ecuménico fue un acontecimiento, no sólo católico, con gran repercusión universal que marcó a todas las Iglesias. El concilio constó de cuatro sesiones: la primera de ellas fue presidida por el mismo papa en el otoño de 1962, quien no pudo concluir este concilio ya que falleció un año después; las otras tres etapas fueron convocadas y presididas por su sucesor, el papa Pablo VI, hasta su clausura en 1965.

Fue el concilio que contó con más representación de todos los celebrados, con una media de asistencia de unos dos mil padres conciliares procedentes de todas las partes del mundo, y de una gran diversidad de lenguas y razas. Asimismo, asistieron miembros de otras confesiones religiosas cristianas (figura 1.76).

El Concilio se convocó con los siguientes fines principales:

⁸⁶ Fernández Arenas, A. (1963). Opus cit. p. 88.

⁸⁷ La designación de *era tridentina* a los siglos comprendidos entre Trento y el Concilio Vaticano II, refleja la decisiva trascendencia que tuvo el Concilio de Trento en la Iglesia católica moderna, a pesar de que, entre los años 1869 y 1870, tuvo lugar el Concilio Vaticano I en la Basílica de San Pedro. Celebrado bajo el pontificado del papa Pío IX, el Concilio Vaticano I fue una respuesta a las ideas del liberalismo filosófico del siglo XVIII y del galicanismo (sistema doctrinal iniciado en Francia, que postula la disminución del poder del Papa en favor del episcopado y de los grados inferiores de la jerarquía eclesial y la subordinación de la Iglesia al Estado) que habían triunfado en la mentalidad de las sociedades. En él se establecieron, una vez más, los principios básicos sobre la Fe: sobre Dios creador del universo y de todo lo que él contiene; sobre la Revelación divina, escrita (Biblia) y oral (tradición); sobre la Iglesia y su magisterio, se puntualizaron y aclararon las relaciones entre la fe y la razón, que de un siglo a esa parte habían adquirido una gran preponderancia; y se definieron los dogmas de la Inmaculada Concepción y el de la infalibilidad del Romano Pontífice. Aunque se celebraron cuatro sesiones generales y generaron dos constituciones dogmáticas: *Filius Dei*, sobre la fe católica, y *Pastor Aeternus*, sobre la Iglesia de Cristo, el Concilio Vaticano I se interrumpió debido al inicio de la *guerra franco-prusiana* (1870-1871), dejando sin resolver los aspectos pastorales y dogmáticos concernientes al conjunto de la Iglesia.

- Promover el desarrollo de la fe católica.
- Lograr una renovación moral de la vida cristiana de los fieles.
- Adaptar la disciplina eclesiástica a las necesidades y métodos de nuestro tiempo.
- Lograr la mejor interrelación con las demás religiones, principalmente las orientales.

Se pretendió que fuera una *puesta al día de la Iglesia*, renovando los elementos que más necesidad tuvieran de ello, revisando el fondo y la forma de todas sus actividades.

Procuró proporcionar una apertura dialogante con el mundo moderno, actualizando la vida de la Iglesia sin definir ningún dogma, incluso con nuevo lenguaje conciliatorio frente a problemas actuales y antiguos.

El Concilio Vaticano II generó tres tipos de documentos: constituciones, declaraciones conciliares y decretos conciliares. En la tabla 1.1 se indican los textos publicados.

CONSTITUCIONES	<i>Dei Verbum</i>	Constitución Dogmática sobre la Divina Revelación
	<i>Lumen Gentium</i>	Constitución Dogmática sobre la Iglesia
	<i>Sacrosanctum Concilium</i>	Constitución sobre la Sagrada Liturgia
	<i>Gaudium et Spes</i>	Constitución Pastoral sobre la Iglesia en el mundo actual
DECLARACIONES CONCILIARES	<i>Gravissimum Educationis</i>	Declaración sobre la Educación Cristiana
	<i>Nostra Aetate</i>	Declaración sobre las relaciones de la Iglesia con las Religiones no cristianas
	<i>Dignitatis Humanae</i>	Declaración sobre la libertad religiosa
DECRETOS CONCILIARES	<i>Ad Gentes</i>	Decreto sobre la actividad misionera de la Iglesia
	<i>Presbyterorum Ordinis</i>	Decreto sobre el ministerio y vida de los presbíteros
	<i>Apostolicam Actuositatem</i>	Decreto sobre el apostolado de los laicos
	<i>Optatam Totius</i>	Decreto sobre la formación sacerdotal
	<i>Perfectae Caritatis</i>	Decreto sobre la adecuada renovación de la vida religiosa
	<i>Christus Dominus</i>	Decreto sobre el ministerio pastoral de los Obispos
	<i>Unitatis Redintegratio</i>	Decreto sobre el ecumenismo
	<i>Orientalium Ecclesiarum</i>	Decreto sobre las Iglesias orientales católicas
	<i>Inter Mirifica</i>	Decreto sobre los Medios de comunicación social

Tabla 1.1. Documentos del Concilio Vaticano II.

El primer tema sobre el cual trabajó el concilio fue la liturgia, siendo el único texto preparatorio que había sido bien acogido por los padres conciliares. Los expertos que habían preparado el texto eran animadores reconocidos del Movimiento Litúrgico, a los que la Curia romana no había podido frenar y modificar sus propuestas renovadoras que, desde hacía unas décadas, se venían debatiendo en prestigiosos círculos de estudios litúrgicos.



Figura 1.76. Sesión del Concilio Vaticano II.

El documento conciliar sobre la liturgia, la Constitución *Sacrosanctum Concilium*, fue el primero en ser aprobado, con 2.147 obispos a favor y sólo 4 contrarios, el 4 de diciembre de 1963. Pocos meses después, con la cuaresma de 1964, la Reforma litúrgica entraba en vigor en todo el mundo.

La Constitución *Sacrosanctum Concilium* y la Instrucción *Inter Oecumenici*, de fecha 26 de septiembre de 1964, para aplicar debidamente la citada Constitución, contienen el germen de las reformas realizadas desde entonces en la sagrada liturgia y en el espacio sacro.

1.10.1. LA REFORMA LITÚRGICA DEL CONCILIO VATICANO II

El Concilio Vaticano II, en la Constitución *Sacrosanctum Concilium*, subrayó el carácter sacramental o simbólico de las celebraciones litúrgicas, poniendo de manifiesto la importancia de los signos y de los símbolos en los ritos, así como la participación plena, consciente y activa de los fieles en las celebraciones litúrgicas. No proporcionó instrucciones sobre el espacio eclesial, sino recomendaciones pastorales encaminadas a obtener la citada participación del pueblo. Asimismo, como señala la Instrucción *Inter Oecumenici* en el punto 5, el objetivo de la citada Constitución no fue cambiar solamente unos ritos y textos litúrgicos, sino promover una educación de los fieles y una acción pastoral que tengan la sagrada liturgia como su cumbre y su fuente.

La mencionada Instrucción *Inter Oecumenici* dedica el capítulo V a la *Construcción de iglesias y altares con vistas a facilitar la participación activa de los fieles*, estableciendo pautas sobre la disposición de iglesias, el altar mayor, la sede del celebrante y de los ministros, la reserva de la Eucaristía, el ambón, el lugar de los fieles, el baptisterio, etc.

Este planteamiento, que propone celebraciones litúrgicas basadas en la participación plena y activa del pueblo, unido al sacerdote, para celebrar la muerte y resurrección de Jesús, recupera la liturgia de los orígenes del cristianismo.

Antes del Concilio Vaticano II, los fieles seguían la misa uniéndose al sacerdote y contemplando lo que éste hacía en el altar, por lo que el lugar para la celebración constaba de un buen escenario: un presbiterio muy alto, para que los fieles siguieran el desarrollo de la liturgia que celebraban los ministros. En este presbiterio se concentraba, en un único punto, un altar muy grande y visible donde se celebra el sacrificio, el tabernáculo para la reserva eucarística dispuesto sobre el altar y, detrás de éste, el retablo, para la veneración de advocaciones y santos. Como explica Vicens, I.⁸⁸, frente a esta monodireccionalidad de los ámbitos preconciliares, la reforma litúrgica pide *separar para clarificar*, es decir, separar el ámbito de la celebración del sacrificio del lugar para la reserva eucarística, del lugar de proclamación de la palabra y del lugar de la presidencia. Surge entonces una pluridireccionalidad, que exige diversos puntos de atención diversos, no simultáneos y ámbitos diferenciados.

Según el padre P. Farnes⁸⁹, una iglesia, como lugar de celebración, no debe ser ... *ni un monumento artístico, ni un templo en el que Dios habita, ni un lugar en donde se veneran imágenes o se custodian con respeto diversos objetos sagrados, ni un espacio dedicado a la oración personal y al trato íntimo con Dios. Es innegable que el lugar de la celebración puede servir también para todas estas finalidades; pero, en todo caso, hay que reconocer que se tratará sólo de aspectos secundarios.*

Para Fernández Cobian, E⁹⁰, una iglesia es un espacio que ha de ser capaz de asumir cuatro funciones básicas: congregar a los fieles para orar; proclamar la Palabra de Dios y celebrar la eucaristía; celebrar los restantes sacramentos; y ser el lugar de oración y adoración del Santísimo Sacramento. Una de las funciones propias de la iglesia, como espacio, es su expresividad, que ha de favorecer la piedad y educar en el sentido de lo sagrado.

Los elementos que recogen y materializan estas funciones básicas de la iglesia son el presbiterio (figura 1.77), el lugar de la asamblea, el lugar de la penitencia, el lugar de la reserva eucarística y el baptisterio.

⁸⁸ Vicens, I. (2009). *Veinticinco años de arquitectura religiosa*. En E. Fernández Cobián (Ed.). *Arquitecturas de lo sagrado: memoria y proyecto* (p. 72-91). La Coruña: Netbiblo.

⁸⁹ Farnés, P. (1989). *Construir y adaptar las iglesias: orientaciones doctrinales y sugerencias prácticas sobre el espacio celebrativo, según el espíritu del Concilio Vaticano II*. Barcelona: Regina. p.14.

⁹⁰ Fernández Cobián, E. (2005). *Opus cit.* p. 33.

El presbiterio

A partir de la Instrucción *Inter Oecumenici*, cambia el aspecto externo de la celebración: se establece la celebración de cara al pueblo, separando para ello el altar del muro de fondo del presbiterio; el sacerdote que preside la celebración, en lugar de permanecer siempre junto al altar, empieza a ocupar una sede presidencial durante la liturgia de la palabra, que se realiza desde un ambón visible y se usa la lengua vernácula durante la celebración. Desde el punto de vista acústico, esta nueva configuración propicia que el oyente reciba el sonido directo emitido por el celebrante, energía que anteriormente se perdía y que, a partir de este momento, favorecerá la claridad de la palabra.

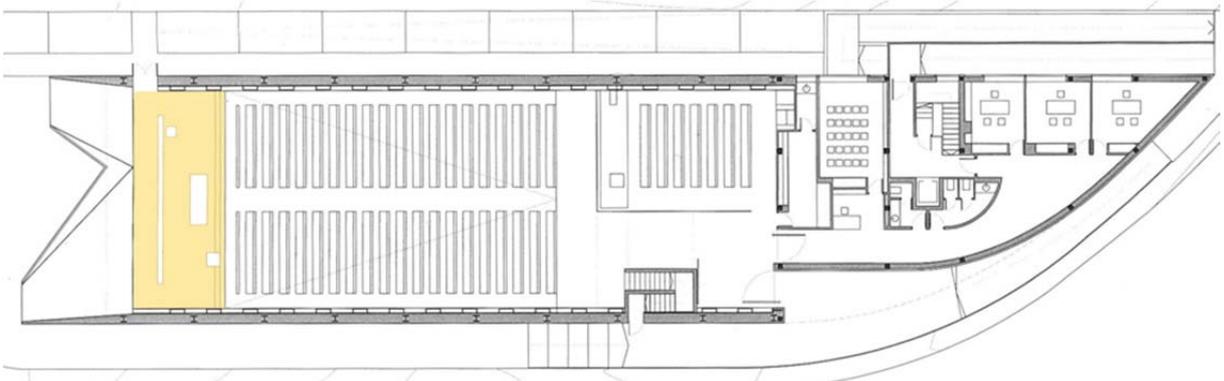


Figura 1.77. Presbiterio de la iglesia parroquial de Santa Mónica, Rivas Vaciamadrid. Madrid, 2002-2006. Arquitectos: Ignacio Vicens y José Antonio Ramos.

El simbolismo de los diversos focos de la celebración litúrgica se describe a continuación:

- El altar (figura 1.78): debe constituir el centro de atención de la asamblea cristiana y el momento culminante de la liturgia eucarística. Es en los signos sacramentales del pan y del vino, dispuestos sobre una mesa festiva, donde se hace presente la muerte y resurrección de Jesús.

Al ser el signo del sacramento de la Eucaristía un banquete en reunión, el altar debe estar lo más cerca posible de los fieles, sin que existan rejas, gradas ni comulgatorios, estar separado de la pared para celebrar de cara al pueblo, ser visible desde toda la asamblea y poseer la forma de una verdadera mesa para las personas que participan en él, asumiendo un peso arquitectónico significativo en la iglesia.



Figura 1.78. Altar. Iglesia parroquial de Santa María Magdalena. Madrid, 1966-1967. Arquitecto: Miguel Fisac.

- La sede presidencial (figura 1.79): Ha de ser única, elevada y visible y no quedar separada de la asamblea. Como entre los fines del Concilio Vaticano II está el recuperar el concepto de

asamblea, el ministro colocado en la sede logra que el pueblo se vea como una asamblea congregada.



Figura 1.79. Sede. Iglesia parroquial de Santiago. Pumarejo de Tera (Zamora), 1984. Arquitecto: Miguel Fisac.

- El ambón o lugar de la palabra (figura 1.80): Surge de la norma del Concilio que restablece la importancia de la liturgia de la palabra dentro de la misa, enriqueciéndola con lecturas del Antiguo y Nuevo Testamento, indicando que dichas lecturas se realicen en un lugar distinto del altar, por un lector distinto y en la lengua del pueblo para su comprensión. El ambón debe ser único⁹¹, visible, ocupar un lugar destacado separado del altar y de la sede presidencial, dispuesto *de tal forma que los fieles puedan ver y oír bien al ministro*⁹². En las distintas tipologías y formas de las iglesias, estas condiciones generales sobre el ambón, han llevado a situarlo en una posición lateral más cercana a los fieles, repercutiendo positivamente en la inteligibilidad de la palabra, al menos en las posiciones más cercanas al ambón.



Figura 1.80. Ambón. Iglesia parroquial de Santa María Magdalena. Madrid, 1966-1967. Arquitecto: Miguel Fisac.

⁹¹ Aunque la Instrucción *Inter Oecumenici* nº 96 establece la conveniencia de que haya uno o dos ambones, el misal romano de 1969, nº 309, hace referencia exclusivamente a un solo lugar.

⁹² Instrucción *Inter Oecumenici*, nº 96.

El lugar de la asamblea

La instrucción *Inter Oecumenici*⁹³, de 1964, en lo que se refiere al lugar de los fieles en la asamblea, comenta: *Téngase especial cuidado en disponer el lugar de los fieles de modo que pueden ver las celebraciones sagradas y participar debidamente en ellas con su espíritu... Se procurará, además, que los fieles no sólo puedan ver al celebrante y demás ministros, sino también escucharlos cómodamente, utilizándose para ellos los medios técnicos modernos.*



Figura 1.81. Lugar de la asamblea. Iglesia parroquial de Santa Mónica, Rivas Vaciamadrid. Madrid, 2002-2006. Arquitectos: Ignacio Vicens y José Antonio Ramos.

Más tarde, en 1969, la *Institutio* del Misal Romano de Pablo VI establece una implicación más profunda y teológica: la participación de los fieles en la celebración debe ser *consciente, activa y plena, es decir, de cuerpo y alma...*⁹⁴. Para ello, las iglesias deben constituirse como un lugar de asamblea y de reunión, donde los fieles se vean situados no como asistentes individuales a un espectáculo que se desarrolla en un escenario (el presbiterio), sino como miembros activos de una acción común. Ahora los fieles se unen al sacerdote, que representa a Cristo, para la celebración litúrgica de la Eucaristía (figura 1.81).

Iglesia significa *reunión*, por lo que el pueblo cristiano en la iglesia debe sentirse reunido, formando asamblea con otros participantes. Esto precisa una determinada disposición de cada individuo en relación al sacerdote y los demás fieles, y por la forma como están dispuestos los asistentes, debe captarse que se trata de una reunión que incita a los fieles a participar.

En la práctica, disponer el lugar de la asamblea de forma que los fieles puedan ver, escuchar y reunirse con el celebrante para participar en las celebraciones litúrgicas, repercute en una mayor recepción de sonido directo por parte de los oyentes, favoreciendo la claridad de la voz y la inteligibilidad de la palabra.

El lugar de la Penitencia

Según Farnés, P.⁹⁵, al tratarse de un *encuentro sacramental y personal del pecador con Cristo*, el espacio para la celebración del sacramento de la penitencia *debe hacer patente la cercanía del Señor (simbolizado por el ministro) y la humillación del pecador* (el penitente se arrodilla para confesar su pecado), así como *facilitar la imposición de manos del ministro* (figura 1.82).



Figura 1.82. Confesionarios. Iglesia parroquial de Santa Ana. Madrid, 1965-1971. Arquitecto: Miguel Fisac.

⁹³ Instrucción *Inter Oecumenici*, nº 98.

⁹⁴ Instrucción General del Misal Romano, nº 18.

⁹⁵ Farnés, P. (1989). Opus cit. p. 179-181.

El lugar para la reserva eucarística

El Concilio Vaticano II, al restablecer la celebración dinámica de la eucaristía, separa el momento litúrgico asamblear del conjunto de fieles, del momento contemplativo individual ante la presencia real de Cristo en la eucaristía, por lo que en iglesias nuevas debe proyectarse una capilla propia para este fin y separada del espacio celebrativo. Se trata de un espacio de recogimiento y de oración personal; no es un lugar de celebración. Asimismo, en el recinto debe respirarse intimidad y silencio, la luz no debe ser intensa y debe evitarse distancias innecesarias entre el Sagrario y quienes oran ante él (figura 1.83).



Figura 1.83. Capilla del Sagrario. Iglesia parroquial de Santa Cruz de Oleiros. Oleiros (La Coruña), 1967. Arquitecto: Miguel Fisac.

El baptisterio

El baptisterio, o lugar destinado al sacramento del Bautismo, debe ser proyectado en un lugar diferente al de la celebración eucarística. Este espacio debe ser adecuado para la celebración en común y estar comunicado con el espacio de la asamblea (figura 1.84). En ocasiones la pila bautismal se ha colocado en el presbiterio pero presenta el inconveniente, entre otros, de que su inclusión junto a los demás focos litúrgicos, obstaculiza la captación del simbolismo en la celebración eucarística.



Figura 1.84. Baptisterio. Iglesia parroquial de Santa María Magdalena. Madrid, 1966-1967. Arquitecto: Miguel Fisac.

1.10.2. EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO DE IGLESIA TRAS EL CONCILIO VATICANO II

La carencia de especificaciones concretas sobre la forma de las iglesias permitió a los arquitectos libertad para buscar la mejor solución acorde con los requisitos del concilio, originándose un amplio debate entre teólogos, liturgistas y arquitectos sobre cómo debía ser la iglesia postconciliar. Las dos posturas extremas las hemos visto a lo largo del recorrido arquitectónico realizado en este capítulo y como indican Cirillo y Martellotta⁹⁶ son: la *Domus Ecclesiae* (Casa de la Iglesia) de los primeros cristianos, que es un lugar sin significado transcendental ni evocador donde los creyentes se reúnen, y la *Domus Dei* (Casa de Dios), que se trata de un lugar simbólico, donde la presencia de Dios puede sentirse.

Bergamo, M. y del Prete, M.⁹⁷ resumen en tres puntos las claves de la renovación conciliar:

1. *Recuperación de la estructura y de las formas originarias de la liturgia, cuyo centro es la Eucaristía en su dinámica pascual.*

⁹⁶ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006). Opus cit. p. 180.

⁹⁷ Bergamo, M. y del Prete, M. (1997). Opus cit. p. 44.

2. *Transformación de un culto clericalizado y seguido pasivamente por el pueblo, en una celebración en la que participa un cuerpo orgánico jerárquicamente ordenado, sacramento fundamental del Cuerpo de Cristo.*
3. *Retorno a un lenguaje sacramental en el que los signos vuelven a tener gran importancia, y por tanto una vuelta a los signos depositados en la memoria de la Iglesia primitiva, cuyo lenguaje hoy se identifica totalmente con la problemática del hombre contemporáneo.*

Considerando estas premisas, el proyecto arquitectónico de una iglesia conforme a las determinaciones litúrgicas del Concilio Vaticano II, debe contemplar:

- Un espacio asambleario de dimensiones apropiadas, que facilite la participación de los fieles, permitiendo la visibilidad recíproca, así como una acústica adecuada.
- Importancia de los focos litúrgicos como símbolo de los distintos momentos de la celebración litúrgica: el ambón y la sede (liturgia de la Palabra), el altar (liturgia de la Eucaristía) y el baptisterio (liturgia bautismal).
- Ordenación del conjunto espacial de forma que cada celebración festiva suponga al mismo tiempo, para cada uno de los fieles, un encuentro particular con Dios. Elementos importantes son el tratamiento de la luz, materiales, acabados interiores, otras artes como la pintura y la escultura, etc. Esta celebración festiva y gozosa implica huir de ambientes lúgubres y tenebrosos.
- Creación de un espacio, separado del espacio celebrativo, para la colocación del Sagrario y su adoración
- Es recomendable que la organización del espacio interior eclesial se combine con una tensión axial de espacios previos al mismo, que conduzcan gradualmente del exterior al interior de la iglesia, de forma que, estos espacios previos, al servir de reunión antes y después de las celebraciones litúrgicas, aluden al signo que constituye la propia Iglesia.

En la figura 1.85 se muestra como ejemplo un plano de planta de la iglesia parroquial de Santa Cruz de Oleiros, en Oleiros (La Coruña), proyectada por el arquitecto Miguel Fisac en 1967, donde se reflejan los distintos espacios y focos litúrgicos descritos.

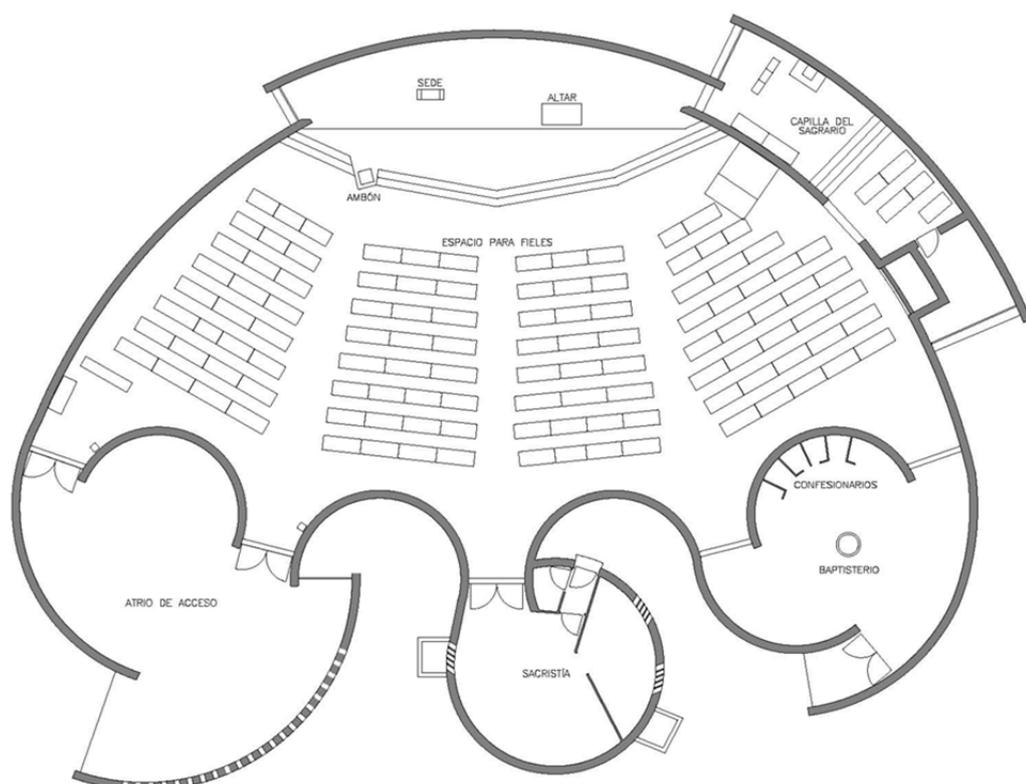


Figura 1.85. Planta de la iglesia parroquial de Santa Cruz de Oleiros. Oleiros (La Coruña), 1967. Arquitecto: Miguel Fisac.

Queda patente la estrecha relación entre dinámica litúrgica y proyecto arquitectónico eclesial, de forma que ya no es posible prescindir de los signos y símbolos sacramentales ni de la participación de los fieles, ya que, de lo contrario, el espacio de la iglesia se convertirá en un mero proyecto de envoltura.

Al respecto, Ignacio Vincens⁹⁸ comenta:

...para un arquitecto que se enfrenta con el tema del arte sacro, la liturgia es el programa. Porque si no lo hacemos así estaremos llenando una vez más... las iglesias de mediocridad. Y si realmente muchos de los templos y de las iglesias que se han realizado últimamente son mediocres, es porque les falta alma, porque son banales, porque no tienen ninguna estructura intelectual detrás. Porque una característica de toda arquitectura mediocre es, siempre, su déficit de teoría.

Estoy plenamente convencido de que la buena voluntad carente de musculatura teórica no produce más que banalidades, ámbitos que no sirven para nada. Y, desgraciadamente, creo que todos nosotros estamos acostumbrados a ver en el tema de la arquitectura sacra muchos ámbitos que están desprovistos de sentido litúrgico; aproximaciones más o menos voluntaristas, con muy buena voluntad, pero que están exentas de profundidad. Y porque no tienen esa musculatura teórica, al final se convierten en banales. Son espacios en los que se nota que no ha habido una reflexión sobre las disposiciones litúrgicas.

El hecho de que el espacio sacro sea un lugar donde los fieles se congregan, oran y ofrecen el sacrificio litúrgico, debe constituir el móvil principal del arquitecto al proyectar una iglesia, frente a aspectos estéticos o historicistas. *La acción litúrgica es social y comunitaria: no es sólo un conjunto de acciones y ceremonias para contemplar o ver, sino para realizar. De tal forma que los fieles no deben estar allí como espectadores, sino como actores. La relación altar-nave no debe ser la misma que escenario-espectadores.*⁹⁹

Para Bergamo y del Prete, la planta basilical longitudinal, predominante en la iglesia occidental desde la época constantiniana hasta el Concilio Vaticano II, resulta ahora inadecuada y no responde a los requerimientos de la liturgia renovada (figura 1.86). Por el contrario, la planta central o en abanico permite *la organización de la asamblea en hemiciclo con la atención convergente hacia el centro y la mayor equidistancia posible entre los participantes y este centro focal, en el cual se localizan los polos de la liturgia*¹⁰⁰ (figura 1.87).

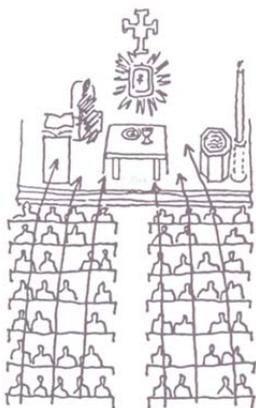


Figura 1.86. Iglesia con esquema longitudinal con todos los focos litúrgicos sobre tarima elevada. Bergamo, M. y del Prete, M.

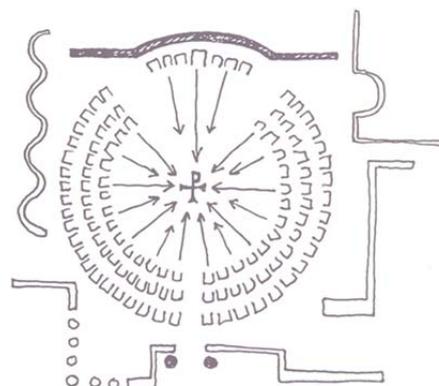


Figura 1.87. Iglesia con disposición centripeta: la envoltura es secundaria. Bergamo, M. y del Prete, M.

⁹⁸ Vincens, I. (2009). Opus cit.

⁹⁹ Fernández Arenas, A. (1963). Opus cit. p. 88.

¹⁰⁰ Bergamo, M. y del Prete, M. (1997). Opus cit. p. 194.

No obstante, afirmaciones como la de Giorgio della Longa¹⁰¹ deben ser consideradas: *Una buena arquitectura litúrgica no es una buena planta que satisfaga las reglas de la liturgia, sino que ha de ser un espacio dentro del cual se despliegue una liturgia: es decir, arquitectura.*

Aunque la acústica arquitectónica lleva décadas intentando afianzarse como una rama más de la Arquitectura, como lo son la estética, la construcción, la iluminación, etc., puede decirse que la reforma litúrgica del Concilio Vaticano II, seguramente sin pretenderlo, constituyó un punto de inflexión en la disciplina acústica, máxime si tenemos en cuenta la innegable conexión entre arquitectura y acústica en los recintos de culto.

Desde el punto de vista acústico, el citado concilio planteó la inteligibilidad del discurso como un aspecto prioritario, haciendo que las condiciones acústicas en los recintos eclesiales empezaran a considerarse un aspecto determinante del proyecto. Sólo a partir de este momento, las necesidades acústicas relacionadas con la inteligibilidad de la palabra serán tratadas en las iglesias católicas, convirtiéndose en una prioridad en los últimos años.

Por otro lado, podemos afirmar, que las determinaciones de esta reforma litúrgica deberían haber contribuido, a priori y de forma indirecta, a la mejora de la calidad acústica de las iglesias. Aspectos, como que el celebrante hable de cara a los fieles, que además deben verle, o la reducción de la distancia entre presbiterio y asamblea, implican que la fuente sonora se acerque a los receptores, y que a éstos les llegue mayor sonido directo. No obstante, cuando se instala la megafonía en las iglesias, la distancia fuente-receptor deja de ser vital para la inteligibilidad de la palabra, aunque cierto es que un recinto mal concebido acústicamente, difícilmente puede solucionarse con un sistema de megafonía. Asimismo, para conseguir la visibilidad de los focos y signos litúrgicos, desde todos los puntos susceptibles de ser ocupados por los fieles, en la mayoría de las iglesias se reducen las dimensiones y el volumen de la sala, lo que repercute, en general, en una disminución de los tiempos de reverberación y mejora la inteligibilidad de la palabra y claridad musical. Sin embargo, rasgos característicos de la arquitectura del momento, como la austeridad, la falta de ornato, materiales como el hormigón y el yeso liso, provocan un efecto contrario al descrito, por la falta de absorción sonora en el recinto.

Paralelamente, los avances y la expansión de los conocimientos en materia acústica de la época, la aparición en el mercado de gran variedad de materiales absorbentes sonoros, la concienciación de los proyectistas por el problema acústico y la presencia de un público cada vez más exigente, fueron aspectos que incidieron de forma favorable en la acústica de la arquitectura eclesial. Además, el uso de materiales absorbentes sonoros, en zonas estratégicas desde el punto de vista acústico, en la arquitectura religiosa de formas simples, sin ornamentos y realizada con materiales contemporáneos, permitía conseguir efectos beneficiosos para la acústica, similares a los que, varios siglos antes, ofrecían las capillas laterales, la decoración o los techos de madera.

El uso de sistemas de refuerzo electroacústico jugó un papel fundamental en la mejora de la inteligibilidad del discurso en casi todas las iglesias. A priori, iglesias de reciente construcción realizadas en hormigón, yeso liso o ladrillo visto son demasiado reverberantes como para tener buena inteligibilidad de la palabra sin el uso de apoyo electroacústico, aunque las deficiencias acústicas originales son difíciles de corregir con la megafonía¹⁰². En los recintos de culto, la solución habitual suele consistir en un sistema de refuerzo sonoro, con los oyentes orientados hacia el foco sonoro y el sistema de apoyo electroacústico orientado hacia la zona de audiencia.

¹⁰¹ Della Longa, G. (2009). La arquitectura religiosa contemporánea en Italia y la experiencia de la Conferencia Episcopal Italiana en su promoción. En E. Fernández Cobián (Ed.) (2009). *Arquitecturas de lo sagrado: memoria y proyecto* (p. 106-129). La Coruña: Netbiblo.

¹⁰² Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006). Opus cit. p. 26.

En este contexto, donde resurgen los aspectos simbólicos del rito cristiano y de la arquitectura, y su repercusión indirecta en la acústica, el principal protagonista de la arquitectura religiosa postconciliar española será, sin lugar a duda, Miguel Fisac, que en este momento ya cuenta con una dilatada experiencia en la arquitectura eclesial y un profundo conocimiento e interés por la liturgia.

Las soluciones arquitectónicas presentadas por Fisac en sus iglesias, tras el Concilio Vaticano II, constituyen un claro exponente de eficacia, adecuación y simplicidad proyectual obtenida al aplicar la reforma litúrgica de forma literal, considerando, a su vez, el problema acústico de estos espacios eclesiales como una constante a tratar y resolver. Mediante el estudio de las condiciones acústicas actuales de sus iglesias postconciliares, comprobaremos si Fisac logró los objetivos acústicos que se propuso.

2

LA ARQUITECTURA RELIGIOSA DE MIGUEL FISAC

2.1. MIGUEL FISAC SERNA

Nació en Daimiel (Ciudad Real) el 29 de septiembre de 1913, en una familia sin relación con la Arquitectura, siendo el menor de tres hermanos. Sobre su afición a la arquitectura, él mismo comentaba¹:

Desde siempre he tenido vocación, pasión, por la arquitectura. Nunca he comprendido por qué. Soy hijo de farmacéutico y en el medio rural donde nació la profesión de arquitecto era prácticamente desconocida.

No fui mal estudiante, me gustaban las matemáticas, pero no tenía especiales cualidades para el dibujo; que me costó mucho trabajo dominar a la manera, muy académica, que le gustaba al profesor que tenía que aprobarme.

Terminado el Bachillerato Universitario en el Instituto Nacional de Badajoz, se trasladó en 1930, con diecisiete años, a Madrid con el firme propósito de estudiar Arquitectura. Para ello, se preparó dibujando, de forma incansable, constante y tenaz, el repertorio de estatuaría clásica existente en la academia donde se formaba, hasta aprobar el ejercicio de estatua, que posibilitaría su ingreso en la Escuela de Arquitectura de Madrid. Comenzó la carrera en septiembre de 1932, aunque al iniciarse la Guerra Civil el 18 de julio de 1936 tuvo que interrumpirla, volviendo a Daimiel, donde permaneció un año refugiado en las cámaras del tejado de su casa familiar, hasta ser rescatado por Juan Jiménez Vargas, con el que huyó cruzando España y atravesando los Pirineos, incorporándose al bando nacional. Al acabar la guerra, el 1 de abril de 1939, reanudó sus estudios de Arquitectura, finalizándolos en 1942, a la edad de 29 años, con premio fin de carrera de la Real Academia de las Bellas Artes de San Fernando, en una promoción de sólo 10 arquitectos, entre los que se encontraban: Francisco de Asís Cabrero, Javier Lahuerta, José Rebollo, José Luis Fernández del Amo, Luis Alústiza, Manuel Bastarache y Javier Peña.



Figura 2.1. Miguel Fisac. Autorretrato, 1945.

Comenzaría entonces una trayectoria profesional que se prolongará durante más de 60 años, cuyo legado supera los 400 proyectos construidos, que contribuyeron a la incorporación de la arquitectura española a la modernidad del siglo XX. Su trabajo abarcó todo los ámbitos de la Arquitectura, desde la vivienda privada hasta la pública singular y representativa, pasando por el diseño de muebles y objetos, el diseño industrial, la pintura, la rehabilitación y la restauración de edificios, e incluso, como él mismo decía, sus dos grandes batallas perdidas: el urbanismo y la vivienda social. Pero fueron sus intervenciones en la arquitectura religiosa, tanto iglesias como conjuntos conventuales, las que le proporcionaron fama y prestigio internacional.

Su trabajo en la mesa de dibujo y a pie de obra, lo compaginó con la escritura en diarios, revistas y libros, así como con

¹ Intervención de Miguel Fisac en la entrega del Premio Nacional de Arquitectura 2002. En **Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009).** *Miguel Fisac: Premio nacional de arquitectura 2002*. Bilbao: Ministerio de Vivienda, Secretaría General Técnica, Servicio de Publicaciones.

conferencias sobre su obra. Su única actividad docente tuvo lugar, en 1978, en la Universidad de Caracas, y en diversas ocasiones rechazó las invitaciones para ser profesor de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Trabajador incansable y tenaz, no se definió ni decantó por ninguna corriente, sino que su carácter innovador, pensador, con ideas claras, inconformista, su capacidad creativa unida a su talante investigador, le llevó a realizar una arquitectura sin apriorismos, que partiendo desde cero, resulta sincera e innovadora y no deja a nadie indiferente.



Figura 2.2. Miguel Fisac en su estudio del Cerro del Aire, Madrid.

2.2. CONSIDERACIONES GENERALES DE SU ARQUITECTURA

En un momento de vacío y aislamiento cultural de postguerra, sin referencias ni maestros próximos, tuvo la oportunidad de comenzar su trayectoria profesional realizando proyectos de cierta importancia, lo que le obligó a aprender sobre la marcha, de forma autodidacta. Buscando su propio camino en solitario y estudiando directamente los edificios que conoció en los muchos viajes que realizó por todo el mundo, forjó su forma personal de entender la Arquitectura. No leyó ni estudió mucho sobre Arquitectura, prefirió ver y estudiar en directo, interiorizando y meditando posteriormente sobre ella.

El pensamiento sobre la Arquitectura, atribuida al filósofo chino Lao Tsé (570-490 a.c.), *cuatro paredes y un techo no son arquitectura, sino el aire que queda dentro*, le sirvió para formular su propia definición de Arquitectura: *un trozo de aire humanizado*. Es pues, que la Arquitectura tendría como materia prima el espacio, y no la envoltura material, los elementos sustentantes o los elementos sustentados. *Un espacio que ha surgido por y para el hombre, exigencia proporcionada por el programa humano, que requiera la colaboración de otros elementos, tanto constructivos como estéticos*². Desde este planteamiento general acerca de la Arquitectura, el propio Fisac no se identificó con ningún movimiento o corriente arquitectónica, ni del pasado ni de su tiempo.

Él mismo comentaba que *ver y pensar han sido las dos coordenadas que han determinado el punto concreto de mis conocimientos sobre la Arquitectura*³ y que han forjado su filosofía sobre su manera de proyectar. Y con una mentalidad innovadora, propia de quien parte desde cero, sin tomar nada prestado ni recurrir a un bagaje de conocimientos anteriores, a unos modelos tipológicos a unas reglas compositivas, a unas normas plásticas o a un repertorio de soluciones y detalles constructivos⁴, establece su método de proyecto definiendo su *itinerario mental*. Consistente en una sucesión ordenada de preguntas: *¿para qué?, ¿dónde?, ¿cómo?*, a las que añadió un *no sé qué*, su *itinerario mental* constituyó el proceso formativo de cada proyecto para que la arquitectura sea humanizada, respecto al cual, el propio arquitecto señalaba: *Existe una ortogénesis que hace que la arquitectura que se engendra sin seguir un recto orden en su aparición en el proceso creativo del arquitecto, adolece de una malformación genética que tiene directas consecuencias en el resultado*⁵.

Con la mente en blanco como actitud previa al iniciar cada proyecto, comenzaba por estudiar cada uno de los espacios que requiere el programa (*¿para qué?*); a continuación analizaba las

² Morales, M. C. (1979). *La arquitectura de Miguel Fisac*. Ciudad Real: Colegio de Arquitectos. p. 19.

³ Fisac, M. y Cánovas, A. (1997). *Fisac: Medalla de oro de la arquitectura 1994*. Madrid: Ministerio de Fomento y Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España. p. 9.

⁴ Cortés, J. A. (2001). *Miguel Fisac, el último pionero*. Valladolid: Colegio Oficial de Arquitectos de Castilla y León Este. p. 17.

⁵ Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). Opus cit. p. 35.

circunstancias concretas del lugar (*¿dónde?*); en tercer lugar, y no antes, se planteaba la forma de realizar arquitectónica y estructuralmente ese proyecto, sirviéndose de los avances que le ofrece la técnica (*¿cómo?*); y finalmente, añadía un *no sé qué*, que convierte a la construcción técnicamente correcta en obra de Arte. Y así, partiendo de unas necesidades edificatorias humanas y sociales, casi inconscientemente, el proyecto se transforma en obra de arte, en Arquitectura, que tiene al hombre como único fin, como según Fisac⁶, ocurre con *todas las arquitecturas populares de todos los pueblos y de todas las latitudes, y también la Arquitectura Griega, la Arquitectura Gótica, y algunas otras menos claras de catalogar.*

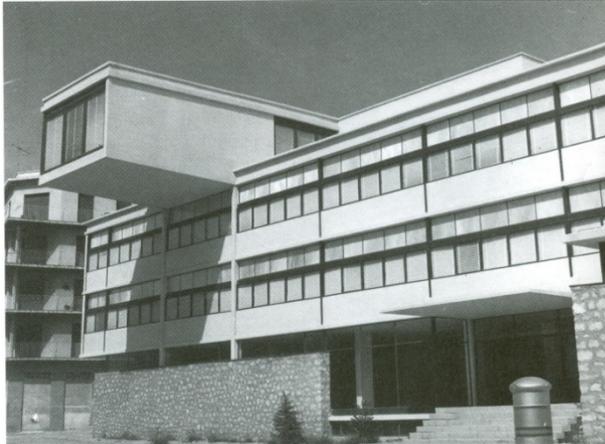


Figura 2.3. Casa de la Cultura. Cuenca, 1958.

Según comenta Morales, M.C.⁷, si primara el aspecto estructural o el estético sobre las verdaderas exigencias funcionales se produciría, lo que Fisac llamaba, una *deshumanización técnica*, en el primer caso, pues factores de tipo técnico habrían sido prioritarios, o una *deshumanización plástica*, en el segundo caso, si el objetivo hubiera sido la búsqueda de una determinada imagen o proporción. Asimismo, *no puede adelantarse una cosa a otra. En el momento en que la estética se adelante a la técnica, o se adelante al programa, lo hecho será una escultura a la*

*que se obliga a servir como arquitectura*⁸.

La primera fase de su *itinerario mental* las solucionaba mediante su fidelidad al programa de necesidades de cada proyecto, al que consideraba no *sólo un componente esencial de la Arquitectura, sino el punto de arranque y la fuente de toda posible creatividad arquitectónica*⁹. La segunda fase se basaba en un exhaustivo estudio de las condiciones del entorno:

*Toda arquitectura está plantada en un paisaje. La realidad física, climática, cromática, ambiental de este paisaje, son circunstancias que no es correcto desconocer: un punto de apoyo de mi arquitectura ha sido siempre el paisaje. Los pueblos, las gentes, con su manera de ser, sus peculiaridades, su manera de entender la vida, durante siglos, han conseguido plasmar una casi inconsciente arquitectura popular, dándonos una gran lección en sus conceptos esenciales, no formales*¹⁰.

Para resolver el tercer paso del proceso formativo del proyecto unía una actitud reflexiva con su capacidad innovadora e investigadora, surgiendo elementos constructivos como los distintos modelos de *huesos* o piezas huecas de hormigón pretensado o postensado; los techos plegados o curvos que resuelven a su vez la entrada de luz y la recogida de aguas; ladrillo hueco especial para cerramiento; el *muro convergente* y el *muro dinámico* que empleó en su arquitectura religiosa preconciliar; los *muros dispersivos* en sus iglesias postconciliares, etc. Estos y otros recursos arquitectónicos de Fisac se analizarán en los apartados siguientes.

Para el cuarto y último paso de su *itinerario mental*, poseía una sensibilidad creativa e intuición expresiva para los espacios arquitectónicos y para la humanización de los espacios geométricos, fruto de haber visto, analizado y meditado mucha Arquitectura. Fue la Alhambra de Granada, el edificio que más enseñanzas le proporcionó y donde descubrió que debía proyectar recordando que tenemos cinco sentidos, la cual, junto a la casa japonesa, la basílica de Santa Sofía de Constantinopla

⁶ Fisac, M. y Cánovas, A. (1997). Opus cit. p. 12-13.

⁷ Morales, M. C. (1979). Opus cit. p. 19.

⁸ Fisac, M. y Cánovas, A. (1997). Opus cit. p. 281.

⁹ Fisac, M. y Cánovas, A. (1997). Opus cit. p. 32.

¹⁰ Conferencia impartida por Miguel Fisac en la Universidad Nacional de Educación a Distancia, mayo de 1977. En Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). Opus cit. p. 414.

y sobre todo, la arquitectura nórdica de Gunnar Asplund, le marcarían sobre el sentido espacial, descubriendo la comunicación gradual de espacios, la fluidez sin compartimentación rígida ni cortes bruscos y la fusión con la naturaleza.

El mismo Fisac comentaba que ... *esta actitud de desarrollar mis proyectos comenzando por esforzarme en dejar la mente en blanco de precedentes propios y ajenos, me ha proporcionado el gozo de ir sucesivamente descubriendo posibilidades nuevas; tanto estructurales como estético-formales*¹¹. Pero también esta actitud frente a la arquitectura y este método de trabajo tuvieron el inconveniente de tener que recorrer su camino en solitario, a contracorriente, confiando en sus propios recursos y en su propio ingenio, soportando, muchas veces, la incompreensión de los demás. Durante cincuenta y dos años realizó su ejercicio profesional directo, artesanal y en solitario, no tuvo maestros ni discípulos y apenas colaboradores, y mantuvo, voluntariamente, poca relación con los círculos arquitectónicos profesionales: academias, escuelas, etc. En sus artículos de prensa y otros medios de comunicación denunció, en reiteradas ocasiones, la mala arquitectura y el urbanismo que se estaba haciendo en España y que le parecían socialmente perjudiciales, creando un cierto malestar, por el que años más tarde pediría perdón, pero no por lo que decía sino por la forma en que lo hizo.

Como comenta Arqués, F.¹², *su arquitectura no ha avanzado mediante argumentaciones intelectuales o disposiciones sobre los lenguajes sino mediante el encuentro directo con la realidad funcional y constructiva, espacial y vital del acontecimiento arquitectónico*. Confió su expresión arquitectónica a la sinceridad constructiva, a las características y al respeto por los materiales, a sus texturas y al tratamiento de la luz y la sombra en éstos. Resolvió desde los detalles más pequeños hasta la geometría completa de cada edificio, empleando el material como elemento unificador, aunque en opinión de algunos críticos, la resolución de todos los problemas constructivos le llevase a dejar, en algunos edificios, fachadas sin depurar.

Una conversación con el arquitecto Fernando Cassinello, en 1958, le hizo ver lo importante que era la investigación del hormigón armado con mentalidad arquitectónica, que con un sentido ingenieril, estaban ya realizando Torroja, Candela o Nervi.

*Aquella advertencia me hizo reflexionar y seguir indagando, con más profundidad, ciertas características del hormigón que ya, hacía años, había comenzado a tener en cuenta, sobre todo en su calidad plástica al echarse el material en los moldes; lo que podríamos llamar su huella genética, y que yo consideraba, y sigo considerando, detalle de gran importancia para la obtención de una expresividad formal propia de este material*¹³.

Este hecho unido a su capacidad de innovación y a la búsqueda de la honradez y sinceridad constructiva, donde las formas debían reflejar las propiedades auténticas del material consiguiendo que las propias formas arquitectónicas se aguantaran por sí mismas, llevó a Fisac a idear su invento más conocido, las *vigas hueso*. Este hallazgo estructural responde a la inquietud del arquitecto por mostrar el comportamiento real de cada elemento que conforma la estructura, pues con el hormigón



Figura 2.4. Edificio de oficinas Vega. Madrid, 1964.

¹¹ Fisac, M. (1997). Algunas consideraciones personales sobre mi arquitectura. En Fisac, M. y Cánovas, A. (1997). Opus cit. p. 14.

¹² Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). Opus cit. p. 33.

¹³ Conferencia impartida por Miguel Fisac en la Universidad Nacional de Educación a Distancia, mayo de 1977. En Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). Opus cit. p. 418.

pretensado y postensado conseguía anular los esfuerzos de tracción en el hormigón, quedando sólo sometido a esfuerzos de compresión, tensiones éstas adecuadas para ser soportadas por materiales de carácter pétreo. El estudio pormenorizado de la forma, los condicionantes del hormigón y el cálculo estructural le llevó a realizar piezas ligeras, de espesores delgados y huecas, cuya forma se asemeja a los huesos de las extremidades de los animales vertebrados. Asimismo, esta investigación llevada a cabo por Fisac, refleja el estado de la construcción en nuestro país en la segunda mitad del siglo XX, del intento de enlazar arquitectura e industria, de la prefabricación sobre la mano de obra.



Figura 2.5. Vigas hueso.

Según Asensio-Wandosell, C.¹⁴, Fisac identifica materia con forma, estructura con construcción, decoro y espacio, consiguiendo que la superficie no sea dependiente de la arquitectura sino la protagonista. La investigación del arquitecto sobre la cubierta y la fachada a lo largo de su trayectoria profesional, ha marcado un hito en el entendimiento del hormigón como material de Arquitectura en el siglo XX.

Para Fullaondo, J. D.¹⁵, Fisac no fue *un arquitecto sutil, refinado, sino un diseñador violento, unilateral, seguro, de ideas claras, precisas...*, mientras que Campo Baeza,

A.¹⁶ lo definió como *íntegro y coherente como persona. Revolucionario y rebelde como arquitecto. Inencasillable. Libre.* Y califica la belleza de la arquitectura de Fisac como rebelde. *Con la rebeldía que supone la creación profunda por encima de las modas, sin atenderlas. Con la rebeldía que supone el hacer una arquitectura cimentada en el pensamiento... y siempre hay razones para explicar su obra.*

El propio Fisac¹⁷ finalizaba uno de sus escritos afirmando, *con toda sinceridad, que mi deseo es que la arquitectura que yo hago, y también la que hacen los demás profesionales, se vacíe de tanto vanidoso protagonismo y de tanto interés bastardo y se llene de humilde servicio a la convivencia y al amor entre los hombres.*

El entendimiento de la arquitectura como un servicio a todos los sentidos del hombre, hizo que también se interesara por los efectos no visuales del medio arquitectónico, especialmente por la acústica. Al considerar la arquitectura como un fenómeno acústico, no pensaba únicamente en la audibilidad de un cantante, un orador o un órgano, sino en la repercusión de la acústica en el goce de la arquitectura considerada en sí misma. Señalaba como ejemplo, que el rumor de nuestros pasos en la nave solitaria de una catedral también es arquitectura¹⁸.

En los siguientes apartados veremos que su interés y preocupación por los temas acústicos, cristalizarán en la arquitectura religiosa que realizó tras la reforma litúrgica promovida por el Concilio Vaticano II. Él mismo, como arquitecto no se consideraba un especialista en cuestiones acústicas, sino un *shintetista* que debe aquilatar los problemas acústicos con los demás.

2.3. TRAYECTORIA PROFESIONAL

Durante los tres últimos años de carrera, entre 1939 y 1942, completó su formación e inició su trayectoria profesional, colaborando en el estudio de Ricardo Fernández-Vallespín y, posteriormente, en el de Pedro Muguruza. El diseño de una puerta toscana, el salón de actos de la sede del Consejo

¹⁴ Asensio-Wandosell, C. (2004). *Fisac: Ensamblaje con vacíos (Assembly with voids), 1959 -68*. Madrid: Rueda. p. 19.

¹⁵ Fullaondo, J.D. (1969). Miguel Fisac: Los años experimentales. *Nueva Forma*, 40. En Fisac, M. y Cánovas, A. (1997). Opus cit. p. 274.

¹⁶ Campo, A. (1995). La belleza rebelde. *Arquitectos*, 135. En Fisac, M. y Cánovas, A. (1997). Opus cit. p. 283.

¹⁷ Fisac, M. y Cánovas, A. (1997). Opus cit. p. 15.

¹⁸ Fisac, M. (1969). *Arquitectura y audición musical* (conferencia impartida por M. Fisac en el Ateneo de Madrid, 4 de diciembre de 1969). Crónica recogida en el diario Pueblo, Madrid, 6 de diciembre de 1969.

Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y el edificio del Instituto Torres Quevedo de la calle Serrano, fueron sus tareas en el primer estudio, mientras que en el segundo, dibujó perspectivas para la reconstrucción de la ciudad de Santander, junto a compañeros como Rafael Aburto, Francisco Cabrero y Francisco Javier Sáenz de Oíza.

Autores que han investigado y escrito sobre la trayectoria profesional de Miguel Fisac, como Morales, M.C.¹⁹, Morell, A.²⁰ o Patón-Alberto, V.²¹, clasifican su producción arquitectónica en cuatro etapas, coincidiendo con las décadas, a partir de los años cuarenta. Así, la primera etapa durante la década de los cuarenta, refleja su admiración por la arquitectura historicista; la década de los cincuenta se caracteriza por la presencia del ladrillo en sus obras, buscando una expresión constructiva coherente con su uso y función; la tercera etapa, durante la década de los sesenta, por la investigación del hormigón pretensado; y la última etapa correspondiente a las décadas de los setenta, ochenta y noventa, en la que centró su atención en las posibilidades plásticas del hormigón.

Primera etapa, 1942-1949



Figura 2.6. Iglesia del Espíritu Santo. Madrid, 1942.

Su primer proyecto profesional fue la conversión del auditorio de la residencia de estudiantes en la iglesia del Espíritu Santo (1942), un encargo del CSIC, situado en la Colina de los Chopos, en Madrid (figura 2.6). Este proyecto, según sus propias palabras, fue *como tirarme al agua sin saber nadar y por donde me cubría*²², ya que su realización por administración directa, le obligó a estudiar lo que había que hacer y cómo debía ejecutarse, aprendiendo los oficios de cantero, albañil, encofrador, etc.

Los siguientes proyectos serían el Edificio Central del CSIC (1943) y el Centro de Investigaciones Geológicas y Geográficas del CSIC (1944), ambos en la Colina de los Chopos de Madrid (figuras 2.7 y 2.8). Sobre estos edificios proyectados en un lenguaje clasicista, el mismo arquitecto comentó:

*El esfuerzo y entusiasmo con que realicé estos edificios, la dedicación y minuciosidad que puse en ellos, proyectando los muebles, las lámparas, las alfombras y hasta las manivelas de las puertas, y la dificultad que tuve para conseguir los materiales adecuados ya que nos encontramos en plena reconstrucción de postguerra y con la Guerra Mundial a nuestro alrededor, fueron de mucha utilidad para mí. Y aquellas columnatas, pórticos y cornisas llegaron a parecer “una audacia moderna” en el ambiente rabiosamente historicista y folklórico en el que se desarrollaba en España la intensa actividad de reconstrucción arquitectónica. Toda aquella labor que comprende mi primera etapa terminó hacia el año 1946. Gustó a las autoridades, a la gente y hasta a mis compañeros. El intento arquitectónico había resultado como yo me había propuesto, no había aparente motivo de frustración, pero me quedó la certidumbre instintiva (no razonada ni intelectual) de que aquel era un camino equivocado*²³.

¹⁹ Morales, M. C. (1979). Opus cit. p. 57-159.

²⁰ Fisac, M. y Cánovas, A. (1997). Opus cit. p. 32.

²¹ Patón-Alberto, V. (2011). URL: <http://fundacionfisac.org/miguel/biografia> [Última consulta: 28 julio 2011].

²² Arqués, F. y Fisac, M. (1996). *Miguel Fisac*. Madrid: Pronaos. p. 44.

²³ Conferencia impartida por Miguel Fisac en la Universidad Nacional de Educación a Distancia, mayo de 1977. En Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). Opus cit. p. 415.



Figura 2.7. Edificio Central del CSIC. Madrid, 1943.



Figura 2.8. Centro de Investigaciones Geológicas y Geográficas del CSIC. Madrid, 1944.

Tras visitar por primera vez la Alhambra, en Granada, donde quedó impresionado con el palacio de Carlos V, proyectó el Instituto Nacional de Óptica “Daza de Valdés” en Madrid (1948), el cual refleja el abandono del lenguaje clásico, la valoración del ladrillo visto, la austeridad y simpleza compositiva, así como un planteamiento funcional (figura 2.9).



Figura 2.9. Alzado y exterior del Instituto Nacional de Óptica “Daza de Valdés”. Madrid, 1948.

En 1949, con motivo del encargo del Instituto Ramón y Cajal de Microbiología en Madrid, (figura 2.10) recibe una bolsa de viaje para visitar instalaciones de animales de experimentación en Basilea, París, Estocolmo, Copenhague y Amsterdam, quedando decepcionado con la arquitectura racionalista de Centroeuropa²⁴ y fascinado con la arquitectura nórdica, especialmente con la ampliación del Ayuntamiento de Göteborg (1934-1937) del arquitecto sueco Erik Gunnar Asplund, en el que encuentra una nueva línea de investigación sobre arquitectura:

La ampliación del Ayuntamiento de Göteborg fue para mí la lección de un maestro que dentro de su contexto social y ambiental, radicalmente distinto al mío, me descubría la posibilidad de hacer una arquitectura de nuestro tiempo, para los hombres de nuestro tiempo y al servicio de la sociedad de nuestro tiempo²⁵.

... encontré algo que me pareció, un firme punto de partida... la conocía por fotografías... Pero vista en realidad, la honradez constructiva, la natural modernidad, las calidades, y la concepción y fluidez de espacios me impresionaron. En la terminación del Instituto de Óptica y en el proyecto de Cajal (1949) hubo ya influencias de Asplund, posiblemente

²⁴ Tras analizar las obras emblemáticas de Le Corbusier y Mies, Miguel Fisac comentaba que su *conclusión y decepción fue que aquello era un formalismo plástico deshumanizado, sin resultados lógicos con el programa humano y social al que debería servir, con un olímpico desprecio al emplazamiento físico y social en el que estaba enclavado, y hasta con cierto desprecio del concepto constructivo real, sustituido por otro falso tomado de un esteticismo plástico pictórico.* Conferencia titulada *Lo que he aprendido de la Alhambra*, pronunciada por Fisac, M. en el Colegio de Arquitectos de Granada el 21 de abril de 1994. En Fisac, M. y Cánovas, A. (1997). Opus cit. p. 10.

²⁵ **Fisac, M. (1981).** Asplund en el recuerdo. *Quaderns d' Arquitectura i Urbanisme*, 147, p. 33.

más formales que profundas, y sin darme cuenta apareció también un cierto ascetismo manchego de tipo expresionista que, sin aún evidencias con claridad, es muy posible que estuviera forcejeando por aparecer hacía tiempo, como un ingrediente autóctono de mi arquitectura²⁶.

Aquello era una modernidad que arrancaba de la esencia del problema arquitectónico y me pareció una solución honrada. No me interesaron, como español, los problemas suyos que eran suecos (idiosincrasia, problemas técnicos, etc.), pero sí me interesó el cómo él había analizado una situación y había obtenido unas formas y lo que llaman ahora un lenguaje arquitectónico, es decir, el método. Entonces eso a mí me interesó una barbaridad. Descubrí que no hay que hacer arquitectura de recetas²⁷.



Figuras 2.10. Exteriores del Instituto Ramón y Cajal de Microbiología. Madrid, 1951.

Segunda etapa, 1950-1958

Estos años fueron muy fructíferos en la producción arquitectónica de Fisac, no sólo por la cuantía de sus obras sino por la búsqueda de un camino y concepto propio, proponiendo brillantes y novedosas soluciones espaciales y formales. Al inicio de esta etapa, se reflejan los rasgos característicos que marcarán su arquitectura posterior: sinceridad constructiva, fidelidad al programa y adecuación al lugar. Asimismo, definió su *itinerario mental*, el cual imprimirá un método y carácter personal a su obra.

En el año 1949, después de obtener, en unos edificios anteriormente realizados, unos resultados que no me terminaron de convencer, y después de analizar “in situ” edificios emblemáticos de los grandes maestros del Movimiento Moderno ensayé al proyectar el prescindir de buscar formas previas y seguir, paso a paso, el desarrollo lógico del proyecto, no a intuir una cierta forma más o menos relacionada con Arquitecturas que me fueran conocidas y que me gustaban sino, a la inversa, a iniciar (con la mente en blanco de formalismos recordados) el itinerario del proyecto a realizar, y haciéndome por orden estas preguntas: ¿Para qué?... ¿Dónde?... ¿Cómo?... El resultado formal obtenido, y no previsto, me posibilitaba, con pequeñas variaciones, llegar a un no sé qué, como solución de proyecto final, que con pequeños ajustes se acercara a lo que mi sensibilidad estética me inducía a pensar que podría tener cierta belleza.

²⁶ Conferencia impartida por Miguel Fisac en la Universidad Nacional de Educación a Distancia, mayo de 1977. En Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). Opus cit. p. 417.

²⁷ Entrevista con Miguel Fisac, 21 de abril de 1979. En Urrutia, A. (2002). *Arquitectura española contemporánea. Documentos, escritos, testimonios inéditos*. Madrid: COAM. p. 412.

A mí este itinerario que he seguido durante cerca de cincuenta años, me ha resultado útil y apasionante²⁸.

La librería del CSIC (1950), en la calle Medinaceli de Madrid, refleja un dominio global del espacio hasta el más mínimo detalle, reflejando la funcionalidad y calidez organicista de la arquitectura nórdica.

El proyecto para el concurso de viviendas económicas, organizado por el Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, que él denominó *Casas en cadena* (1950), recoge sus ideas sobre el urbanismo y la vivienda social, aunque incomprensiblemente, no se construyeron, a pesar de haber ganado el primer premio.



Figura 2.11. Planta y exterior del Instituto Laboral de Daimiel, Ciudad Real, 1950.

Su primer proyecto en su tierra natal y el primero en el que empleó su itinerario mental, el Instituto Laboral de Daimiel (Ciudad Real, 1950) abre *las puertas de la moderna arquitectura orgánica en España. Es en cuanto a evolución conceptual una de las primeras obras auténticamente MODERNAS y consecuente con el pensamiento y planteamientos de arquitectura que centraba Fisac en 1950²⁹*. Denota por un lado, la influencia nórdica por la fluidez de los espacios y su relación con la naturaleza, y por otro lado, el determinismo local, donde los problemas de aislamiento, luz, orientación, etc. se solucionan con los recursos heredados de la arquitectura popular (figuras 2.11 y 2.12).

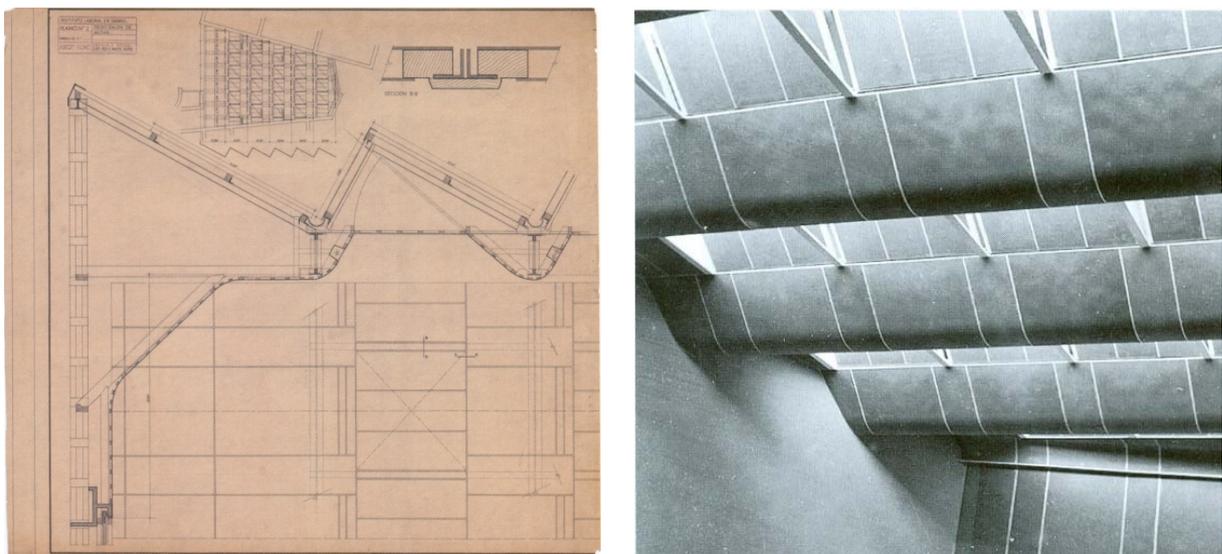


Figura 2.12. Detalle constructivo y vista interior del techo del salón de actos del Instituto Laboral de Daimiel.

Para el Instituto Ramón y Cajal de Microbiología en Madrid, proyectado en 1949 y terminado en 1951 (figura 2.13), Fisac realiza su primera patente, un ladrillo especial para cerramiento. La autenticidad

²⁸ Alberdi, R. y Sousa, A. L. (1996). *Miguel Fisac: Obra en Madrid, exposición organizada por el Área de Cultura de la Fundación COAM, noviembre - diciembre de 1996*. Madrid: Pronaos. p. 14-15.

²⁹ Morales, M. C. (1979). Opus cit. p.66.

constructiva y arquitectónica, le lleva a considerar impropio el uso del ladrillo macizo para cerramiento, en un edificio con estructura de hormigón. Por ello, inventa un ladrillo hueco y ligero, que resuelve bien el problema del aislamiento y de la impermeabilización en caso de lluvia, y cuyo aparejo presenta un buen resultado plástico.



Figura 2.13. Exterior y pilares inclinados del Instituto Ramón y Cajal de Microbiología. Madrid, 1949.

En 1953 impartió conferencias en la Escuela de Arquitectura de Manila, quedando impresionado, en este viaje a Extremo Oriente, por la casa popular japonesa. Asimismo, repetidas visitas a Granada, le hicieron descubrir la Alhambra como una fuente inagotable de enseñanzas, siendo uno de los veinticuatro arquitectos, que en ese mismo año, firmaron el *Manifiesto de la Alhambra*³⁰. En 1955, realizó un viaje a Norteamérica, donde conoció las obras de Mies van der Rohe, Neutra, Wright o Saarinen. Estos viajes *me proporcionaron la ocasión de estudiar directamente arquitectura de gran valor y me hicieron posible estructurar y completar no sólo un criterio arquitectónico sino una cierta teoría que lo respaldara*³¹.

En 1951, proyecta el Colegio Apostólico *Arcas Reales* en Valladolid (figura 2.14), un encargo de los padres dominicos, donde Fisac materializó, por vez primera, su teoría del *espacio dinámico* en una iglesia, con la que obtendría, en 1954, la Medalla de Oro en la exposición de Arte Sacro de Viena, proporcionándole un reconocido prestigio internacional.



Figura 2.14. Colegio Apostólico Arcas Reales. Valladolid, 1951.

³⁰ Dirección General de Arquitectura y Ministerio de la Gobernación. (1953). *Manifiesto de la Alhambra*. Madrid: Autor.

³¹ Conferencia impartida por Miguel Fisac en la Universidad Nacional de Educación a Distancia, mayo de 1977, En Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). Opus cit. p. 417.

Según Morales, M.C.³², el Instituto de Formación de Profesorado en la Ciudad Universitaria de Madrid (1954), supuso, en la arquitectura civil, lo que “Arcas Reales” en la monástica, una arquitectura de espacios fluidos, dentro del organicismo y la línea de influencia nórdica en cuanto a la escala humana, la apertura al paisaje y la complementación con jardines (figura 2.15).

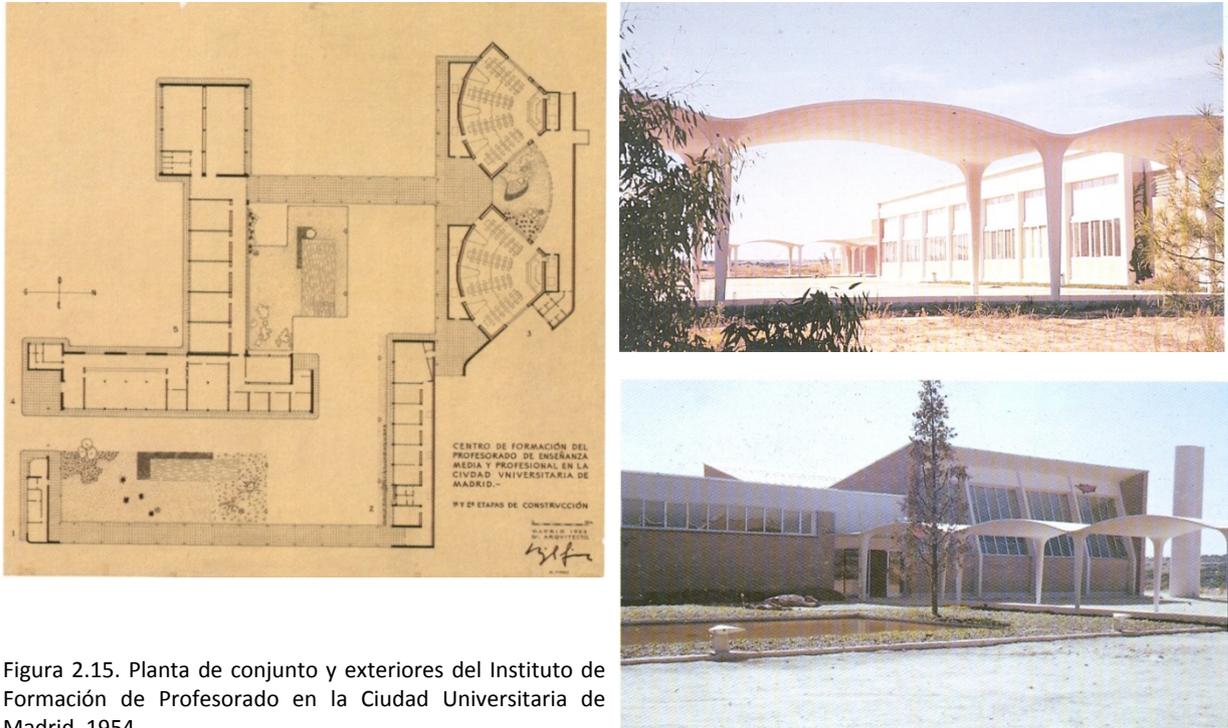


Figura 2.15. Planta de conjunto y exteriores del Instituto de Formación de Profesorado en la Ciudad Universitaria de Madrid, 1954.

En 1955, siendo arquitecto consultor de la catedral de Manila y del Santo Sepulcro de Jerusalén, proyectará un edificio referencial para el conocimiento de su arquitectura: el Teologado de San Pedro Mártir para los padres dominicos en Alcobendas, Madrid (figura 2.16).

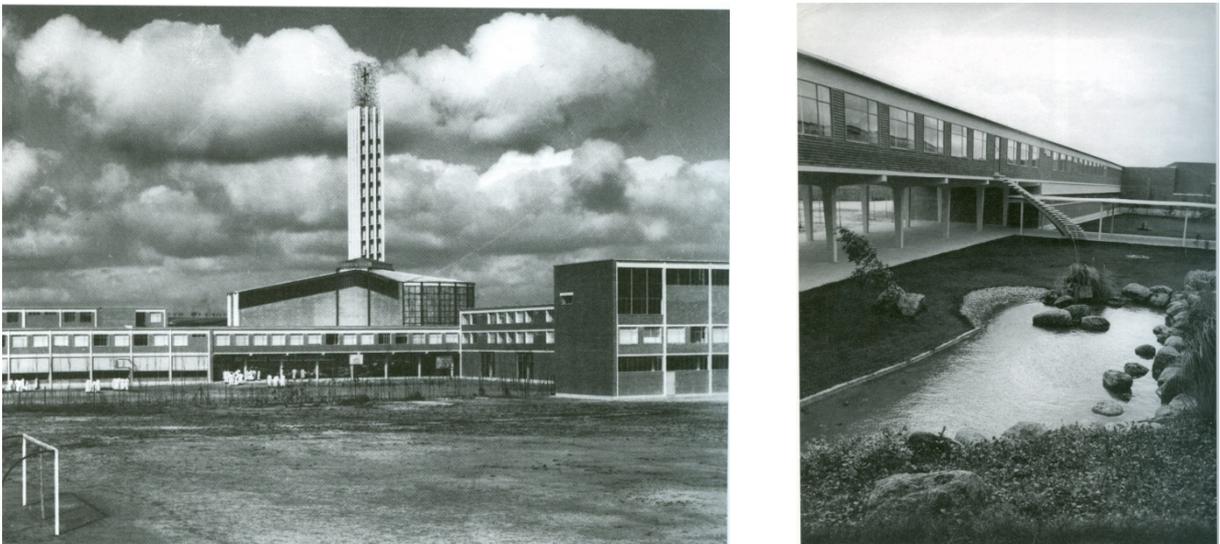


Figura 2.16. Teologado de San Pedro Mártir, Alcobendas. Madrid, 1955.

Su propia casa en el madrileño Cerro del Aire (1956), refleja el descubrimiento de la casa tradicional japonesa. Realizada con muros de mampostería, el arquitecto la amuebló con los prototipos de mesas, sillas, alfombras o lámparas, que diseñó a lo largo de su vida profesional.

³² Morales, M. C. (1979). Opus cit. p.72.

Para la diócesis de Vitoria, realizó la iglesia parroquial de la Coronación de Nuestra Señora (1958), un proyecto firmado de forma conjunta con Alejandro de la Sota, pero cuya autoría corresponde a Fisac, donde formaliza, con gran madurez, el *espacio dinámico*.

Tercera etapa, 1959-1969

Esta etapa se caracteriza por la investigación de las posibilidades estructurales del hormigón, como material moderno amoldable a cualquier forma, capaz de resolver íntegramente un edificio.

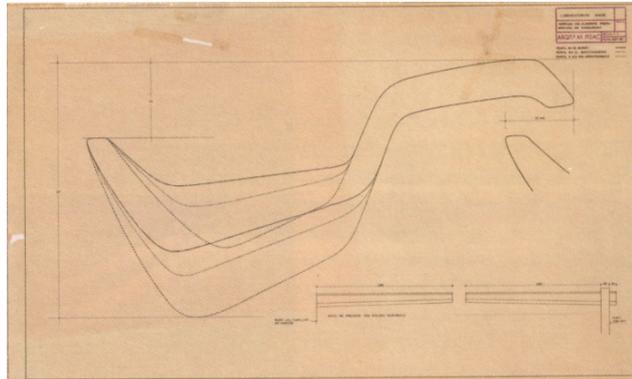


Figura 2.17. Exterior y detalle de pieza de cubierta de los laboratorios farmacéuticos Made. Madrid, 1960.

Comenzó con un proyecto no construido, el concurso de la iglesia parroquial de San Esteban Protomártir (1959), en Cuenca, con el que obtuvo un segundo premio. En ella, planteó una solución para la cubierta, con piezas prefabricadas de doble curvatura en hormigón pretensado, cuya forma en sección recuerda a las alas de una gaviota, que resolvían a su vez la iluminación natural y la canalización del agua de lluvia.

La sinceridad constructiva se aprecia en los laboratorios farmacéuticos Made (1960), en Madrid, un conjunto de edificios realizados con un único material, el hormigón visto, destacando además, una marquesina formada por piezas lineales modulares de hormigón de sección continua, que supuso el inicio de su investigación hacia las *vigas huesos* (figura 2.17). En el edificio para Laboratorios Alter (1960), en Madrid, proyecta otra marquesina de hormigón, pero en forma de lámina plegada (figura 2.18).



Figura 2.18. Laboratorios Alter. Madrid, 1960.

Continuación de las obras anteriores, en el sentido de *gran sencillez formal y absoluta expresividad*³³, fue el Centro de Estudios Hidrográficos y Laboratorio de Hidráulica (1961), en Madrid (figuras 2.19 y 2.20).

Se me indicaba en el programa propuesto el deseo de que la solución estructural fuese interesante. El desafío era sugestivo y me puse a trabajar con mucho interés. La cubierta del laboratorio, para cumplir las exigencias requeridas de luz cenital uniforme, era la clave del problema que debía resolver...

Después de desechar una primera solución de cilindros de eje vertical huecos que no resolvían ni la rigurosa uniformidad lumínica ni la supresión total de sol directo, consideré a continuación que la condición indispensable era la de disponer unas pantallas con la orientación e inclinación conveniente para que no entrara el sol en la

³³ Morales, M. C. (1979). Opus cit. p. 97.

nave en ninguna estación del año. Esas pantallas deberían tener una dimensión y separación necesaria y también una determinada inclinación y, por supuesto, ser autoportantes en los 22 m de luz de la nave. Había también que disponer los canalones necesarios para recoger las aguas de lluvia y proteger con vidrio u otro material transparente la zona abierta para la iluminación. A la primera solución abierta de pantallas que le propuse a José María Priego... este gran calculista me contestó que con esa sección no podía conseguir la pieza de hormigón pretensado que resistiera las tensiones de flexión previstas. Debía aligerar el peso propio que habían de soportar las vigas. Y pensé en la posibilidad de hacerlas huecas. Y al tantear cómo unir una pieza de sección rectangular o triangular a la pantalla para conseguir la luz celeste deseada, me encontré con una figura que me recordó la sección de los huesos de las extremidades de los animales vertebrados. Entonces pedí que me trajeran unos huesos de vaca de carnicería y, al comprobar su semejanza, adquirí la convicción de que marchaba por buen camino³⁴.



Figura 2.19. Centro de Estudios Hidrográficos y cubierta de vigas hueso del Laboratorio de Hidráulica. Madrid, 1961.

Con estas vigas, a las que denominó *vigas hueso*, Fisac consigue cubrir una nave de 80x22 m, empleando dovelas de hormigón pretensado, unidas mediante un sistema de postensado para salvar una luz de 22 metros. Como describe Arqués, F.³⁵ dichas vigas surgieron de la adecuación y adaptación de una serie de necesidades del programa arquitectónico y responden a la condición adintelada que tiene la arquitectura. No es sólo un sistema estructural resistente que impide la iluminación solar directa y canaliza el agua de lluvia, sino que constituye un elemento estructural autónomo e independiente, resultado de una síntesis constructiva al considerar las exigencias parciales de parasol, gárgola y viga. Este hallazgo estructural (patentado y comercializado) ha constituido una de las más brillantes aportaciones a la arquitectura del siglo XX realizadas por Fisac.

³⁴ Fisac, M. y Cánovas, A. (1997). Opus cit. p. 138 y 141.

³⁵ Arqués, F. (2007). Estructuras óseas. Vigas-hueso. En Fisac, M. y González Blanco, F. (2007). *Huesos varios*. Madrid: Fundación COAM. p. 73.



Figura 2.20. Interiores y *vigas hueso* del Laboratorio de Hidráulica. Madrid, 1961.

Dichas *vigas hueso*, con múltiples variaciones de las piezas, conformarán las cubiertas de muchos de sus edificios, de grandes o pequeñas dimensiones, durante la década de los sesenta. En el Instituto Nacional de Enseñanza Media Femenina *Nuñez de Arce* (1961), en Valladolid, empleará por primera vez la estructura pretensada de hormigón con sección en forma de *hueso*, resolviendo a la vez estructura, cubierta y recogida de aguas (figura 2.21). A principios de los años ochenta, la cubierta fue sustituida por problemas de filtración derivados de una mala ejecución, pero la idoneidad del sistema queda demostrado en edificios como el colegio de los Padres Jesuitas de La Coruña, realizado en 1962 (figura 2.22); la vivienda unifamiliar construida en 1962 para José Vicente Barrera en Somosaguas (figura 2.23), en Madrid; la iglesia parroquial de Santa Ana (1965), en Madrid; el colegio Asunción Cuestablanca (1965) junto a su casa del Cerro del Aire, en Madrid; los desaparecidos Laboratorios Jorba (1965) de Madrid, que se describirá más adelante.

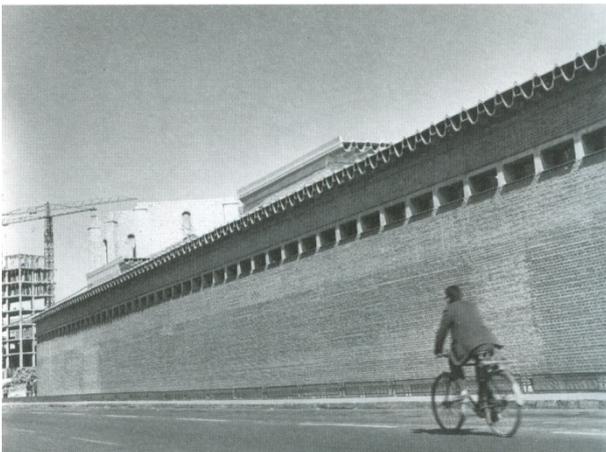


Figura 2.21. Instituto Nacional de Enseñanza Media Femenina *Nuñez de Arce*. Valladolid, 1961.



Figura 2.22. Colegio de los Padres Jesuitas. La Coruña, 1962.

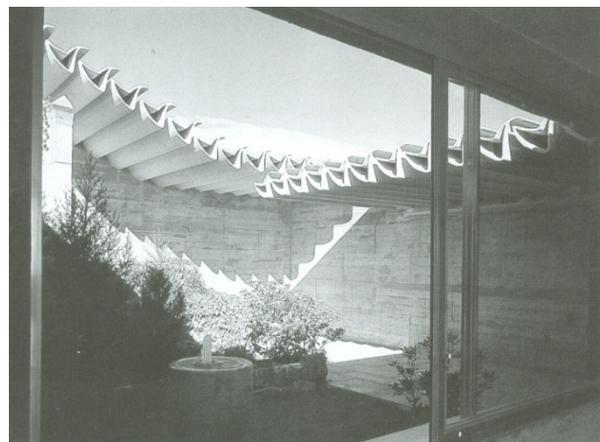


Figura 2.23. Vivienda unifamiliar para José Vicente Barrera en Somosaguas. Madrid, 1962.

Destacan también las soluciones estructurales de grandes luces resueltas con dovelas postensadas, empleadas en las bodegas Garvey (1967) en Jerez de la Frontera (figura 2.24), o en las factorías en Vic (1967) y Montmeló (1968), mostradas en las figuras 2.25 y 2.26, respectivamente.

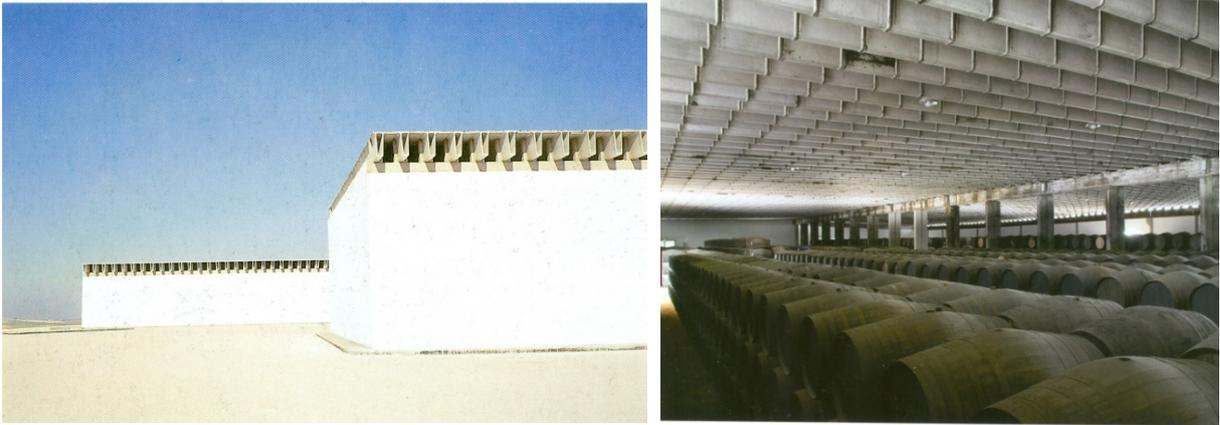


Figura 2.24. Exterior e interior de las bodegas Garvey. Jerez de la Frontera (Cádiz), 1967.

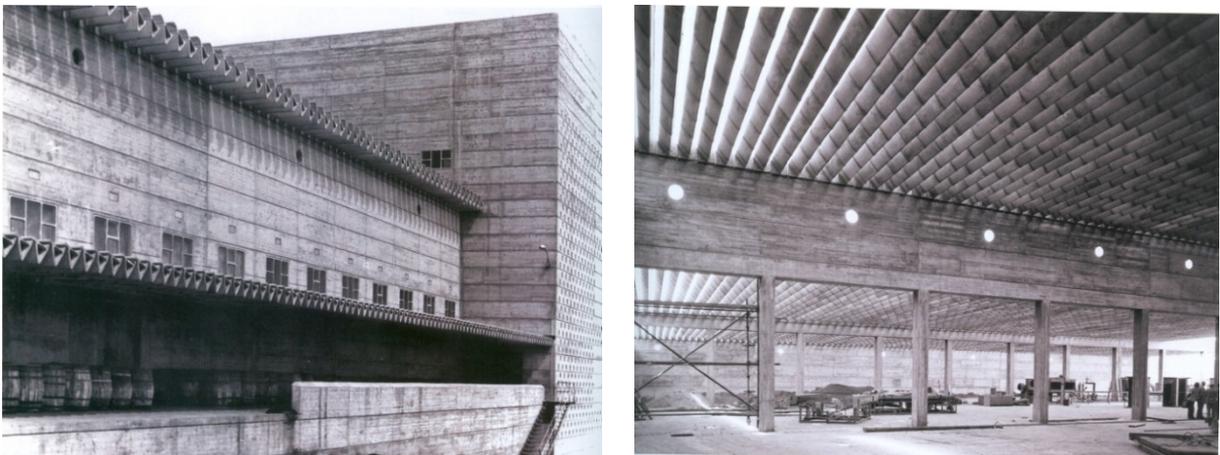


Figura 2.25. Exterior de la factoría en Vic (Barcelona), 1967.



Figura 2.26. Interior de la factoría en Montmeló. (Barcelona), 1968.

Tras obtener el título de Doctor Arquitecto en 1964, por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, de nuevo una empresa de productos farmacéuticos confió a Fisac la realización de su sede, los Laboratorios Jorba (1965), en un lugar muy visible desde la carretera N-II, de Madrid a Barcelona, antes del aeropuerto de Barajas (figura 2.27). Junto a un programa sencillo y familiar para el arquitecto, la propiedad señaló su deseo de que el edificio sirviera como reclamo publicitario para los laboratorios. De ahí que, en un conjunto de edificios con una unidad plástica, conseguida por la homogeneidad del material empleado, hormigón sin revestir, y por la continuidad de las líneas horizontales, destacó un elemento singular en forma de torre, destinado a oficinas, biblioteca, cafetería, etc. Con planta cuadrada de 16 m de lado, la torre se trataba de una composición de seis pisos, que van girando 45º sobre el inmediato inferior y se unen entre sí, generando paraboloides hiperbólicos de hormigón visto, entre las líneas de ventanas continuas de cada planta, cuyos picos recuerdan a la arquitectura japonesa.

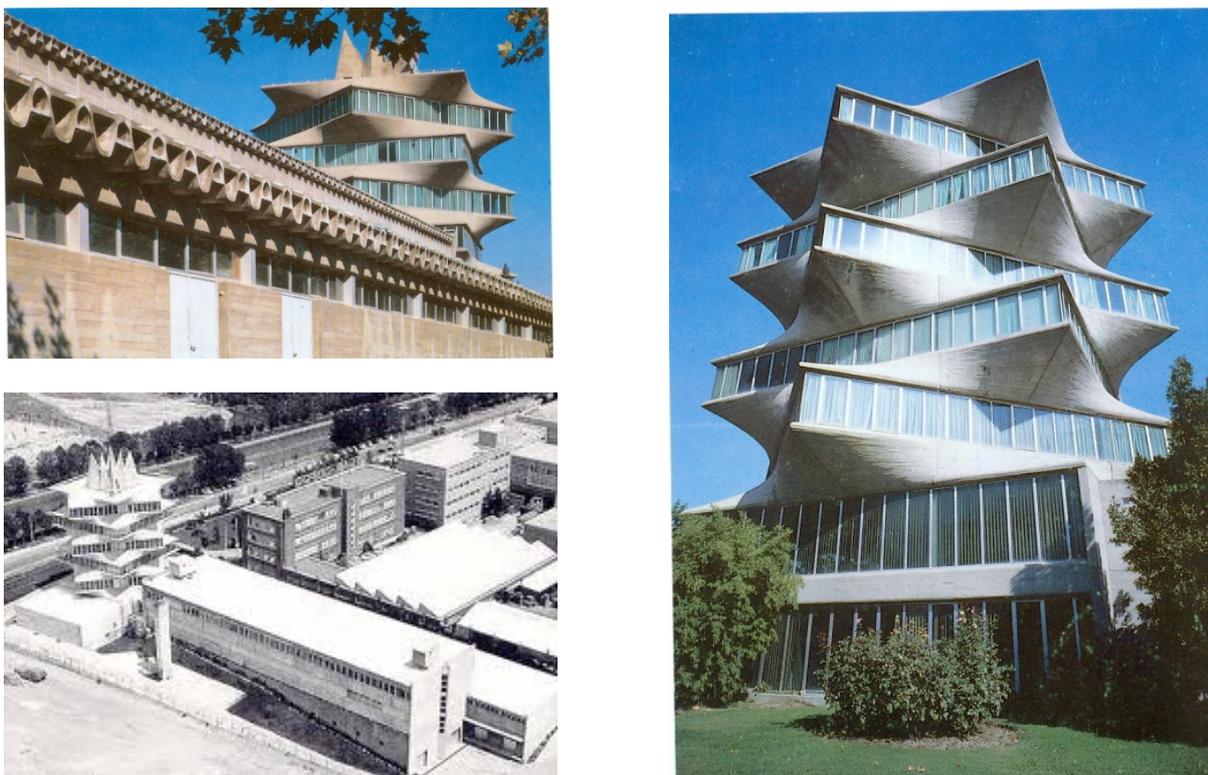


Figura 2.27. Laboratorios Jorba. Madrid, 1965.

En la torre de este edificio, conocida como *pagoda* por recordar a este templo oriental, Miguel Fisac investigó y reflexionó sobre el carácter plástico del hormigón. La cubierta del resto de las edificaciones que formaban el conjunto de los Laboratorios Jorba, se resolvió mediante piezas huecas pretensadas, o *vigas hueso*, de 12 m de luz. Incomprendiblemente, el conjunto de edificios fue descatalogado y, posteriormente, demolido en el año 1999.

En un solar con tres fachadas, de las cuales la principal, situada en el paseo de la Castellana de Madrid, poseía orientación oeste, Fisac recibe el encargo de proyectar un edificio de oficinas para la empresa IBM (1967), el cual debía ser lo más diáfano posible y no poseer vistas ni luz directa a poniente (figura 2.28).



Figura 2.28. Edificio de oficinas para la empresa IBM. Madrid, 1967.

Preocupado por la incidencia, sobre la fachada oeste, de los rayos solares en el período estival, Fisac decidió crear un cerramiento que matizara la entrada de luz solar, sin causar desde el interior sensación de claustrofobia. Para ello, inventó una pieza prefabricada de hormigón, en forma de bumerán, de 15 mm de espesor de pared, rellena de bolas aislantes de *poroxpan*, que aportaban aislamiento acústico y térmico (figura 2.29). Con este elemento resolvió la fachada, mediante la secuencia de dos piezas colocadas a la inversa, quedando entre ambas ventanuales laterales de suelo a techo, por lo que el conjunto proporcionaba un interesante juego de luz y sombra.

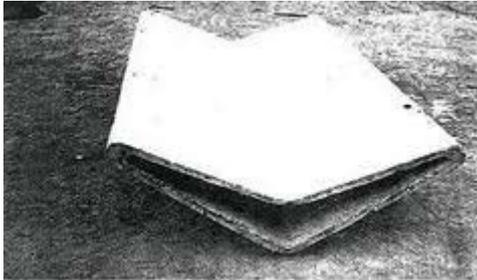


Figura 2.29. Pieza hueca de hormigón. Edificio de oficinas para la empresa IBM.



Figura 2.30. Edificio de oficinas Bioter S.A. Madrid, 1969.

En el edificio de oficinas para la empresa Bioter, S.A. (1969), en Madrid, intenta unir los planos de fachada salientes mediante formas curvas de hormigón, idea que abandona por problemas con el constructor, optando finalmente por una brillante solución mediante chapa ondulada, que denota su destreza incluso con este material poco empleado por él (figura 2.30).

Debido a la falta de oportunidad real para llevar a la práctica sus ideas urbanísticas, su actividad en esta materia fue esencialmente teórica, reduciéndose a la publicación, en 1969, de un libro titulado *La molécula urbana*. En este texto recogió sus reflexiones en materia urbanística, después de más de veinte años de actividad profesional, las cuales se basaban en el principio de la *convivencia*. Es este mismo año, la revista *Nueva Forma* dedica dos número monográficos, 39 y 41, que recogen todos sus proyectos hasta el momento, encabezados por artículos de su director Juan Daniel Fullaondo, que serán claves para el entendimiento de su obra.

Cuarta etapa, 1970-2006

La trayectoria profesional de Fisac, en la década de los setenta, se caracteriza por una nueva fase en la investigación e innovación del hormigón, pero no en su faceta estructural como hasta ahora, sino en su expresividad plástica, su textura y las formas, trabajando las posibilidades superficiales del hormigón, tanto *in situ* como prefabricado. En 1970, desarrolla la siguiente reflexión:

Al estudiar e investigar sobre formas de hormigón y comprobar que esas piezas que yo proponía se daban sobre todo en los huesos de los animales vertebrados, me rebelé contra esa forma que se hacía y que yo también había hecho encofrando sus tablas y tomando prestada la calidad leñosa vegetal de la superficie de la madera para imprimirla impropriamente en el hormigón. Así que decidí prescindir de esa incorrecta textura. Por otra parte tratar la superficie de hormigón con chorro de arena o con bujarda o martinilla o romper la superficie a golpes, o hacer un encofrado con aristas vivas, para después romperlas, etc., siempre me han parecido artificios para conseguir falsas texturas de hormigón, ...Pensé, al fin, después de estudiarlo detenidamente que, tal vez la característica más peculiar, más exclusiva del hormigón era la de ser el único material que llega a obra, o a su previa fabricación, en estado pastoso, que después, se solidifica. Y comprendí que posiblemente su más genuina expresividad plástica pudiera ser ésta: la de recordar (como huella genética) que había sido un material blando vertido en un molde. Y como característica de ese estado pastoso y blando, debería carecer de aristas vivas y presentar un aspecto redondeado, típico de todo material blando... Si sobre una estructura rígida, lo más diáfana posible y que mantenga las dimensiones de cálculo de la estructura de hormigón armado, se tiende un material flexible y sin textura,

como puede ser una lámina lisa de plástico (polietileno, por ejemplo) al resultado de pesadez del material blando que se da en el hormigón durante el vertido es real y efectivo y su textura es, a nivel táctil, también la suya³⁶.

El primer edificio realizado con paneles de hormigón armado con sus caras vistas tratadas con un encofrado flexible fue el Centro del MUPAG (Centro de Rehabilitación de la Mutua del Papel Prensa y Artes Gráficas, Madrid 1970). Sus fachadas, volumétricamente complejas, se componen de piezas de hormigón con aspecto pastoso, sin aristas vivas y con una textura brillante similar al del granito pulimentado al tacto (figura 2.31).



Figura 2.31. Centro del MUPAG. Madrid, 1970.

El siguiente proyecto fue la ejecución de su propio Estudio en el Cerro del Aire (1971), junto a su casa de Madrid, donde lo trasladó desde la calle Villanueva (figura 2.32).

En un solar libre con las únicas imposiciones de distancias de retranqueos de los linderos, tuvo la oportunidad de realizar todas las pruebas de cuyo resultado no estaba seguro, por lo que fue *concebido como un verdadero laboratorio de prototipos, de nuevas ideas, de incansable búsqueda de posibles soluciones³⁷*: muros de hormigón realizados *in situ* con encofrados flexibles verticales, formados por rollizos de madera y tela de gallinero; separó la iluminación de la ventilación; realizó la cubierta con piezas grandes prefabricadas y postensadas; y el pórtico de planta baja a base de piezas prefabricadas, solución ya empleada anteriormente, y que en este caso, armonizaba en el conjunto.



Figura 2.32. Estudio de Miguel Fisac en el Cerro del Aire. Madrid, 1971.

Le seguirán el hotel Tres Islas (1973), en Fuerteventura (figura 2.33), una casa de lujo para Pascual de Juan en La Moraleja (1973), en Madrid (figura 2.34), o el edificio para talleres y oficinas de la Editorial Dólar S.A. (1974), en Madrid (figura 2.35), en los que los encofrados flexibles redondean los huecos y las aristas de fachada.

³⁶ Fisac, M. (2007). *Carta a mis sobrinos: estudiantes de Arquitectura (Letter to my nephews: Architecture students)*. Cuidad Real: Fundación Miguel Fisac. p. 43 y 45.

³⁷ Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). *Opus cit.* p. 33.

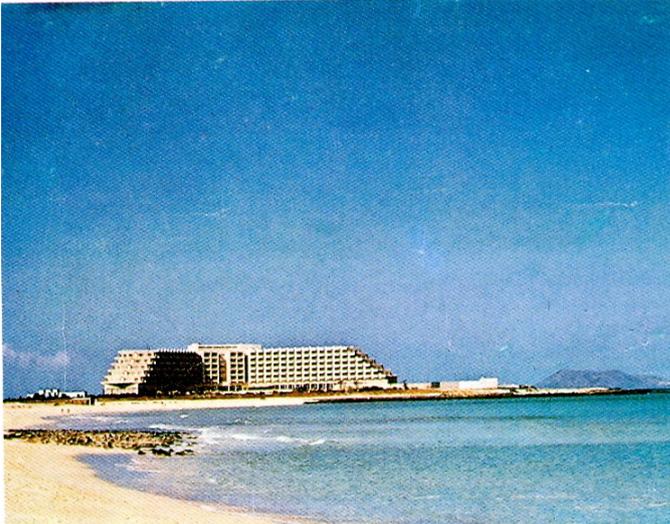


Figura 2.33. Hotel Tres Islas y detalle de fachada. Fuerteventura, 1973.

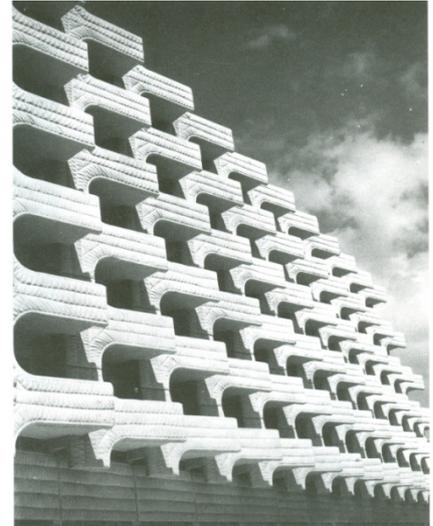


Figura 2.34. Vivienda para Pascual de Juan en La Moraleja. Madrid, 1973.



Figura 2.35 Edificio para talleres y oficinas de la Editorial Dólar S.A. Madrid. 1974.

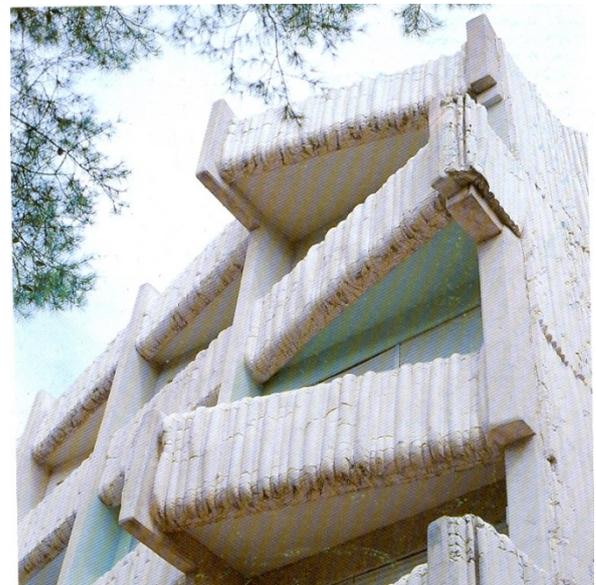


Figura 2.36 Edificio de viviendas en Daimiel (Cuidad Real), 1977.

A pesar de gozar de gran reconocimiento y prestigio profesional, como prueban los dos mencionados números monográficos de la revista *Nueva Forma* del año 1969, o la monografía que Juan Daniel Fullaondo escribe en la colección *Artistas Españoles Contemporáneos* en 1972, durante estos años, sus encargos profesionales se distanciaron y disminuyeron hasta tal punto que, aunque en 1978 construyó un edificio de viviendas en Daimiel (Cuidad Real) con sistema de fachada acolchada en vertical (figura 2.36), en 1977 cerró su estudio del Cerro del Aire por falta de encargos profesionales,

trabajando, a partir de este momento, de forma puntual y dispersa, compaginando la arquitectura nueva con la rehabilitación, la pintura, la escritura, las conferencias y las exposiciones sobre su obra.

Para los padres carmelitas realizó el complejo parroquial de Nuestra Señora Flor del Carmelo (1983), en Madrid, y un año después, la iglesia de Santiago (1984), en la localidad zamorana de Pumarejo de Tera, en cuya construcción participaron los habitantes del pueblo. Posteriormente realizó el edificio para usos sociales de la congregación Sagrado Corazón de Jesús (1985), en Ciempozuelos, provincia de Madrid (figura 2.37); el edificio de oficinas de la Caja de Ahorros del Mediterráneo (1988), en San Juan (Alicante), mostrado en la figura 2.38; y la iglesia en la urbanización Torre Güil (1991), Murcia, en colaboración con el arquitecto Emilio Vicedo.

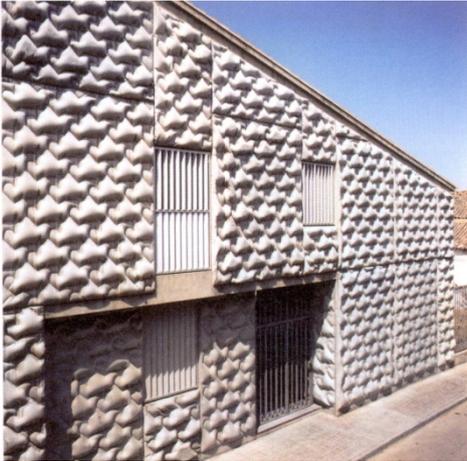


Figura 2.37 Edificio para usos sociales. Ciempozuelos (Madrid), 1985.



Figura 2.38 Edificio de oficinas de la Caja de Ahorros del Mediterráneo. San Juan (Alicante), 1988.

En el año 2000, Miguel Fisac retomó la construcción, a petición de un grupo de jóvenes arquitectos, que le proponen trabajar desinteresadamente en su estudio, realizando el Centro Cultural en Castilblanco de los Arroyos, en Sevilla (figura 2.39) y, en el año 2003, un pabellón deportivo La Alhóndiga en Getafe (Madrid). Para este último realizó su último esfuerzo en prefabricación, consistente en vigas con sección en artesa con alma curva, de longitud superior a cincuenta metros, pretensadas y ejecutadas con hormigón autocompactable, que junto a los pilares y los paneles de fachada, fueron pioneras en el uso de este tipo de hormigón en España, con lo que también al final de su carrera, la actitud innovadora de Fisac se adelanta a su tiempo (figura 2.40).



Figura 2.39. Exterior e interior del Centro Cultural en Castilblanco de los Arroyos (Sevilla), 2000.



Figura 2.40. Exterior, interior y detalle de cubierta del pabellón deportivo La Alhóndiga. Getafe (Madrid), 2003.

Anteriormente, en el año 1979 se había publicado la primera tesis sobre la arquitectura de Miguel Fisac, realizada por María Cruz Morales Saro. El propio Fisac, publicó en 1982, sus reflexiones en materia arquitectónica en *Carta a mis sobrinos* y *Mi estética es mi ética*, editado por el Museo de Ciudad Real, así como un libro sobre *Arquitectura popular manchega*, en 1985. En 1989, la obra de Fisac se reunió en un monográfico de la colección *Documentos de Arquitectura*, sucediéndose, desde entonces, las publicaciones y exposiciones sobre su obra arquitectónica.

Conmemorando su ochenta cumpleaños y como reconocimiento a su trabajo, la Escuela de Arquitectura de Múnich, organizó una exposición retrospectiva sobre su obra en 1993, rescatándolo del olvido al que había sido desterrado³⁸. El reconocimiento en nuestro país, tuvo lugar en 1994, cuando el Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España le distinguió con la *Medalla de Oro de la Arquitectura*. Su obra ha sido expuesta en las escuelas de arquitectura de Weimar y Regensburg, y tras la distinción española, en los Colegios de Arquitectos de Zaragoza, Valencia, Murcia, Bilbao, Gijón, Cádiz, Teruel, La Coruña, Toledo, Madrid, etc.



Figura 2.41. Logotipo de la Sociedad Española de Acústica.

También en 1994, la Sociedad Española de Acústica (donde fue y es muy querido) le otorgó su galardón, la Caracola de la SEA, la máxima distinción que la Sociedad tiene para las personas o instituciones de prestigio, cuyo diseño había sido realizado por el propio Fisac (figura 2.41).

En 1996 recibió el Premio Antonio Camuñas y el Ministerio de Fomento le dedicó una exposición monográfica en la sala de la Arquerías de los Nuevos Ministerios de Madrid. Fue galardonado con el *Premio Nacional de Arquitectura* en el año 2002 e investido Doctor Honoris Causa por la Universidad Europea de Madrid en el año 2004, por su aportación a la arquitectura española del siglo XX.

La Escuela de Arquitectura de Sevilla lo homenajeó, invitándolo a impartir una conferencia el 14 de febrero de 2003, dentro del ciclo *Aprendamos de los mayores*.

El 12 de mayo de 2006, a sus 92 años, cuando trabajaba en su última obra, un proyecto sobre vivienda social, basado en su última patente sobre *Procedimiento de construcción de viviendas y similares*, registrada en 1999, murió en su casa del Cerro del Aire, al norte de Madrid.

El 22 de noviembre de 2006, se constituyó la Fundación Miguel Fisac con sede en Ciudad Real, en cumplimiento del compromiso adquirido por el Colegio de Arquitectos de Ciudad Real, con ocasión de la adquisición del archivo documental completo de Miguel Fisac.

³⁸ Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). Opus cit. p. 33.

2.4. LA ARQUITECTURA RELIGIOSA

Sus intervenciones religiosas marcaron una nueva concepción del espacio eclesial, constituyendo una de las aportaciones más relevantes en la arquitectura religiosa del siglo XX. Persona de profundas convicciones religiosas, solucionó sus proyectos de iglesias apoyándose en el conocimiento del hecho litúrgico, en la percepción del espacio sagrado, en el tratamiento maestro de la luz y en la sabia utilización de los materiales y técnicas constructivas del momento, consiguiendo espacios religiosos austeros, sobrios, cargados de espiritualidad y fundamento teórico.

La arquitectura religiosa ha tenido para mí una atracción especial. Su programa y las exigencias de una liturgia presentan un cuadro muy sugestivo y concreto de necesidades. Su uso como espacio cargado de trascendencia espiritual obliga a buscar soluciones ambientales nuevas y audaces. Y, en fin, como católico, en estos proyectos se me presenta la ocasión de ofrecer a Dios mi modesto homenaje profesional.

Para mí una iglesia no es un problema arquitectónico ya conocido sino un problema arquitectónico a resolver en cada caso, según su programa, según sus necesidades, según las posibilidades económicas con que contemos. Sin despreciar las soluciones anteriores, históricas, pero tampoco atándome a ellas. Sin preocuparnos si las soluciones a que llegamos son completamente distintas a las clásicas, siempre que lleguemos a ellas honradamente, no con el deseo torcido de hacer algo chocante, raro, sino con la recta intención de ayudar a los fieles a unirse con Dios³⁹.

Fisac, definió el espacio eclesial, matizando su definición general de arquitectura, como *un trozo de aire sagrado*, con lo que *el problema de la arquitectura religiosa consiste en crear un recinto apto para la asistencia de los fieles a la Misa y a las demás prácticas litúrgicas, pero además que esos fieles se sientan envueltos en un ambiente místico... en un torbellino que les arrastre, que les eleve... que les conmueva⁴⁰.*

La técnica constructiva al edificar una iglesia no tiene por qué diferir de la de cualquier otro edificio de nuestro tiempo. Hay que tener en cuenta que además de las características necesarias y corrientes en cualquier edificio de hoy en cuanto a iluminación, visibilidad, acústica, acondicionamiento de aire, estructura, etc. existen otros factores exclusivos de una iglesia que hacen que sintamos que es un edificio sagrado⁴¹.

Años más tarde el propio arquitecto escribió:

Cuando me enfrenté por primera vez con el problema de hacer una iglesia, me pareció que la posible renovación de formas en la arquitectura religiosa, para que tuvieran la solidez y la seriedad necesaria, habían de partir de motivaciones profundas en la concepción del programa. Había que partir de que la iglesia es un lugar en donde se reúnen los fieles muy especialmente para asistir al santo sacrificio de la Misa.

Las formas tradicionales habían arrancado de este programa, pero, después, un formalismo sin motivación programática había ido amanerando rutinariamente unas formas puras en su origen.

³⁹ Conferencia impartida por Miguel Fisac en la Universidad Nacional de Educación a Distancia, mayo de 1977. En Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). Opus cit. p. 419.

⁴⁰ Fisac, M. (1957). Buscando un nuevo Arte Sacro. *Trahe Nos*, 12.

⁴¹ Morales, F. (1960). *Arquitectura religiosa de Miguel Fisac*. Madrid: Librería Europa. p. 12.

Este era el caso, por ejemplo, de las iglesias de crucero que parten del proyecto del Bramante para San Pedro y que después siguen manteniendo unas formas y unas estructuras, pero ya sin contenido, en todas las iglesias renacentistas y barrocas⁴².

En 1967, publicó un artículo titulado *Algunas consideraciones sobre el espacio arquitectónico sagrado*⁴³, donde reflexionaba sobre las características del espacio eclesial contemporáneo. *Si acaso sabemos lo que no ha de ser: ni mágico, ni sorprendente, ni escenográfico, ni lujoso... De momento, creo que hay tener la humildad de esperar, limpiando de escenografía y teatralidad, de artificialidad y fingimientos el espacio que queremos que sea sagrado, trabajando con humilde sencillez al servicio de la más estricta necesidad litúrgica, sin buscar sorpresas estructurales, sin rebuscar calidades y texturas superficiales, sin recurrir a técnicas audiovisuales electrónicas innecesarias. Solamente con la verdad: el espacio justo para cobijar la iglesia, resuelto con la técnica más eficaz y con los materiales más económicos: hierro, cemento, ladrillos, piedra, madera... y amor.*

Fisac huyó de la monumentalidad en sus iglesias, que a su vez es innato al concepto de *arquitectura humanizada*. Sin embargo, mostró un gran interés por agrupar las artes plásticas en su arquitectura eclesial, incorporando pocas imágenes pero siempre de gran calidad.

Su preocupación por las cualidades del espacio interno, le llevó a descuidar el aspecto externo de sus obras. *Las envolturas estructurales de aquellos espacios, no respondían a la elaboración que ofrecían los interiores. La justificación del autor se basaba en un desinterés consciente por la investigación de estructuras especiales para unos edificios que no las requerían ni necesitaban⁴⁴.*

Fueron más de cincuenta sus intervenciones en arquitectura religiosa, entre proyectos y obras construidas, abarcando iglesias de nueva planta, conjuntos conventuales, complejos docentes y residencias de estudiantes, así como restauraciones y rehabilitaciones.

2.4.1. LAS IGLESIAS PRECONCILIARES

En el capítulo anterior, vimos que antes del Concilio Vaticano II, las celebraciones litúrgicas centraban su atención en un foco único, que englobaba el altar, el retablo y el sagrario. Esta posición polar del altar y la postura del sacerdote de espaldas a los fieles, hizo pensar a Fisac, que se trataba de una reunión procesional dinámica, un lugar donde los fieles se reunían para marchar juntos hacia el altar y hacia el cielo, por lo que el espacio sagrado que la albergaba debería arquitectónicamente contribuir a esa situación. Se trataba de crear un trozo de aire sagrado en movimiento.

En mi concepción de una iglesia católica considero que no sólo se le presenta al arquitecto el problema de crear un recinto sagrado, un trozo de aire en que los fieles se sientan atraídos a la oración, sino que además es necesaria la creación de un cierto dinamismo hacia un punto: el altar, ya que la oración de un católico es una oración no individual e independiente sino colectiva, de comunión. Comunión que exige dirigir la atención hacia un punto singular en que se celebra el Santo Sacrificio de la Misa o en el que está el Santísimo Sacramento en la Eucaristía. Esta doble disposición, sagrada y dinámica hacia un punto, yo estimo que exige del arquitecto no una escenografía... sino sencillamente una ayuda, una disposición morfológica o de luz y color que ayude a ese dinamismo⁴⁵.

⁴² Fisac, M. (1965). Notas sobre mi arquitectura religiosa. *Hogar y Arquitectura: Revista Bimestral de la Obra Sindical del Hogar*, 57, p.46-48.

⁴³ Fisac, M. (1967). Algunas consideraciones sobre el espacio arquitectónico sagrado. *Atlántida: Revista del pensamiento actual*, 29-30, p. 528-530.

⁴⁴ Morales, M. C. (1979). Opus cit. p.25.

⁴⁵ Fisac, M. (1960). Teólogo de San Pedro Mártir de los PP. Dominicos en Madrid. *Arquitectura*, 17, p. 10.

*La luz, el color y la forma son los medios con los que el arquitecto ha de contar para conseguir su propósito, pero no ha de olvidar el medio más importante, la sincera actitud del verdadero creyente*⁴⁶.

Crear espacios de gran espiritualidad empleando la luz y el color, y conseguir el dinamismo ascensional hacia el altar, fueron los principales objetivos de su arquitectura eclesial preconiliar. Este movimiento dinámico, fruto de profundas reflexiones, fue realmente un invento suyo con el que justificar su manera de proceder, ya que, hasta 1964, año en que entró en vigor la renovación litúrgica del Concilio Vaticano II, estableciendo, de forma indirecta, la importancia de la inteligibilidad del discurso, cada vez que proyectaba una iglesia se encontraba vacío de contenido⁴⁷.

Morales, F.⁴⁸ analizó las herramientas arquitectónicas formales utilizadas por Fisac para conseguir este objetivo, agrupándolas en cuatro etapas: *dinamismo espacial por convergencia de muros ciegos*, *dinamismo de luz en fuga de color*, *el muro dinámico*, y finalmente el *dinamismo por reiteración de convergencias*.

El *dinamismo espacial por convergencia de muros ciegos* (figura 2.42 [a]), cuyo ejemplo más representativo lo constituye la capilla del colegio apostólico de los padres dominicos de Arcas Reales de Valladolid (figura 2.43), lo conseguía mediante el giro de los muros laterales desnudos haciéndolos converger hacia el altar, reforzándolo con otros elementos complementarios como la elevación del suelo y del techo hacia el presbiterio, y el aumento gradual de la intensidad lumínica hasta inundar el presbiterio de luz.

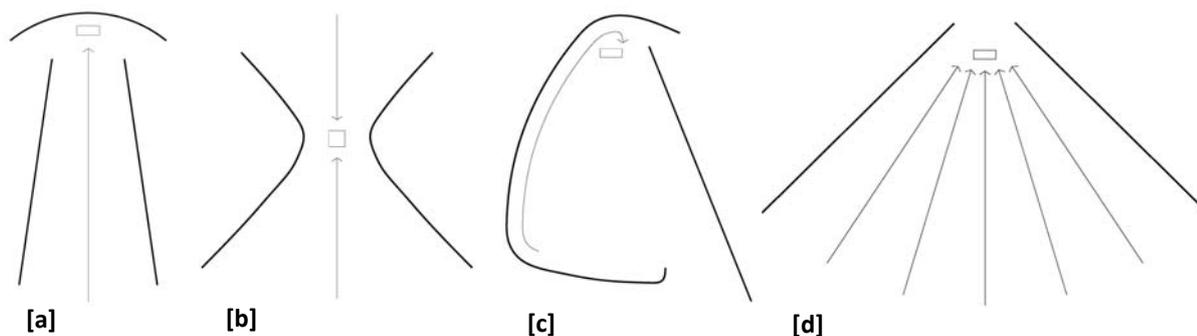


Figura 2.42. Esquema de las herramientas arquitectónicas para el espacio dinámico.

Para obtener el *dinamismo de luz en fuga de color* (figura 2.42 [b]), cuyo único ejemplo fue la iglesia del Teologado San Pedro Mártir de los PP. Dominicos de Alcobendas (figura 2.44), empleó las fugas cromáticas de las vidrieras de colores de los paramentos verticales convergentes hacia el altar. Para ello, dispuso tonos fríos e intensos en el fondo, que palidecían progresivamente hacia el presbiterio, el cual, además, se inundaba de luz cenital dorada.

El *muro dinámico* (figura 2.42 [c]), cuyo máximo exponente lo encontramos en la iglesia de la Coronación de Nuestra Señora, en Vitoria (figura 2.45), se trata de un muro envolvente curvo, continuo y liso, que envuelve el presbiterio haciendo resbalar la mirada hacia el altar, al que enfrentaba un *muro estático*, robusto y pesado, que aporta textura y que se inunda de huecos que iluminan el *muro dinámico*. De la relación entre estos dos elementos de diferente naturaleza, se obtiene la sensación subjetiva de movimiento.

Por último, el *dinamismo por reiteración de convergencias* (figura 2.42 [d]), empleado en el concurso para la iglesia de San Esteban Protomártir de Cuenca (figura 2.46), lo conseguía haciendo converger hacia el presbiterio los cerramientos laterales, que a su vez aumentaban gradualmente la intensidad

⁴⁶ Fisac, M. (1957). Opus cit.

⁴⁷ Comentario realizado por Miguel Fisac, en una entrevista personal mantenida en su propia casa en febrero de 2001, con el arquitecto Francisco López, doctorando que investigó en el marco de la línea de investigación sobre iluminación natural del grupo TEP-130 del PAIDI (Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación).

⁴⁸ Morales, F. (1960). Opus cit. p.12-14.

lumínica, las piezas estructurales de cubierta y las franjas luminosas que la disposición que dichos elementos estructurales creaban.

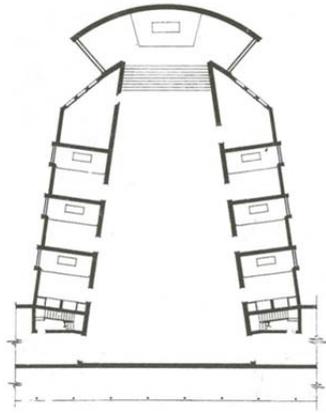


Figura 2.43. Planta de la iglesia del Colegio Apostólico Arcas Reales. Valladolid, 1952.

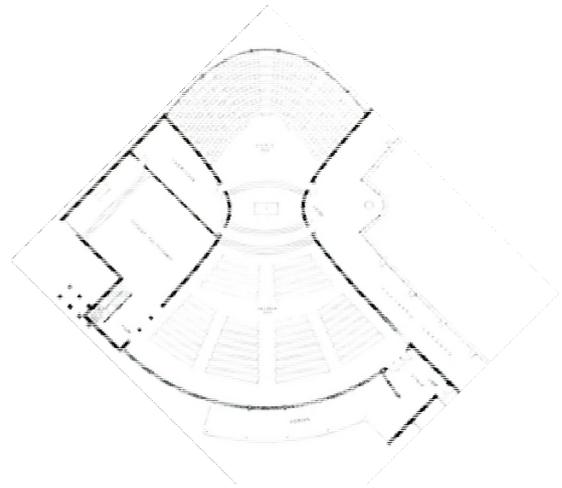


Figura 2.44. Planta de la iglesia del Teologado San Pedro Mártir. Madrid, 1955.

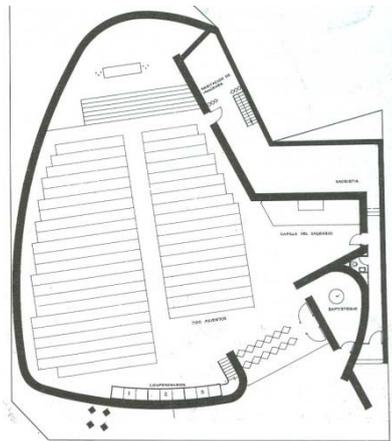


Figura 2.45. Planta de la iglesia de la Coronación de Nuestra Señora. Vitoria, 1958.

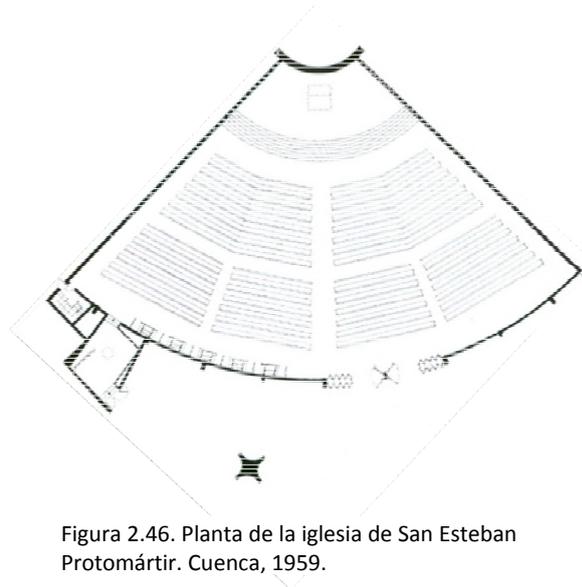


Figura 2.46. Planta de la iglesia de San Esteban Protomártir. Cuenca, 1959.

En la configuración de la planta de sus iglesias, no se aferró a ninguna tipología o simbología (cruz latina, cruz griega, basilical, etc.), sino que solucionó el espacio eclesial partiendo desde cero, reflexionando para dar respuesta tanto a los condicionantes impuestos por el programa, la liturgia y el lugar, como a los objetivos que él mismo se fijó. Según Fernández, A.⁴⁹, *un análisis más profundo y sobre todo más estructural, descubre la existencia de una tendencia positiva común a todas las plantas: la tendencia a subordinar todas las formas, planos, espacios y volúmenes, sometiéndoles a uno central, el altar como centro espiritual y material de todo el interior. Esta tendencia positiva se puede llamar centralizadora o, mejor aún, "concentradora" y es la que realmente define la planimetría moderna de las iglesias que M. Fisac llama "convergencia"*.

Iglesia del Espíritu Santo, Madrid (1942-1943)

Aunque cuando cursaba tercer curso de carrera, proyectó un oratorio muy sencillo con paredes recubiertas de tela de arpillera, esta capilla del CSIC, conocida como Iglesia del Espíritu Santo, fue su primer encargo profesional y eclesial. Se trataba de convertir el auditorio del Instituto-Escuela de la Colina de los Chopos, obra de Carlos Arniches y Martín Domínguez y en ruinas tras la Guerra Civil, en

⁴⁹ Fernández Arenas, A. (1963). *Iglesias nuevas en España*. Barcelona: Polígrafa. p. 88.

una capilla aprovechando unos muros de fachada y nave, que condicionaban la disposición en planta y parte de los alzados, tanto interiores como exteriores.

Con la inexperiencia de un recién salido de la Escuela de Arquitectura y con la carencia de un vocabulario arquitectónico propio y de su tiempo, en una España inmersa en formas historicistas, proyectó esta iglesia basándose en la planta de la iglesia mozárabe de San Miguel de la Escalada, en el repertorio de formas clásicas de Brunelleschi y la lealtad al programa religioso, en relación al altar, la luz y el ambiente.

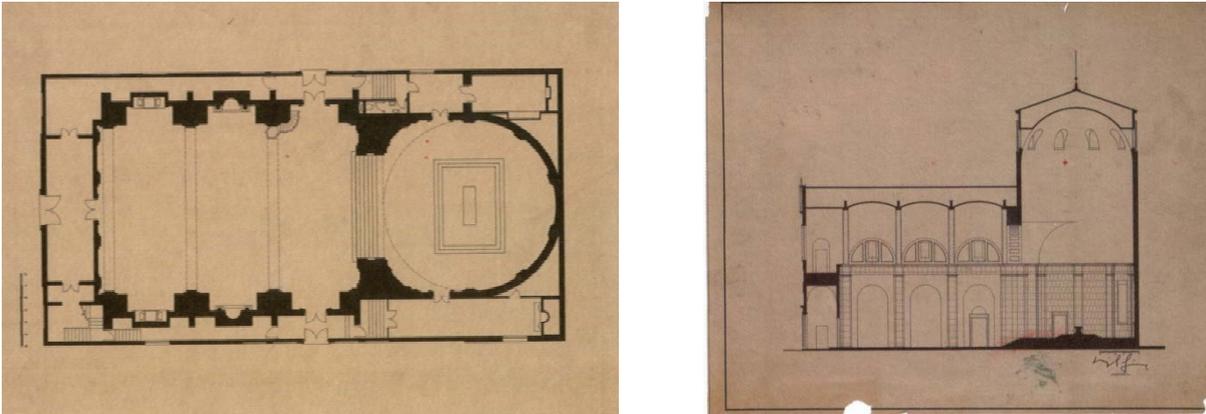


Figura 2.47. Planta y sección longitudinal de la iglesia del Espíritu Santo. Madrid, 1942.

La disposición en planta corresponde a una sola nave sin crucero, donde la deambulación se organiza mediante pasillos perimetrales exteriores al espacio sacro. La carencia de hierro de la época de postguerra española, le llevó a cubrir este espacio rectangular con unas bóvedas vaídas de construcción artesanal, tabicadas de rasilla y conformadas por cuatro arcos (dos fajones y dos formeros) de hormigón armado, reflejándose, en este primer proyecto, la capacidad inventiva del arquitecto (figura 2.47).

En el presbiterio, contenido en un cilindro visible desde el exterior y cubierto con una cúpula esférica, la entrada de luz contrasta con la penumbra de la nave, efecto que el autor desarrollará en obras religiosas posteriores.

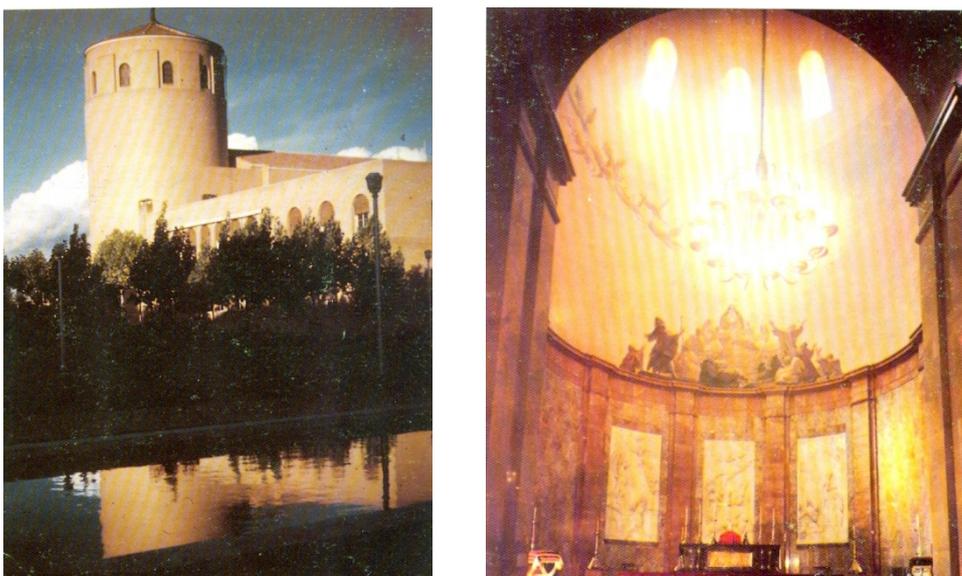


Figura 2.48. Exterior e interior de la iglesia del Espíritu Santo. Madrid, 1942.

En el exterior, los volúmenes puros y limpios realizados en ladrillo visto, contrastan con los órdenes gigantes de mármol superpuestos a la estructura del edificio en el interior. Los bancos, alfombras, candelabros y otros accesorios fueron diseñados por Fisac, mientras que el conjunto escultórico del

presbiterio se debe a Juan Adsuara y las pinturas al fresco son obra de Ramón Stolz (figura 2.48). Asimismo, en la sacristía se colocó un retablo barroco del siglo XVII.

Años después, el propio arquitecto⁵⁰ comentaba sobre esta obra, del Edificio Central del CSIC, y otros edificios para Institutos de Investigación realizados entre 1942 y 1945:

Entonces (1942-45) pareció rabiosamente moderno. Y al terminar, después de haber adquirido un profundo conocimiento de la arquitectura clásica, en especial la del Quattrocento y Cinquecento italianos; enseñanza en la que siempre he creído (también ahora) que me proporcionó una base segura en mi formación estética arquitectónica. Al terminar aquellas obras con éxito y a mi gusto, me di cuenta, sin necesidad de ningún discurso intelectual, que aquél no era un camino; que por allí no se iba a ninguna parte.

Asimismo señaló que este templo del Espíritu Santo adolecía de mala acústica, reconociendo que cuando se construyó, en el año 1943, la carestía de materiales que facilitasen condiciones óptimas de audición y el asesoramiento de expertos era absoluta⁵¹.

Dos capillas de montaña, basílica de Nuestra Señora de la Merced y oratorios

Las intervenciones religiosas de sus comienzos profesionales, incluyeron dos capillas de montaña, con soluciones basadas en esquemas populares. Se trata de la capilla de la Virgen de las Nieves, en Jaca (Huesca), realizada en 1943, muy sobria formalmente y con una cubierta y coro de madera vista. Años más tarde, en 1949, en la ermita del Ventorrillo, en la Sierra de Guadarrama (Madrid), reproduce el esquema de la iglesia del Espíritu Santo en cuanto a disposición del altar, luz y ambiente (figura 2.49).



Figura 2.49. Acuarela de Miguel Fisac, exterior e interior de la ermita del Ventorrillo. Guadarrama (Madrid), 1949.

La propuesta de Fisac para el concurso convocado por la orden de los Mercedarios para construir la Basílica Hispanoamericana Nuestra Señora de la Merced (1949), en la prolongación de la Castellana de Madrid, presentaba un planteamiento formal de tipo catedral neoclásica, buscando un equilibrio entre dignidad, modernidad, luz y color (figura 2.50). En la planta desarrolló la propuesta comenzada en la iglesia del Espíritu Santo, proponiendo una nave central abovedada y grandes capillas laterales para las celebraciones de los religiosos, a las que se accede por un deambulatorio, para no interferir en el culto de la nave, y que rodea incluso el presbiterio. El altar se ubica en la vertical de la cúpula

⁵⁰ Fisac, M. (1989). *Miguel Fisac*. Almería: Colegio Oficial de Arquitectos de Andalucía Oriental. p. 9.

⁵¹ Fisac, M. (1969). *Arquitectura y audición musical* (conferencia impartida por M. Fisac en el Ateneo de Madrid, 4 de diciembre de 1969). Crónica recogida en el diario ABC, Madrid, 5 de diciembre de 1969.

que domina exteriormente el conjunto. La propuesta ganadora del concurso para esta basílica fue la presentada por los arquitectos Francisco Javier Sáenz de Oíza y Luis Laorga.

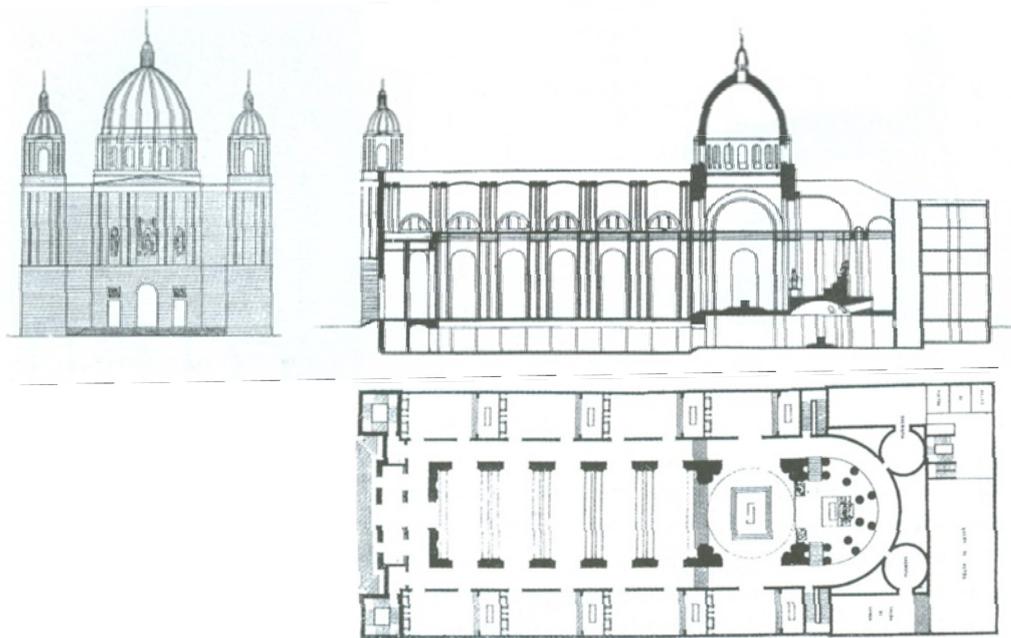


Figura 2.50. Planta, sección longitudinal y alzado de la Basílica Hispanoamericana Nuestra Señora de la Merced. Madrid, 1949.

Para la institución religiosa del *Opus Dei*, proyectó y construyó, en la década de los cuarenta, varias residencias para sus miembros, como el Colegio Mayor Manterols (1947), en Barcelona (figura 2.51), el Colegio Mayor La Estila (1947), en Santiago de Compostela (figura 2.52) o las residencias de La Pililla (1947-1952), en Piedralaves (Ávila), así como varias reformas en pisos para adaptarlos a las necesidades de esta institución. Cada una de estas residencias constaba de un recinto de pequeñas dimensiones para el culto, el oratorio, que constituía un espacio más dentro del conjunto proyectado.



Figura 2.51. Croquis del Colegio Mayor Manterols. Barcelona, 1947.



Figura 2.52. Acuarela de Miguel Fisac del Colegio Mayor La Estila. Santiago de Compostela, 1947.

En un artículo publicado, en 1949, en la revista *Arbor*, Miguel Fisac reflexionaba sobre los posibles trazados en planta para las iglesias, introduciendo la solución convergente por primera vez en

España, recurso que estaba siendo empleado en Alemania por arquitectos como Dominikus Böhm y Rudolf Schwarz.

Aunque en 1951 ensayó esta solución en dos proyectos no construidos: la capilla para el Instituto Laboral de Daimiel (Ciudad Real) y la iglesia parroquial de la Asunción de Nuestra Señora, en Escaldes, población de Andorra, (figura 2.53), serán dos encargos de los padres dominicos los que le darían la oportunidad de plasmarla de forma brillante. Se trata de la capilla del colegio apostólico de Arcas Reales, en Valladolid y la capilla del Teologado de San Pedro Mártir, en Alcobendas (Madrid).

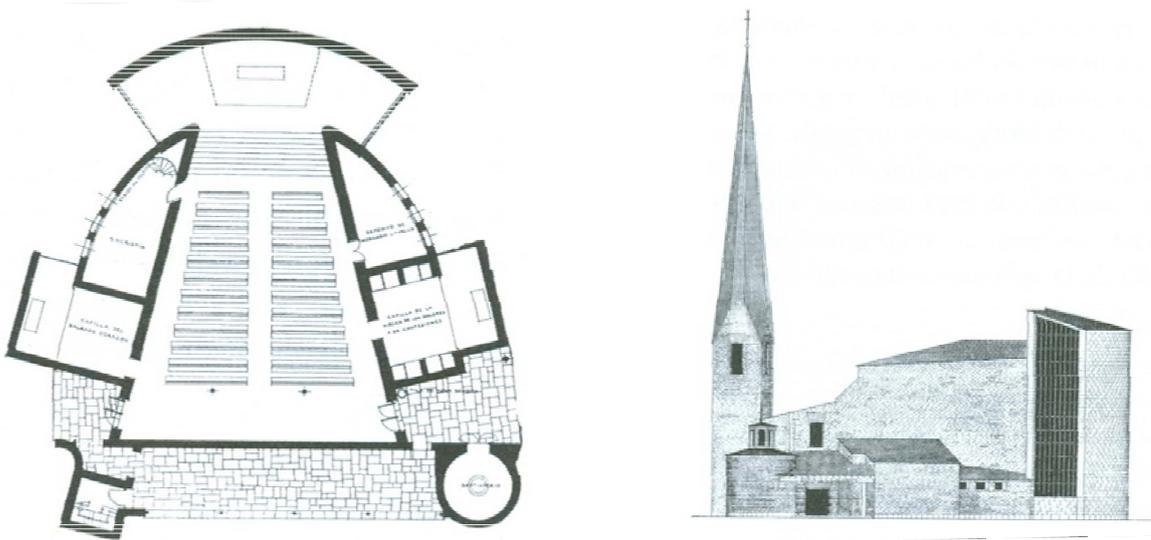


Figura 2.53. Planta y alzado de la iglesia parroquial de la Asunción de Nuestra Señora. Escaldes (Andorra), 1951.

Capilla del Colegio Apostólico de los Padres Dominicos. Arcas Reales, Valladolid (1952-1954)

Una gran planicie sin arbolado ni edificaciones, a las afueras de Valladolid, donde en el siglo XV estuvieron custodiadas las Arcas Reales, fue el solar elegido por los padres dominicos para construir un colegio apostólico.

La duplicidad del programa, formado por edificios de carácter docente y conventual para dos grupos de distinta edad, le llevó a optar por una disposición sensiblemente simétrica, con patios y jardines que optimizaban las características de orientación y soleamiento, ventilación e iluminación, y donde la iglesia, punto de reunión común, se situaba en el centro del conjunto (figura 2.54).

Los materiales empleados constituyen un alarde de nobleza y sinceridad constructiva que caracteriza la arquitectura de Miguel Fisac. En el conjunto, el material sustentante y de cerramiento es el ladrillo visto, interrumpido por cargaderos de vigas de hormigón visto para los

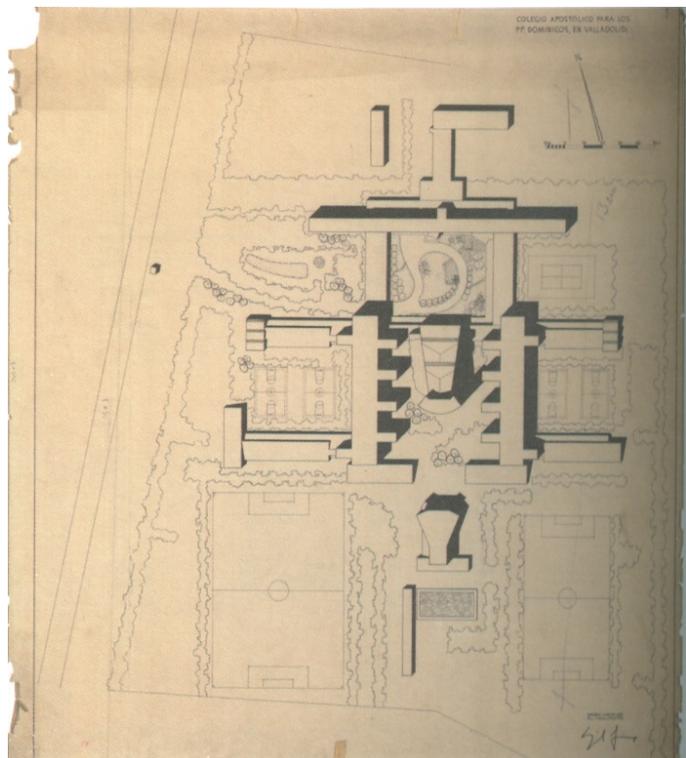


Figura 2.54. Planta de conjunto del Colegio Apostólico de los Padres Dominicos, Arcas Reales. Valladolid, 1952.

huecos de fachada y por las membranas onduladas que conforman los claustros, y que reflejan la cualidad moldeable de ese material. En la iglesia, un muro curvo visto por las dos caras, realizado en piedra caliza de Campaspero (piedra típica de los monumentos de Valladolid) con una escultura en el exterior de Santo Domingo, obra de Jorge Oteíza, se alza como la seña de identidad del conjunto que muestra referencias orgánicas (figura 2.55).



Figura 2.55. Colegio Apostólico de los Padres Dominicos, Arcas Reales. Valladolid, 1952.

Los claustros que se cierran progresivamente hacia los pabellones reflejan su admiración por la comunicación gradual y la fluidez de los espacios sin cortes bruscos, propios de la arquitectura sueca.

La iglesia, obra premiada en Viena en 1954 con la Medalla de Oro de la Arquitectura en la Exposición Internacional de Arte Sacro, fue proyectada aferrándose al programa de necesidades y replanteándose el problema del templo partiendo desde cero, apreciándose un léxico arquitectónico personal (figura 2.56). Las razones proyectuales de la iglesia, las describe el arquitecto en la memoria del proyecto⁵²:

En esta iglesia del Colegio Apostólico de Padres Dominicos, en Valladolid, se ha intentado conseguir un recinto sagrado con una expresión plástica actual... Los medios para conseguir este recinto sagrado quedan, pues, al margen de la construcción y del cálculo; hay que buscarlos en el más perfecto cumplimiento de las necesidades del programa, en la parte que podríamos llamar física: disposición de los fieles en el templo, visibilidad, acústica, iluminación, etc. También el cumplimiento de las disposiciones litúrgicas en todos sus detalles; y una tercera y más sutil propiedad que haga que este recinto, que cumple todas esas condiciones previas, materiales y canónicas, sea, sobre todo, un recinto sagrado, un lugar que invite al recogimiento y a la oración. ¿Qué medios plásticos habrá que utilizar para conseguir este propósito? En esta iglesia se ha pretendido conseguirlo por dos medios. El primero: que todo el recinto del templo tenga una forzada disposición convergente hacia el altar. El segundo, dando una máxima dignidad a este altar. De esta forma la elevación espiritual dentro del templo no será (como en el caso de las catedrales góticas) de verticalidad, sino una disposición dinámica hacia el altar y de allí hacia arriba. Este primer medio de convergencia hacia el altar se lleva a cabo por un ligero declive ascendente del pavimento del templo: por una disposición oblicua de los paramentos laterales de ladrillo visto, ciegos y limpios, y por una interrumpida y fuerte elevación ascendente del techo, con dos fajas de iluminación cenital. La dignidad del altar queda encomendada: a la nobleza de los materiales, piedra labrada en el propio altar, pavimento y paramento posterior; a la intensa iluminación

⁵² Fisac, M. (1954). Iglesia en Valladolid. *Informes de la Construcción*, 66, p. 148-149.

alta y lateral, con un cromatismo adecuado; y a la colocación del propio altar a una elevación conveniente a las necesidades visuales de los fieles y, sobre todo, a su mejor disposición. El grupo escultórico de la Virgen del Rosario con Santo Domingo, obra de Capuz, colocado en el centro del ábside: un vía crucis en bronce, de Mallo, y la composición de las vidrieras de la iglesia, representando los misterios del Rosario, dibujados por Labra, completan este conjunto.

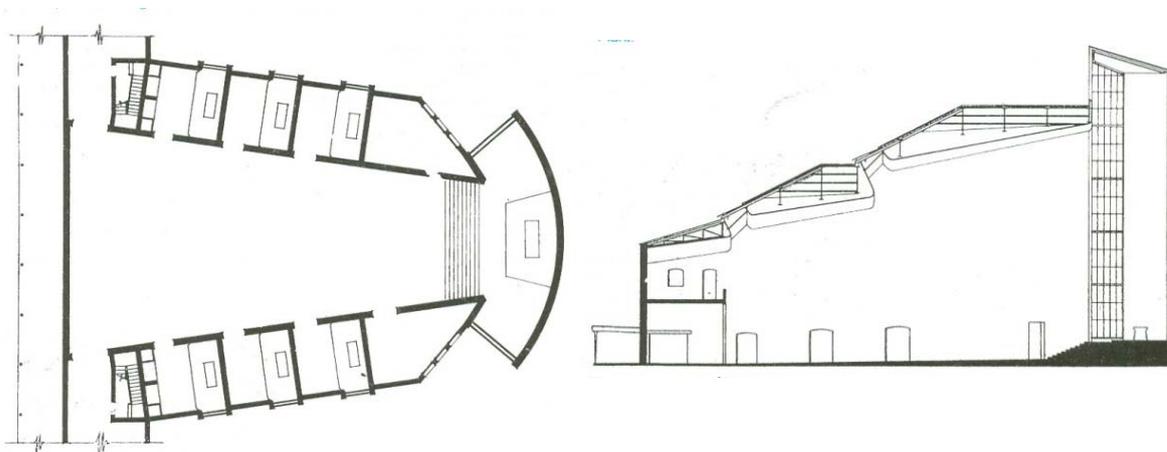


Figura 2.56. Planta y sección longitudinal de la iglesia del Colegio Apostólico Arcas Reales. Valladolid, 1952.

El deseo de modernidad, la necesidad de dar respuesta al programa y *conjugar un altar con unos fieles que van a oír la Santa Misa*⁵³, llevaron al arquitecto a proponer este novedoso espacio dinámico, configurado por muros opacos y desnudos convergentes hacia el altar; el tratamiento de la luz, con colores fríos y no excesiva en la nave, y colores cálidos y muy abundante en el ábside; el escalonamiento ascendente de las cubiertas; el ligero ascenso del pavimento; el ennoblecimiento de la pared del ábside y la sencillez iconográfica del mismo, resultando una iglesia que constituyó una pieza clave y controvertida en la renovación de la arquitectura religiosa en España (figura 2.57).

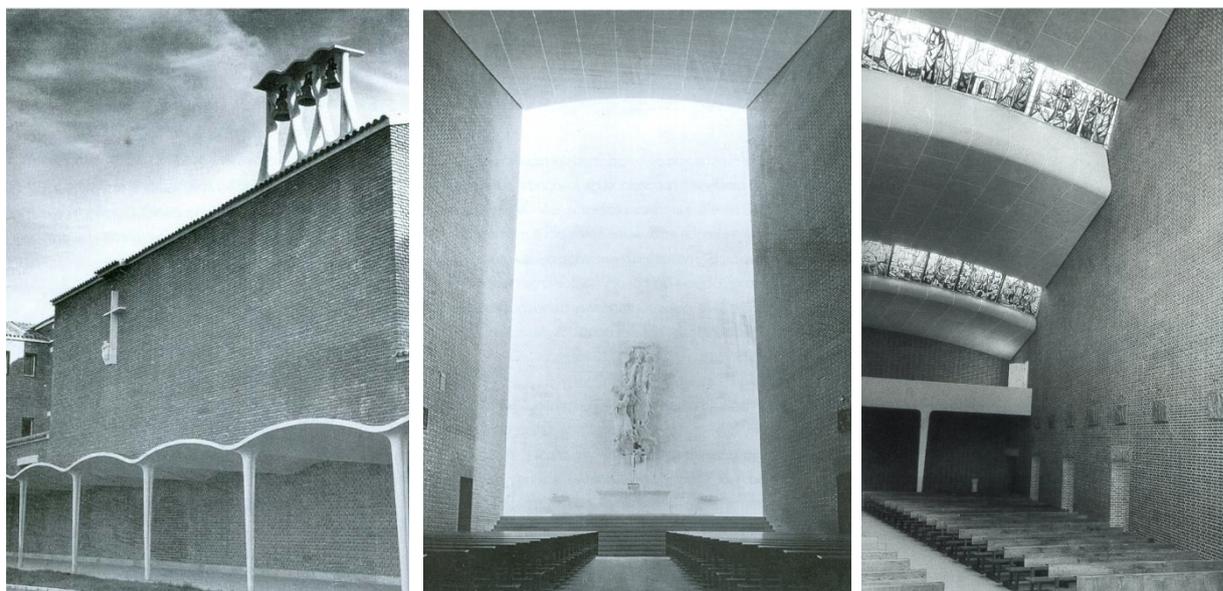


Figura 2.57. Exterior e interiores de la iglesia del Colegio Apostólico Arcas Reales. Valladolid, 1952.

⁵³ Fisac, M., Labrada, A., Laorga, L., Rojo, R., Herrero, M. y Fernández, C. (1955). Sesión crítica de arquitectura dedicada la iglesia de los P.P. Dominicos de Valladolid. *Revista Nacional de Arquitectura*, 157, p. 10-19.

Teologado de los Padres Dominicos, San Pedro Mártir. Madrid (1955-1960)

Este edificio, referencial para el conocimiento de su arquitectura religiosa, lo comenzó el mismo año en el que viajó por primera vez a Jerusalén, como arquitecto supervisor de las obras de restauración del Santo Sepulcro.

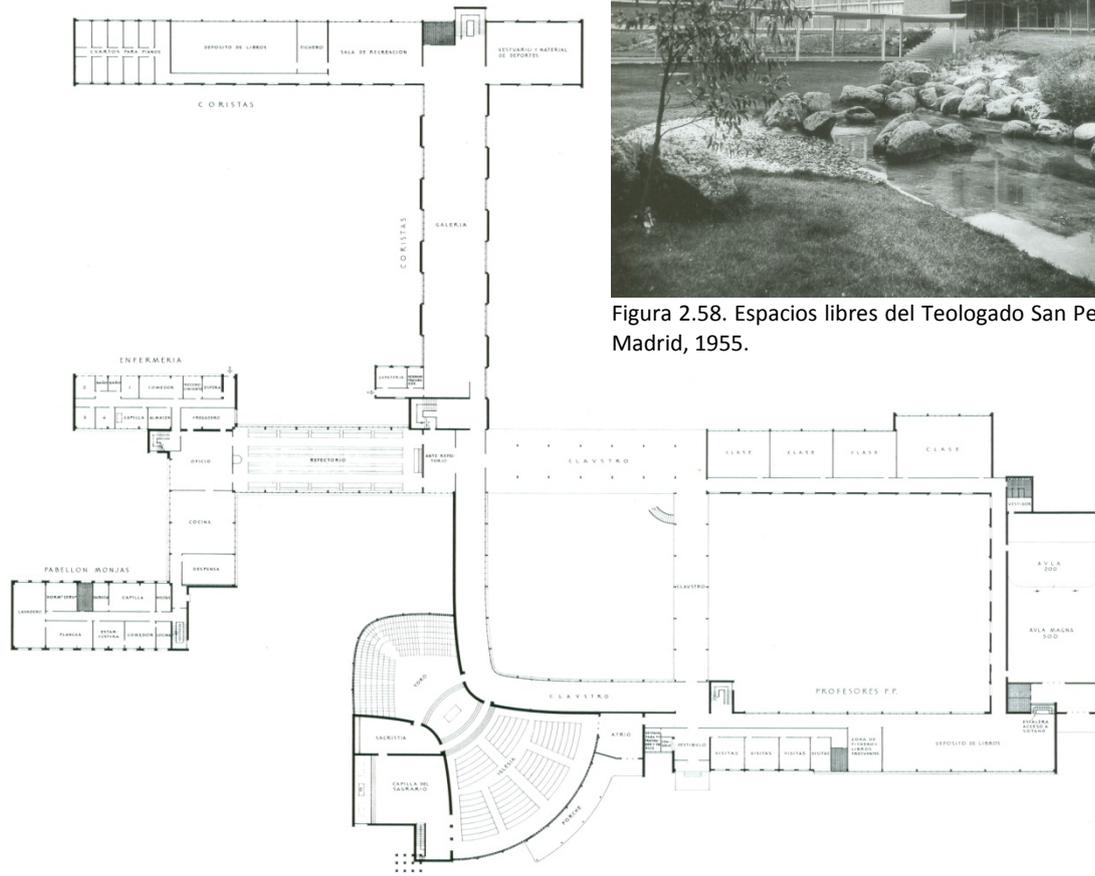


Figura 2.58. Espacios libres del Teologado San Pedro Mártir. Madrid, 1955.

Figura 2.59. Planta de conjunto del Teologado de los Padres Dominicos, San Pedro Mártir. Madrid, 1955.

Su programa contemplaba tres grupos diferentes de usuarios: profesores, teólogos jóvenes y estudiantes, que habían de vivir en espacios completamente separados, y reunirse, sin que se interfirieran, en tres lugares: coro de la iglesia, refectorio y aulas de clase. El estudio del programa y de los recorridos e itinerarios sin cruzarse, en un solar con difíciles características topográficas, pues se trataba de una vaguada bastante pronunciada, organizó la implantación y disposición arquitectónica del conjunto. Resultó un conjunto funcional, sencillo y de poca monumentalidad, acorde con la tradición dominica, formado por una serie de pabellones de poca altura, enlazados con claustros, corredores abiertos o acristalados, patios y espacios verdes de inspiración japonesa, presidido por una pieza singular: la iglesia (figura 2.58). El propio Fisac explicaba:

La iglesia tenía dos partes que los frailes querían separar: la zona del coro y la de la congregación. Yo pensé: si estuviera en medio del campo y tuviera que poner un altar, ¿cómo lo dispondría? Pues los monjes a un lado, los feligreses en el otro y las plazas que estuvieran muy giradas deberían suprimirse; así surgió la planta hiperbólica.

Una vez decidida la forma de la iglesia, empecé a jugar con el color. Quería un espacio vertical de luz blanca sobre el altar, un ámbito cálido sobre el coro, porque iba dedicado a San Pedro Mártir y a los misioneros, o sea, un poco a la sangre y otro más frío donde estaban los fieles. Entonces quise poner una ventana corrida que diera continuidad pero que fuera evolucionando⁵⁴.

Al igual que en sus anteriores iglesias, el dinamismo y la convergencia constituyeron aspectos formales configuradores del proyecto, pero la necesidad de disponer un coro para trescientos frailes y albergar, a su vez, a la comunidad parroquial con una capacidad de setecientos fieles, le llevaron a proyectar esta iglesia con planta hiperbólica, con lo que el dinamismo espacial y la convergencia resultaron dobles. Las ramas de hipérbola que configuran el espacio se cortan por arcos de circunferencias (figura 2.60).

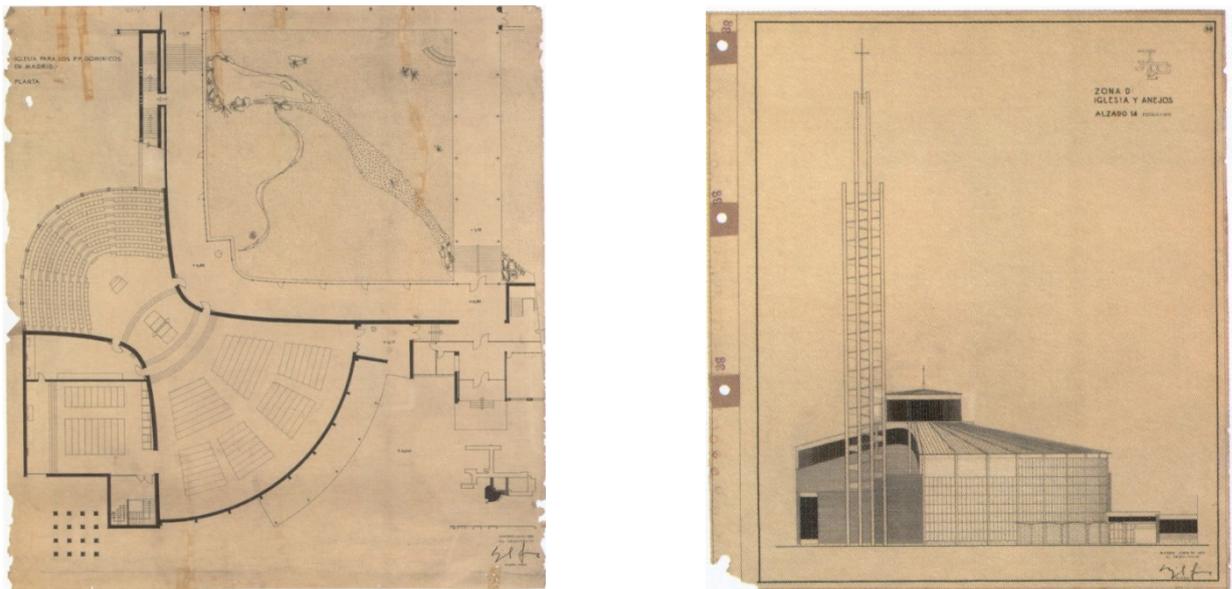


Figura 2.60. Planta y alzado de la iglesia del Teologado San Pedro Mártir. Madrid, 1955.

En el punto de mayor tensión dispuso el presbiterio elevado, con dos altares que permitían officiar las ceremonias de cara al pueblo o a la comunidad religiosa. Además de las formas convergentes, la inclinación de las cubiertas, la luz y el color, crean un espacio dinámico en continuo movimiento que *no encuentra correspondencia en el exterior, macizo y pesado⁵⁵*. La luz que penetra a través de las paredes de la hipérbola, crece en intensidad desde el fondo al presbiterio, tornándose su color, desde los azules en los extremos a los dorados que se funden con la luz cenital blanca sobre el altar. Tras el coro de los religiosos, unas vidrieras en tonos rojos, diseño de Adolfo Winternitz, reproducen el martirio de San Pedro de Verona, primer mártir dominico y titular del conjunto⁵⁶. Sobre los altares, unos cables de acero suspenden un gran Crucificado fundido en bronce, obra del escultor Pablo Serrano (figura 2.61).

⁵⁴ Pemjean, E. (2010). *Miguel Fisac: La madera en la iglesia de San Pedro Mártir y en el colegio de la Asunción*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. p. 6.

⁵⁵ Morales, M. C. (1979). Opus cit. p.84.

⁵⁶ Miguel Fisac desaprobó el resultado de dichas vidrieras, pues la introducción de piezas de color azul sin su consentimiento, desvirtuaba una composición que debía haber sido exclusivamente en tonos rojos, color que debía simbolizar el martirio de San Pedro. Tal fue su desacuerdo que consideró que las vidrieras colocaron a esta iglesia en una posición marginal.

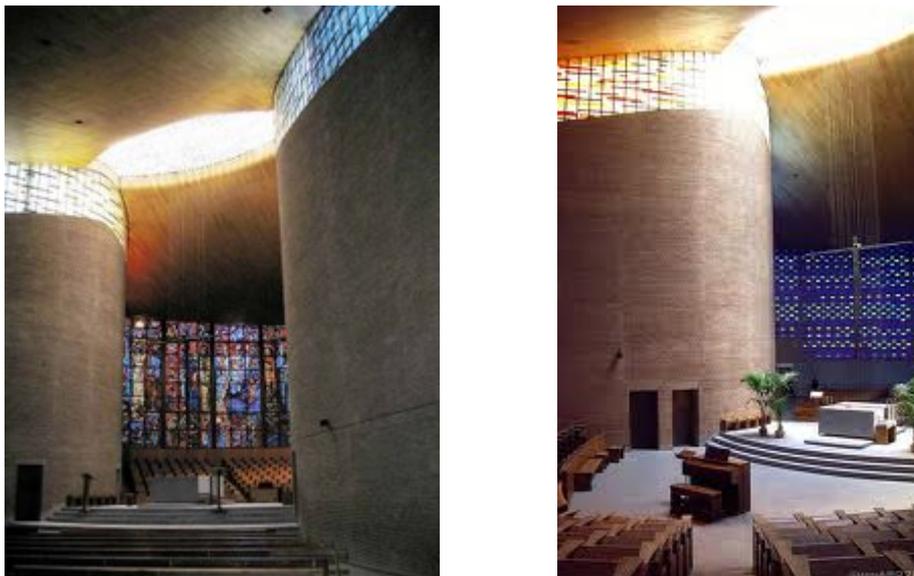


Figura 2.61. Interiores de la iglesia del Teologado San Pedro Mártir. Madrid, 1955.

De esta iglesia conventual con un programa muy especial, y que no tuvo que ser reformada tras el Concilio Vaticano II, el propio arquitecto diría, años más tarde, que *aporta poco tanto plástica como conceptualmente a mi itinerario de arquitectura religiosa*⁵⁷.

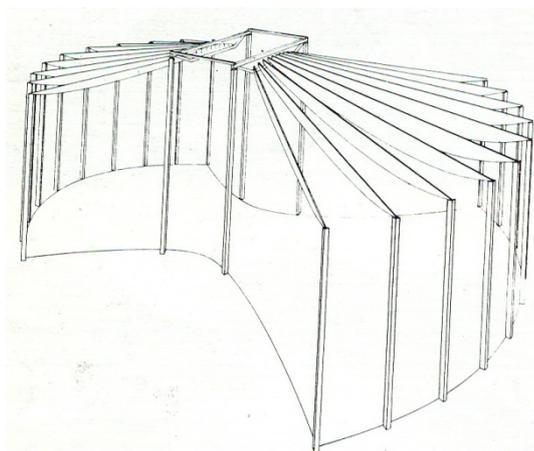


Figura 2.62. Esquema estructural de la iglesia del Teologado San Pedro Mártir según M.C. Morales.

La estructura del conjunto era porticada de hormigón con cerramientos de ladrillo hueco visto, según su patente, quedando el hormigón visto en algunas piezas como las galerías de los claustros, el pórtico adosado al muro exterior de la iglesia y la torre-campanario, formada por doce pilares con sección cuadrada y sesenta y cuatro metros de altura. La estructura de la iglesia, realizada también en hormigón, quedaba oculta pero su forma era comparable a la de dos libros abiertos unidos por el lomo (figura 2.62). Las fachadas laterales de la iglesia que formaban la hipérbola, eran muros de carga de ladrillo macizo de hasta dos pies de espesor (figura 2.63).

Este conjunto conventual lo proyectó en un momento de su trayectoria profesional en el que se encontraba inmerso en la creación del espacio interior y la veracidad expresiva de los materiales. Fisac reconoció haber descuidado la estética de las fachadas exteriores, comprendiendo que debía rectificar, pues son las superficies que configuran el espacio urbano.

⁵⁷ Fisac, M. (1965). Opus cit.

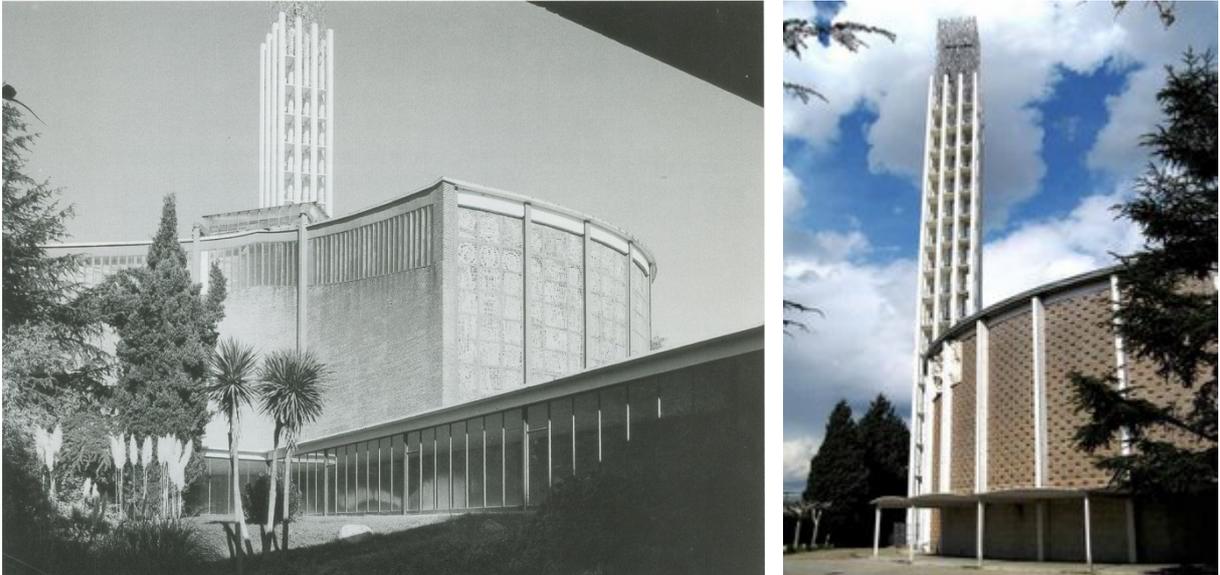


Figura 2.63. Exteriores de la iglesia del Teologado San Pedro Mártir. Madrid, 1955.

Iglesias de muro dinámico (1953-1964)

Durante estos años, Miguel Fisac desarrolló siete proyectos eclesiales, que aunque no todos se construyeron. Se caracterizaron por el estudio del dinamismo espacial empleando lo que él mismo denominó como *muro dinámico*. *Su consecuencia arquitectónica primordial fue la asimetría, desarrollada tanto en planta como en alzado, y que precisamente será la clave del movimiento del espacio*⁵⁸.

En las iglesias proyectadas entre 1953 y 1957, utiliza el recurso de los muros convergentes, con la salvedad de que ahora uno de esos muros se prolonga y envuelve el presbiterio. Entre 1958 y 1964, la característica común de sus iglesias es la presencia de un muro envolvente curvo y continuo que delimita tres lados del recinto eclesial, correspondiendo a soluciones de mayor complejidad y madurez. *La dirección que se imprime al espacio, deja de ser la que puede representar un vector centrado dirigido hacia el altar, para adoptar una dirección curva, resbalando sobre el muro, se trata de un acercamiento menos rígido, pero también con la tensión que proporciona en todos los casos la asimetría*⁵⁹.

La primera de estas iglesias, proyectada en 1953, es la realizada para el Instituto de Enseñanza Media y Escuela de Comercio en Málaga (figura 2.64). Como el programa del edificio incluía un salón de actos y una capilla con las mismas superficies, Fisac inscribió ambos recintos en un rectángulo que, al dividirlo por la diagonal, resultaron dos espacios convergentes, disponiendo en la zona más estrecha de éstos, el ábside de la iglesia y el escenario de salón de actos. Esta diagonal medianera, ciega y lisa en el interior de la iglesia, le pareció que contribuía a crear el buscado dinamismo espacial. A su vez, en la capilla, este muro medianero compartido y liso se prolonga, aunque sin solución de continuidad, envolviendo al presbiterio, que ahora sólo recibe luz por un lateral, pues esta solución exigía la supresión de una vidriera vertical del ábside. Frente a este muro continuo, con textura lisa, superficie blanca, iluminación directa desde el lado opuesto y que dirige la mirada hacia el altar, el otro muro adquiere su condición de estático, con su textura rugosa, horadado por huecos y cargado de obstáculos, deteniendo e interrumpiendo el desplazamiento.

⁵⁸ Fernández Cobián, E. (2005). Opus cit. p. 294.

⁵⁹ Morales, M. C. (1979). Opus cit. p. 88.

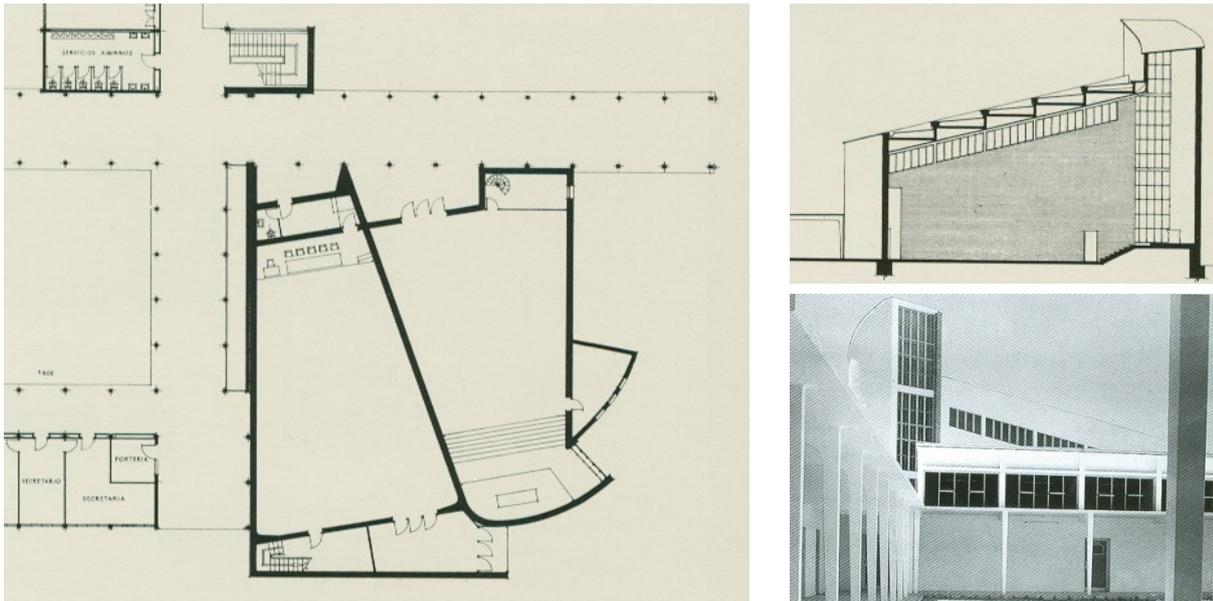


Figura 2.64. Planta, sección longitudinal y exterior de la iglesia de la Escuela de Comercio. Málaga, 1953.

La propuesta de Miguel Fisac para el concurso del templo parroquial de San Florián de Viena (1956), presentaba una clara definición de los muros estático y dinámico. En la planta aparece un muro dinámico más abierto, lo que supone mayor aceleración; y en alzado, este muro, con textura lisa y resaltada iluminación, se prolonga rodeando el ábside y se curva en altura hasta unirse con la vidriera que recorre la segunda rama de la parábola. Por contra, un muro de ladrillo de textura irregular, con aperturas para capillas laterales, cortado y coronado por una vidriera corrida que recoge la cubierta parabólica, aporta pasividad al espacio (figuras 2.65 y 2.66).

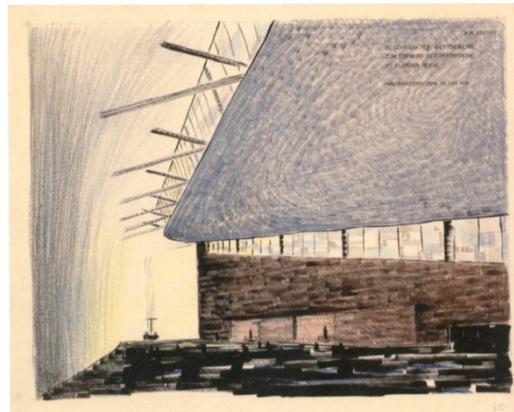


Figura 2.65. Perspectiva interior hacia el altar del templo parroquial de San Florián. Viena, 1956.

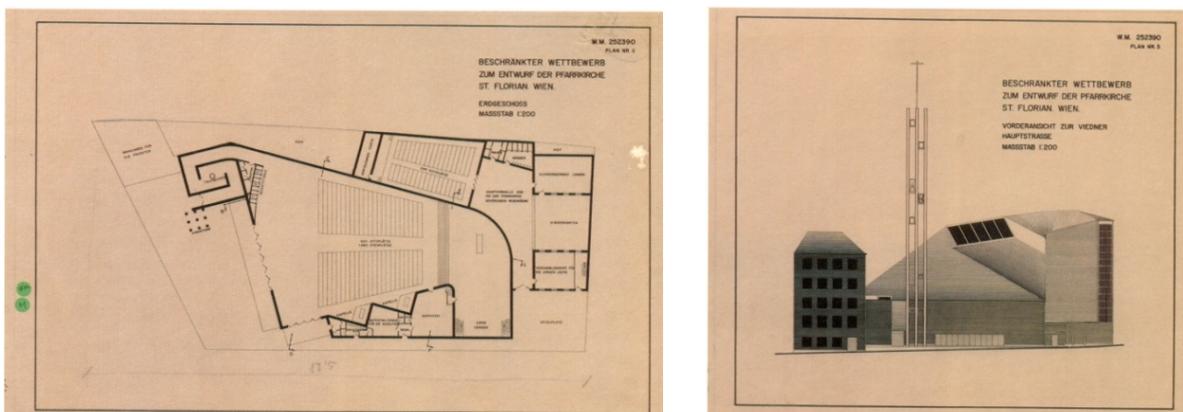


Figura 2.66. Planta y alzado del templo parroquial de San Florián. Viena, 1956.

El criterio de composición, que el arquitecto expuso en la memoria de este proyecto, se reproduce a continuación:

Una iglesia es lugar de reunión de fieles para celebrar los sagrados misterios y para orar. Es por tanto condición esencial la de valorar esa atracción de todos los asistentes hacia ese punto singular que es el Altar. (...) Hay que procurar una completa comunicación de los fieles con el Altar. Esta comunicación, sin embargo, no puede estar exenta de dignidad y de jerarquía. (...) El problema que se plantea es el de proyectar un recinto espacial en donde los fieles se sientan dinámicamente atraídos hacia el Altar. Este dinamismo se estudia en este anteproyecto con todo cuidado por varios medios: por la luz, por la forma y por la calidad de los materiales⁶⁰.

El proyecto ganador fue el presentado por el arquitecto alemán Rudolf Schwarz, construyendo la iglesia en colaboración con su compañero Hubert Friedl (1956-63).

El proyecto no construido para la iglesia parroquial en Ayamonte (Huelva), realizado en 1957, reproduce en planta la propuesta para la iglesia de Viena (figura 2.67). La búsqueda de una estructura que, con la mayor economía posible cumpliera los requisitos necesarios, le llevó a plantear una estructura mixta de hormigón armado y perfiles laminados de acero. De este modo, en la cubierta dos grandes vigas metálicas, una en el centro y otra en el lado derecho, arriostran una serie de pórticos transversales de hormigón que cambian de cota en el encuentro con la viga central, lo que permite introducir una ventana corrida, que consigue el mismo efecto que las vidrieras en la iglesia de San Florián. Por la longitud de las cubiertas resultantes y la pluviometría de la zona, realizó las vigas de hormigón con sección en forma de V, funcionando como inmensos canalones que sobresalen del plano de fachada. La resolución de esta cubierta refleja, de forma incipiente, la preocupación e investigación estructural del arquitecto, que más tarde cristalizará con sus *vigas huesos*.

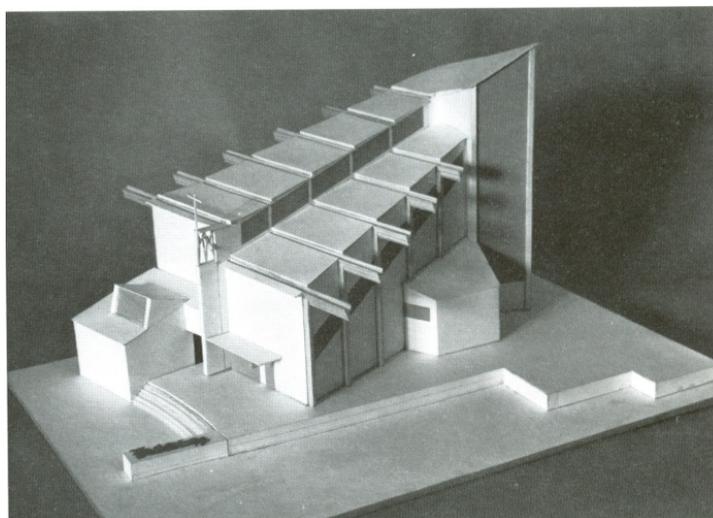
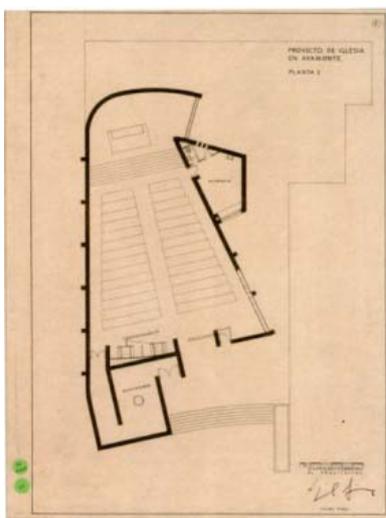


Figura 2.67. Planta y maqueta de iglesia parroquial. Ayamonte (Huelva), 1957.

La investigación continúa en la iglesia para el centro parroquial del barrio del Zofío, en Madrid (1957-1958), un proyecto no construido en el que el muro dinámico que envuelve el presbiterio, también se prolonga por el extremo opuesto, convirtiéndose en un muro envolvente que cierra tres fachadas con un único gesto, lo que hace al muro opuesto, aún más estático. En alzado, las tres fachadas de la iglesia se funden con el muro dinámico, apreciándose la elevada inclinación de la cubierta hacia el ábside. Al igual que en anteriores iglesias, el arquitecto enfatizó la dinámica hacia el altar, mediante el tratamiento de la luz, en intensidad y color (figura 2.68).

⁶⁰ Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). Opus cit. p.166.

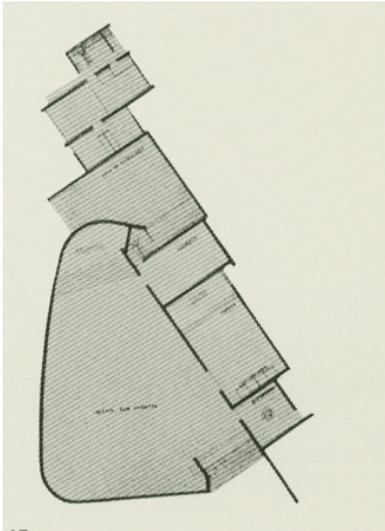


Figura 2.68. Planta del centro parroquial del barrio del Zofio. Madrid, 1957.

Como indicamos en el capítulo primero, a finales de los años cincuenta, la diócesis de Vitoria promovió la construcción de cinco nuevas parroquias, cuyos proyectos fueron realizados por los arquitectos relevantes del momento. Uno de ellos, la iglesia parroquial de la Coronación de Nuestra Señora, fue proyectado y ejecutado por Miguel Fisac.

El primer anteproyecto, realizado en 1957, presentaba semejanza con sus iglesias anteriores a 1958, con un muro posterior diferenciado del muro dinámico. Sin embargo, el proyecto definitivo, realizado en 1958 y construido posteriormente, refleja un avance y una madurez en aspectos como la iluminación, el muro envolvente y el dinamismo espacial. Una sucesión de pequeños huecos en el muro estático realizado en mampostería, iluminan la nave, sustituyendo a la vidriera corrida que empleaba anteriormente. El muro dinámico, continuo, encalado y de textura lisa, envuelve el presbiterio y se prolonga en el fondo de la iglesia, dotando al espacio de gran dinamismo. El resultado fue una iglesia

de trazado orgánico y materiales tradicionales, de planta asimétrica, con el baptisterio integrado en el conjunto, en la que el eje principal no coincide con la línea que une la entrada y el altar, sino que discurre junto al muro curvo (figura 2.69).

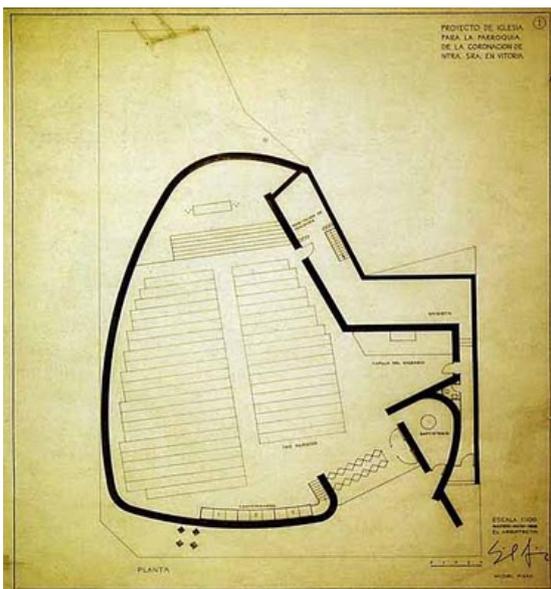


Figura 2.69. Planta e interior de la iglesia parroquial de la Coronación de Nuestra Señora. Vitoria, 1958.

La explicación de esta iglesia por el propio arquitecto manchego se reproduce a continuación:

Las soluciones tanto técnicas como estéticas de este proyecto se han encaminado, por una parte, a cumplir, con la mayor fidelidad posible, las prescripciones litúrgicas de un templo católico, unidas a las propiamente materiales, tales como conseguir una óptima visibilidad, acústica, iluminación, ventilación, y demás condiciones físicas que debe tener el recinto. Sin embargo la esencial característica ha de ser la de conseguir un ambiente de espiritualidad; una iglesia ha de ser un trozo de aire sagrado que ayude plásticamente, sensorialmente, a los fieles a acercarse a Dios.

Para conseguir este acercamiento de los fieles hacia Dios y crear un ambiente de comunión en la asistencia al Santo Sacrificio de la Misa se ha intentado conseguir un cierto dinamismo plástico hacia el altar. Este dinamismo está encomendado a dos factores: uno es la conjunción de un muro envolvente (muro dinámico), blanco, liso, sin

ningún punto de referencia que obligue a la mirada a resbalar tangencialmente al fondo del ábside, donde se sitúa el altar, contraponiendo un muro de sillarejo visto (muro estático), más bajo, con una iluminación en celosía, y en el que se colocan una imagen de la Virgen, el Vía Crucis, la capilla del Santísimo Sacramento y la comunicación al baptisterio. De la conjunción de estas disposiciones paramentales se pretende conseguir ese dinamismo espacial. De otra parte, la fuerte iluminación del ábside, conseguida por un gran ventanal no visible directamente por los fieles; la ordenación cromática en fuga de las celosías del muro de piedra, unido a una disposición ascendente de techo y suelo, son los medios que se utilizan para conseguir esta tensión concentrada en el altar⁶¹.

La estructura de la cubierta, que se realizó mediante cerchas triangulares de perfiles metálicos apoyadas en los muros perimetrales, se ocultaba con el techo continuo de madera. La marquesina de entrada a la iglesia, el cerramiento superior de la entrada y el coro, se realizaron en hormigón visto mostrando la textura leñosa del encofrado, así como la torre-campanario formada por cuatro pilares de sección cuadrada (figura 2.70).

En el interior, el crucifijo y el Vía Crucis fueron realizados por Pablo Serrano y las vidrieras por Francisco Farreras.

Esta iglesia de Vitoria fue considerada por la crítica europea como una obra maestra de la arquitectura contemporánea.⁶² En ella, Fisac logra alcanzar los objetivos buscados en su camino, consiguiendo definir el espacio sagrado preconiliar como un ámbito focalizado, determinado por un muro recto horadado por huecos y un muro curvo, liso, iluminado indirectamente y que resbala la mirada hacia el altar. Paradójicamente, una vez que ha llegado a la cumbre con esta tipología, abandonará este camino al comenzar un nuevo proyecto de iglesia: el concurso para la iglesia de San Esteban Protomártir de Cuenca en 1959.



Figura 2.70. Exterior de la iglesia parroquial de la Coronación de Nuestra Señora. Vitoria, 1958.

Diez años después de la consagración del templo, a finales de la década de los sesenta, Fisac recibió el encargo de adecuar el presbiterio a las disposiciones de la nueva liturgia introducida por el Concilio Vaticano II.

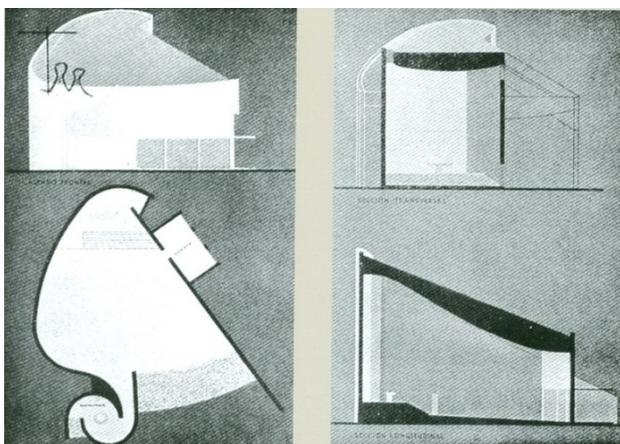


Figura 2.71. Capilla en la finca San Miguel y el Pas. Huesca, 1958.

También en 1958, mientras proyectaba la iglesia de Vitoria, recibió el encargo de realizar una capilla, que finalmente no se construyó, para la familia Raventós en la finca San Miguel y el Pas, en Huesca (figura 2.71). Frente al habitual muro recto, un muro curvo con tres puntos de inflexión, movilizaba el espacio interior. La cubierta, también ascendente hacia el altar, incorporaba un lucernario junto al muro dinámico, bañándolo con luz rasante.

Con este proyecto, se cierra la etapa del *dinamismo espacial* con el muro curvo en su

⁶¹ Fisac, M. (1958). Las nuevas parroquias de Vitoria. *Revista Nacional de Arquitectura*, 196. Madrid. p.1-15.

⁶² Kidder, G.E. (1964). *The New Churches of Europe (Las Nuevas Iglesias de Europa)*. London: The Architectural Press. p. 240.

arquitectura religiosa, comenzando un nuevo ciclo que caracterizará tanto su arquitectura civil como la religiosa.

En su proyecto para el concurso de la iglesia parroquial de San Esteban Protomártir, en Cuenca (1959), el dinamismo y el movimiento hacia el altar, buscado en sus iglesias anteriores al Concilio Vaticano II, lo conseguirá con el llamado *dinamismo por reiteración de convergencias*, según definía Felipe Morales.

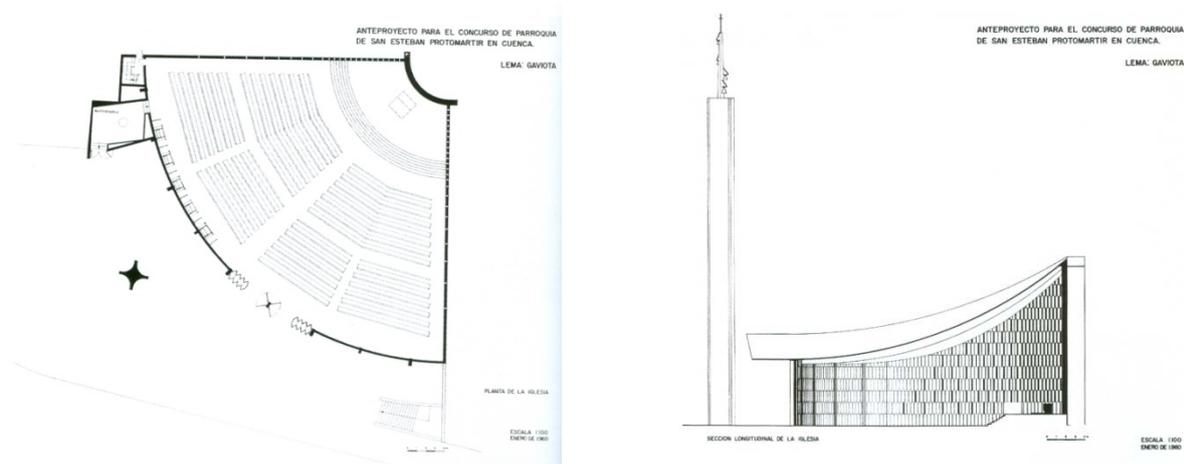


Figura 2.72. Planta y sección longitudinal de la iglesia parroquial de San Esteban Protomártir. Cuenca, 1959.

Al igual que otros participantes en el concurso, Fisac plantea la iglesia en forma de cuarto de círculo, configurando y dando continuidad a la esquina redondeada del solar. En un espacio delimitado con dos muros rectos perpendiculares y dos muros curvos, Fisac ensaya los temas que ya había planteado en otras iglesias: la planta convergente, la sección ascendente y fugada hacia arriba y los muros de cerramiento dinámicos (figura 2.72). Pero al mismo tiempo, apunta hacia un espacio asambleario transversal más que al modelo procesional-longitudinal, favoreciendo el sentido comunitario y participativo de los fieles, adelantándose a las intenciones renovadoras del Concilio Vaticano II, que marcarán el trazado de sus iglesias a partir de 1965.

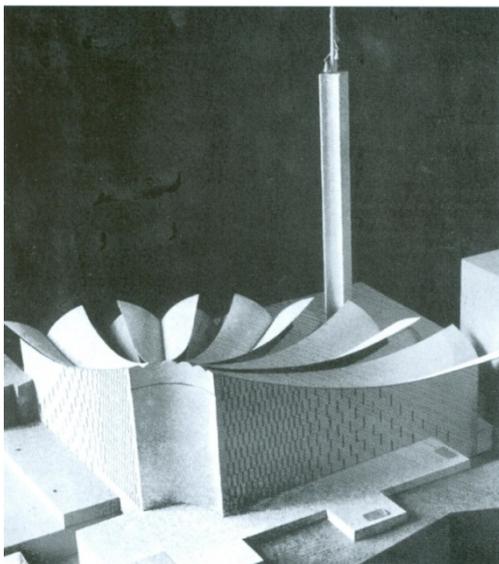


Figura 2.73. Maqueta y recreación virtual del interior de la iglesia parroquial de San Esteban Protomártir. Cuenca, 1959.

Siguiendo con la investigación estructural iniciada en el proyecto para la iglesia parroquial en Ayamonte (Huelva), para este concurso plantea, por primera vez, una solución de cubierta, que resuelve con una pieza las solicitaciones estructurales, la iluminación natural y la recogida de aguas. Consta de nueve vigas de hormigón pretensado en forma de V, con luces superiores a treinta metros,

y dispuestas de forma radial entre el muro circular perimetral y el ábside. Vigas de diferente tamaño, cuyas secciones recuerdan a alas de gaviotas en vuelo, se van alternando, permitiendo que entre ellas la luz cenital se introduzca en el interior de la iglesia, lo que provoca una convergencia luminosa hacia el altar (figura 2.73).

A dicha convergencia de intensidad luminosa también contribuyen los huecos de los muros perimetrales, más numerosos conforme nos acercamos al altar (figura 2.73). *Es un muro pensado desde el interior y funciona escenográficamente en tanto que el número y posición de las ventanas no responde a una lógica de relación interior-exterior, sino a un deseo de espacialidad y luminosidad que se agota más allá del propio límite del muro*⁶³.

Una distribución sin deficiencias, un interior cuidado y acorde con las normas litúrgicas, pero un aspecto exterior con indudables valores estéticos que desentonaba del ambiente de la ciudad, unido a un sistema constructivo realizable en aquel momento aunque entrañando serias dificultades, fueron, a juicio del jurado del concurso, las razones que le hicieron merecedor del segundo puesto. El primer premio lo obtuvo el proyecto presentado por los arquitectos José Luis Esteve y José Luis Rokiski.

Otras intervenciones eclesiales preconciarias

En 1959, en la localidad de Villafrea de la Reina (León), proyectó una iglesia rural radicalmente distinta, que recuerda a las realizadas por Rudolf Schwarz en Aquisgrán o en Düren. Con un juego de cubiertas a un agua, dispuso una planta rectangular con el presbiterio elevado, donde el altar, desplazado del eje longitudinal, se iluminaba por un gran lucernario. Un pequeño atrio de acceso, la sacristía, el coro y la torre completaban el conjunto eclesial, que no llegó a construirse (figura 2.74).

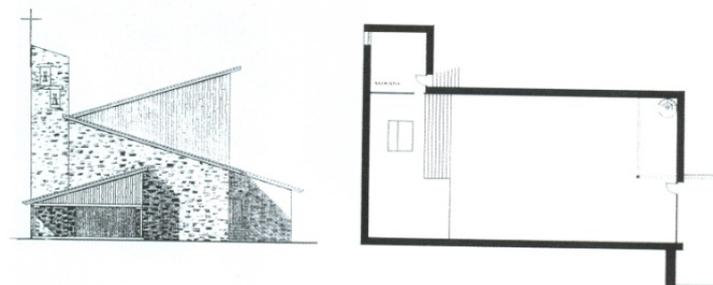


Figura 2.74. Planta y alzado de iglesia rural. Villafrea de la Reina (León), 1959.

Para el Instituto de Enseñanza Media Nuñez de Arce, construido en Valladolid varios años antes, proyectó una capilla en 1961, que aunque no se construyó, tuvo como idea fundamental el sentido comunitario de las celebraciones iniciado en el proyecto de Cuenca, y que fue expresado en este caso con una planta cuadrada y el altar situado en el centro.

Para la escuela apostólica de Misioneros del Espíritu Santo, en Calahorra (Logroño, 1961-1963), proyectó una capilla con trazado similar al proyecto de Cuenca pero sólo se construyó la cimentación de la misma.

En 1964 en la localidad onubense de Punta Umbría, construyó una iglesia parroquial con dos condicionantes antagónicos: debía tener mucha amplitud pero contaba con unos mínimos recursos económicos. Con estas premisas, Fisac proyectó una iglesia formada por naves dispuestas en forma de abanico de distinta altura, que se irían construyendo conforme la financiación lo fuera permitiendo. Propuso el sistema constructivo más sencillo y económico del momento para un edificio de estas características: muros de carga de ladrillo, de pie y medio de espesor, que servían de apoyo a una estructura metálica tridimensional, y una cubierta formada por tableros de rasilla y tejas planas. La comunicación entre las naves estaba prevista mediante huecos triangulares sin arcos de

⁶³ Asensio-Wandosell, C. (2004). Opus cit. p. 35.

descarga en los muros, con lo que las obras podían hacerse con mano de obra poco cualificada. La estética del conjunto respondía con el ambiente marineru del lugar (figura 2.75).

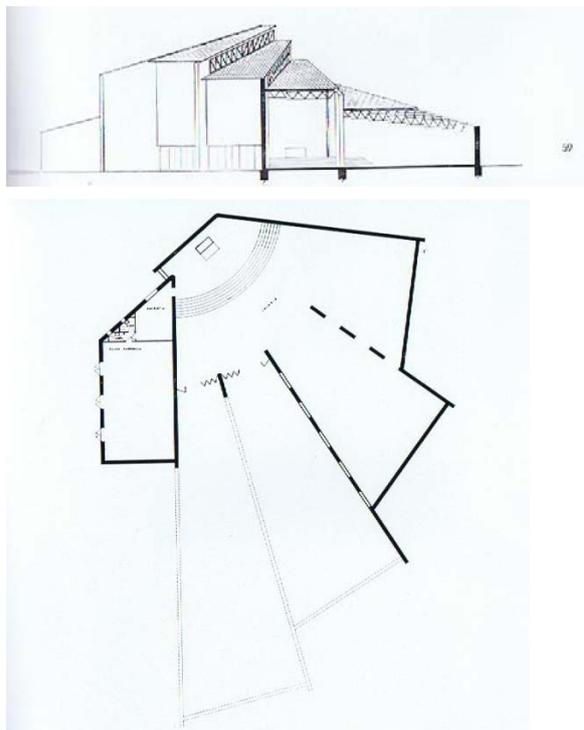


Figura 2.75. Planta (con esquema de la posible ampliación) y sección de iglesia parroquial. Punta Umbría (Huelva), 1964.

Los proyectos que realizó entre 1963 y 1966 para la ermita en la Costa de los Pinos, en Son Servera (Mallorca), ninguno de los cuales pudo construir, definen perfectamente los conceptos de arquitectura religiosa preconiliar y postconiliar de Miguel Fisac. En la propuesta preconiliar, persistía la focalización en el altar y el muro dinámico, mientras que la versión postconiliar muestra la disposición asamblearia que desarrollará en su arquitectura eclesial posterior (figura 2.76).

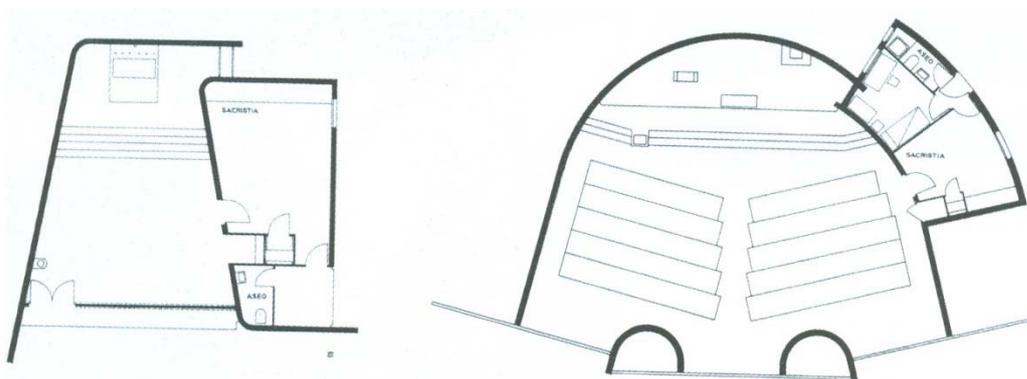


Figura 2.76. Planta de las versiones preconiliar y postconiliar de la ermita en la Costa de los Pinos. Son Servera (Mallorca), 1963-1966.

De construcción coetánea a la entrada en vigor de la reforma litúrgica del Concilio Vaticano II, en la iglesia parroquial de Nuestra Señora del Pilar del pequeño pueblo oscense de Canfrac (1963-1964), Fisac se adelanta recogiendo en su proyecto algunas premisas que establecerá el concilio, fruto del ambiente de renovación que años antes se respiraba.

En una ladera rocosa y con pendiente muy pronunciada, dispuso un edificio con carácter alpino, integrado con la naturaleza, respetando el terreno natural y el arbolado existente. El programa de necesidades del proyecto se organizó teniendo en cuenta las características topográficas del terreno

y las condiciones climatológicas, que al ser un lugar muy frío y nevado gran parte del año, llevaron al arquitecto a plantear unas cubiertas con pendientes muy acusadas y a emplear materiales locales o ligeros, por las dificultades para el transporte.

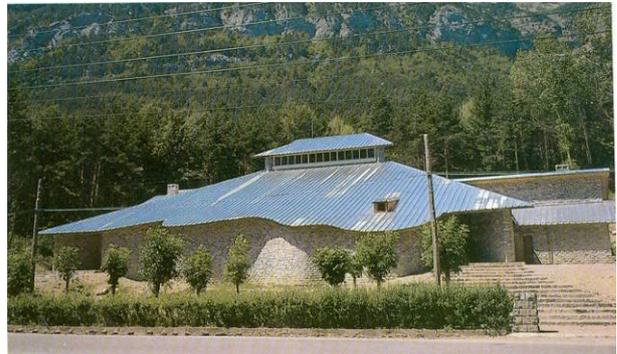
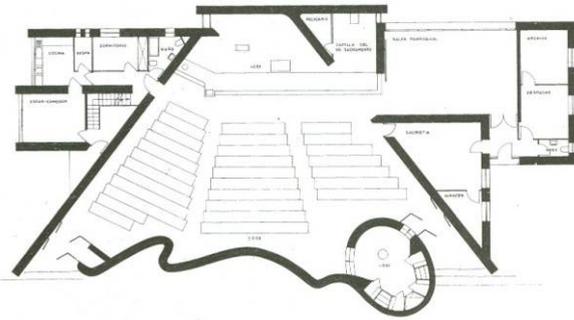


Figura 2.77. Planta y exterior de la iglesia parroquial de Nuestra Señora del Pilar. Canfrac (Huesca), 1963.

Mientras que las dependencias anejas al templo siguen un trazado ortogonal en planta, la disposición de la iglesia presenta forma de abanico, favoreciendo la reunión de los fieles, con un presbiterio no tan alto como en las anteriores iglesias, en el que ya se distinguen la sede, el ambón, el altar (que permite celebrar de frente o de espaldas a la asamblea) y la reserva del Santísimo Sacramento, reflejando así algunas disposiciones litúrgicas que el Concilio Vaticano II establecerá (figura 2.77).

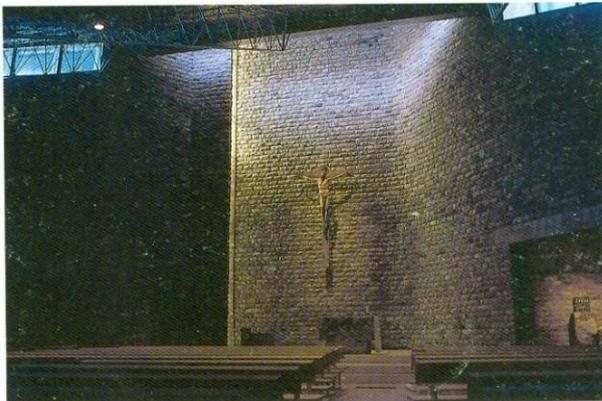


Figura 2.78. Interior de la iglesia parroquial de Nuestra Señora del Pilar. Canfrac (Huesca), 1963.

En sus muros, contruidos en piedra de sillarejo de los Pirineos, no hay distinción entre muro estático ni dinámico, a pesar de que el derecho envuelve el ábside para formalizar el hueco de luz natural lateral del presbiterio. El muro posterior, de trazado sinuoso y que contiene el baptisterio y la capilla penitencial, obedece a un gesto de integración con la naturaleza, y no responde a exigencias acústicas de dispersión de ondas sonoras (figura 2.78).

La cubierta, cuya ligereza se aprecia desde el interior, se resolvió mediante una estructura tridimensional metálica sobre la que apoyaban los paneles de chapa de aluminio aislados térmicamente.

2.4.2. LAS IGLESIAS POSTCONCILIARES

En el capítulo anterior vimos que el Concilio Vaticano II (1962-1965), en la Constitución *Sacrosanctum Concilium*, fomentó la participación plena, consciente y activa de los fieles en las celebraciones litúrgicas, subrayó el carácter sacramental o simbólico de las mismas, y restableció la importancia de la liturgia de la palabra dentro de la misa.

Consciente de la situación y de su gran responsabilidad como arquitecto al tener que plasmar en su arquitectura la renovación religiosa que vivía la Iglesia, Miguel Fisac contactó con sacerdotes y liturgistas, que le ayudaron a asimilar con profundidad y eficacia las nuevas instrucciones litúrgicas.

A partir de ese momento, elementos definidores de su arquitectura religiosa preconciliar, como el *muro dinámico* y el *muro estático*, o la convergencia y focalización en el altar, evolucionaron para recoger la aplicación de estos nuevos conceptos litúrgicos establecidos por el concilio.

Para Fisac, la redefinición de la liturgia tuvo tres puntos claves, los cuales condicionaron su arquitectura religiosa postconciliar:

- El sacerdote se da la vuelta para officiar misas dialogadas de cara al pueblo que se congrega en la iglesia. Fisac decía⁶⁴: *se acabó el dinamismo, lo que hay que hacer es un corro*. El altar deja de ser un punto focal para convertirse en un itinerario.
- Fomentar la participación activa de los fieles. Para ello, proyectó iglesias con una disposición asamblearia en planta, lo que permitía una eficaz agrupación del pueblo en torno a un presbiterio, constituyendo un foco móvil en el que se despliega la liturgia. En una de sus conferencias afirmaba⁶⁵: *manteniendo el concepto de religiosidad he buscado un sentido más estático y comunitario con una mayor sobriedad en materiales y texturas*.
- Por último, la importancia que el concilio otorgó a la liturgia de la palabra, hizo que las condiciones acústicas en las iglesias empezaran a considerarse en los proyectos de las mismas. A partir de entonces, la acústica será una constante que Fisac tratará de resolver en su arquitectura eclesial postconciliar. Sobre la importancia de este aspecto, Fernández Cobián indicaba⁶⁶: *Si se pudiese encontrar una solución óptima para este problema, resultaría innecesario el empleo de medios técnicos de ampliación del sonido, lo que daría una mayor autenticidad e intimidad a una reunión comunitaria ya potenciada en planta con disposiciones más o menos circulares*. Además, Fisac sostenía que la nueva liturgia dificultaba mucho más el problema de los templos, pues las fuentes de sonido se multiplican: ahora el coro y el presbiterio no son los únicos manaderos sonoros, sino que los fieles, distribuidos en la zona de bancos, participan de viva voz.

Una conferencia, impartida en el Ateneo de Madrid en 1969, nos muestra su visión sobre las cuestiones acústicas de la época. Comenzó refiriéndose al problema acústico en dos de sus primeras obras construidas: el salón de actos del CSIC y la iglesia del Espíritu Santo. Reconoció que cuando se construyeron en el año 1943, la carestía de materiales que facilitasen condiciones óptimas de audición era absoluta. Por ello, sin ninguna clase de asesoramiento por parte de expertos, para lograr la bondad acústica del salón del CSIC, sólo dispuso de su intuición y de algunos estudios a su alcance. Continuó explicando su actitud ante el acondicionamiento acústico⁶⁷ afirmando que en una sala de conciertos, o en un salón de actos, pueden disponerse materiales absorbentes, pero en una iglesia los revestimientos son duros y no tienen ningún poder absorbente, pues como diría años más tarde,

⁶⁴ Fisac, M. (1996). *El espacio religioso* (conferencia impartida por M. Fisac en E.T.S. de Arquitectura, Universidad de La Coruña, 11 de enero de 1996). [Video/DVD]. Biblioteca de Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla.

⁶⁵ Conferencia impartida por Miguel Fisac en la Universidad Nacional de Educación a Distancia, mayo de 1977. En Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009). Opus cit. p. 419.

⁶⁶ Fernández Cobián, E. (2005). Opus cit. p. 306.

⁶⁷ Fisac, M. (1969). *Arquitectura y audición musical* (conferencia impartida por M. Fisac en el Ateneo de Madrid, 4 de diciembre de 1969). Crónica recogida en el diario *Ya*, Madrid, 5 de diciembre de 1969.

en una iglesia no hay posibilidades económicas para disponer materiales con dichas propiedades. Por ello, y para no confiar la consecución de una buena acústica a adaptaciones a posteriori de expertos, intentaba resolver el acondicionamiento acústico con una única herramienta: la propia forma arquitectónica. En esa misma conferencia opinaba que un espacio mal concebido arquitectónicamente tendría mala acústica, pese a lo avanzado de la técnica respecto a la sonorización e insonorización. Calificó la acústica como una ciencia aséptica, por lo que sus principios debían adecuarse a la función del recinto cerrado⁶⁸.

En aquella época, Fisac era conocedor de algunos de los fenómenos sonoros que provocaban deficiencias acústicas en los recintos interiores, como las concentraciones sonoras, el eco y la reverberación excesiva. Para evitar estos problemas y tratar de lograr una *audición apetecible*, ya que la audición ideal le parecía imposible alcanzarla, en los proyectos y obras de su arquitectura religiosa postconciliar introdujo lo que él llamó *muros dispersivos*, que consistían en unas superficies convexas que se disponían en las paredes de fondo de sus iglesias, con el fin de evitar las perjudiciales concentraciones sonoras.

Este interés y preocupación de Miguel Fisac por la acústica surgió tras apreciar que en sus primeras iglesias preconciarias, los sermones eran prácticamente ininteligibles, lo cual le causó una gran decepción. Como comentamos anteriormente, reconoció que el templo del Espíritu Santo adolece de mala acústica. Como por entonces no era frecuente el uso de la megafonía en las iglesias, no tuvo más remedio que recurrir, según él, a fundamentos acústicos, interesándose por esta disciplina en sus realizaciones eclesiales tras el Concilio Vaticano II. No obstante, defendía que un local acústicamente bien acondicionado, no necesitaría apoyo electroacústico y siempre estuvo en contra de utilizar este recurso en salas de conferencias, iglesias y otros espacios similares⁶⁹.

Sobre el empleo de materiales absorbentes, solamente fueron utilizados en dos de sus iglesias postconciliares: Santa María Magdalena en Madrid (1966-1967) y la pequeña iglesia de Santiago en Pumarejo de Tera (Zamora, 1984). Las cubiertas de ambas iglesias son de tipo ligero y se resuelven con cerchas metálicas espaciales, sobre las que disponía paneles absorbentes sonoros. En la iglesia de Santa María Magdalena se emplearon paneles de lana de roca, mientras que en la de Pumarejo de Tera se montaron paneles de viruta de madera prensada.

A continuación, y en orden cronológico, se describen los principales aspectos de sus proyectos y obras religiosas postconciliares.

Complejo parroquial de Santa Ana, Moratalaz. Madrid (1965-1971)

En 1965, Miguel Fisac proyectó el primer templo conforme a las nuevas directrices litúrgicas marcadas por el Concilio Vaticano II. Se trata del conjunto parroquial de Santa Ana, en el barrio de Moratalaz de Madrid, un encargo que el arquitecto recibió del arzobispado de Madrid-Alcalá y de la sociedad promotora y constructora *Urbis*, tras el fallecimiento prematuro de su hija Anaick.

El complejo parroquial debía situarse en un solar topográficamente accidentado. Fisac dispuso la iglesia en la parte más alta y las dependencias parroquiales a su alrededor, proyectando una compleja macla de volúmenes de distintas familias geométricas: la iglesia con planta en forma de óvalo; y el pequeño patio de acceso, las dependencias parroquiales y residenciales con trazado ortogonal. Este último grupo de espacios salvaba un fuerte desnivel de unos 7 metros de altura (figura 2.79).

⁶⁸ **Fisac, M. (1969).** *Arquitectura y audición musical* (conferencia impartida por M. Fisac en el Ateneo de Madrid, 4 de diciembre de 1969). Crónica recogida en el diario *ABC*, Madrid, 5 de diciembre de 1969.

⁶⁹ Información facilitada mediante correo electrónico por Antonio Calvo-Manzano, Secretario de la Sociedad Española de Acústica, entidad con la que estuvo vinculado Miguel Fisac. Fecha: 30 agosto 2011.



Figura 2.79. Plano de situación del Complejo Parroquial de Santa Ana, Moratalaz. Madrid, 1965.

El propio arquitecto comentaba sobre esta iglesia⁷⁰:

Es la primera iglesia que proyecté después del Concilio Vaticano II, un acontecimiento que cambió por completo el programa del templo. El Concilio Vaticano II impuso una relación más comunicativa entre los participantes del oficio religioso; el sacerdote debía celebrar la misa mirando a los fieles y hablar de forma que todo el mundo lo entendiera. Y esto tenía implicaciones acústicas muy importantes, porque en la mayoría de las iglesias había unas reverberaciones tremendas... Y como la acústica era un tema en el que me movía bien, tuve en cuenta que hasta una distancia de ocho metros, la reverberación refuerza la voz, pero si te alejas más ya hay interferencias. Si te sitúas a más distancia ya se distingue el sonido que emites del que la pared refleja, es decir, hay eco. En la iglesia de Santa Ana, como no quería poner materiales absorbentes, tuve que inventar unas formas que dispersaran las ondas; o sea, que las curvas del fondo lo que evitan es que el sonido vuelva por el mismo sitio. En cambio, los nichos curvos tras el altar responden ya a la liturgia. El altar aquí deja de estar concentrado en un sólo punto para transformarse en un escenario litúrgico con varios focos, con un sitio para la liturgia de la palabra, otro dedicado a los comentarios del Evangelio que los hace el que preside la asamblea -que, por tanto cuenta con un asiento-, un lugar para la consagración y otro para la reserva del Santísimo, o sea, que ahora la ceremonia tiene lugar a lo largo de un itinerario, y no, como sucedía antes, en un sólo punto y una dirección.

Asimismo, la memoria del proyecto establece en doce puntos⁷¹, las directrices e ideas proyectuales con los que Miguel Fisac realizó el complejo parroquial:

1. Se han procurado seguir lo más fielmente posible las directrices marcadas por el Concilio Vaticano II.
2. La idea inicial ha sido la de proyectar no un templo con unos cuantos servicios pegados a él, sino un auténtico complejo parroquial con unidad y jerarquía.
3. Cada uno de los espacios destinados a la labor social, la instrucción religiosa y cultural, el esparcimiento y fomento del conocimiento mutuo entre los fieles de la parroquia, y la

⁷⁰ Fisac, M. en Fernández Galiano, L., Frampton, K. y Mostafavi, M. (2003). Miguel Fisac. *Arquitectura Viva*, 101, p. 72.

⁷¹ Recogida en Fernández Cobián, E. (2005). Opus cit. p. 308-311.

dirección espiritual, se ha procurado que tenga una fisonomía propia dentro del complejo, presididos todos ellos, por supuesto, por el templo.

4. Esta unidad jerarquizada del conjunto tiene su expresión plástica en los volúmenes de cada uno de los espacios –más importantes los de mayor rango jerárquico-, y en la homogeneidad de la cubierta, toda ella formada por piezas pretensadas y huecas –según patente del arquitecto autor del proyecto-, con paredes de dos a tres centímetros de espesor y longitudes variables, según el espacio que han de cubrir –de 6 a 20 metros-, realizadas por V.Peiró con sus métodos patentados de fabricación.

5. El trazado del templo responde a una doble necesidad del programa:

a) Espacio para albergar la Asamblea del pueblo de Dios.

b) Lugar para la celebración de la Santa Misa, en el que dinámicamente va cambiando el foco de interés y presidencia durante la celebración litúrgica.

6. La forma adecuada para conseguir la más eficaz agrupación de la Asamblea es la que esa misma Asamblea tomaría, naturalmente, si se encontrara en un espacio libre. Creemos que esa disposición no sería la circular, ya que no es un punto, sino un camino el recorrido por el foco de atención que han de seguir los fieles durante la celebración de la Santa Misa, sino más bien una forma ovalada que agrupará a los fieles a lo largo de ese itinerario lineal.

7. Esta forma ovalada de la nave del templo presentaría el inconveniente técnico de que, en la pared posterior, las ondas sonoras que procedieran del presbiterio se reflejarían creando concentraciones acústicas que perturbarían la audición, por lo que en la disposición ovalada de la iglesia, el segmento posterior se sustituye por tres superficies convexas que crean una dispersión sonora. Las aristas de inflexión de estas superficies, ensanchándolas, se aprovechan en su parte inferior para paso desde el atrio, sacristía, claustro y recinto de bautismo y penitencia, y en la parte superior para iluminación natural y artificial.

8. En el muro anterior del templo se sitúa el presbiterio precedido del antepresbiterio, lugar de sacramentos de vivos: confirmación, matrimonio y orden. El presbiterio tiene una iluminación natural y artificial cenital, y los diferentes focos de atención en la liturgia de la Palabra –ambón y sede, en la primera parte de la Santa Misa, y en el altar al pasar al Rito, en la Consagración y la Comunión, en la que los fieles se acercarían al altar – quedan jerárquicamente patentizados en dos concavidades practicadas en los muros verticales del óvalo de la parte anterior de la iglesia.

9. La reserva del Santísimo Sacramento se realiza en otra tercera concavidad del muro del ábside iluminado con una ventana larga y lateral, cubierta con una composición confeccionada en materia plástica traslúcida, obra del pintor A. Úbeda, que es también autor de las composiciones transparentes sobre la pila bautismal y el espacio para confesionarios.

10. Un espacio del templo queda reservado para sacramentos de muertos: bautismo y penitencia, en directa comunicación con la nave.

11. La concepción estructural del complejo es muy sencilla. Muros verticales de cerramiento y sustentación del hormigón armado en su calidad propia, tanto en el interior como en el exterior. Piezas tubulares de hormigón pretensado, simplemente apoyadas en la cubierta y una viga colgada de un arco, también de hormigón armado para recibir las cabezas de las vigas tubulares que no pueden apoyarse en el muro por dejar el rompimiento cenital del ábside.

12. Los cálculos estructurales han sido realizados por el ingeniero J. Bardell. Las imágenes que componen el grupo de Santa Ana con la Virgen y el Niño, el crucifijo que preside el altar, la figura que sostiene la lámpara, así como el Sagrario y dos recipientes para flores, son todas ellas obras del escultor José Luis Sánchez. Urbis ha sido la empresa promotora y constructora.

Además, en el apartado de *características técnicas*, la memoria del proyecto⁷² recoge que *la acústica ha sido el elemento configurador en el aspecto del templo*. En el apartado de estética de dicho texto, el arquitecto describe las razones de proyecto:

Estéticamente se ha procurado, con todo interés, no partir de una concepción plástica previa, sino buscando la forma más armónica de resolver con la máxima honradez la expresividad propia conseguida con el más fiel cumplimiento de las necesidades del programa, unido a la expresividad propia de los materiales que intervienen en cada caso y en la forma estructuralmente más conveniente para que la impresión del fiel que entra en el templo, y en general de cualquier persona que contempla el complejo parroquial desde fuera, sea la de una expresión arquitectónica radicalmente honrada hasta en sus más mínimas exigencias y que por esa propia honradez expresiva, choque con el mundo tecnificado y sofisticado de la vida exterior que nos rodea y pueda producir en el fiel un impacto de religiosidad auténtica y rigurosamente actual.

Con todo lo anterior, y para conseguir una eficaz agrupación de la asamblea en torno al presbiterio, Fisac plantea una iglesia de planta ovalada con un marcado eje transversal, reforzando el carácter asambleario inclinando el pavimento en sentido descendente hacia el presbiterio. Como describe en su memoria, en la cara posterior del óvalo se disponen unas superficies convexas, a modo de *muros dispersivos*, cuyas aristas de inflexión ensanchadas facilitan el acceso al templo desde el atrio, la sacristía, la capilla penitencial y bautismal y las dependencias parroquiales, a la vez que permiten la iluminación natural y artificial del espacio asambleario por la zona superior (figura 2.80).



Figura 2.80. *Muros dispersivos*. Iglesia de Santa Ana de Moratalaz. Madrid, 1965.

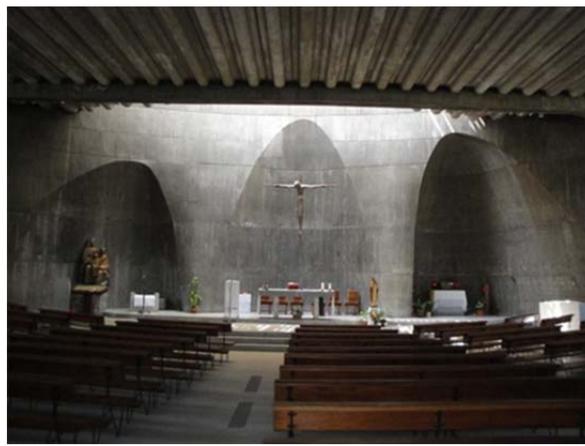


Figura 2.81. Presbiterio. Iglesia de Santa Ana de Moratalaz. Madrid, 1965.

La razón de ser del muro que conforma el presbiterio, surge por la adecuación del mismo a los distintos momentos de la celebración litúrgica (figura 2.81). Ahora el altar no es un foco único, sino un foco móvil, que Fisac materializa y distribuye apoyándose en tres concavidades practicadas en dicho muro, estableciendo en la primera concavidad el lugar para el ambón y 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 (puntos 8 y 9 de las directrices del proyecto).

La sacristía, aunque situada en la cabecera del templo, tiene acceso al mismo a media altura de la nave, favoreciendo la entrada del sacerdote en procesión desde la asamblea al presbiterio.

⁷² Recogida en **Delgado Orusco, E. (2007)**. *Santa Ana de Moratalaz, 1965-1971. Miguel Fisac*. Almería: Colegio de Arquitectos de Almería.



Figura 2.82. Apoyo de *vigas hueso* prefabricadas, en viga de hormigón y en muros dispersivos. Iglesia de Santa Ana de Moratalaz. Madrid, 1965.

En la iglesia, al igual que en 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 de hasta 20 m de luz, según patente del arquitecto, dispuestas en la nave paralelamente al eje longitudinal que une presbiterio y muros dispersivos (figura 2.82). Ésta se interrumpe al llegar al presbiterio para dar lugar a un gran lucernario que se eleva en altura. Para formalizar dicho lucernario, las cabezas de dichas vigas se recogen en una viga de hormigón ejecutada *in situ* y que cuelga de un arco visible desde el exterior (figura 2.83).



Figura 2.83. Apoyo de *vigas hueso* prefabricadas, en muros de hormigón visto ejecutado *in situ*. Iglesia de Santa Ana de Moratalaz. Madrid. 1965.



Figura 2.84. Exterior del complejo parroquial de Santa Ana de Moratalaz. Madrid, 1965.

Finalmente, tal y como se detalla en el apartado *características técnicas* de la memoria del proyecto:

En la nave del templo se ha buscado una luz cenital suave en toda la zona del presbiterio y cuatro fajas verticales encima de las cuatro puertas de iluminación lateral de la nave. Para que estos ventanales respondan a las exigencias acústicas y de dispersión luminosa necesarias, estas vidrieras son de vidrio normal armado y una celosía de lamas metálicas de aluminio anodizado que forman una dispersión luminosa necesaria tanto en iluminación natural como artificial, y solamente coloreada por el anodizado en oro de la celosía de aluminio del presbiterio o por el anodizado en azul de las vidrieras situadas encima de las puertas de la nave⁷³.

Al ejecutar los muros de hormigón visto, el arquitecto dejó previstas unas hornacinas para alojar los altavoces del sistema de megafonía, así como el *viacrucis*, formado por catorce cruces, de brazos iguales, impresas en los muros de hormigón visto.



Figura 2.85. Lucernario sobre el presbiterio. Iglesia de Santa Ana de Moratalaz. Madrid, 1965.

⁷³ En la actualidad, las vidrieras originales situadas encima de las puertas de acceso ha sido sustituidas por otras de colores.

Iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca. Madrid (1965)

En un solar cercano a su casa del Cerro del Aire, en Madrid, y para las religiosas de la Asunción, proyectó un colegio con trazado ortogonal, a excepción de la capilla y el comedor, situado debajo de ésta, que constituían una pieza singular en forma de óvalo dentro del conjunto (figura 2.86).



Figura 2.86. Vista aérea del colegio de la Asunción Cuestablanca. Madrid, 1965.



Figura 2.87. Muros dispersivos en cara posterior del óvalo. Iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca. Madrid, 1965.



Figura 2.88. Vigas hueso con paneles de catón yeso en uniones. Iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca. Madrid. 1965.

En la capilla, Fisac empleó las ideas desarrolladas en la iglesia de Santa Ana de Moratalaz, aunque con un carácter más sobrio. A diferencia de su predecesora, la forma ovalada de la iglesia conseguía una mayor aproximación entre el presbiterio y la nave, y por tanto un espacio asambleario más participativo. En la cara posterior del óvalo dispuso los *muros dispersivos* formados por elementos cilíndricos convexos (figura 2.87). La cara anterior del óvalo envuelve la nave y el presbiterio, mediante dos segmentos curvos que se superponen en el presbiterio, dejando un hueco de iluminación natural entre ambos. Para Eduardo Delgado Orusco⁷⁴, *la mayor sencillez del programa: una capilla escolar frente a un complejo parroquial puede explicar una cierta simplificación en el esfuerzo de diseño.*

En la iglesia, al igual que en la totalidad del conjunto, Fisac vuelve emplear el hormigón visto en todos los paramentos verticales y resuelve la cubierta mediante *vigas hueso* de hormigón prefabricado, dispuestas paralelamente en sentido longitudinal (líneas desde muros dispersivos al presbiterio) y con ligera pendiente ascendente hacia el presbiterio. En los vanos donde se sitúan las juntas de unión de dichas vigas hueso, dispuso unas placas lineales de cartón-yeso que ocultan el cableado de la instalación de iluminación del recinto (figura 2.88).

En este caso, el arquitecto ensayó una nueva forma de iluminación natural que consistía en perforar la parte no estructural de determinadas vigas, para crear un lucernario en celosía sobre el presbiterio (figura 2.89). Además, sobre las aberturas de los muros dispersivos se abrieron huecos de iluminación, así como en el encuentro de las *alas* curvas que conforman el presbiterio y el espacio para la

⁷⁴ Delgado Orusco, E. (2007). *Santa Ana de Moratalaz, 1965-1971. Miguel Fisac*. Almería: Colegio de Arquitectos. p. 86.

asamblea (figura 2.90).



Figura 2.89. Iluminación cenital sobre el presbiterio. Iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca. Madrid, 1965.



Figura 2.90. Huecos para iluminación en paramentos verticales. Iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca. Madrid, 1965.

Al igual que en la iglesia de Santa Ana de Moratalaz, Fisac enfatiza el carácter asambleario y de reunión del espacio, inclinando el pavimento de la zona ocupada por los fieles, desde el altar hasta los muros dispersivos.

En el proyecto se repetía la misma disposición de elementos sobre el presbiterio que en Santa Ana, pero en este caso el sagrario se colocó en el centro del mismo desplazando ligeramente el altar. La imagería del templo, compuesta por un Crucificado y una imagen de la Virgen con el Niño, fue realizada por el escultor Amadeo Gabino (figura 2.91).

La capilla penitencial se dispuso separada del espacio de reunión, participando del orden ortogonal del resto del colegio, ya que los ejes principales de la capilla poseen un ligero giro.



Figura 2.91. Focos litúrgicos en el presbiterio. Iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca. Madrid, 1965.



Figura 2.92. Exterior del colegio de la Asunción Cuestablanca. Madrid, 1965.

Finalmente, como la capilla está encajada dentro de un pabellón, carece de fachada, pero en el exterior se alza un sobrio campanario compuesto por piezas de hormigón prefabricado, que preside el conjunto edificado (figura 2.92).

Centro parroquial Santa María Magdalena, Santamarca. Madrid (1966-1967)

La iglesia de este centro parroquial situado en el barrio Santamarca de Madrid es una variante de la iglesia postconciliar de Miguel Fisac, pero construida en ladrillo.



Figura 2.93. Exterior de la iglesia de Santa María Magdalena. Madrid, 1966.

El principal condicionante de proyecto fue el económico, de ahí que Fisac eligiera muros de carga de ladrillo visto en el exterior e interior, de pie y medio de espesor, sobre los que apoya la cubierta formada por cuatro vigas metálicas en celosía, placas de *viroterm* (paneles acústicos de lana de roca), doble tablero de rasilla y uralita. Al igual que hiciera en la iglesia de Canfrac (Huesca) con estructura metálica, o en las iglesias con cubierta de *vigas hueso*, Fisac deja vista la estructura metálica y proporciona a la cubierta una ligera pendiente, ganando altura hacia el presbiterio (figura 2.93).

La idea proyectual y la solución espacial con respecto a los demás templos postconciliares realizados en hormigón es idéntica, pero aquí se adaptan a las condiciones impuestas por el material, obteniéndose una forma distinta (figura 2.94). La planta conserva la disposición litúrgica asamblearia, con un perceptible eje transversal, pero en vez de ser ovalada pasa a ser poligonal. Del mismo modo, con el fin de evitar las concentraciones sonoras y reflexiones tardías provenientes de la pared de fondo, los anteriores *muros dispersivos* de hormigón *in situ* formados por superficies sinuosas y convexas, se convierten en muros quebrados de aristas vivas, más adecuados para su construcción con ladrillo (figura 2.95).



Figura 2.94. Vista interior hacia el presbiterio. Iglesia de Santa María Magdalena. Madrid, 1966.



Figura 2.95. Muros dispersivos. Iglesia de Santa María Magdalena. Madrid, 1966.

Como ocurriera en las iglesias de Santa Ana y Cuestablanca, sobre las aberturas de los muros dispersivos se disponen vidrieras de colores para la iluminación de la zona de fieles. Asimismo, la iluminación del presbiterio se resuelve bilateralmente con vidrieras de colores orientadas al este y oeste, disposición que recuerda a alguna de sus iglesias preconciarias (figuras 2.96 y 2.97).



Figura 2.96. Cubierto e iluminación lateral del presbiterio. Iglesia de Santa María Magdalena. Madrid, 1966.

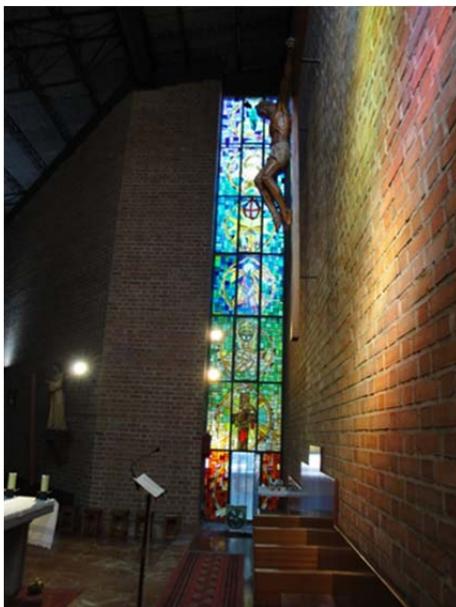


Figura 2.97. Iluminación lateral del presbiterio. Iglesia de Santa María Magdalena. Madrid, 1966.



Figura 2.98. Capilla del Sagrario y capilla penitencial. Iglesia de Santa María Magdalena. Madrid, 1966.

La Capilla del Santísimo, accesible, visible y ligeramente elevada como el presbiterio al que tiene acceso, se adosa a uno de los muros laterales que conforma el espacio de reunión, y actualmente alberga también los confesionarios y la pila bautismal (figura 2.98).

Conjunto parroquial de Santa Cruz de Oleiros. Oleiros (La Coruña, 1967)

El complejo parroquial de Santa Cruz se sitúa sobre una colina con vistas a la bahía de La Coruña, en el que Miguel Fisac continuó con las ideas desarrolladas desde el año 1965. El complejo está constituido por la iglesia, como pieza principal con su potente y esbelta torre-campanario, y la guardería infantil y el dispensario médico, en un edificio independiente (figura 2.99). Este conjunto arquitectónico, concebido como sucesión de recintos engendrados por muros de traza curva, había sido insinuado por Fisac en el templo de Vitoria 1958-60.

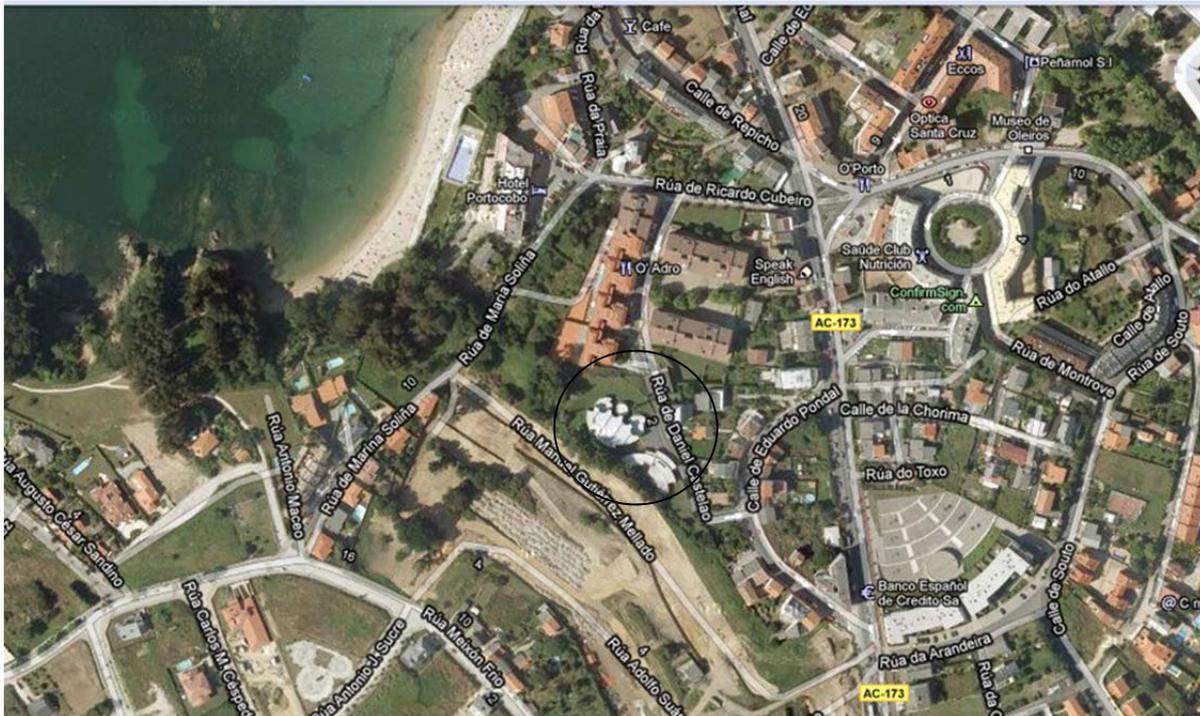


Figura 2.99. Planta de situación del conjunto parroquial de Santa Cruz de Oleiros (La Coruña), 1967.

La planta del templo, que ya había sido prefigurada en el proyecto de iglesia para la misión dominica de Formosa (Taiwán, 1966), presenta forma de vieira para conseguir un espacio asambleario, garantizando una buena visibilidad del altar desde cualquier punto de la nave (figura 2.100). En las paredes de fondo de la iglesia se sitúan los ya conocidos *muros dispersivos* (figura 2.101). En este proyecto, éstos se forman mediante cuatro semicilindros convexos a los que se añade una rama lateral, a la izquierda, que conforma el atrio cubierto de acceso. Sobre el eje principal, un cilindro casi completo, forma la sacristía facilitando la entrada procesional del sacerdote hasta el altar; mientras, a su derecha, una nueva rama recoge el baptisterio y la capilla penitencial (figura 2.102).



Figura 2.100. Vista interior hacia el presbiterio. Iglesia de Santa Cruz de Oleiros (La Coruña), 1967.



Figura 2.101. Muros dispersivos. Iglesia de Santa Cruz de Oleiros (La Coruña), 1967.

De forma similar a Santa María Magdalena, la capilla del Santísimo está proyectada como un desdoblamiento lateral del ala derecha de la nave y es accesible desde ella y desde el presbiterio (figura 2.103).



Figura 2.102. Baptisterio y capilla penitencial. Iglesia de Santa Cruz de Oleiros (La Coruña), 1967.



Figura 2.103. Capilla del Sagrario. Iglesia de Santa Cruz de Oleiros (La Coruña), 1967.

El complejo fue totalmente realizado en hormigón armado *in situ*, a excepción de la cubierta que se ejecutó con piezas prefabricadas de hormigón a base de grandes vigas longitudinales y nervios transversales, realizadas a pie de obra (figura 2.104).



Figura 2.104. Vista interior de nave y presbiterio. Iglesia de Santa Cruz de Oleiros (La Coruña), 1967.



Figura 2.105. Iluminación cenital sobre el presbiterio. Iglesia de Santa Cruz de Oleiros (La Coruña), 1967.

En el interior, el color de la luz define los distintos ámbitos de la iglesia: la iluminación del presbiterio se resuelve, por un lado, horadando el entrevigado de la cubierta que introduce una luz blanca sobre el altar (figura 2.105), y por otro lado, disponiendo ventanales de vidrio amarillo a ambos lados del presbiterio, que resuelven la unión de las alas laterales con el muro que conforma el presbiterio. Como es frecuente en sus proyectos, sobre las aberturas de los muros dispersivos se abren huecos para iluminación de la zona de fieles, formados por vidrios simples de color azul. En la capilla del Santísimo Sacramento, una luz intensa roja ilumina el recinto e invita al recogimiento.

El gran crucifijo de bronce que preside el templo es obra del escultor Pablo Serrano y la imagen de la Virgen con el Niño fue realizada por José Luis Sánchez.

Centro parroquial de Nuestra Señora Flor del Carmelo. Madrid (1983-1991)

En la década de los 80, Fisac recibe el encargo de realizar un complejo parroquial para una comunidad religiosa carmelita en el madrileño barrio del Pilar. En este caso, los Padres Carmelitas tenían muy claro el programa y el mismo arquitecto lo relataba en una conferencia pronunciada en la ETSA de La Coruña en el año 1996⁷⁵:

...entonces –ya a última hora, décima-, los Carmelitas van a hacer una parroquia en Madrid. Una parroquia que está en el barrio de Altamira (...) y por eso al principio le llamaban Parroquia de Altamira y en el proyecto que yo hice aparece así; luego les ha

⁷⁵ Fisac, M. (1996). Opus cit.

parecido mejor ponerle Flor del Carmelo. Bien, ahora se llama así. El caso es que ellos contaban con la experiencia de dieciséis años de tener la parroquia en un piso bajo de una casa de vecinos, con todos los inconvenientes que supone el no tener un lugar adecuado. Pero piden unas cosas bastante raras, y a mí me parece que debo cumplir esas cosas. Primero: ellos quieren mucha luz; también quieren que la parte del ábside casi no se distinga de lo demás: que tenga un escalón, pero nada más; que las cosas que hay en el ábside se puedan incluso quitar, por si en un momento determinado conviene usarlo, no como una sala de fiestas, pero sí como una sala de reunión no religiosa. O sea, una serie de cosas que a mí me parecen extrañas, que no responden al concepto de luz que yo he estado estudiando anteriormente. Me planteo dos posibilidades: hacerles poco caso a estos señores o hacerles mucho caso. A mí me parece que, honradamente, estos señores me piden esto: una iglesia que cuando haya poca gente no quede desangelada, y que cuando vaya mucha gente, quepan. Vamos a ver: el hecho de que pueda no quedar desangelada y que sin embargo quepa mucha gente, me quitaba la posibilidad de hacer – como si dijéramos- un estuche. Un estuche es una cosa que sirve para meter un objeto, pero que en su forma, de alguna manera ya va concebido el objeto. Y eso es lo que había hecho en mis iglesias anteriores, ya que si los fieles se colocaban normalmente, en libertad, más o menos adoptarían esa forma-una forma como de abanico- que es la lógica en un sitio abierto en donde vas a hablar con bastante gente. Luego tendré que hacer aquí lo que yo llamo una caja de zapatos, que no es un estuche, sino un sitio donde caben los zapatos; por el tamaño sabemos que es una caja de zapatos, pero nada exterior nos indica que aquello sea una caja de zapatos. ¿Por qué no lo parece? Pues porque una simple forma, un paralelepípedo. Bueno, pues yo, lo que voy a hacer, va a ser coger una figura geométrica –geométrica no de reunión de fieles: un cuadrado, pongamos por caso-, y voy a poner además un eje inclinado que sea una de las diagonales. Si hago una iglesia cuadrada con una diagonal principal, cuando reúno a los fieles me quedan tres picos perfectamente claros, un poco fuera. Si allí no pongo nada, cuando los fieles estén sólo en los bancos pues muy bien, queda perfectamente, y por tanto no parece desangelada. Y si vienen trescientas personas más, en cada pico meto cien. Eso es lo que hice. Hicimos el proyecto. Y terminamos. También me impusieron otras cosas que yo acepté perfectamente. –No queremos que haya ningún crucifijo. – Bueno pero... -No, no: un Resucitado. ¡Un Señor con camión: Dios de mi vida! Bueno, tampoco tenían mucho dinero. Fui a ver a unos chicos jóvenes que hacían imágenes: su padre era imaginero. Vi que sabían bastante y que estaban dispuestos. Me decidí a probar. Hicieron un boceto y dije: -Pues sí: éste es un Resucitado. Les dije que pararan un poco antes para que algunas cosas quedaran abocetadas, para que no fueran muy realistas. E hicieron una cosa realmente preciosa, y me pusieron la imagen del Resucitado y luego una imagen pequeña de la Virgen y se acabó la cosa (...) Total, que esa iglesia tenía muy pocas imágenes, y además estaban sin pintar, de color natural de pino. Y yo me quedé allí solo, en medio de la iglesia y dije: -Pues Señor, aquí está. Es lo que me han mandado. Es lo que, por otra parte, me han dicho estos señores, que saben de esto, que se debe hacer. Porque tienen experiencia. Entonces se reunieron con unos fieles para que vieran la nueva iglesia parroquial; y un carmelita dijo una Misa. Me encontré con una sorpresa tremenda, porque realmente fue emocionante. Y la gente que llegó allí dijo: -¡Es que es una delicia estar aquí, es que...! ¡Y después me di cuenta (están teniendo un éxito tremendo: están dejando las parroquias cercanas y se están llenando los picos, ¡se están llenando los picos...!) que la reunión en la Misa era una reunión de Fieles! No se trata de un espacio que realmente recoja a una persona aislada para hacer su oración personal: es una reunión de fieles. Y esa reunión de fieles tiene que estar muy iluminada, tiene que estar muy alegre, tiene que estar ¡bulluciosa! Tanto es así que hasta yo he llegado a la conclusión de que ha tenido ese éxito porque estos padres carmelitas tenían a los fieles muy acostumbrados. Esto lo digo porque los que tienen que proyectar una iglesia se encontrarán con estas cosas. Yo creo que es fundamental, primero, que sigamos las instrucciones, y segundo, que conozcamos también la sociología de las

gentes que nos va a decir lo que quieren. Y cuando a una persona le haces el traje a medida...



Figura 2.106. Patio interior del conjunto parroquial de Nuestra Señora Flor del Carmelo. Madrid, 1983.



Figura 2.107. Exterior de la iglesia de Nuestra Señora Flor del Carmelo. Madrid, 1983.

De lo anterior se deduce que la concepción del conjunto parroquial varió con respecto a ejemplos anteriores. Fisac proyectó un patio interior desde el que se podía acceder al templo, a la residencia para los religiosos y a las demás dependencias parroquiales, creando la transición necesaria entre la calle y el lugar del culto (figura 2.106). Fisac nunca había interpretado esta indicación postconciliar de manera literal, limitándose a crear espacios intermedios reducidos a un simple atrio. Exteriormente, la imagen del conjunto parroquial participa del carácter introvertido de las arquitecturas árabes, y además de contar con un patio con agua, las placas de hormigón aplantillado reproducen dibujos geométricos similares a los alicatados árabes de la Alhambra de Granada o el Alcázar de Sevilla (figura 2.107).



Figura 2.108. Vista interior hacia el presbiterio. Iglesia de Nuestra Señora Flor del Carmelo. Madrid, 1983.



Figura 2.109. Vista interior de presbiterio y nave. Iglesia de Nuestra Señora Flor del Carmelo. Madrid, 1983.

En esta iglesia, Fisac vuelve a emplear elementos prefabricados en los cerramientos de fachada, como paradigma constructivo, mediante piezas de hormigón con tratamiento de encofrado blando que reproducen los citados dibujos geométricos (figuras 2.108 y 2.109). La estructura de cubierta la resuelve con vigas Boyd, que se superponen en altura y permiten una intensa entrada de luz sobre el presbiterio y buena parte de la zona de fieles, así como perfiles metálicos y entrevigado de hormigón con tratamiento de encofrado blando (figura 2.110).



Figura 2.110. Cubierta. Iglesia de Nuestra Señora Flor del Carmelo. Madrid, 1983.

Este sencillo espacio eclesial es un auténtico espacio de reunión festiva de fieles, donde presbiterio y nave se funden más que nunca. Incluso los focos litúrgicos del presbiterio, es decir, el altar, el ambón y la sede, son elementos livianos y móviles, que facilitar el uso del recinto para otras actividades como conciertos. Adosada a un lateral de la iglesia, se halla la capilla del Sagrario, proyectado como lugar para la oración y el recogimiento.

Iglesia parroquial de Santiago. Pumarejo de Tera (Zamora, 1984)

En 1984, Miguel Fisac tiene la oportunidad de reconstruir la iglesia del pequeño pueblo zamorano de Pumarejo de Tera, la cual se había hundido.

El nuevo templo se asienta sobre la antigua iglesia de tipología muy tradicional de la zona, con nave a dos aguas, altar en el cuerpo más elevado rematado por una torre a cuatro aguas y espadaña en el lado opuesto al altar.

Miguel Fisac decide conservar la espadaña y modifica por completo el trazado de la iglesia en dos variantes. La segunda versión del proyecto, finalmente construido, fue replanteada en el lugar adaptándose al vacío urbano. El arquitecto cambia el altar de lado y lo coloca junto a la espadaña. El carácter asambleario de las iglesias postconciliares de Fisac se observa más en la primera versión que en la segunda, pero al no poder desplegar el abanico por las características del solar, llevó la abertura de los muros laterales de la nave a los límites del solar y dispuso la estructura de cubierta, formada por cerchas tridimensionales de tubo de acero en el sentido longitudinal de la nave, sobre las que se colocaron los paneles de viruta de madera prensada y las piezas de pizarra (figuras 2.111 y 2.112).



Figura 2.111. Vista interior hacia el presbiterio. Iglesia de Santiago, Pumarejo de Tera (Zamora), 1984.



Figura 2.112. Vista interior desde el presbiterio. Iglesia de Santiago, Pumarejo de Tera (Zamora), 1984.

Como en ocasiones anteriores, el muro izquierdo envuelve el presbiterio, que se ilumina lateralmente al encontrarse con el muro derecho. Asimismo, el muro posterior, con traza en forma de V, permite la iluminación en su centro. El acceso al templo se realiza desde el lateral noroeste.

Se trata de un templo oscuro, contando tan sólo con dichas aberturas de luz a modo de vidrieras, rasgadas verticalmente en el muro de piedra, formadas por piezas de u-glass. El carácter

contemporáneo del templo queda patente en el sistema de cristales de colores insertados desde la parte superior en la cámara de piezas de los vidrios u-glass, y en las parejas de viguetas de hormigón prefabricado que deja vista sobre los huecos (figuras 2.113 y 2.114).



Figura 2.113. Cristales de colores en vidrios u-glass. Iglesia de Santiago, Pumarejo de Tera (Zamora), 1984.



Figura 2.114. Viguetas prefabricadas en dintel de puerta de acceso. Iglesia de Santiago, Pumarejo de Tera (Zamora), 1984.

El mismo Fisac comentó que la ejecución de la iglesia fue *el acto social más bonito que me ha sucedido a los largo de mi carrera profesional*.

Realizó el proyecto y la dirección de obra de modo altruista, replanteando la iglesia directamente en el suelo y explicando a los habitantes del pueblo cómo se hacía un muro. Los vecinos se organizaron en cuadrillas y se repartieron los trabajos; las mujeres y los niños hacían la pasta y los hombres colocaban las piedras traídas de cerros cercanos de Villageriz. Surgieron unos muros toscos e ingenuos, en absoluta armonía con la espadaña restaurada y con el pasaje urbano (figura 2.115).

Según Delgado Orusco, E.⁷⁶, es posible que en Pumarejo de Tera, el arquitecto reflexionase que si lo que las reformas conciliares pretendían era la participación de los fieles, ninguna de sus obras lo había conseguido tanto como aquella, en la que la obligada autoconstrucción ante la falta de recursos, consiguió la identificación de los fieles con su templo. Por otra parte, también en esta pequeña obra rural Fisac alcanzó, puede que como en ninguna otra, otro de sus anhelos constantes de su carrera: lo que él mismo denominaba *la humanización de la arquitectura*.



Figura 2.115. Vista exterior de la iglesia con la antigua espadaña. Iglesia de Santiago, Pumarejo de Tera (Zamora), 1984.

Finalmente, en 1991, construyó un pequeño complejo parroquial en la urbanización Torre Güil, en Murcia. Para su realización, contó con la colaboración del arquitecto Emilio Vicedo, quien recogiendo las ideas y croquis de Miguel Fisac, se encargó de plasmarlos en el proyecto de ejecución.

El edificio consta de un recinto principal, la iglesia, y dos espacios anexos, la sacristía y el salón de actos, articulados con un pequeño patio interior, mostrando el conjunto un único volumen al exterior. El interés del complejo parroquial estriba en su sistema constructivo, donde los muros y la cubierta se realizaron mediante losa de hormigón armado de espesor uniforme, encofrada con

⁷⁶ Delgado Orusco, E. Opus cit. p. 102.

paneles prefabricados de madera revestidos con una membrana de polietileno, proporcionándole una textura brillante y pulida al hormigón visto (figura 2.116).



Figura 2.116. Exterior e interior de la iglesia parroquial en la urbanización Torre Güil. Murcia, 1991.

La iglesia con planta rectangular, aunque con un ensanchamiento lateral que permite su apertura a la explanada exterior, se cierra con un muro posterior quebrado para la dispersión acústica (figura 2.117). La cubierta de la zona ocupada por los fieles se resuelve a tres aguas, mientras que sobre el presbiterio se dispone a un agua, permitiendo la formalización del hueco de entrada de luz sobre el altar. De nuevo, el juego cromático en el interior, jerarquizan los diferentes espacios del recinto.

En la actualidad, esta edificación no posee uso cultural.

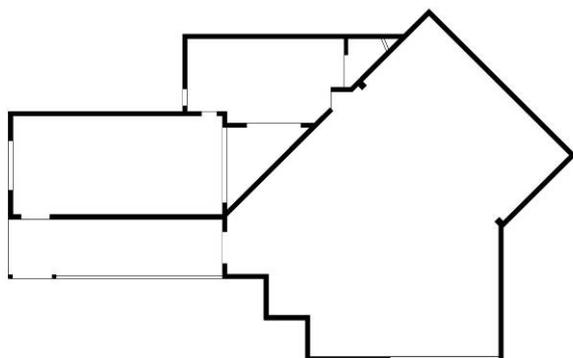


Figura 2.117. Planta del complejo parroquial en la urbanización Torre Güil. Murcia, 1991.

2.5. LISTADO DE PROYECTOS Y OBRAS RELIGIOSAS DE MIGUEL FISAC

A continuación se indica, por orden cronológico, los proyectos y obras de edificios religiosos realizados por Fisac a lo largo de su trayectoria profesional. En negrita se resaltan las estudiadas en este trabajo de investigación.

- 1942** Capilla del Espíritu Santo. Madrid
- 1943** Seminario Conciliar. Ávila
Capilla de la Virgen de las Nieves. Jaca (Huesca)
- 1946** Monumento a los Caídos. Zaragoza. Proyecto
- 1947** Oratorio del colegio mayor La Estila. Santiago de Compostela (La Coruña)
Oratorio del colegio mayor Monterols. Turó de Monterols (Barcelona)
Oratorio de las residencias La Pililla. Piedralaves (Ávila)
- 1949** Basílica hispanoamericana Nuestra Señora de la Merced. Madrid. Proyecto
Ermita del Ventorrillo. Guadarrama (Madrid)
- 1951** Capilla del Instituto Laboral. Daimiel (Ciudad Real). Proyecto
Iglesia de la Asunción de Nuestra Señora. Escaldes (Andorra). Proyecto
- 1952** Capilla del colegio apostólico de los padres dominicos. Arcas Reales (Valladolid)
- 1953** Restauración de la iglesia de San Roque. Daimiel (Ciudad Real)
Capilla del Instituto de Formación de Profesorado de Enseñanza Laboral. Ciudad Universitaria. Madrid. Proyecto
Capilla del instituto de enseñanza media y escuela de comercio. Málaga
- 1955** Restauración del Santo Sepulcro. Jerusalén. Arquitecto supervisor
Teologado de San Pedro Mártir, Alcobendas. Madrid
- 1956** Iglesia de San Florián. Viena (Austria). Proyecto
- 1957** Iglesia parroquial. Ayamonte (Huelva). Proyecto
Iglesia Parroquial de la Coronación de Nuestra Señora. Vitoria (Álava)
- 1958** Centro parroquial en El Zofío. Madrid. Proyecto
Iglesia (abierta). Finca de San Miguel y el Pas. Raventós (Huesca). Proyecto
- 1959** Iglesia parroquial de San Esteban Protomártir. Cuenca. Concurso
Iglesia rural. Villafrea de la Reina (León). Proyecto
- 1960** Capilla del instituto de enseñanza media. Valdepeñas (Ciudad Real)
- 1961** Capilla en el instituto de enseñanza media "Núñez de Arce". Valladolid. Proyecto
Capilla de la escuela apostólica de los Misioneros del Espíritu Santo, Calahorra (Logroño). Proyecto
- 1962** Convento y noviciado de la Presentación de Nuestra Señora. Granada. Proyecto
Convento para las religiosas de la Cruz y el Sagrado Corazón (sin localizar). Proyecto
Capilla de la Virgen del Pilar en la catedral de Manila. Filipinas

- 1963** Iglesia en la Ciudad de los Niños. San José de Costa Rica
- 1964** Iglesia parroquial. Punta Umbría (Huelva)
Iglesia parroquial de Nuestra Señora del Pilar. Canfranc (Huesca)
Capilla del colegio "Santa María del Mar". La Coruña. Proyecto
- 1965** **Complejo parroquial de Santa Ana, Moratalaz. Madrid**
Iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca, Alcobendas. Madrid
- 1966** **Centro parroquial Santa María Magdalena, Santamarca. Madrid**
Ermita. Urbanización Costa de los Pinos. Son Servera (Mallorca). Proyecto
Iglesia para la misión dominicana. Formosa (Taiwán). Proyecto
- 1967** **Conjunto parroquial de Santa Cruz de Oleiros. Oleiros (La Coruña)**
Reforma de la parroquia de San José. Madrid
- 1968** Capilla del instituto de enseñanza media. Valencia. Proyecto
- 1969** Ermita. Guadalix de la Sierra (Madrid)
- 1976** Restauración de la torre de la iglesia parroquial de San Pedro Apóstol. Aldea del Fresno (Madrid).
Reforma de ermita del Santísimo Cristo El Salvador del Mundo. Calzada de Calatrava (Ciudad Real)
- 1977** Cementerio de los padres dominicos, Alcobendas. Madrid
- 1980** Restauración de la iglesia de San Bartolomé. Almagro (Ciudad Real)
Mausoleo para Félix Rodríguez de la Fuente. Burgos
- 1981** Restauración de la iglesia de los padres franciscanos. Jerez de la Frontera (Cádiz)
- 1983** **Centro parroquial de Nuestra Señora Flor del Carmelo. Madrid**
- 1984** Restauración de la iglesia de San Agustín. Almagro (Ciudad Real)
Iglesia parroquial de Santiago. Pumarejo de Tera (Zamora)
- 1985** Restauración de iglesia parroquial. Villamanrique (Ciudad Real)
- 1991** Iglesia. Urbanización Torre de Güil, Murcia

3

ACÚSTICA EN RECINTOS DE CULTO. INVESTIGACIONES ANTERIORES

La aparente despreocupación por la calidad acústica en los lugares de culto, que hemos visto a lo largo del recorrido histórico realizado en el capítulo 1, ha cambiado en las últimas décadas, apreciándose un notable interés por parte de la comunidad científica, y un progreso destacable en la consideración del problema acústico en los recintos culturales de muchas confesiones religiosas.

Este interés se refleja, tanto en el estudio y conocimiento de las condiciones acústicas de edificios existentes, como en la consideración del problema acústico desde las primeras fases del proyecto, con la participación de técnicos especialistas en materia acústica, tanto en obras de nueva planta como de rehabilitación. En esta línea, las administraciones públicas, en el marco de sus programas de conservación y recuperación del patrimonio, han acometido múltiples intervenciones en edificios de culto para su rehabilitación con usos culturales, o bien para un uso compartido con el religioso. En este contexto es fundamental que, al acometer estos proyectos, la funcionalidad del espacio intervenido no quede comprometida, pues ello puede llevar al abandono de su uso y al consecuente deterioro del edificio, siendo en vano los esfuerzos empleados en su rehabilitación¹. Este interés por la acústica eclesial se ha reflejado en el mundo científico con la aparición, en los congresos internacionales de acústica, de sesiones especializadas dedicadas a la acústica de los recintos de culto (*Worship Buildings Acoustics*), presentes en el *17º Congreso Internacional de Acústica (ICA)* celebrado en Roma en septiembre de 2001 o, un año después, en el *Forum Acusticum Sevilla 2002* (3º Congreso Europeo de Acústica y Simposium Europeo-Japonés), pasando a ser una sesión programada habitual en posteriores congresos internacionales y nacionales. Además, ha dado lugar a una abundante publicación de artículos en revistas científicas especializadas.

Los primeros estudios acústicos comenzaron con la medición y el análisis de los valores del tiempo de reverberación en recintos culturales significativos, y paulatinamente, se van ocupando de otros aspectos como la uniformidad de la distribución sonora, la calificación de inteligibilidad de la palabra con ensayos subjetivos e índices objetivos, o los fenómenos de acoplamiento acústico entre diferentes volúmenes. Con los avances de las tecnologías y del interés por la materia, los parámetros monoaurales y binaurales pueden determinarse *in situ* o predecirse a partir de otros, se relacionan parámetros de acústica de salas con características arquitectónicas, con el uso al que se destinan, o se establecen relaciones entre estilos y tipologías arquitectónicas. Asimismo, las técnicas de simulaciones informáticas del campo sonoro y de auralización permiten predecir parámetros acústicos y la recreación de la percepción acústica subjetiva en distintas configuraciones.

Con el objeto de enmarcar el contexto de este trabajo de investigación, presentaremos como antecedentes, expuestos de forma cronológica, algunos de los estudios acústicos más relevantes, realizados en recintos de culto de diversas ciudades europeas y de oriente próximo. Destacaremos, en apartados independientes, la labor científica desarrollada en esta materia, por grupos y proyectos de investigación específicos, como los dirigidos por A. Carvalho en Portugal, el proyecto CAHRISMA, F. Martellotta en Italia, el grupo de acústica de la Universidad Politécnica de Valencia - Universidad de Valencia y, por último, el Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla (IUACC).

¹ **Zamarreño, T. (2011).** *Acústica y patrimonio*. *Tecniacústica 2011*, Cáceres, octubre. p. 7.

Las primeras publicaciones relacionadas con la acústica en lugares de culto se remontan a mediados del siglo pasado. En 1952, Parkin y Taylor^{2,3} midieron el tiempo de reverberación en la catedral de San Pablo de Londres, recinto para el que, además, diseñaron y probaron un sistema de apoyo electroacústico que proporcionaba una uniforme distribución sonora y mejoraba la inteligibilidad de la palabra. Como veremos en este capítulo, la catedral de San Pablo de Londres, ha sido objeto de múltiples estudios acústicos.

En esa misma década, Lottermoser⁴ y, posteriormente, Keibs y Kuhl⁵, realizaron análisis acústicos de iglesias barrocas luteranas alemanas a partir de las medidas *in situ* del tiempo de reverberación, mientras que en Italia, Raes y Sacerdote⁶ llevaron a cabo medidas experimentales de las propiedades acústicas en dos basílicas romanas.

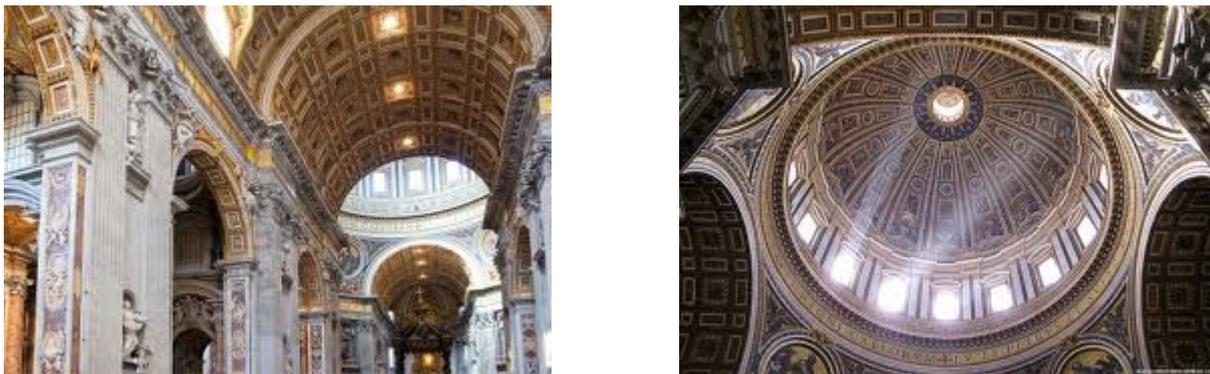


Figura 3.1. Vista interior de la bóveda de cañón y de la cúpula de la basílica de San Pedro del Vaticano, estudiada por Shankland y Shankland.

En la década de los setenta, la basílica de San Pedro (figura 3.1) y las basílicas romanas de San Juan de Letrán, San Pablo Extramuros y Santa María La Mayor fueron estudiadas por Shankland y Shankland⁷, donde, a partir de las medidas del tiempo de reverberación realizadas *in situ*, justificaron el comportamiento sonoro de estos espacios, por el acoplamiento acústico entre los distintos volúmenes existentes en cada iglesia y por el grado de difusión del campo acústico en su interior. En la misma línea, pero con ocho iglesias ortodoxas en Tesalónica, Tzekakis^{8,9} determinó el coeficiente de absorción virtual de los espacios acoplados. Sobre iglesias españolas (catalanas), inglesas y francesas, Fearn¹⁰ publicó un estudio donde comparaba las medidas del tiempo de reverberación, obtenidas mediante impulsos generados por estallidos de globos, con su diseño arquitectónico. Para las iglesias góticas catalanas, comprobó que los tiempos de reverberación obtenidos eran superiores a los valores recomendados para la música y la palabra.

En la década de los ochenta, Schader *et al.*¹¹ analizaron las condiciones acústicas de las iglesias barrocas luteranas en Alemania, a partir de las medidas *in situ* del tiempo de reverberación.

² Parkin, P.H. y Taylor, J.H. (1952). Speech reinforcement in St. Paul's Cathedral—experimental system using line-source loudspeakers and time delays. *Wireless World*, 58, p. 54-57.

³ Parkin, P.H. y Taylor, J.H. (1952). Speech reinforcement in St. Paul's Cathedral—details of the equipment and results of tests. *Wireless World*, 58, p. 109-111.

⁴ Lottermoser, W. (1952). Nachhallzeiten in Barockkirchen. *Acustica*, 2, p. 109-111.

⁵ Keibs, L. y Kuhl, W. (1959). Akustics der Thomaskirche in Leipzig. *Acustica*, 9, p. 365-370.

⁶ Raes, A. C. y Sacerdote, G. (1953). Measurement of the acoustical properties of two roman basilicas. *Journal of the Acoustical Society of America*, 25 (5), p. 935-961.

⁷ Shankland, R.S. y Shankland, H.K. (1971). Acoustic of St. Peter's and Patriarchal Basilicas in Rome. *Journal of the Acoustical Society of America*, 50, p. 389-396.

⁸ Tzekakis, E. (1971). Reverberation time of the Rotunda of Thessaloniki. *Journal of the Acoustical Society of America*, 57, p. 107-109.

⁹ Tzekakis, E. (1979). Data on the acoustics of the byzantine churches of Thessaloniki. *Acustica*, 43, p. 275-279.

¹⁰ Fearn, R.W. (1975). Reverberation in Spanish, English and French churches. *Journal of Sound and Vibration*, 43(3), p. 562-567.

¹¹ Schader, S., Schubert, G. y Lüscher, E. (1981). Akustische Gesichtspunkte bei der Gestaltung von Sakralräumen. *Detail* 4/81, p. 478-482.

En 1984, Lewers y Anderson¹² realizaron medidas acústicas en la catedral de San Pablo de Londres, determinando el tiempo de reverberación mediante tres métodos diferentes, la distribución sonora y la inteligibilidad mediante ensayos subjetivos. Posteriormente, los estudios acústicos en la citada catedral se ampliaron con medidas del índice RASTI¹³ (figura 3.2), para calificar la inteligibilidad de la palabra, y con el análisis de su comportamiento como sala de conciertos¹⁴.

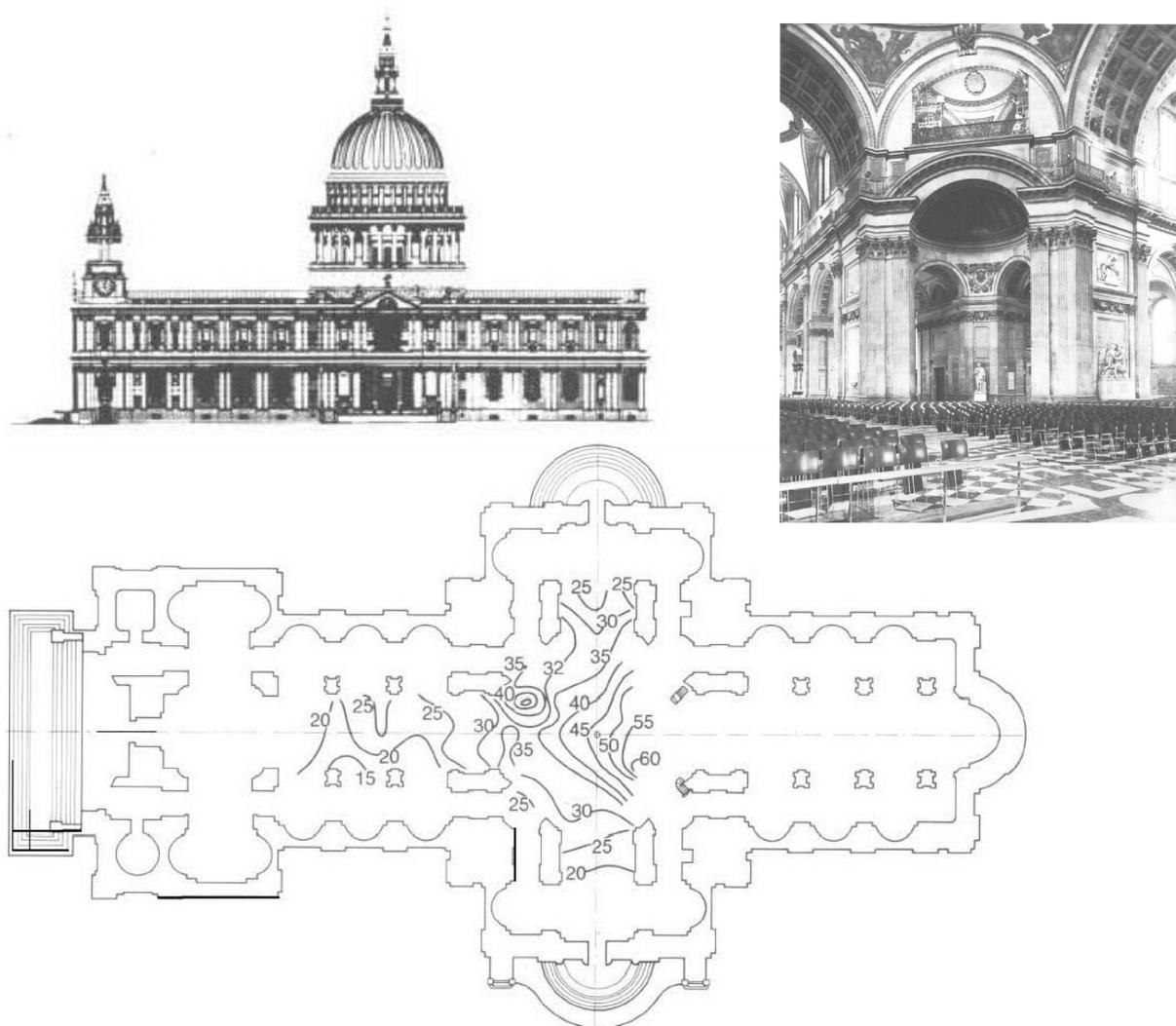


Figura 3.2. Alzado, vista interior y curvas iso-RASTI de la catedral de San Pablo de Londres, determinadas por Anderson y Jacobsen.

En 1987, Recuero y Gil¹⁵ realizaron mediciones acústicas *in situ* de la iglesia del monasterio de Santo Domingo de Silos, lugar emblemático del canto gregoriano. Determinaron tiempos de reverberación excesivos, especialmente a frecuencias bajas, adecuados para el canto gregoriano, pero inaceptables para el uso de la palabra; niveles de distribución sonora aceptables, incluso para frecuencias altas; y, por último, niveles excesivos de ruido de fondo producidos por el tráfico, el motor del órgano y el sistema de calefacción. Años más tarde, utilizando tecnologías de medición más avanzadas, Díaz y

¹² Lewers, T.H. y Anderson, J. (1984). Some acoustical properties of St. Paul's Cathedral, London. *Journal of Sound and Vibration*, 92 (2), p. 285-297.

¹³ Anderson, J. y Jacobsen, T. *RASTI measurements in St. Paul's Cathedral, London*. Technical note, Brüel&Kjaer, Dinamarca.

¹⁴ Anderson, J. y Bratos-Anderson, J.S. (1999). *St. Paul's Cathedral London, as a concert hall*. 6th International Congress on Sound and Vibration, Copenague, julio.

¹⁵ Recuero, M. y Gil, C. (1987). Experimental study of the acoustics in the church of the monastery of Santo Domingo de Silos. *Acustica*, 62, p. 241-248.

Pedrero¹⁶ midieron una serie de parámetros acústicos monoaurales y binaurales en la iglesia de dicho monasterio, realizando consideraciones sobre la adecuación de las características acústicas del recinto al uso litúrgico-musical, para el que está destinado (figura 3.3).

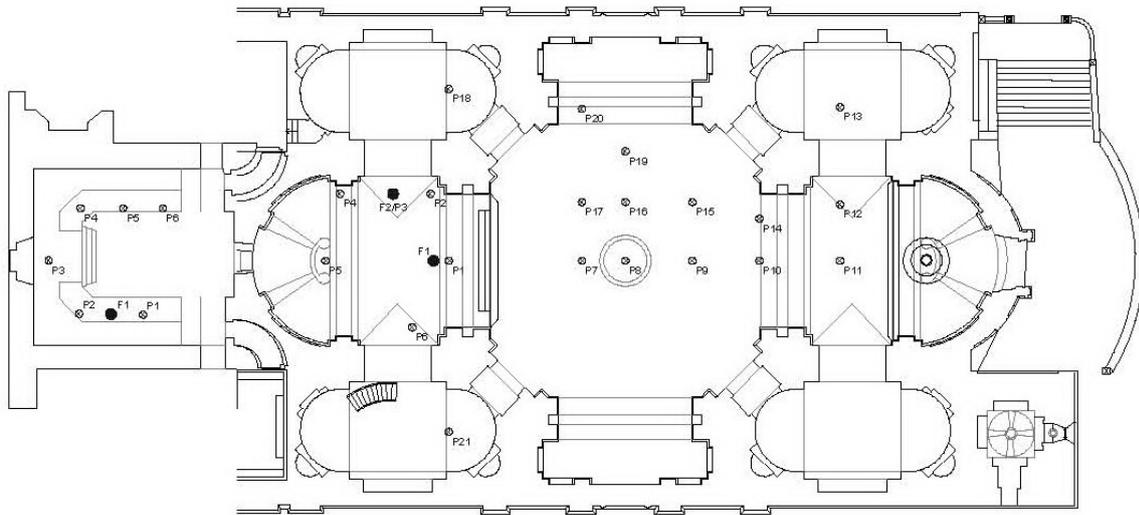


Figura 3.3. Planta de la iglesia del monasterio de Silos. Posiciones de fuente y micrófonos de medidas experimentales de Díaz y Pedrero.

Para mejorar la inteligibilidad de la palabra en una iglesia renacentista del siglo XV, con buenas condiciones sonoras para la música, Romero-Faus *et al.*¹⁷ propusieron un sistema de apoyo - electroacústico que, concentrando un grupo de altavoces sobre el altar, aseguraba la uniformidad sonora en el recinto.

Como comentamos anteriormente, el problema de las condiciones acústicas afecta a los lugares de culto de las distintas confesiones religiosas. Un ejemplo de ello es el estudio de Hammad¹⁸, realizado en 1990, que recoge las medidas experimentales de 30 mezquitas en Amman (Jordania), que incluye tiempos de reverberación, inteligibilidad mediante índice RASTI, nivel de ruido de fondo, EDT y relación señal ruido, mostrando la elevada reverberación y la escasa inteligibilidad en estos espacios. Un año después, los resultados del acondicionamiento acústico de una de las mezquitas estudiadas fueron publicados¹⁹. Otro ejemplo es el estudio del comportamiento acústico de varias mezquitas en Arabia Saudí realizado por Adel²⁰ en el año 2003.

En el siglo actual, los estudios de Magrini y Ricciardi se centran en iglesias de la ciudad suiza de Génova, construidas entre los siglos XI-XVI, en los cuales comparan la distribución de los parámetros acústicos medidos y teóricos^{21,22}; relacionan los parámetros de acústica de salas con sus características arquitectónicas y con el uso al que se destinan²³; o proponen el análisis de los efectos

¹⁶ Díaz, C. y Pedrero, A. (2006). *La acústica de la iglesia del monasterio de Santo Domingo de Silos y su adecuación a la práctica del canto gregoriano*. Tecniacústica Gandía 2006, octubre.

¹⁷ Romero-Faus, J., Giménez-Pérez, A., Marín-Sanchís, A. y Sanchís-Sabater, A. (1999). Restoration by means of sound reinforcement of a church of the Renaissance. *Journal of Acoustical Society of America*, 105(2), p. 1044-1044.

¹⁸ Hammad, R.N. (1990). RASTI measurements of mosques in Amman, Jordan. *Applied Acoustics*, 30, p. 335-345.

¹⁹ Abdelazeed, M.K., Hammad, R.N. y Mustafa, A.A. (1991). Acoustics of King Abdullah mosque. *Journal of Acoustical Society of America*, 90(3), p. 1441-1445.

²⁰ Adel, A.A. (2003). Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia. *Journal of Acoustical Society of America*, 113(3), p. 1505-1517.

²¹ Magrini, A. y Ricciardi, P. (2001). *On the distribution of acoustical parameters: Comparison between experimental results in historical Christian churches and theoretical models*. 17th International Congress on Acoustics, ICA 2001, Roma, septiembre.

²² Magrini, A. y Ricciardi, P. (2003). Churches as auditoria: Analysis of acoustical parameters for a better understanding of sound quality. *Journal of Building Acoustics*, 10(2), p. 135-157.

²³ Magrini, A. y Ricciardi, P. (2002). An experimental study of acoustical parameters in churches. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 7 (3), p. 177-183.

de los espacios acoplados en el campo sonoro de los recintos, mediante un modelo teórico basado en el modelo SEA (*Statistical Energy Analysis*), comparando los resultados del modelo con los obtenidos en las medidas experimentales²⁴ (figura 3.4). Más tarde, proponen dos métodos sencillos para determinar los valores de reverberación en edificios religiosos antiguos, que cuenten con espacios articulados tales como capillas laterales, en los cuales el efecto de los múltiples espacios acoplados acústicamente pueden influir en el campo sonoro del volumen central²⁵.

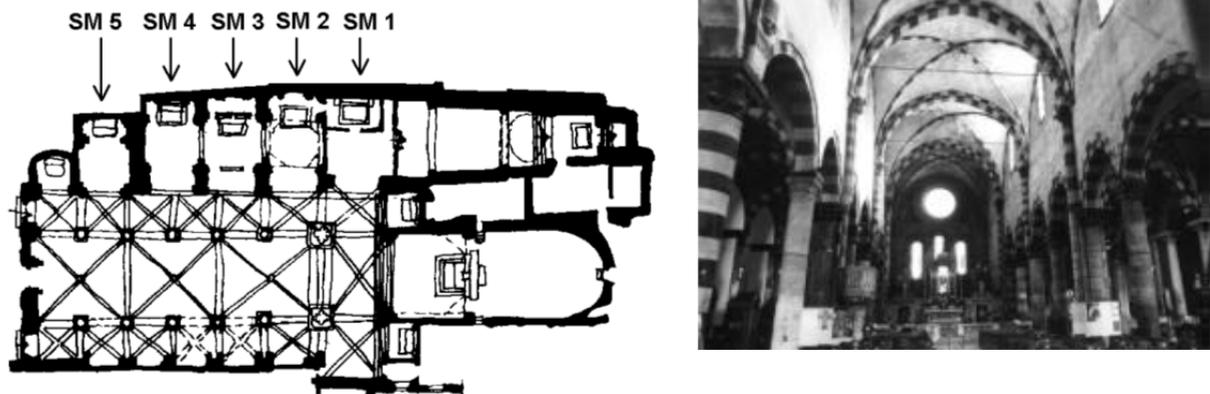


Figura 3.4. Planta y vista interior de la iglesia de S. Maria di Castello de Génova, cuyo espacios acoplados fueron analizados por Magrini y Ricciardi.

Diferentes aspectos acústicos, en los distintos estilos y tipologías arquitectónicas o confesiones religiosas, son objetos de otros trabajos de investigación. Destacamos varios estudios dirigidos por Desarnaulds, entre 1998 y 2002, sobre más de 150 iglesias suizas de distintas épocas (románicas, góticas, barrocas, neoclásicas y modernas), tanto católicas como protestantes, como el que se centra, principalmente, en el análisis del tiempo de reverberación y del índice RASTI²⁶; o el que estudia la relación del tiempo de reverberación y los estilos arquitectónicos²⁷; o el análisis estadístico sobre las condiciones litúrgicas de las celebraciones católicas y protestantes, y su relación con las características arquitectónicas y acústicas de sus iglesias en Suiza²⁸.



Figura 3.5. Resonadores acústicos encontrados en la bóvedas de la Iglesia de la Presentación de la Virgen en el Templo, Sremski Karlovci.

Las iglesias ortodoxas serbias fueron estudiadas por Mijic y Sumarac-Pavlovic presentando sus resultados en congresos internacionales celebrados en los años 2001 y 2002. El análisis, desde el punto de vista acústico, de las iglesias ortodoxas serbias fue realizado por Mijic²⁹, donde a partir de las medidas experimentales del tiempo de reverberación, valoró la repercusión acústica de las costumbres ortodoxas en el diseño arquitectónico de los templos. Investigaciones arqueológicas o reconstrucciones de iglesias medievales serbias revelaron la existencia de

²⁴ Magrini, A. y Ricciardi, P. (2002). *Coupling effects in Christian churches: preliminary analysis based on a simple theoretical model and some experimental results*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

²⁵ Magrini, A. y Magnani, L. (2005). Models of the influence of coupled spaces in Christian churches. *Journal of Building Acoustics*, -12(2), p. 115-142.

²⁶ Desarnaulds, V., Bossoney, S. y Eggenschwiler, K. (1998). Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen. *Fortschritte der Akustik DAGA*, 98, p. 710-711.

²⁷ Desarnaulds, V. y Carvalho, A. (2001). *Analysis of reverberation time values in churches according to country and architectural style*. The 8th International Congress on Sound and Vibration, Hong Kong, julio.

²⁸ Desarnaulds, V. y Carvalho, A. (2002). *Liturgical conditions of catholic and reformed celebrations and their relationship with architectural and acoustical characteristics of churches*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

²⁹ Mijic, M. (2001). *Serbian orthodox church—an acoustical view*. 17th International Congress on Acoustics, ICA 2001, Roma, septiembre.

resonadores acústicos (figura 3.5), hecho que llevó a Mijic y Sumarac-Pavlovic³⁰, a ensayar en laboratorio varios resonadores para averiguar su función. Otra investigación se centró en la influencia de los detalles específicos arquitectónicos, en las propiedades del campo sonoro en las iglesias serbias ortodoxas³¹.

En 2002, las condiciones acústicas de las catedrales góticas alemanas fueron objeto de estudio para Meyer³², proponiendo soluciones prácticas para mejorar la acústica para los conciertos de coro u órgano, sin afectar a la conservación de estos edificios históricos. En el mismo año, a partir de las medidas experimentales de la reverberación de catorce iglesias españolas de distintos estilos arquitectónicos, Fernández *et al.*³³ proponen una base de datos que permite, mediante expresiones empíricas, predecir el tiempo de reverberación de una iglesia, según su volumen y su estilo arquitectónico. En 2004, Cunico y Soares³⁴ analizaron los conflictos acústicos entre los sistemas de sonido y la arquitectura moderna, a partir de las medidas experimentales de dos iglesias brasileñas, una con disposición asamblearia y otra con forma cónica. Schmidt y Kirkegaard³⁵, en el año 2005, investigaron el campo de aplicación que los programas de simulación acústica pueden tener durante el proceso de diseño acústico y arquitectónico, apuntando la necesidad de aplicar dichos programas en las primeras fases del proyecto arquitectónico. Además establecen estrategias para los futuros programas informáticos, como el desarrollo acústico de un determinado espacio, o el desarrollo de un espacio con una acústica determinada (figura 3.6).

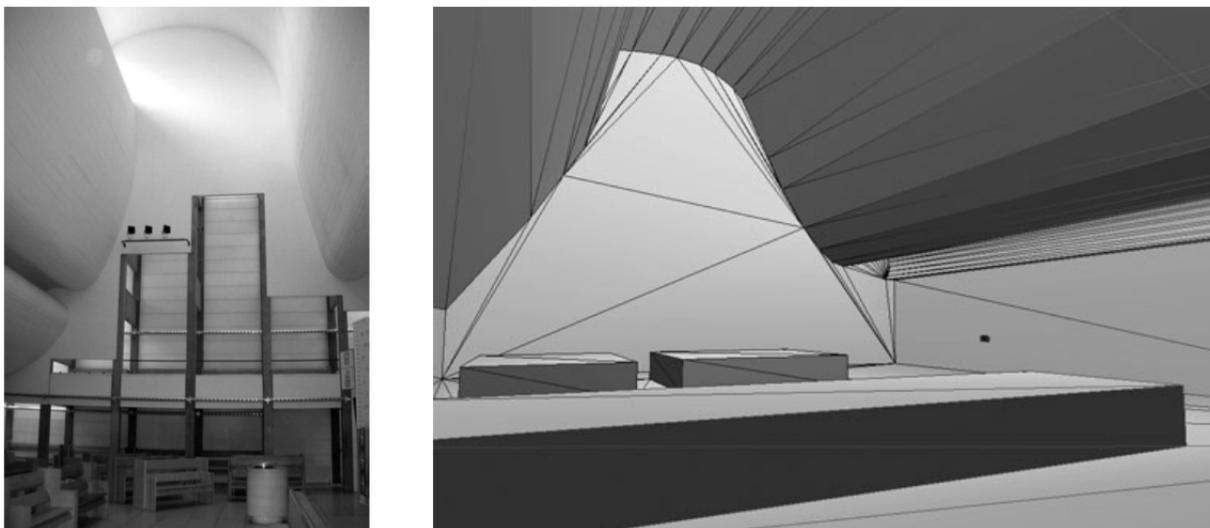


Figura 3.6. Vista interior y simulación informática de la iglesia Bagsvaerd. Trabajo de investigación de Schmidt y Kikegaard.

En el año 2008, Mateus *et al.*³⁶ estudian las diferentes condiciones acústicas de dos capillas del nuevo edificio de la iglesia de la Santísima Trinidad en Fátima, a partir de las medidas realizadas *in situ*. Aunque tienen geometría y aspectos de acabados muy semejantes entre sí, una de las capillas es mucho más reverberante que la otra, debido a la diferencia en las características de absorción sonora del revestimiento interior de paredes y techo. Díaz *et al.*³⁷ mostraron, también en 2008, los resultados de una campaña de mediciones acústicas realizadas sobre diversas iglesias prerrománicas

³⁰ Mijic, M. y Sumarac-Pavlovic, D. (2002). *Acoustic resonators in Serbian orthodox churches*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

³¹ Sumarac-Pavlovic, D. y Mijic, M. (2002). *Relation between sound field properties and architectural design in Serbian churches*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

³² Meyer, J. (2002). *Acoustics of gothic churches*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

³³ Fernández, M., Recuero, M. y Cruz, D. (2002). *Church acoustics*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

³⁴ Cunico, E. O. y Soares, P. F. (2004). *Churches acoustic investigation*. Acústica 2004, Guimarães, septiembre.

³⁵ Schmidt, A.M. y Kirkegaard, P.H. (2005). From architectural acoustics to acoustical architecture using computer simulation. *Journal of Building Acoustics* 12(2), p. 85-98.

³⁶ Mateus, D., Santos, P., Calejo, R. y Abrantes, V. (2008). *Avaliação dos parâmetros de qualidade sonora nas capelas da reconciliação no edifício da nova igreja do Santuário de Fátima*. Acústica 2008, Coimbra, octubre.

³⁷ Díaz, C., Pedrero, A., Navacerrada, M.A. y Carro, C. (2008). *Las características acústicas de las iglesias prerrománicas hispanas*. Acústica 2008, Coimbra, octubre.

hispanas (figura 3.7), mientras que Romero *et al.*³⁸, en 2011, realizaron una propuesta de intervención para la iglesia Sant Agustí de Vinaròs de Castellón, como sala de uso múltiple.

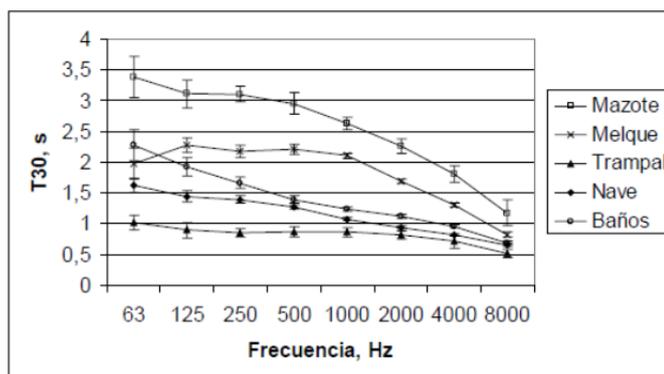


Figura 3.7. Promedios y desviaciones estándar de los tiempos de reverberación medidos en las iglesias prerrománicas hispanas analizadas por Díaz *et al.*

Por un lado, la auralización del sonido del canto mozárabe en su ambiente primitivo, considerando las características acústicas de las iglesias prerrománicas en su estado original³⁹ y, por otro, la repercusión acústica de los diversos métodos de acondicionamiento empleados en la historia de las catedrales, centrándose en la Catedral de Toledo⁴⁰, son, entre otras, las últimas aportaciones del Grupo de Investigación de Acústica Arquitectónica de la Universidad Politécnica de Madrid, presentadas en el congreso Acústica 2012, celebrado en Évora (Portugal).

Programa de investigación sobre la acústica de iglesias católicas en Portugal

Iniciado en 1992 en el laboratorio de Acústica de la Facultad de Ingeniería de Oporto, bajo la coordinación de Antonio Pedro Oliveira de Carvalho, el proyecto plantea el análisis del comportamiento acústico de iglesias católicas de diferentes estilos arquitectónicos, repartidas por el territorio portugués, incluyendo, hasta la fecha, un total de sesenta y siete iglesias⁴¹.

El análisis acústico de las iglesias abarca dos aspectos: el objetivo, describiendo el fenómeno físico, y el subjetivo, mediante la respuesta psico-fisiológica de la audiencia. En el programa se investiga la relación entre las características arquitectónicas y la respuesta acústica del recinto, estudiando las variaciones obtenidas tanto *intra* como *inter-iglesia*.

A través de la determinación de los principales parámetros acústicos de las iglesias, muestran cómo las características arquitectónicas influyen en el comportamiento acústico del recinto, estableciendo relaciones entre los distintos estilos arquitectónicos, dimensiones y materiales con los diferentes parámetros acústicos del análisis objetivo y subjetivo de cada recinto. Otro objetivo es el cálculo de fórmulas y ecuaciones para predecir los valores de los parámetros acústicos, a partir de datos básicos arquitectónicos⁴².

³⁸ Romero, A., Navarro, E.A. y Segura, J. (2011). Estudio y rehabilitación acústica de la iglesia Sant Agustí de Vinaròs (Castelló). *Revista de Acústica*, 41(1-2), p. 28-43.

³⁹ Pedrero, A., Pollow, M., Dietrich, P., Behler, G., Vorländer, M., Díaz, C. y Díaz, A. (2012). *Mozarabic chant anechoic recordings for auralization purposes*. Acústica 2012, Évora, octubre.

⁴⁰ Ruiz, R., Díaz, A., Pedrero, A. y Díaz, C. (2012). *Revestimientos fijos y configurables en la acústica de las catedrales*. Acústica 2012, Évora, octubre.

⁴¹ Información detallada sobre el proyecto puede consultarse en la siguiente dirección de internet: <http://www.fe.up.pt/~carvalho/igrejas.htm>.

⁴² Carvalho, A., Morgado, A. y Henrique, L. (1997). Relationships between subjective and objective acoustical measures in churches. *Journal of the Building Acoustics*, 4 (1), p. 1-20.

Una innovación importante del proyecto fue la propuesta, en los años 1994 y 1995, de un nuevo parámetro denominado *BACH* (*Binaural Acoustics Coherente*)^{43,44} que relaciona las características físicas objetivas binaurales del campo sonoro en las iglesias, con las respuestas subjetivas de la audiencia sobre el sonido musical percibido en estos recintos. El desarrollo y la validación de este parámetro continúa con nuevas medidas experimentales.

Otra investigación importante fue el análisis de la evolución de las condiciones acústicas de las iglesias a través de los siglos, según los distintos estilos arquitectónicos. Como si se tratara de acústica arqueológica, comprobaron cómo la evolución histórica de la construcción de iglesias, en los últimos catorce siglos en Portugal, ha influido en los cambios de sus características acústicas. Como línea de investigación para el futuro, pretenden estudiar la evolución de los estilos musicales en cada momento histórico, desde el canto gregoriano hasta la música contemporánea, pasando por el clasicismo barroco y el romanticismo, empleando los parámetros acústicos representativos, tanto objetivos como subjetivos, y el análisis estadístico.

La primera fase del proyecto culminó, en 1994, con la publicación de la tesis doctoral⁴⁵ del coordinador y, posteriormente en 1998, con su tesis de *maestrado*⁴⁶, además de numerosos artículos y publicaciones en revistas especializadas, así como comunicaciones para congresos. Por citar algunos de ellos, se encuentra aquel en el que definen el tiempo de reverberación, la claridad musical y la fuerza acústica (*strength*, en la nomenclatura inglesa), como los principales y más importantes parámetros para caracterizar la acústica de las iglesias⁴⁷. En otro trabajo, las diferencias detectadas entre el tiempo de reverberación obtenido en las mediciones acústicas y el calculado con las ecuaciones de Eyring y Sabine, les lleva al estudio de los espacios acoplados de las iglesias en cuestión, planteando una formulación analítica del tiempo de reverberación, considerando las magnitudes geométricas del espacio acoplado y del área de la abertura existente entre el volumen principal y el acoplado⁴⁸. Su investigación también muestra, hacia 1999, las relaciones entre el índice RASTI de cualificación de la inteligibilidad de la palabra y otros parámetros acústicos como la claridad musical C_{80} , el tiempo de caída inicial EDT y el tiempo central T_s ⁴⁹ (figura 3.8). Otros ejemplos son: un estudio comparativo de los valores de RASTI en iglesias, sin y con apoyo electroacústico⁵⁰, o un estudio relativo a la influencia de la ocupación en las características acústicas de las iglesias⁵¹.

⁴³ **Carvalho, A. (1994).** *BACH, a new binaural room acoustical measure*. Proceeding of the 128th Acoustical Society of America Meeting, Austin, Texas, diciembre.

⁴⁴ **Carvalho, A. (1995).** *BACH, a new binaural parameter*. Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics, Tondheim, Noruega. Vol. 2, p. 409-412, junio.

⁴⁵ **Carvalho, A. (1994).** *Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches*. Ph. D. Dissertation, University of Florida.

⁴⁶ **Carvalho, A. (1998).** *A inteligibilidade da palavra em igrejas católicas a través de análises de carácter objetivo e subjectivo*. Tese de Maestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

⁴⁷ **Carvalho, A. (1994).** *Objective acoustical analysis of room acoustic measurements in Portuguese catholic churches*. Noise-Con'94, Fort Lauderdale, Florida, mayo.

⁴⁸ **Carvalho, A. (1995).** *The use of the Sabine and Eyring reverberation time equations to churches*. 129th meeting of the Acoustical Society of America, Washington D.C., mayo-junio.

⁴⁹ **Carvalho, A. (1999).** Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches. *Applied Acoustics*, 58, p. 33-49.

⁵⁰ **Carvalho, A. y Lencastre, M. (1999).** *How does RASTI change with sound reinforcement systems in churches?* 6th International Congress on Sound and Vibration, Copenague, julio.

⁵¹ **Desarnaulds, V., Carvalho, A. y Monay, G. (2002).** Church acoustics and the influence of occupancy. *Building Acoustics*, 9 (1), p. 29-47.

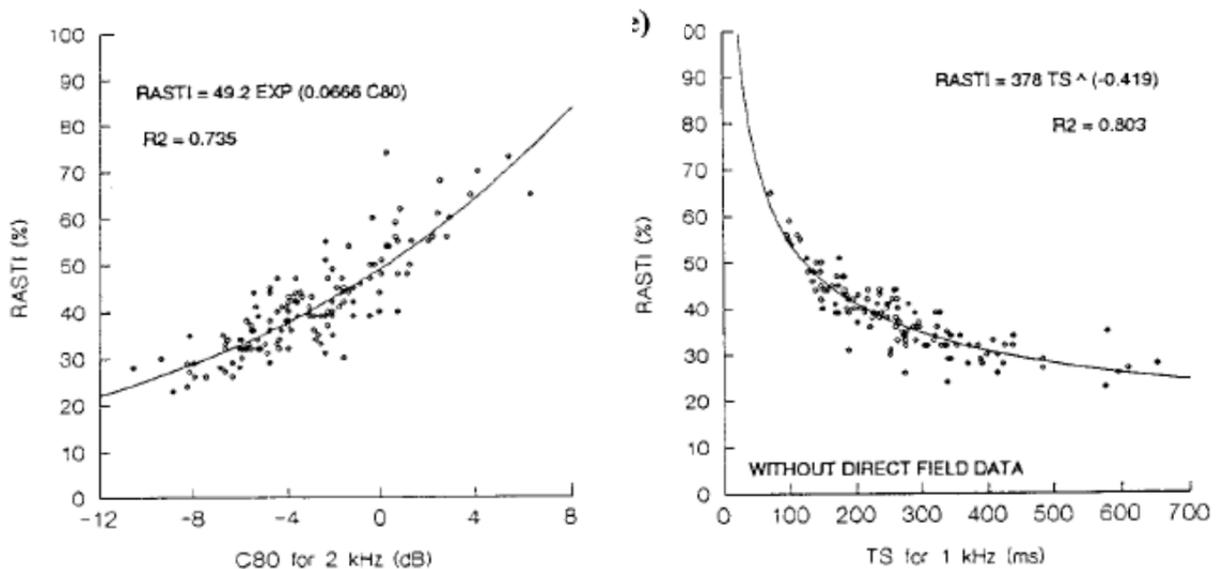


Figura 3.8. Valores de RASTI vs C_{80} y T_S en las iglesias católicas portuguesas analizada por Carvalho.

Recientemente, en 2008, propuso el índice QAI (*Qualidade Acústica de Igrejas*)⁵², un algoritmo que permite cuantificar el confort acústico global de una iglesia, desde el punto de vista de la audiencia, usando los parámetros acústicos objetivos y subjetivos, así como los parámetros arquitectónicos de la misma.

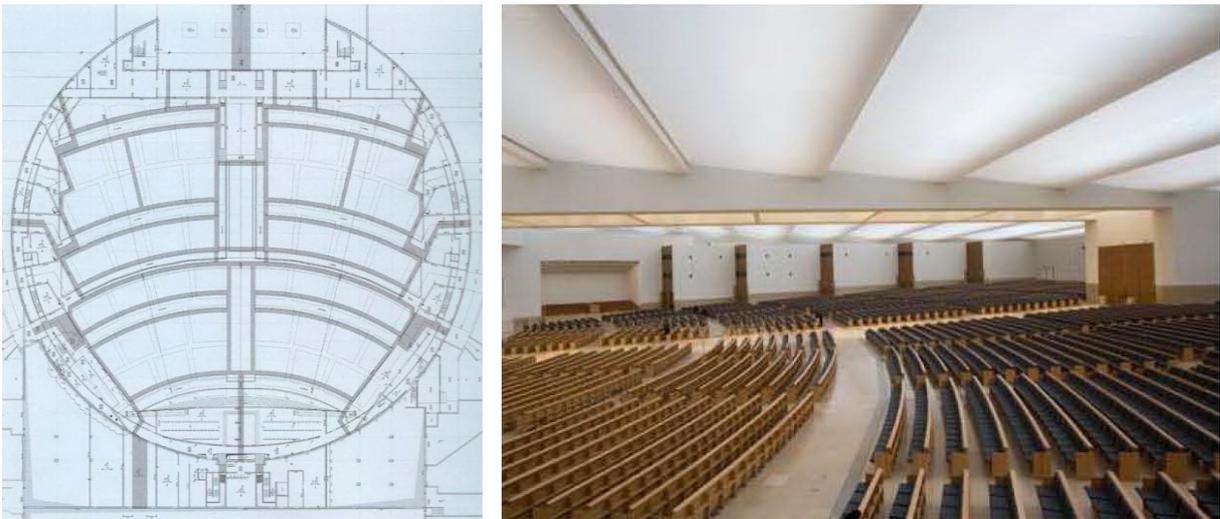


Figura 3.9. Planta y vista interior de la nueva iglesia de la Santísima Trinidad de Fátima, analizada acústicamente por Carvalho y Silva en el año 2009.

Por otro lado, las condiciones acústicas de la nueva iglesia de la Santísima Trinidad de Fátima (figura 3.9), con capacidad para albergar más de 8600 personas sentadas, fueron analizadas, en 2009, para comprobar si, realmente, se ajustaban a los requerimientos y limitaciones acústicos propuestos en la fase de anteproyecto⁵³. La caracterización acústica de las capillas subterráneas de Reconciliación de la nueva iglesia de Fátima⁵⁴ fue realizada aportando valores de tiempo de reverberación, RASTI con y sin el uso del sistema de refuerzo de sonido, niveles de ruido y curvas NC de los equipos de climatización e índices de aislamiento al ruido aéreo entre capillas. Los resultados se compararon con

⁵² Carvalho, A. y Loureiro, J. (2008). *Metodologia multi-critério para análise da qualidade acústica em igrejas*. Acústica 2008, Coimbra, octubre.

⁵³ Carvalho, A. y Silva, P. (2009). *Caracterização acústica da megaigreja da Santíssima Trindade - Fátima*. Teniacústica 2009, Cádiz, septiembre.

⁵⁴ Carvalho, A. y Nascimento, B. (2011). *Acoustical characterization of the underground chapels of the new Holy Trinity church in the Fatima shrine, Portugal*. Forum Acusticum, Aalborg, junio.

los relativos a iglesias católicas portuguesas de similar volumen y, además, se analizó la opinión subjetiva de los usuarios de las capillas de Fátima.

De forma similar, realizó la caracterización acústica de la mezquita central de Lisboa⁵⁵ mediante tiempo de reverberación, RASTI y ruido de fondo asociado al tráfico, comparando los resultados con los correspondientes a otras mezquitas e iglesias católicas con un volumen similar (figura 3.10).

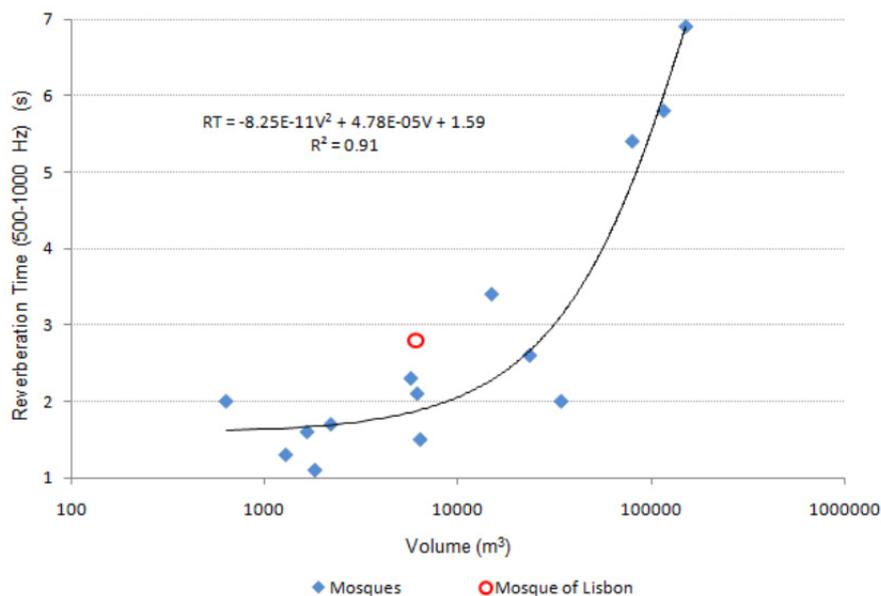


Figura 3.10. Comparación de la mezquita central de Lisboa con otras mezquitas: Valores del tiempo de reverberación en función del volumen. Investigación realizada por Carvalho y Freitas.

Al congreso Tecniacústica 2011, el grupo realizó dos aportaciones relacionadas con la acústica eclesial: la primera, consistió en realizar una propuesta de rehabilitación acústica para la iglesia N^a Sra. da Conceição de Oporto, a partir de las medidas *in situ* del tiempo de reverberación, RASTI y ruido de fondo⁵⁶, mientras que la segunda, consistió en la determinación del coeficiente de absorción sonora, en cámara reverberante, de distintos tipos de bancos de iglesias⁵⁷.

Actualmente, el programa sigue abierto, incorporando nuevas iglesias para el estudio. Por otro lado, el grupo pretende crear y publicar una *guía de sonido de las iglesias portuguesas*, que, considerando su contexto histórico, ofrezca datos relativos a su comportamiento acústico para los usos de la palabra y para varios tipos de música. El hecho de que las iglesias, cada vez más, se usen como alternativas a salas de conciertos justifica la utilidad del contenido de la guía.

Proyecto CAHRISMA (Conservation of the acoustical heritage by the revival and identification of the Sinan's mosques' acoustics)

Dentro del Programa Europeo INCO (enmarcado en el 5º programa marco europeo de investigación) durante los años 2000-2003, bajo la coordinación del Centro Universitario de Informática (MIRALab) de la Universidad de Ginebra y en colaboración con otras universidades europeas, este proyecto desarrolla el concepto de *patrimonio arquitectónico híbrido* planteado para espacios acústicamente significativos, como una nueva forma de identificación que recoge las características acústicas,

⁵⁵ Carvalho, A. y Freitas, C. (2011). *Acoustical characterization of the central mosque of Lisbon*. Forum Acusticum, Aalborg, junio.

⁵⁶ Carvalho, A. y Cruz, M. (2011). *Igrejas modernas com problemas acústicos o caso da igreja Nossa Senhora da Conceição (Porto)*. Tecniacústica 2011, Cáceres, octubre.

⁵⁷ Carvalho, A. y Pino, J. (2011). *Estudo acústico de bancos de igreja*. Tecniacústica 2011, Cáceres, octubre.

además de las peculiares visuales y formales. Los responsables del proyecto resumen los objetivos científicos y tecnológicos del mismo como sigue⁵⁸:

- Identificación de las peculiaridades acústicas, tanto actuales como originales, de las mezquitas de Sinan⁵⁹ y de las iglesias bizantinas, mediante medidas acústicas *in situ* y simulación acústica de modelos informáticos.
- Evaluación de las características subjetivas y psicoacústicas de estos espacios de culto.
- Integración de los entornos visual y acústico en un sistema interactivo en tres dimensiones y en tiempo real.
- Creación de un sistema integrado en tiempo real para CD-ROM de modelos arquitectónicos en tres dimensiones con personajes humanos virtuales.
- Comparación de la acústica de las mezquitas y de las iglesias, y revisión de las influencias de las iglesias bizantinas en las mezquitas de Sinan.
- Determinación de las condiciones acústicas óptimas para las mezquitas mediante la comparación de parámetros subjetivos, obtenidos de encuestas psicoacústicas, y de los parámetros objetivos obtenidos mediante medidas y cálculos.
- Conservación y restauración del patrimonio arquitectónico (acústico y visual), de los monumentos elegidos, en un ámbito virtual.

Algunos resultados de este proyecto de investigación fueron presentados en Roma en el 17º Congreso Internacional de Acústica (ICA 2001)^{60,61,62} y en el Forum Acusticum de Sevilla 2002⁶³ (figura 3.11).

En la misma línea destaca la investigación, publicada en 2005, sobre la influencia de la cúpula en el tiempo de reverberación de un recinto⁶⁴, elemento presente en la mayoría de los edificios religiosos del campo de estudio del citado proyecto. Analizando el comportamiento sonoro en una maqueta a escala de una mezquita común, muestran cómo dicho parámetro es afectado e indican cómo este fenómeno podría ser cuantificado. Asimismo, en 2008, las características acústicas de las mezquitas clásicas del período otomano y las del período contemporáneo, se contrastan mediante el estudio de las condiciones sonoras de la mezquita de Kocatepe de Ankara⁶⁵, un edificio cultural que combina la estética otomana del siglo XVI con la tecnología del siglo XX (figura 3.12).



Figura 3.11. Vista interior de la Iglesia de Santa Sofía de Constantinopla, cuya acústica fue analizada por Weitze *et al.*

⁵⁸ Karabiber, Z.A. (2000). *A new approach to an ancient subject: CAHRISMA project*. 7th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch, julio.

⁵⁹ El arquitecto Sinan (1498?-1588?) estuvo fuertemente influenciado por la arquitectura bizantina y en su obra desarrolló un estilo propio.

⁶⁰ Christoffer, A., Weitze, C., Lynge, C., Rindel, J.H. y Gade, A.C. (2001). *Computer simulation of the acoustics of mosques and Byzantine churches*. 17th International Congress on Acoustics, ICA 2001, Roma, septiembre.

⁶¹ Prodi, N., Marsilio, M. y Pompoli, R. (2001). *On the prediction of reverberation time and strength in mosques*. 17th International Congress on Acoustics, ICA 2001, Roma, septiembre.

⁶² Marsilio, M., Prodi, N. y Pompoli, R. (2001). *On the effect of floor inside mosques*. 17th International Congress on Acoustics, ICA 2001, Roma, septiembre.

⁶³ Weitze, C. A., Rindel, J. H., Christenswen, C. L. y Gade, A. C. (2002). *The acoustical history of Hagia Sophia revived through computer simulation*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

⁶⁴ Prodi, N. y Marsilio, M. (2005). *On the effect of domed ceiling in worship spaces: a scale model study of a mosque*. *Journal of Building Acoustics*, 12(2), p. 117-133.

⁶⁵ Sü, Z. y Yilmazer, S. (2008). *The Acoustical Characteristics of the Kocatepe Mosque in Ankara, Turkey*. *Architectural Science Review*, 51(1), p. 21-30.



Figura 3.12. Interior y exterior de la mezquita de Kocatepe de Ankara. Caracterización acústica realizada por Sü y Yilmazer.

Trabajo de investigación de Cirillo y Martellota

La redacción de la tesis doctoral⁶⁶ de Martellota (finalizada en el año 2001) sobre las características acústicas de nueve iglesias románicas en el sur de Italia, con volúmenes comprendidos entre 1500 m³ y 32.000 m³, fue el comienzo de una trayectoria investigadora, cuyos resultados se recogen en diferentes publicaciones en revistas, comunicaciones en congresos y monografías. De las aportaciones más destacadas y relevantes realizaremos una breve reseña.

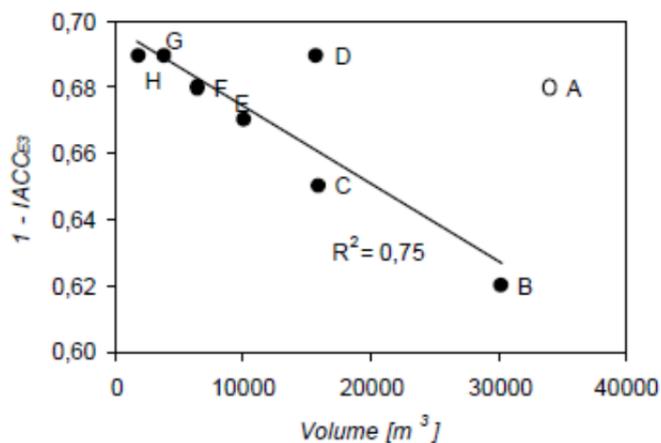


Figura 3.13. Valores de $(1-IACC_{E3})$ en función del volumen, en las ocho iglesias románicas analizadas en la región italiana de Apulia.

diferencias detectadas en la energía inicial en los distintos puntos de medida, según su distancia a la fuente sonora⁶⁹. Además, presentó los resultados de los parámetros binaurales (IACC) medidos en las iglesias estudiadas. A pesar de la gran diferencia entre los volúmenes de las mismas, encuentra similitud entre los resultados de IACC, demostrando la dependencia de los parámetros binaurales con el volumen y la anchura del recinto⁷⁰ (figura 3.13).

Un año más tarde, aportó un análisis detallado de los valores (promediados espacialmente,

Para la muestra de iglesias elegida para el desarrollo de la tesis, presentó, en 2002, los valores experimentales medidos *in situ*, analizando la distribución interior de los parámetros acústicos y su dependencia con las características específicas de cada iglesia, aportando, finalmente, una discusión global de los resultados⁶⁷. En el mismo año, propuso un modelo teórico, basado en el modelo de Barron-Lee⁶⁸ para auditorios, para predecir las relaciones energéticas en las iglesias analizadas, basándose en las

⁶⁶ Martellota, F. (2001). *Caratteristiche acustiche delle chiese romaniche in Puglia*. Tesis Doctoral en Física Aplicada, Università degli Studi di Ancona.

⁶⁷ Cirillo, E. y Martellota, F. (2002). Acoustics of Apulian-Romanesque churches: an experimental survey. *Building Acoustics*, 9 (4), p. 271-288.

⁶⁸ Barron, M. y Lee, L. J. (1988). Energy relations in concert auditorium. *Journal of Acoustical Society of America*, 84 (2), p. 618-628.

⁶⁹ Cirillo, E. y Martellota, F. (2002). An improved model to predict energy-based acoustic parameters in Apulian-Romanesque churches. *Applied Acoustics*, 64, p. 1-23.

⁷⁰ Cirillo, E. y Martellota, F. (2002). *On the measurement of binaural acoustic parameters in some Romanesque churches*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

individuales y según posición en el recinto) de los distintos parámetros acústicos monoaurales y binaurales, investigando en los siguientes temas:

- El efecto de los parámetros arquitectónicos sobre el tiempo de reverberación, mostrando la influencia del volumen y de los materiales en los valores de aquel.
- Mediante el estudio de los valores promediados de los demás parámetros acústicos muestra la relación, o bien con el tiempo de reverberación, o con la absorción acústica total del recinto.
- El análisis de los valores, promediados espectralmente de los parámetros monoaurales, se expresan en función de la distancia fuente-receptor y de uno o dos de los siguientes parámetros: volumen de la sala, absorción total, coeficiente medio de absorción, longitud total o tiempo de reverberación.
- Finalmente, demostró que los valores de los parámetros acústicos en cada posición, que describen la claridad, están significativamente correlacionados entre sí⁷¹.

En el año 2006 publicó una monografía⁷² sobre culto, acústica y arquitectura, donde a través de cinco capítulos analiza la compleja relación entre música y arquitectura; la evolución de la liturgia cristiana y sus implicaciones acústicas y arquitectónicas; la evolución de la música sacra; los criterios objetivos y subjetivos para evaluar las condiciones acústicas de un espacio; y, por último, analiza los resultados de las medidas experimentales realizadas en recintos eclesiales italianos de distintos estilos arquitectónicos.

En 2008, aplicó el modelo energético μ -model⁷³, definido originalmente para las iglesias gótico-mudéjares por el grupo de investigación del IUACC, en treinta iglesias italianas con el fin de intentar generalizar el modelo para iglesias de distintas tipologías. Un año más tarde, propuso un modelo energético exponencial⁷⁴ como modelo de distribución de la energía acústica en iglesias, con ecuaciones de cálculo sencillas y precisas, frente al modelo lineal usado para adaptar la teoría revisada de Barron⁷⁵. Posteriormente, comparó los modelos energéticos propuestos por Cirillo y Martellota⁷⁶ y por Zamarreño *et al.*⁷⁷ para intentar generalizar su uso, empleando los resultados de las medidas experimentales realizadas en 24 iglesias italianas de distinto estilo, tipología y situación⁷⁸.

Durante 2008 y 2009, otros aspectos acústicos también fueron investigados por este investigador, como las condiciones acústicas preferidas por la audiencia en las iglesias, utilizando diferentes piezas musicales (desde canto gregoriano a música sinfónica) y relacionando calificaciones subjetivas y parámetros acústicos⁷⁹; la determinación del coeficiente de absorción de bancos de madera para iglesias⁸⁰, de diferentes tipos y materiales, en cámara reverberante con el método de Bradley⁸¹; o el fenómeno de acoplamiento acústico descrito por Shankland y Shankland para la basílica de San

⁷¹ Cirillo, E. y Martellota, F. (2003). Acoustics of Apulian-Romanesque churches: correlations between architectural and acoustical parameters. *Building Acoustics*, 10 (1), p. 55-76.

⁷² Cirillo, E y Martellota, F. (2006). *Worship, acoustics and architecture*. Essex: Multi-Science Publishing Co.

⁷³ Berardi, U, Cirillo, E. y Martellota, F. (2008). *Predicting energy-based acoustic parameters in churches: an attempt to generalize the μ -Model*. Acústica 2008, Coimbra, octubre.

⁷⁴ Martellota, F. (2009). A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches. *Journal of Acoustical Society of America*, 125 (3), p. 1281-1284.

⁷⁵ Barron, M. y L. J. Lee, L.J. (1988). Opus cit.

⁷⁶ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2005). Sound propagation and energy relations in churches. *Journal of Acoustical Society of America*, 118, p. 232–248.

⁷⁷ Zamarreño, T., Girón, S. y Galindo, M. (2007). Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches. *Journal of Acoustical Society of America*, 121 (1), p. 234–250.

⁷⁸ Berardi, U., Cirillo, E. y Martellotta, F. (2009). A comparative analysis of acoustic energy models for churches. *Journal of Acoustical Society of America*, 126 (4), p. 1838-1849.

⁷⁹ Martellota, F. (2008). Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches. *Journal of Sound and Vibration*, 317 (1-2), p. 378-399.

⁸⁰ Martellota, F. y Cirillo, E. (2009). Experimental studies of sound absorption by church pews. *Applied Acoustics*, 70, 441-449.

⁸¹ Bradley, J.S. (1992). Predicting the absorption of pew cushions. *Journal of Acoustical Society of America*, 92(4), p.2470.

Pedro en Roma. Martellota⁸² analizó los resultados de las medidas experimentales de la citada basílica con varios métodos, incluyendo la estimación del parámetro *Bayesian*⁸³, y demostró que los bajos tiempos de reverberación medidos en la basílica (si bien, más altos que los obtenidos en anteriores medidas experimentales) depende más del incremento de absorción de las superficies decoradas que del efecto de acoplamiento de los volúmenes (figura 3.14).

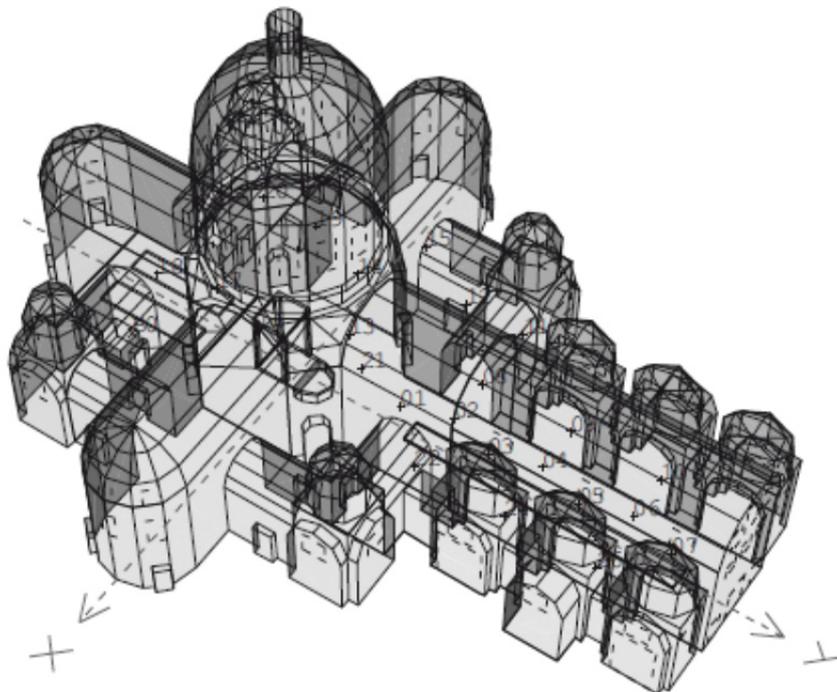


Figura 3.14. Modelo informático tridimensional utilizado para la simulación acústica de la basílica de San Pedro de Roma.

Las aportaciones más recientes (años 2010 y 2011) corresponden al estudio de la influencia del tiempo de reverberación en los *Just Noticeable Difference* (JND) de la claridad y el tiempo central en espacios muy reverberantes⁸⁴, y a las medidas experimentales realizadas en laboratorio para clarificar el coeficiente de absorción de los bancos ocupados y de la audiencia, cuando ésta permanece en pie⁸⁵.

Grupo de Acústica de la Universidad Politécnica de Valencia - Universidad de Valencia

Dedicado a la acústica de salas de conciertos y edificios patrimoniales, el grupo de acústica de la Universidad Politécnica de Valencia y de la Universidad de Valencia, se formó en el año 2003 gracias al proyecto de investigación BIA2003-09306-C04-01 *Establecimiento de parámetros acústicos determinantes de la calidad percibida en salas de concierto y auditorios. Propuesta para su aplicación en proyectos de nueva planta o rehabilitación*. Con este proyecto elaboraron una metodología de estudio objetivo-subjetivo en salas de concierto y comprobaron la fiabilidad y validez de las encuestas para recoger las muestras subjetivas⁸⁶.

⁸² Martellota, F. (2009). Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *Journal of Acoustical Society of America*, 126 (3), p. 1175-1186.

⁸³ Xiang, M. y Goggans, P.M. (2001). Evaluation of decay times in coupled spaces: Bayesian parameter estimation. *Journal of Acoustical Society of America*, 110, p. 1415-1424.

⁸⁴ Martellota, F. (2010). The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *Journal of Acoustical Society of America*, 128, p. 654-663.

⁸⁵ Martellota, F., D'Alba, M. y Della Crociata, S. (2011). Laboratory measurement of sound absorption of occupied pews and standing audiences. *Applied Acoustics*, 72, p.341-349.

⁸⁶ Giménez, A., Cibrián, R., Girón, S., Zamarreño, T., Sendra, J.J., Vela, A y Daumal, F. (2011). Questionnaire Survey to Qualify the Acoustics of Spanish Concert Halls. *Acta Acustica united with Acustica*, 97(6), p. 949-967.

Esta investigación ha tenido su continuidad con el proyecto BIA2008-05485 *Estudio de parámetros objetivos y subjetivos evaluadores de la calidad acústica percibida en salas, auditorios y edificios del patrimonio histórico-artístico. Validación de un protocolo de calidad acústica, mediante entornos virtuales para su aplicación en proyectos de nueva planta y/o rehabilitación*. Apoyándose en la metodología elaborada en el proyecto anterior, introducen la aplicación de técnicas de realidad virtual y auralización. La acústica virtual, compuesta por la modelización en 3D de la sala para su simulación visual (figura 3.15) y la auralización de la señal acústica, permite la valoración subjetiva del recinto, la obtención de parámetros representativos de su calidad sonora, la conservación del patrimonio cultural musical y la investigación de las modificaciones de las características acústicas de edificios patrimoniales debido a las remodelaciones realizadas a lo largo de su historia. La característica básica de la realidad virtual acústica es el control del entorno o recinto y la reproducibilidad de la percepción sonora⁸⁷.

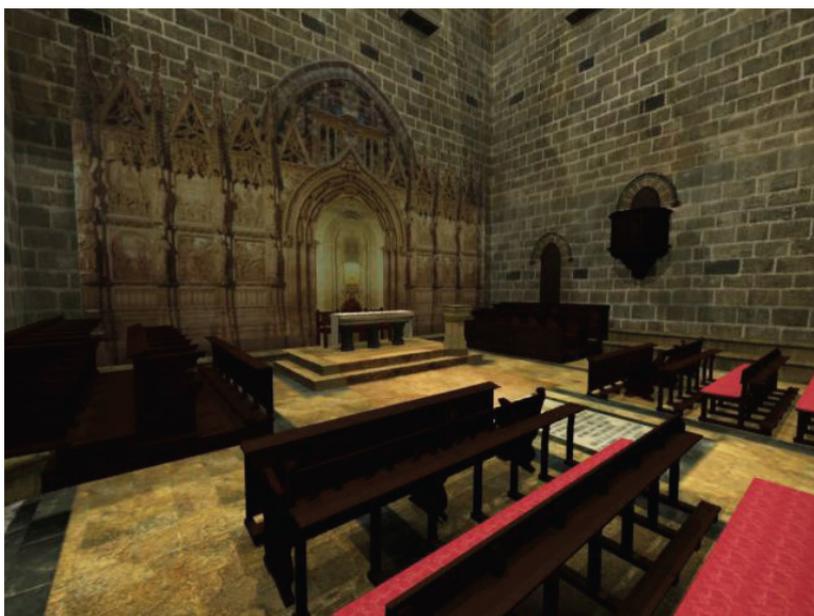


Figura 3.15. Imagen texturizada de la capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia.

Los frutos de esta investigación han sido publicados y presentados en congresos internacionales, mostrando que esta herramienta ha sido empleada en edificios religiosos de gran interés histórico como la capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia⁸⁸, la basílica de Santa María de Elche⁸⁹, la basílica de Sant Jaume⁹⁰ de Algemés (Valencia) o la Catedral Metropolitana de Valencia⁹¹. Es de destacar el análisis acústico de la basílica de Sant Jaume⁹² de Algemés (figura 3.16), en la que a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones y en las mediciones *in situ*, calculan los errores relativos comparados con los umbrales diferenciales de los parámetros acústicos que un oyente puede percibir, con el fin de comprobar si las diferencias obtenidas entre valores teóricos y

⁸⁷ **Giménez, A., Cibrián, R., Segura, J., Cerdá, S., Barba, A., Montell, R., Lacatis, R., Romero, J., Miralles, J.L., Fernández, M., y Navasquillo, J. (2011).** *A review of room acoustics: from objective measures to virtualization and subjective evaluation*. International Seminar on Virtual Acoustics, ISVA 2011, Valencia, noviembre.

⁸⁸ **Montell, R., Segura, J., Planells, A., Barba, A., Cerdá, S., Cibrián, R., Lacatis, R. y Giménez, A. (2011).** *Simulación acústica de auditorios y edificios patrimoniales. Integración con entornos de realidad virtual*. International Seminar on Virtual Acoustics, ISVA 2011, Valencia, noviembre.

⁸⁹ **Planells, A., Montell, R., Segura, J., Barba, A., Cerdá, S., Cibrián, R., Lacatis, R. y Giménez, A. (2011).** *Elaboración de modelos para el estudio acústico en entornos virtuales*. International Seminar on Virtual Acoustics, ISVA 2011, Valencia, noviembre.

⁹⁰ **Romero, A., Segura, J. y Navarro, E. (2011).** *Análisis de la policoralidad en espacios sacros*. International Seminar on Virtual Acoustics, ISVA 2011, Valencia, noviembre.

⁹¹ **Cervera, O., Moya, A., Querol, L., Planells, A., Pérez, C. y Montell, R. (2012).** *Técnicas de modelado tridimensional y su aplicación en la auralización de espacios*. Acústica 2012, Évora, octubre.

⁹² **Segura, J.; Giménez, A.; Romero, J. y Cerdá, S. (2011).** *A comparison of different techniques for simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume basilica in Valencia, Spain*. *Acta Acustica united with Acustica*, 97(1), p. 155-170.

experimentales se encuentran dentro de un rango razonable de aceptabilidad. La acústica de la Catedral de Valencia⁹³ fue analizada a nivel experimental, estudiando el efecto que tiene la posición de la fuente sonora en el comportamiento de diferentes parámetros acústicos relativos a la palabra y a la música.



Figura 3.16. Interior de la basílica de Sant Jaume de Algemés (Valencia), analizada por Segura *et al.*

Trabajo de Investigación del Instituto Universitario de Arquitectura y de Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla (IUACC)

Integrado por físicos y arquitectos, el grupo de investigación de Acústica Aplicada del IUACC inició su interés por la acústica arquitectónica en la década de los ochenta del pasado siglo, centrandose su labor investigadora en dos grandes líneas: la acústica de teatros y salas de concierto, por un lado, y la acústica en recintos de culto, por otro. En ambas líneas de investigación ha trabajado por la recuperación y la puesta en valor del patrimonio histórico, añadiendo al mismo un aspecto intangible: su comportamiento acústico⁹⁴.

En este apartado repasaremos la trayectoria investigadora de este grupo interdisciplinar, relativa a los recintos de culto cristianos, compuesta por proyectos de acondicionamiento acústico, intervenciones en proyectos de rehabilitación, estudios de asesoramiento acústico, tesis doctorales, libros monográficos, publicaciones nacionales e internacionales y aportaciones a congresos.

La ausencia de valoraciones de las condiciones acústicas en las iglesias, tanto en la historiografía arquitectónica como musical, motivó a los componentes del citado grupo, a abordar el problema acústico a través de la historia y evolución del tipo eclesial, sucediéndose las publicaciones al respecto. Varias aportaciones a congresos relativas a las iglesias gótico-mudéjares⁹⁵, la música⁹⁶ o la influencia del Concilio de Trento en las iglesias⁹⁷, entre otras, cristalizaron en tres publicaciones monográficas: la primera, en 1997, analiza las condiciones acústicas de las iglesias desde el

⁹³ Montell, R., Giménez, A., Cerdá, S., Segura, J., Cibrián, R. y Barba, A. (2012). *Influencia de la localización de la fuente sonora en los parámetros acústicos en la catedral metropolitana de Valencia*. Acústica 2012, Évora, octubre.

⁹⁴ Zamarreño, T. (2011). Opus cit. p. 2.

⁹⁵ Sendra, J.J. y Zamarreño, T. (1995). *El campo sonoro en las iglesias gótico-mudéjares con cubierta de madera: Aplicación del modelo de Barron*. Tecniacustica 1995, La Coruña, octubre.

⁹⁶ Navarro, J. y Sendra, J.J. (1996). La iglesia como lugar de la música. En A. Casas, S. Huerta, E. Rabasa y R. Aroca (Eds.). *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Madrid, 19-21 de septiembre de 1996* (p. 381-387). Madrid: Instituto Juan de Herrera.

⁹⁷ Sendra, J.J. y Navarro, J. (1996). El Concilio de Trento y las condiciones acústicas en las iglesias. En A. Casas, S. Huerta, E. Rabasa y R. Aroca (Eds.). *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Madrid, 19-21 de septiembre de 1996* (p. 485-490). Madrid: Instituto Juan de Herrera.

paleocristiano hasta el tardobarroco⁹⁸; la segunda, también en 1997, se centra en la exposición de las variables acústicas que deben ser analizadas y muestra tres ejemplos de proyectos de rehabilitación de iglesias andaluzas⁹⁹; y la tercera, en 1999, sobre la acústica del *tipo parroquial sevillano*¹⁰⁰, es decir, las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla¹⁰¹. La investigación acústica de los distintos estilos arquitectónicos continuó aportando comunicaciones a congresos^{102,103,104,105}, artículos publicados en revistas nacionales e internacionales^{106,107,108, 109} y capítulos en libros monográficos^{110,111}.

Entre las actuaciones en proyectos de acondicionamiento acústico, intervenciones en proyectos de rehabilitación y estudios de asesoramiento acústico cabe destacar:

- Acondicionamiento acústico de la iglesia renacentista del Hospital de las Cinco Llagas (figura 3.17), del arquitecto Hernán Ruiz, para salón de plenos del Parlamento de Andalucía (año 1995)¹¹² (proyecto de rehabilitación de los arquitectos Alfonso Jiménez y Pedro Rodríguez).
- Acondicionamiento acústico de la iglesia-teatro del Carmen en Vélez-Málaga (1996)¹¹³ (proyecto de rehabilitación del arquitecto Antonio González Cordón).
- Acondicionamiento acústico de la iglesia-auditorio del convento de San Francisco de Baeza (1998)¹¹⁴ (proyecto de rehabilitación de los arquitectos Jaime Nadal y Sebastián Araujo).
- Acondicionamiento acústico de la iglesia-auditorio de la compañía de Jesús de Jerez de la Frontera (año 2004)¹¹⁵ (proyecto de rehabilitación de los arquitectos Vicente Romero, Manuel Collado y José Luis Domínguez).
- Estudio, asesoramiento acústico y proyecto de acondicionamiento de la iglesia de La Anunciación de Sevilla para su uso como sala cultural (2010)¹¹⁶.

⁹⁸ Sendra, J. J. y Navarro, J. (1997). *La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias del paleocristiano al tardobarroco*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

⁹⁹ Sendra, J. J., Zamarreño, T., Navarro, J. y Algaba, J. (1997). *El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

¹⁰⁰ Angulo, I.D. (1983). *Arquitectura mudéjar sevillana de los siglos XIII, XIV y XV*. Sevilla: Ayuntamiento de Sevilla.

¹⁰¹ Sendra, J.J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (1999). *La acústica de las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

¹⁰² Sendra, J.J. y Navarro, J. (1998). *Análisis acústico de los tipos eclesiales*. Tecniacústica 1998. Lisboa, septiembre.

¹⁰³ Sendra, J.J., Zamarreño, T., Navarro, J. y Algaba, J. (1998). *Metodología de análisis acústico en iglesias: casos prácticos*. Tecniacústica 1998, Lisboa, septiembre.

¹⁰⁴ Sendra, J.J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (2000). *The acoustic correction in churches in the rehabilitation projects with a new use*. 7th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch, julio.

¹⁰⁵ Muñoz, S., Sendra, J.J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (2004). *Resultados de la corrección acústica de un recinto eclesial tras su rehabilitación como espacio escénico*. Acústica 2004, Guimarães, septiembre.

¹⁰⁶ Sendra, J.J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (1998). Acoustical behaviour of churches: Mudejar-Gothic churches. *Journal of Acoustical Society of America*, 103(5), p. 2996.

¹⁰⁷ Sendra, J.J. y Navarro, J. (2001). Acoustical behaviour in Mudejar-Gothic churches. *Rivista Italiana di Acustica*, 25(1-3), p. 322.

¹⁰⁸ Navarro, J., Sendra, J.J. y Muñoz, S. (2009). The Western Latin church as a place for music and preaching: an acoustic assessment. *Applied Acoustics*, 70(6). p. 781-789.

¹⁰⁹ Suárez, R., Sendra, J.J. y Alonso, A. (2013). Acoustics, Liturgy and Architecture in the Early Christian Church. From the *domus ecclesiae* to the basilica. *Acta Acustica*, 2(99), p. 292-301.

¹¹⁰ Sendra, J. J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (1999). *Sound fields in churches*. En J.J. Sendra (Ed.), *Computational Acoustics in Architecture* (p.133-177). Southampton: WIT Press.

¹¹¹ Sendra, J.J. y Navarro, J. (2000). La acústica de las iglesias medievales. En A. Graciani (Ed.), *La técnica de la arquitectura medieval* (p.325-346). Sevilla: Secretariado de Publicaciones Universidad de Sevilla y WIT Press.

¹¹² Zamarreño, T., Algaba, J., Nieves, F.J. y Galindo, M. (1995). *Aspectos acústicos en la rehabilitación del salón de plenos del Parlamento andaluz. Viabilidad de una simulación por ordenador*. Tecniacústica 1995, La Coruña, octubre.

¹¹³ Zamarreño, T., Sendra, J.J., Nieves, F., Navarro, J., Algaba, J. y León Rodríguez, Á.L. (1996). *Rehabilitación acústica de la iglesia del Carmen de Vélez-Málaga*. Tecniacústica 1996, Barcelona, octubre.

¹¹⁴ Sendra, J.J., Navarro, J., Zamarreño, T. y León, A.L. (1998). *Propuestas para la rehabilitación acústica de iglesias: El ejemplo de la iglesia de S. Francisco de Baeza*. IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación, La Habana, julio.

¹¹⁵ Muñoz, S., Sendra, J.J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (2004). Opus cit.

¹¹⁶ Rico, B., León, Á.L., Sendra, J.J., Navarro, J. y Zamarreño, T. (2010). *The acoustic rehabilitation of the renaissance church of La Anunciación in Seville*. *Internoise 2010 Noise and Sustainability*, Lisboa, junio.



Figura 3.17. Vista interior de la iglesia del Hospital de las Cinco Llagas tras la rehabilitación. Acondicionamiento acústico realizado por IUACC.

En este marco investigador que emplea el proyecto de rehabilitación como recurso para la adecuación acústica, desarrolló su tesis doctoral R. Suárez¹¹⁷, finalizándola en el año 2002. Centrándose en iglesias de la provincia de Córdoba construidas entre los siglos XIII y XVIII, propone el análisis acústico del recinto eclesial y la intervención arquitectónica con el proyecto de rehabilitación, para el acondicionamiento acústico de estos edificios, con el fin de adaptarlos a las necesidades tanto litúrgicas como culturales. La investigación realizada sobre estas iglesias cordobesas ha sido presentada en congresos^{118,119} y publicada en revistas especializadas, tanto de acústica^{120,121,122} como de patrimonio cultural¹²³.

La descripción del campo sonoro, mediante los principales indicadores de acústica de salas, adecuada en espacios teatrales y auditorios pero, en ocasiones, poco ajustada en recintos eclesiales, llevaron al equipo a proponer, en 1997, un primer modelo analítico de la energía acústica¹²⁴, basado en el modelo de Barron-Lee¹²⁵ para auditorios, el cual resultó válido para tratar la distribución espacial de la fuerza acústica pero no para los demás parámetros energéticos. Con la intención de profundizar en el modelo energético y tomando como muestra de estudio las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla, desarrolla su tesis doctoral M. Galindo¹²⁶, proponiendo un nuevo modelo energético de estos espacios singulares (modelo μ), capaz de explicar el comportamiento del resto de parámetros acústicos basándose en relaciones energéticas (año 2003). Frutos de esta investigación han sido

¹¹⁷ Suárez, R. (2002). *El sonido del espacio eclesial en Córdoba. El proyecto arquitectónico como procedimiento acústico*. Tesis Doctoral, E.T.S. Arquitectura. Universidad de Sevilla.

¹¹⁸ Suárez, R., Sendra, J.J. y Navarro, J. (2002). *Acoustical rehabilitation project of the Santa María de la Mota church, in Montoro (Córdoba)*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

¹¹⁹ Suárez, R., Sendra, J.J., Navarro, J. y León, A.L. (2004). *La acústica en iglesias medievales de la mesta: propuestas de corrección acústica de la iglesia de Santiago en Dos Torres (Córdoba)*. Acústica 2004, Guimarães, septiembre.

¹²⁰ Suárez, R., Sendra, J.J. y Navarro, J. (2003). A proposal to improve the acoustics in Fernandina churches. The example of Magdalena church in Córdoba. En: C.A. Brebbia (Ed), *Modelling Experimental Measurements in Acoustics III* (p. 85-94). Southampton: WIT Press.

¹²¹ Suárez, R., Sendra, J.J., Navarro, J. y León A.L. (2004). The acoustics of the Cathedral-Mosque of Córdoba. Proposals for architectural intervention. *Acta Acustica united with Acustica*, 90 (2), p. 362-375.

¹²² Suárez, R., Sendra, J.J., Navarro, J. y León A.L. (2006). Espacios acoplados en la Mezquita-Catedral de Córdoba: el sonido de los límites. *Informes de la Construcción*, 58 (501), p. 23-31.

¹²³ Suárez, R., Sendra, J.J., Navarro, J. y León A.L. (2005). The Sound of the Cathedral-Mosque of Cordoba. *Journal of Culture Heritage*, 6(4), p. 307-312.

¹²⁴ Sendra, J.J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (1997). An analytical model for evaluating the sound field in Gothic-Mudejar churches. En C.A. Brevia, J. Kenny y R. D. Ciskowski (Eds.). *Computational acoustics and its environmental applications II* (p. 139-148). Southampton: Computational Mechanics Publications.

¹²⁵ Barron, M. y Lee, J. (1988). Opus cit.

¹²⁶ Galindo, M. (2003). *La acústica en espacios religiosos católicos: iglesias gótico-mudéjares*. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura y E.U. Arquitectura Técnica. Universidad de Sevilla.

varias publicaciones en revistas internacionales^{127, 128, 129, 130, 131, 132, 133}, comunicaciones en congresos^{134,135,136,137,138,139} y la publicación, en 2011, de la propia tesis doctoral¹⁴⁰, trabajos que reflejan una labor investigadora que continúa en la actualidad. Prueba de ello es el trabajo relativo a la simulación acústica de seis iglesias gótico-mudéjares de Sevilla (figura 3.18), para determinar los coeficientes de absorción y difusión de los materiales que presentan más incertidumbre, contrastando los resultados de los parámetros acústicos calculados con los obtenidos en las medidas experimentales. El trabajo presenta una sistemática que permite una evaluación fiable del efecto acústico en el mantenimiento, la restauración y el acondicionamiento para nuevos usos, así como la recreación de las condiciones acústicas de edificios de épocas anteriores¹⁴¹.

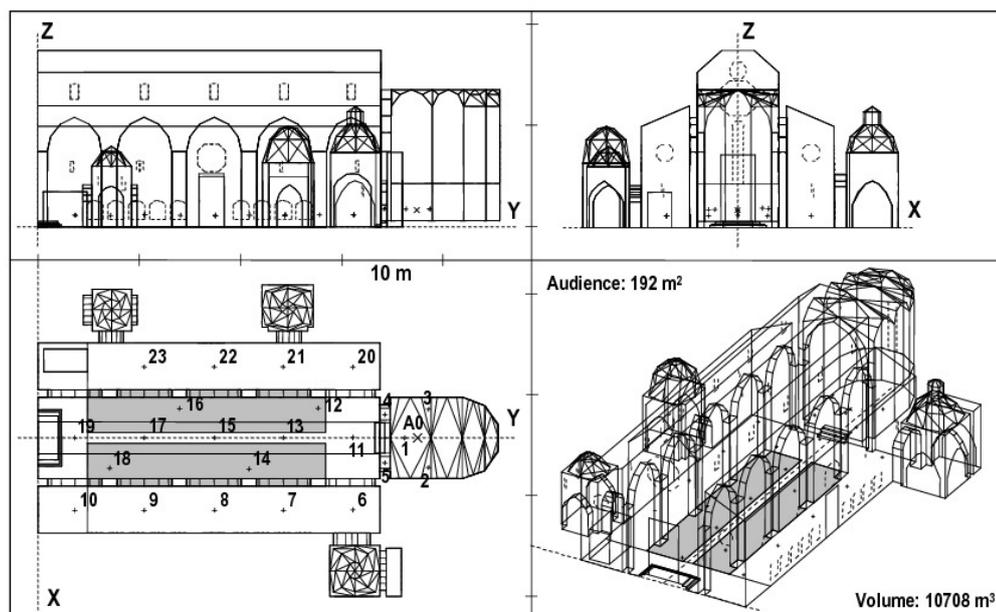


Figura 3.18. Secciones longitudinal y transversal, planta y volumetría del modelo informático creado para la simulación acústica de la iglesia de Santa Marina.

- ¹²⁷ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (1999). Clarity and definition in Mudejar-Gothic churches. *Building Acoustics*, 6 (1), p. 1-16.
- ¹²⁸ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2000). Speech intelligibility in Mudejar-Gothic churches. *Acta Acustica united with Acustica*, 86, p. 381-384.
- ¹²⁹ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2005). Acoustic analysis in Mudejar-Gothic churches: Experimental results. *Journal of Acoustical Society of America*, 117(5), p. 2873-2888.
- ¹³⁰ Zamarreño, T., Girón, S. y Galindo, M. (2007). Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches. *Journal of Acoustical Society of America*, 121(1), p. 234-250.
- ¹³¹ Galindo, M., Girón, S. y Zamarreño, T. (2008). Correlations of the acoustic field of Mudejar-Gothic churches. *Building Acoustics*, 15(3), p. 175-196.
- ¹³² Girón, S., Galindo, M. y Zamarreño, T. (2008). Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches. *Journal of Sound and Vibration*, 315, p. 1125-1142.
- ¹³³ Zamarreño, T., Girón, S. y Galindo, M. (2008). Assessing the intelligibility of speech and singing in Mudejar-Gothic churches. *Applied Acoustics*, 69, p. 242-254.
- ¹³⁴ Galindo, M., Zamarreño, T., Sendra, J.J. y Navarro, J. (1998). *La acústica de espacios religiosos jesuitas y manuelinos en Lisboa*. Tecniacústica 1998, Lisboa, septiembre.
- ¹³⁵ Galindo, M., Zamarreño, T., Sendra, J.J. y Navarro, J. (1998). *La inteligibilidad en las iglesias gótico-mudéjares*. Tecniacústica 1998, Lisboa, septiembre.
- ¹³⁶ Galindo, M., Zamarreño, T., Girón, S., Sendra, J.J. y Navarro, J. (1999). *Simulated acoustics field in Mudejar-Gothic churches*. 137th Meeting of the ASA and 2nd Convention of the EAA: Forum Acusticum, Berlín, febrero.
- ¹³⁷ Sendra, J.J., Zamarreño, T., Navarro, J., Girón, S. y Galindo, M. (2001). *Acoustical behaviour in Mudejar-Gothic churches*. 17th International Congress on Acoustics, ICA 2001, Roma, septiembre.
- ¹³⁸ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2002). *Measured acoustic parameters versus predicted ones in two Mudejar-Gothic churches*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.
- ¹³⁹ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2002). *Comparative study of various techniques to measure speech intelligibility*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.
- ¹⁴⁰ Galindo, M. (2011). *La acústica de las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla*. Berlín: Editorial Académica Española.
- ¹⁴¹ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2009). Acoustic simulation of Mudejar-Gothic churches. *Journal of Acoustical Society of America*, 126 (3), p. 1207-1218.

Desde principios del año 2011, el grupo de acústica del IUACC está trabajando en un nuevo proyecto de investigación titulado: *La acústica de las catedrales: una aportación científica para la recuperación del patrimonio cultural (ACUSCATEMONIO)*¹⁴². Concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación, participan en el proyecto un equipo interdisciplinar formado por físicos, ingenieros, arquitectos e historiadores del arte pertenecientes, tanto al citado instituto, como al Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) dependiente del Ministerio de Cultura.

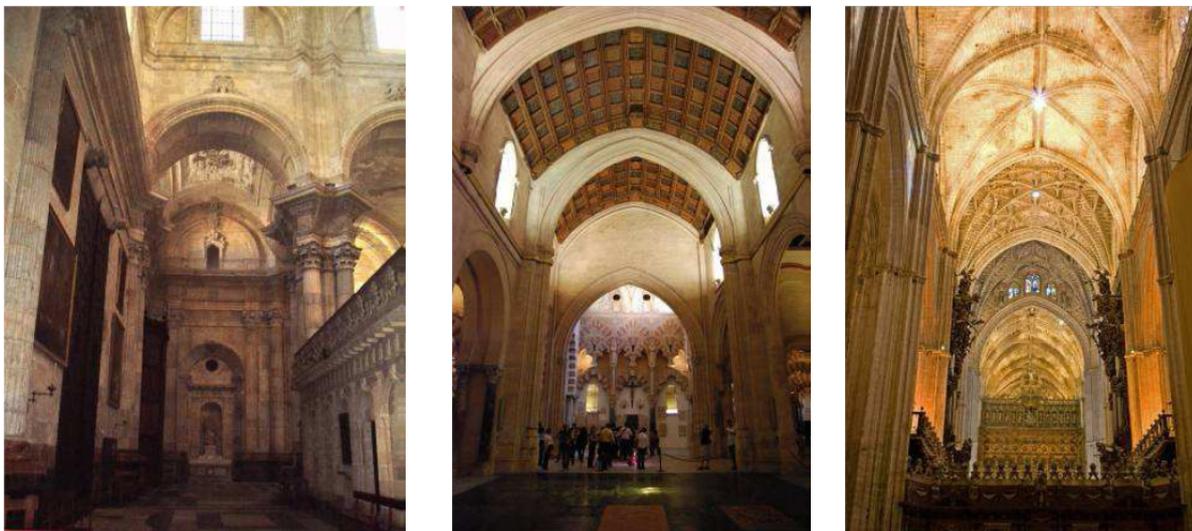


Figura 3.19. Vista interior (de izq. a dcha.) de las catedrales de Cádiz, Córdoba y Sevilla.

El objetivo del proyecto es determinar el comportamiento acústico de las principales catedrales andaluzas: Cádiz, Córdoba, Sevilla, Jaén, Granada y Málaga (figura 3.19), para adecuar el modelo analítico μ , que describe el campo sonoro en el interior de los espacios, y elaborar modelos informáticos tridimensionales para realizar simulaciones y auralizaciones de dichos campos acústicos (figura 3.20). Un avance de los resultados de la investigación ha sido presentadas en congresos internacionales^{143,144}.

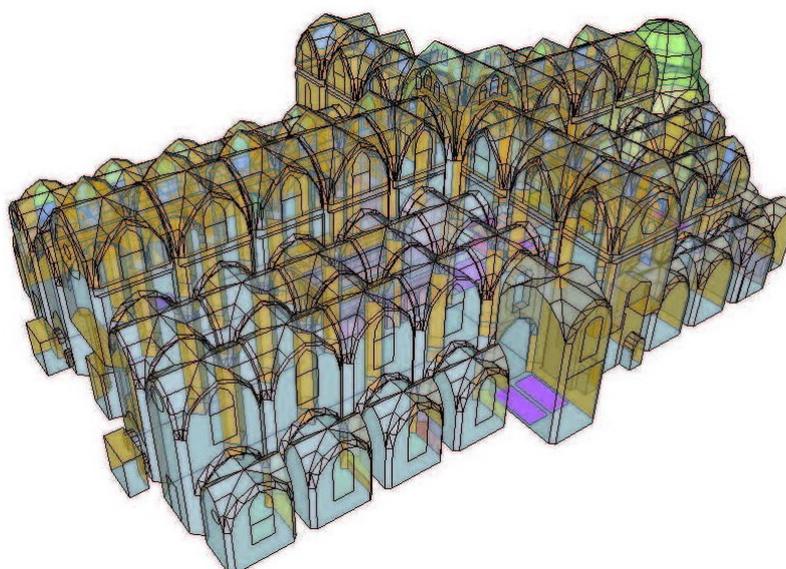


Figura 3.20. Modelo informático tridimensional de la catedral de Sevilla.

¹⁴² Información detallada sobre el proyecto puede consultarse en la siguiente dirección de internet: <http://institucional.us.es/acuscate/>.

¹⁴³ Álvarez, L., Alonso, A., Zamarreño, T., Girón, S. y Galindo, M. (2011). *Virtual acoustics of the cathedral of Málaga (Spain)*. Forum Acusticum, Aalborg, junio.

¹⁴⁴ Álvarez, L., Alonso, A., Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2011). *Initial acoustic model to simulate the sound field of the cathedral of Seville*. International Seminar on Virtual Acoustics, ISVA 2011, Valencia, noviembre.

El conocimiento de este aspecto intangible constituirá una aportación importante al carácter patrimonial de las catedrales, al incorporar la valoración acústica en el enfoque espacio-funcional de estos edificios. Además, el proyecto incorporará pautas e instrumentos de intervención para la recuperación funcional de estos espacios, tanto para el uso religioso como el cultural, constituyendo el problema acústico una variable a considerar en futuras actuaciones.

Es el primer proyecto de investigación con estas características que se realiza en España, siendo el antecedente más cercano el estudio de las mezquitas de Sinan, incluido en el proyecto CAHRISMA descrito anteriormente.

En este contexto investigador sobre las condiciones acústicas de los recintos de culto cristianos, en el grupo han surgido distintas líneas de investigación relacionadas con diferentes estilos arquitectónicos o con determinados aspectos históricos que tuvieron repercusión en la acústica de las iglesias. Actualmente, junto al presente trabajo de investigación, se encuentran en fase de investigación las condiciones acústicas de las iglesias de las órdenes mendicantes del Reino de Sevilla y de las iglesias barrocas sevillanas.

La elección del estudio del sonido en la arquitectura religiosa de M. Fisac tras el Concilio Vaticano II, como materia para este trabajo de investigación, se debe a la conjunción de tres factores: la compleja relación entre arquitectura, liturgia y acústica¹⁴⁵; las implicaciones acústicas que refleja la arquitectura eclesial postconciliar de Fisac¹⁴⁶, y por último, la escasez de estudios específicos en materia acústica sobre la arquitectura religiosa, tras la renovación litúrgica del citado concilio¹⁴⁷. En el capítulo siguiente se exponen los objetivos de la investigación y se especifica la muestra de iglesias del presente estudio.

¹⁴⁵ Analizadas en el capítulo 1: *Arquitectura, liturgia y acústica en la Iglesia Cristiana*.

¹⁴⁶ Analizadas en el capítulo 2: *La arquitectura religiosa de Miguel Fisac*.

¹⁴⁷ Analizadas en el presente capítulo 3.

4

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN. ELECCIÓN DE LA MUESTRA

La presente tesis doctoral se enmarca dentro de la línea de investigación experimental sobre acústicas de salas que, desde hace más de tres décadas, vienen desarrollando los grupos de investigación del Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación denominados TEP-130 y TEP-132¹, adscritos al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla.

El objetivo general que se pretende alcanzar con este trabajo es aportar nuevas perspectivas a la fructífera producción investigadora de los citados grupos de investigación. Como se ha visto en el recorrido realizado en el capítulo anterior sobre la trayectoria de estos grupos, el conjunto de iglesias que componen la muestra de estudio, todas ellas construidas en la segunda mitad del siglo XX por el arquitecto Miguel Fisac, no han sido objeto de análisis desde el punto de vista sonoro. A esto se le añade el interés de aplicar la metodología desarrollada por estos grupos de investigación, para estudiar el comportamiento acústico de las mismas y comprobar la influencia que las cuestiones acústicas tuvieron en la concepción de sus formas arquitectónicas.

4.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los principales objetivos a intentar lograr en esta investigación se exponen a continuación:

- Caracterizar y analizar el comportamiento acústico actual de este grupo de iglesias, así como la relación con sus singulares características formales y constructivas. En cierta medida se pretende avanzar en las investigaciones que Fisac inició con su arquitectura eclesial, influido por su interés en el campo de la acústica, pero empleando los recursos técnicos y herramientas disponibles en la actualidad.
- Elaborar, para cada iglesia, modelos de simulación que reproduzcan con suficiente aproximación y fiabilidad, el comportamiento acústico que poseen en la actualidad dichos espacios eclesiales, apoyándose en las mediciones realizadas *in situ*.
- Partiendo del análisis de las condiciones acústicas actuales de estas iglesias, realizar propuestas de rehabilitación acústica que contribuyan a mejorar sus condiciones sonoras, sin desvirtuar los aspectos espaciales, formales y constructivos con los que el arquitecto concibió los distintos proyectos.
- Las posibles medidas correctoras deben ser compatibles con el grado de protección arquitectónica de cada edificio, y reversibles, de forma que el simple desmontaje de las mismas devuelva a cada iglesia su configuración actual.
- Comprobar, mediante herramientas de simulación del campo sonoro, la idoneidad de cada propuesta de intervención. De esta forma se podría aportar una solución válida a un problema funcional de los edificios con su uso habitual, pues podría implementarse en la realidad mejorando las condiciones acústicas de las iglesias durante las celebraciones litúrgicas.

¹ En febrero de 2013, fruto de la estrecha colaboración entre ambos equipos de investigación, el grupo TEP-132 se incorporó al TEP-130, pasando a denominarse a partir de ese momento bajo el epígrafe: *Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Óptica, Iluminación y Energía*.

- Dada la importancia que tiene en cualquier iglesia una adecuada inteligibilidad de la palabra, se pretende evaluar la mejora que las propuestas de rehabilitación podrían tener sobre las actuales condiciones sonoras en relación a este parámetro. Asimismo, y dado que en casi todos estos recintos es frecuente la utilización de sistemas de apoyo electroacústico, se estudia también el efecto que tendría la incorporación de un adecuado sistema de megafonía optimizado para el uso de la palabra.
- Intentar lograr que las propuestas de rehabilitación acústica minoren las diferencias que, en general, se producen en las iglesias cuando se encuentran casi vacías, frente a cuando están totalmente ocupadas por los fieles. En resumen, conseguir que las condiciones acústicas no dependan, en gran medida, del grado de ocupación de las zonas de audiencia.
- Realizar una valoración del comportamiento acústico global del conjunto de las iglesias, tanto en su estado actual como tras la propuesta de rehabilitación acústica.
- Mediante la valoración del comportamiento sonoro individual y global del conjunto de las iglesias, proporcionar a los arquitectos conocimientos y herramientas para la optimización de la calidad acústica, tanto en los proyectos de nueva planta como en las intervenciones de rehabilitación.
- Realizar el análisis energético de las iglesias de la muestra, en relación al modelo analítico μ desarrollado inicialmente para las iglesias gótico-mudéjares, que pudiera servir de base para la predicción de algunos comportamientos acústicos, en la tipología de iglesias estudiadas en este trabajo de investigación.

4.2. ELECCIÓN DE LA MUESTRA

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se han elegido todas las iglesias posibles que fueron construidas por Miguel Fisac, siguiendo las directrices litúrgicas establecidas por el Concilio Vaticano II. Se trata de seis iglesias de nueva planta, concebidas para acoger a una comunidad parroquial, en las que la acústica, según su autor, tuvo un papel relevante en la configuración de la espacialidad de los templos. No se incluye en la muestra la última obra religiosa que Fisac realizó en 1991, la iglesia en la urbanización Torre de Güil de Murcia, ya que en la actualidad no posee uso cultural. Por otro lado, la ermita que realizó en 1969 en Guadalix de la Sierra, Madrid, se encontraba en ruina en el año 2005.

Como vimos en capítulos anteriores, la reforma litúrgica marcada por este concilio fomentó la participación plena y activa de los fieles, estableció el carácter simbólico de las celebraciones y subrayó la importancia de la palabra y la predicación del sacerdote. Para Fisac, estos aspectos tenían unas implicaciones formales y acústicas muy importantes, cambiando por completo el programa del templo, planteándose, a partir de este momento, el problema acústico como una constante a tratar y resolver en su arquitectura religiosa.

En la tabla 4.1 se especifican las iglesias seleccionadas, así como el año de construcción, el volumen y el número de fieles sentados capaz de albergar.

Nº ORDEN	IGLESIA	LOCALIDAD	AÑO DE CONSTRUCCIÓN	VOLUMEN IGLESIA	AFORO
1	SANTA ANA, MORATALAZ	MADRID	1965-1971	3674 m ³	466
2	COLEGIO DE LA ASUNCIÓN CUESTABLANCA	MADRID	1965	3188 m ³	325
3	SANTA MARÍA MAGDALENA, SANTAMARCA	MADRID	1966-1967	4344 m ³	348
4	SANTA CRUZ DE OLEIROS	OLEIROS (LA CORUÑA)	1967	3702 m ³	329
5	NUESTRA SEÑORA FLOR DEL CARMELO	MADRID	1983-1991	2528 m ³	338
6	SANTIAGO	PUMAREJO DE TERA (ZAMORA)	1984	1424 m ³	193

Tabla 4.1. Iglesias de la muestra y datos generales de las mismas.

5

MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo de investigación se ha desarrollado siguiendo un método experimental, que ha sido depurado durante más de dos décadas de trabajo en la rehabilitación acústica de recintos, por los grupos de investigación (TEP-130 y TEP-132), adscritos al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla. Este método combina las formulaciones analíticas, las medidas experimentales realizadas *in situ* y la utilización de las técnicas de simulación del campo sonoro mediante ordenador para conocer y predecir el comportamiento acústico de las salas. El IUACC ha procurado, en la medida que los recursos lo han permitido, disponer del equipamiento instrumental, de las técnicas de medida y el software más avanzado del mercado. Asimismo, en el ámbito de las formulaciones analíticas se ha intentado aplicar las últimas propuestas aceptadas por la comunidad científica especializada.

El método desarrollado para el análisis de cada iglesia objeto de estudio puede ser desglosado en nueve fases, las cuales se han sucedido cronológicamente en el siguiente orden:

1. Toma de datos generales y levantamiento planimétrico.
2. Realización de mediciones acústicas *in situ*, procesado y valoración acústica de las mismas.
3. Elaboración de modelos tridimensionales para la simulación del campo sonoro.
4. Ajuste de los modelos informáticos a partir de las mediciones *in situ*.
5. Simulación acústica del campo sonoro de los recintos en las hipótesis de sala vacía y ocupada.
6. Propuestas de rehabilitación acústica a partir de la valoración realizada tras las mediciones acústicas *in situ*.
7. Simulación acústica del campo sonoro de las propuestas de rehabilitación.
8. Análisis y valoración individual de las condiciones acústicas de las propuestas de rehabilitación.
9. Análisis y valoración global de comportamiento acústico del conjunto de iglesias en su estado actual y tras las propuestas de rehabilitación.

5.1. TOMA DE DATOS GENERALES

En esta primera fase se ha llevado a cabo la recopilación de la información básica para el desarrollo de las fases posteriores. Los datos referidos son los siguientes:

- **Levantamiento planimétrico:** Se ha hecho una recopilación de los planos de proyecto de todas las iglesias que componen la muestra. Las fuentes de información y documentación han sido distintas según los casos: los planos de las iglesias de Santa Ana de Moratalaz, Colegio Asunción Cuestablanca y Santa Cruz de Oleiros, fueron facilitados, en soporte informático vectorial (dwg), por el arquitecto D. Francisco López¹, doctorando que investigó en el marco de la línea de investigación sobre iluminación natural del grupo TEP-130 del PAIDI². La planimetría de las iglesias de Santa María Magdalena, Flor del Carmelo y Pumarejo de Tera, se obtuvo de la bibliografía sobre M. Fisac y, en su mayor parte, del archivo de la Fundación Fisac³, la cual remitió los documentos de proyecto solicitados en soporte digital

¹ Francisco López tuvo la oportunidad de conocer a Miguel Fisac, quien personalmente le facilitó los planos de proyecto de dichas iglesias.

² Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación.

³ Fundación Miguel Fisac. C/ Carlos López Bustos 3. 13003 Ciudad Real. Email: fundación@fundacionfisac.org;
URL: <http://www.fundacionfisac.org>.

(imágenes raster). Con esta información base se procedió a visitar cada una de las iglesias, comprobando la correspondencia entre los planos de proyecto y el estado actual de los edificios. En el caso del primer grupo de iglesias (Santa Ana, Cuestablanca y Santa Cruz de Oleiros), se actualizaron los planos existentes a la realidad ejecutada completando dicha planimetría con las rectificaciones necesarias. Para el segundo grupo de iglesias se procedió al levantamiento planimétrico completo *in situ*. Asimismo, en cada una de las iglesias, se anotó la disposición exacta, número y tamaño de los bancos de las iglesias.

- **Reportaje fotográfico y de vídeo:** En cada iglesia se ha realizado un reportaje fotográfico y de vídeo completo, tanto del espacio interior como del exterior y entorno urbano que, además de servir de apoyo para el levantamiento de los planos definitivos en soporte informático vectorial de cada iglesia, se utilizó para tener una base de datos visual de todos los materiales y revestimientos de los edificios.
- **Materiales de revestimiento, acabado y detalles constructivos:** En el interior de todos los espacios eclesiales se realizó una identificación de todos los materiales de revestimiento y acabado superficiales, tomando los datos necesarios (espesores, materiales, montaje,...), para la posterior asignación de sus respectivos coeficientes de absorción y dispersión acústica.
Además de ello, en todas las iglesias se realizaron croquis y levantamientos de detalles constructivos que pudieran tener relevancia desde el punto de vista acústico.
- **Otros datos relevantes:** En las inspecciones se comprobó la relación de las iglesias con el entorno urbano, identificando las fuentes de ruido aéreo exterior y vibraciones. Asimismo, se mantuvieron entrevistas con los párrocos o responsables de las iglesias, con objeto de conocer: (1) la disponibilidad para poder realizar las mediciones acústicas sin la presencia de fieles; (2) determinar la ubicación de las fuentes sonoras según el uso real de cada iglesia y, en el caso de aquellas que disponían de órgano, su posición; (3) el uso que se le daba a las iglesias, además del propio litúrgico, y si en ellas se realizan actividades musicales como la celebración de conciertos.
- **Dibujo de planos del estado actual:** Finalmente, obtenida la documentación descrita en los puntos anteriores, se procedió a la elaboración de la planimetría del estado actual de cada iglesia: (plantas, secciones y detalles constructivos). En la planimetría se reflejó la posición exacta de bancos, altar, ambón y demás mobiliario existente.

5.2. MEDICIONES ACÚSTICAS *IN SITU* Y VALORACIÓN ACÚSTICA DE LAS MISMAS

5.2.1. MEDICIONES ACÚSTICAS *IN SITU*

Las medidas acústicas *in situ* de cada iglesia que componen la muestra se han realizado siguiendo el procedimiento normalizado recogido en las siguientes normas:

- UNE-EN ISO 3382-1:2010. *Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.*
- CEI 60268-16:2003. *Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 16: Evaluación objetiva de la inteligibilidad del habla mediante el índice de transmisión del habla.*

En el momento de la medición acústica las iglesias se encontraban vacías de público, estando sólo presentes los miembros del equipo técnico formado por tres personas. Las condiciones ambientales en cada iglesia se monitorizaron durante el período de medida. Los valores medios de las variables ambientales se reflejan en la tabla 5.1.

En todas las iglesias, las fuentes sonoras (F) se situaron en el punto ocupado por el orador en el altar, ambón y, si existía, junto al órgano. Todas las fuentes sonoras se ubicaron a una altura de 1.50 m sobre el suelo.

Los micrófonos receptores se distribuyeron cubriendo las diferentes zonas de audiencia, de forma que sus posiciones fueran representativas de la totalidad del espacio. Todos los receptores se situaron a una altura de 1.2 metros sobre el nivel del suelo.

En la citada tabla 5.1 se indican las fechas de realización de los levantamientos planimétricos y medición acústica de cada iglesia.

IGLESIA	LEVANTAMIENTO	MEDICIÓN ACÚSTICA <i>IN SITU</i>			
	Fecha	Fecha	Hora de comienzo	Temperatura interior	Humedad relativa interior
SANTA ANA DE MORATALAZ (SA)	30-06-2010	15-07-2010	17,00h	30,0°C	22%
COLEGIO DE LA ASUNCIÓN CUESTABLANCA (CU)	29-06-2010	15-07-2010	10,00h	30,9°C	24%
SANTA MARÍA MAGDALENA, SANTAMARCA (SM)	30-06-2010	16-07-2010	9,30h	28,0°C	20%
SANTA CRUZ DE OLEIROS (SC)	12-09-2010	13-09-2010	10,00h	20,8°C	67%
NUESTRA SEÑORA FLOR DEL CARMELO (FC)	30-06-2010	14-07-2010	12,00h	30,0°C	34%
SANTIAGO PUMAREJO DE TERA (PT)	14-09-2010	14-09-2010	12,00h	21,5°C	40%

Tabla 5.1. Fechas de levantamiento planimétrico, mediciones acústicas y condiciones ambientales en el momento de las medidas *in situ*.

Los aspectos subjetivos analizados y los correspondientes parámetros acústicos obtenidos en las medidas *in situ*, se muestran en la siguiente tabla:

ASPECTO SUBJETIVO DEL OYENTE		PARÁMETRO	UNIDAD	
Reverberación		Tiempo de reverberación: T_{30}	s	
		Tiempo de reverberación inicial: EDT	s	
Inteligibilidad de la palabra y claridad musical		Claridad musical: C_{80}	dB	
		Claridad para la palabra: C_{50}	dB	
		Definición: D_{50}	-	
		STI	-	
Nivel sonoro subjetivo		Tiempo central: T_5	ms	
Impresión espacial		Fuerza acústica: G	dB	
		Envolvente	Energía acústica lateral tardía: L_J	dB
			Coficiente de correlación cruzada interaural tardío: $IACC_L$	-
Ancho aparente de la fuente	Energía lateral precoz: J_{LF}, J_{LFC}	-		
Audición binaural	Coficiente de correlación cruzada interaural temprano: $IACC_E$	-		
	Coficiente de correlación cruzada interaural: IACC	-		
Ruido de fondo		Nivel continuo equivalente: L_{EQ}	dB(A)	
		NR	-	

Tabla 5.2. Aspectos subjetivos analizados y los correspondientes parámetros acústicos.

5.2.1.1. Equipos e instrumentación de medida

Los valores de los parámetros acústicos referidos en el presente trabajo se han derivado de las correspondientes respuestas al impulso registradas en cada una de las iglesias. En cada punto de recepción se obtuvieron las respuestas al impulso (RI) a partir de barridos de señales de onda sinusoidales, donde la frecuencia se incrementa exponencialmente con el tiempo⁴. El rango de frecuencias se ajustó para cubrir las bandas de octava desde 63 a 16000 Hz, así como la duración del

⁴ Müller, S. and Massarani, P. (2001). Transfer-function measurement with sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49, p. 443–471.

barrido, para conseguir relaciones señal-ruido mayores de 45 dB. A partir de estas RI se derivan los valores de los parámetros acústicos.

En el caso concreto de estimar inteligibilidad mediante RASTI y STI, las respuestas al impulso se obtuvieron con señales constituidas por secuencias de máxima longitud (MLS, *Maximun Length Sequences*)⁵. En la figura 5.1 se muestra esquemáticamente el proceso de medida de un sistema lineal e invariante en el tiempo, en nuestro caso en un recinto, entre las posiciones del emisor y del receptor, utilizando señales MLS.

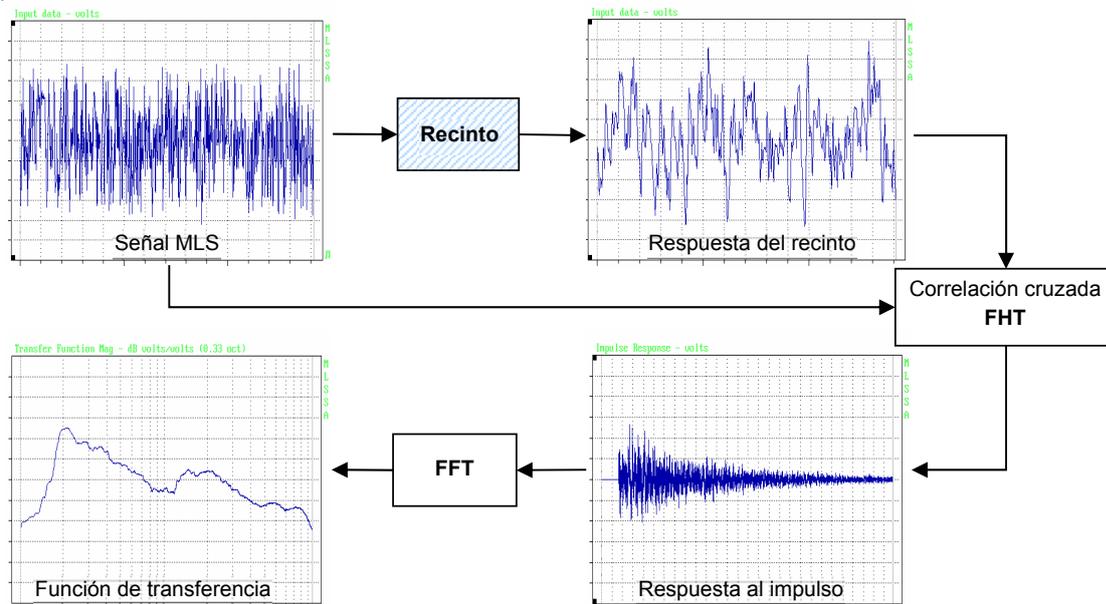


Figura 5.1. Técnica de análisis de las señales MLS.

El proceso de generación, adquisición y análisis de la señal se llevó a cabo con el programa WinMLS2004⁶ (figura 5.2) mediante una tarjeta de sonido VX Pocket v2 de Digigram.

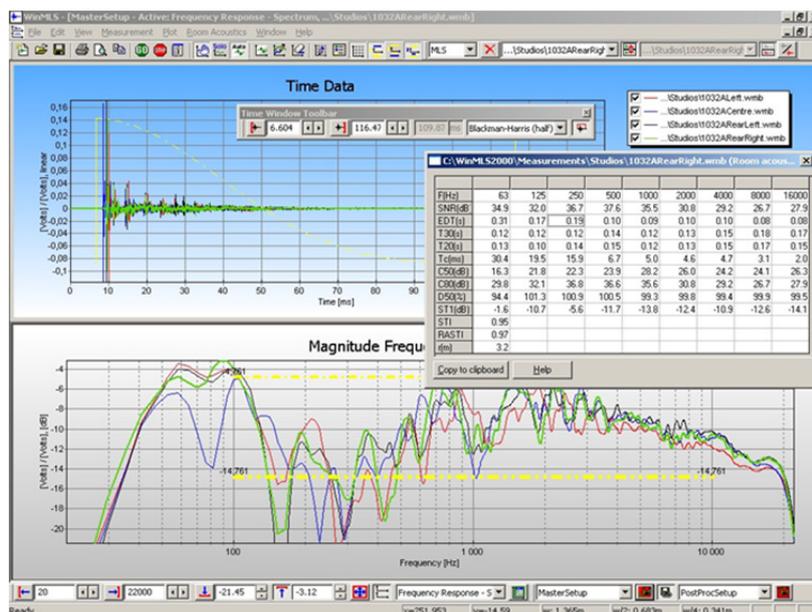


Figura 5.2. Análisis de señal con el software WinMLS2004.

⁵ Peltonen, T. (1987-2003). *A multichannel measurement system for room acoustics analysis*. Master's Thesis. Department of Electrical and Communications Engineering, Helsinki University of Technology.

⁶ Reference documentation. *Morset Sound Development*. URL: <http://www.winmls.com/>.

La señal generada por el ordenador alimenta el amplificador *INTER-M 1000* (figura 5.3) y se reproduce en el recinto por una fuente omnidireccional *AVM DO12* de 01dB (figura 5.5). Las respuestas al impulso (RI) en el recinto se capturan con varios tipos de micrófonos:

- Para las respuestas omnidireccionales recurrimos a un micrófono multipatrón *AT4050/CM5* de *Audio-Technica* (figura 5.6), 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 mismo micrófono multipatrón *AT4050/CM5* de *Audio-Technica* que permite elegir entre la configuración omnidireccional y el patrón de directividad en figura de ocho, conectado a la fuente de polarización de *ARTcessories*.
- Por último, con objeto de medir los coeficientes de correlación cruzada interaural (IACC), se empleó el simulador de torso *HMS III* de *Head Acoustics* (figura 5.7), junto con el acondicionador de señal *OPUS* de 01dB.

Cuando se estimó la inteligibilidad mediante los índices RASTI y STI, se usó una fuente de construcción propia que simula el patrón de directividad de la cabeza humana (figura 5.8), ajustando para ello, el nivel estándar de la voz humana, que corresponde a 67 dB(A) a un metro de la fuente. El nivel de emisión de la fuente se fijó utilizando un sonómetro integrador *B&K 2231* de *Bruel & Kjaer* (figura 5.4). La adquisición de la señal se realizó empleando un micrófono omnidireccional *B&K 4165* de *Bruel & Kjaer* (figura 5.9), con preamplificador *B&K 2669*, junto con un acondicionador de señal *OPUS* de 01dB a la entrada de la tarjeta *VXpocketc v2*.

Finalmente, para el registro del espectro del ruido de fondo se empleó la configuración antes descrita para el micrófono omnidireccional *B&K 4165* de *Bruel & Kjaer*.



Figura 5.3. Amplificador *INTER-M 1000*.



Figura 5.4. Sonómetro integrador *B&K 2231* de *Bruel & Kjaer*.



Figura 5.5. Fuente omni-direccional *AVM DO12*.



Figura 5.6. Micrófono multipatrón *AT4050/CM5* de *Audio-Technica*.



Figura 5.7. Simulador de torso *HMS III* de *Head Acoustics*.



Figura 5.8. Fuente para simular el patrón de directividad de la cabeza humana.



Figura 5.9. Micrófono omnidireccional *B&K 4165* de *Bruel & Kjaer*.



Figura 5.10. Realización de medición acústica.

La figura 5.11 muestra el esquema de la cadena de medida.



Figura 5.11. Esquema del sistema de medida.

5.2.1.2. Condiciones de medición: UNE-EN ISO 3382-1:2010

Se resumen a continuación los aspectos más relevantes considerados en cada medición acústica, según lo indicado en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010:

- Durante el proceso de la medición, se registró la temperatura y la humedad relativa del aire del recinto, mediante un termohigrómetro (figura 5.12), con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$ y $\pm 5\%$, respectivamente.
- Se realizó una descripción precisa del estado de ocupación del recinto para poder evaluar los resultados obtenidos durante la medición del tiempo de reverberación.
- Como se ha indicado en los apartados anteriores, la fuente acústica utilizada ha sido de tipo omnidireccional, cumpliendo los requisitos de desviación máxima dados en la tabla 1 de la norma. Se estableció un nivel de presión acústica suficiente para generar curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido sin contaminación por ruido de fondo.
- Los micrófonos utilizados para medir los parámetros de sala han sido omnidireccionales.
- Se utilizaron, como mínimo dos posiciones de la fuente, ubicándose donde se sitúan generalmente las fuentes sonoras naturales, excepto en la iglesia de Nuestra Señora Flor del Carmelo de Madrid, donde la proximidad entre altar y ambón móviles, llevó a situar la fuente sonora sólo en el altar. Como se ha indicado, la altura del centro acústico de la fuente con respecto al suelo fue de 1,50 m.
- Los micrófonos se situaron en posiciones representativas de las zonas donde se encuentran habitualmente los oyentes. Para las mediciones del tiempo de reverberación, las posiciones de medición fueron representativas de la totalidad del espacio. Para las medidas de los parámetros acústicos asociados a aspectos subjetivos del oyente y de las magnitudes binaurales, las posiciones de los receptores aportaron información sobre las variaciones sistemáticas posibles en función de la posición del recinto. Las posiciones de los micrófonos se situaron alejadas unas de otras, al menos una media longitud de onda, es decir, a una distancia de aproximadamente 2,00 m para el rango de frecuencias habitual. Asimismo, se colocaron a una altura de 1,20 m por encima del suelo, lo que corresponde a la altura de los oídos de los oyentes medios sentados en asientos tipo. Se tuvo en cuenta la distancia mínima entre la fuente y el micrófono para que los resultados del ensayo se consideren adecuados.
- Por último, se estableció una adecuada distribución de las posiciones de micrófono para analizar las diferencias en el tiempo de reverberación a lo largo del recinto. No obstante, en el caso que nos ocupa, las iglesias no presentan espacios como los referidos en la citada norma (coros, naves laterales...) dada la tipología y configuración espacial de las mismas.



Figura 5.12. Termohigrómetro.

Con respecto al procedimiento de medición, la norma describe dos métodos para medir el tiempo de reverberación: el método del ruido interrumpido y el método de la respuesta impulsiva integrada, también conocido como método de Schröder⁷. Para este estudio se ha utilizado el método de la respuesta impulsiva integrada, que es la evolución temporal de la presión acústica observada en un punto de un recinto como resultado de la emisión de un impulso de Dirac⁸ en otro punto del recinto⁹. En cada banda de octava, la fuente impulsiva utilizada cumple los siguientes requisitos:

⁷ **Schroeder, M. R. (1965).** New method of measuring reverberation time. *Journal of the Acoustical Society of America*, 37 (6), p. 1187-1188.

⁸ Función introducida por primera vez por el físico inglés Paul Dirac. Define un funcional en forma de integral sobre un cierto espacio de funciones.

⁹ En la práctica, es imposible crear y emitir funciones delta Dirac verdaderas, sino únicamente sonidos cortos transitorios (por ejemplo, un disparo) que pueden ofrecer aproximaciones suficientes para realizar las mediciones prácticas. Sin embargo, una técnica de medición alternativa es utilizar una señal tal como un período de secuencias de máxima longitud (*maximun-length sequence, MLS*), u otra señal determinística de espectro plano, como un barrido sinusoidal y

- Producir un nivel de presión acústica de pico suficiente para garantizar una curva de decrecimiento empezando al menos 35 dB por encima del ruido de fondo.
- Para la medición del T_{30} , establece un nivel al menos 45 dB por encima del nivel de ruido de fondo.

Una vez realizada la medida, para cada banda de octava se genera la curva de decrecimiento por integración inversa de la respuesta impulsiva cuadrática. A la hora de evaluar si los resultados obtenidos en la medición son adecuados, se tiene en cuenta la incertidumbre de medición. Teóricamente, la respuesta impulsiva integrada corresponde al promediado de un número infinito de excitaciones del ruido interrumpido¹⁰. Para la evaluación práctica de la incertidumbre de medición que utiliza el método de la respuesta impulsiva integrada, se puede considerar del mismo grado de magnitud que la producida por un promedio de $n=10$ mediciones en cada posición con el método del ruido interrumpido. No es necesario ningún promediado adicional para aumentar la precisión estadística de cada posición.

Los resultados medidos para el conjunto de las posiciones de la fuente y de micrófono se combinan, ya sea para zonas identificadas por separado, ya sea para la totalidad del recinto, para obtener los valores de promediado espacial. Este promediado espacial se alcanza por medio del promediado aritmético de los tiempos de reverberación. El promediado espacial se obtiene calculando la media de los tiempos de reverberación individuales para todas las posiciones independientes de la fuente y de micrófono. Se puede determinar la desviación estándar para ofrecer una medida de la precisión y de la variación espacial del tiempo de reverberación.

Por último, la salida de resultados se expresa mediante tablas y curvas, que se adjuntan en el anexo 4, *Resultados medición in situ y simulaciones informáticas* (DVD).

5.2.2. VALORACIÓN DE LAS MEDICIONES ACÚSTICAS

Tras la medición acústica *in situ*, todas las respuestas al impulso obtenidas en cada iglesia, fueron procesadas y analizadas con el software *WinMLS2004*. Posteriormente, los resultados obtenidos para los distintos parámetros medidos en cada receptor, fueron organizados y tratados en una hoja de cálculo *Excel* v.2010 para su posterior análisis y valoración. Las gráficas de resultados se generaron con el software *SigmaPlot* v11.0.

El análisis y valoración de las mediciones acústicas *in situ* de cada iglesia se incluyen en el capítulo 6. Mediante tablas y gráficas se presentan los resultados de los parámetros acústicos, para cada posición de la fuente, los cuales proporcionan información objetiva descriptiva del recinto, relacionada con los aspectos acústicos subjetivos del oyente. En concreto:

- Para el tiempo de reverberación se representaron los valores medidos de T_{30} con la sala vacía, en cada banda de octava de frecuencia comprendida entre 125 y 4000 Hz, y se compararon con los tiempos óptimos propuestos según los usos previstos¹¹. Los valores medidos del EDT (*Early decay time*), puesto que se relacionan con las primeras reflexiones de un recinto y son más adecuados para analizar la impresión subjetiva de la reverberación frente a los tiempos de reverberación, se comparan con los valores indicados en el Tabla A.1: *Magnitudes acústicas agrupadas según los aspectos del oyente* de la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010. Como indica Gade, A. C.¹², salas con valores de EDT significativamente más bajos que los del tiempo de reverberación, serán más *apagadas* para la música pero más inteligibles para un uso de palabra.

transformar la respuesta medida en una respuesta impulsiva.

¹⁰ Schroeder, M. R. (1965). Opus cit.

¹¹ Pérez Miñana, J. (1969). *Compendio práctico de acústica*. Barcelona: Labor, S.A. p. 319-428.

¹² Gade, A. C. (1989). *Acoustical survey of eleven European concert halls: a basis for discussion of hall in Denmark*. Copenhagen: The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark.

- La claridad del sonido percibida se evaluó mediante las magnitudes acústicas de definición (D_{50}), claridad para la palabra (C_{50}), claridad musical (C_{80}) y tiempo central (T_s). Para cada uno de estos parámetros se han representado tanto el promedio espacial por cada banda de octava¹³, como el promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor, comparando los valores obtenidos con el rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 para salas de concierto y salas polivalentes, o en su defecto, con valoraciones internacionalmente aceptadas.
- La inteligibilidad de la palabra se analizó a través del índice STI (*Speech Transmission Index*) obtenido en los distintos puntos de recepción estudiados, viendo su evolución frente a la distancia entre la fuente y el receptor. Posteriormente, se calificó la inteligibilidad de las iglesias según la escala de valoración subjetiva de dicho índice.
A excepción de la iglesia de Pumarejo de Tera donde se emplearon dos posiciones de la fuente, en las demás iglesias, este ensayo se realizó con una sola fuente sonora.
- Para evaluar el nivel sonoro subjetivo se utilizó el parámetro fuerza sonora (G), expresando sus resultados por bandas de octava, así como el promediado espectral frente a la distancia entre la fuente y el receptor.
- En cuanto a la impresión espacial, la sensación en el oyente se representó por la energía acústica lateral tardía (L_l) y el coeficiente de correlación cruzada interaural tardío ($IACC_L$); el ancho aparente de la fuente se evaluó por la energía lateral precoz (J_{LF}) y el coeficiente de correlación cruzada interaural temprano ($IACC_E$) y, por último, la audición binaural, por el coeficiente de correlación cruzada interaural ($IACC_A$).
Para cada uno de estos parámetros se ha representado el promedio espacial por cada banda de octava, y además, en el caso de la energía acústica lateral tardía (L_l) y energía lateral precoz (J_{LF}), se ha representado el promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor, comparando los valores obtenidos con el rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.
- El ruido de fondo se evalúa mediante el nivel sonoro continuo equivalente, L_{eq} , medido para las distintas bandas de octava de frecuencia (dB), así como el valor global dB(A). A partir de estos valores se realiza una gráfica de su espectro, superpuesta con los índices NR, comparándolos con los recomendables para espacios de culto.

Con objeto de dar una visión del comportamiento espacial, junto a los resultados de los parámetros promediados espacialmente, a las frecuencias entre 125 y 4000 Hz se representan las desviaciones estándares.

Para la comparación de resultados de cada parámetro acústico con el rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, se aportan los valores de número único, promediados en frecuencia, obtenidos como la media aritmética para las bandas de octava especificadas en la citada tabla A.1 y que son las siguientes:

- 500 y 1000 Hz, para T_s , D_{50} , C_{80} y G .
- 125 a 1000 Hz, para J_{LF} y L_l .

En el caso de L_l se ha promediado según la ecuación A.17 de dicha norma.

En acústica arquitectónica se emplean una serie de indicadores, de tipo genérico, que relacionan entre sí magnitudes geométricas de los recintos, y que permiten cualificarlos por comparación con los obtenidos en una amplia muestra representativa de recintos de distintos usos, cuya acústica se considera buena. Para ello, nos apoyaremos en el análisis y correlación de indicadores propuestos por Haan y Fricke¹⁴.

¹³ Excepto la claridad para la palabra (C_{50}), que al estar relacionada con la definición (D_{50}) mediante una ecuación matemática, ambos parámetros presentan un comportamiento espacial parecido en las distintas bandas de octava.

¹⁴ Haan, C.H. y Fricke, F.R. (1992). Statistical investigations of geometrical parameters for the acoustic design of auditoria. *Applied Acoustics*, 35. p. 105-127.

Las relaciones geométricas analizadas en este trabajo de investigación son las siguientes:

- Volumen / plaza (V/N)
- Volumen / superficie acústica efectiva de audiencia (V/S_A)
- Superficie acústica efectiva de audiencia / plaza (S_A/N)

La tabla 5.3 muestra los valores recomendados por Haan y Fricke para dichas relaciones geométricas en función del uso del recinto:

USO	V/N (m^3/plaza)		V/S_A (m^3/m^2)		S_A/N (m^2/plaza)	
	Recomendado	Rango	Recomendado	Rango	Recomendado	Rango
Salas de conciertos	7,8	6,2-10,8	12,2	10,2-14,2	0,59	0,54-0,64
Iglesias	7,2	5,1-9,1	-	-	-	-
Locales polifuncionales	7,1	5,1-8,5	10,6	9,2-12,0	0,66	0,63-0,75
Salas de ópera	5,7	4,5-7,4	8,2	6,9-9,5	0,57	0,52-0,66
Teatros	5,0	4,0-6,0	7,5	6,6-9,4	0,64	0,53-0,75
Cines-teatros	3,5	2,8-5,1	-	-	-	-
Salas de conferencias	3,1	2,3-4,3	-	-	-	-
Salas de música	-	-	7,3	6,5-8,1	0,60	0,50-0,70

Tabla 5.3. Valores recomendados por Haan y Fricke para los indicadores V/N , V/S_A y S_A/N , en función del uso del recinto.

Estos parámetros nos pueden proporcionar, a priori, información de las aptitudes de un espacio eclesial, aspecto que debe tenerse en cuenta para cualquier intervención de rehabilitación en una iglesia.

5.3. ELABORACIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DEL CAMPO SONORO

Las simulaciones informáticas conllevan la realización de las siguientes etapas o tareas:

- **Elaboración de modelos digitales tridimensionales de cada iglesia:** Se ha realizado un modelo espacial que reproduce el interior de cada iglesia, desde el punto de vista geométrico, empleando un programa informático de CAD. Posteriormente, se efectúa la exportación de la geometría levantada al programa de simulación acústico *CATT-Acoustic v8.0k*. Como este programa sólo permite introducir superficies planas, los elementos curvos han sido simplificados por conjuntos de pequeños planos rectos. La zona de audiencia se ha simplificado introduciendo la envolvente de cada agrupación de bancos, siendo la altura de la misma desde el suelo de 0,45 m (figura 5.13).

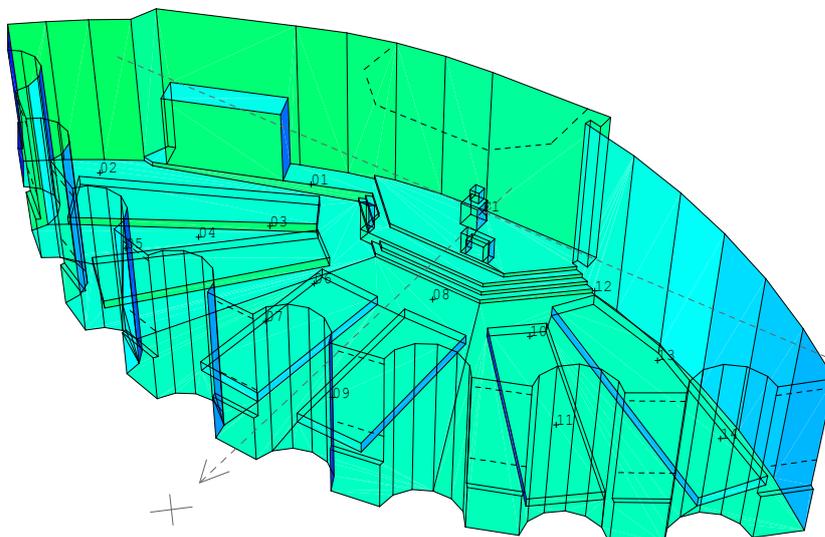


Figura 5.13. Modelo informático de la iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca.

- **Asignación de los coeficientes de absorción y dispersión sonora (*scattering*):** una vez realizados los modelos espaciales, se asignaron los coeficientes de absorción y dispersión acústica a las distintas superficies que revisten interiormente las iglesias. En el capítulo 6, en los apartados de *Ajuste del modelo informático* correspondiente a cada iglesia, se facilitan los coeficientes de absorción y dispersión sonora de los materiales de revestimiento existentes en el recinto eclesial. En el anexo 3, *Coefficientes de absorción y dispersión sonora (DVD)*, se muestra un listado completo de todos los coeficientes de los materiales utilizados en esta investigación, así como la fuente de donde se han obtenido. Cada material, junto a su coeficiente de absorción y dispersión sonora, lleva asociado un código, que permite enlazarlo con el programa de cálculo.
- **Ubicación de fuentes y receptores:** Coincidiendo con lo realizado en las mediciones *in situ* de cada iglesia, todas las fuentes sonoras se situaron en el punto ocupado por el orador en el altar, en el ambón y, si existía, junto al órgano, separando la fuente del órgano, una distancia de 1 m. Todas las fuentes sonoras se ubicaron a una altura de 1,50 m sobre el suelo. El nivel de presión sonora establecido para todas las simulaciones es de 90 dB a 1 m de distancia, en cada una de las bandas de octava de frecuencia. Al igual que en las mediciones acústicas, en la simulaciones, el cálculo del STI se ha realizado empleando una fuente sonora direccional correspondiente a una persona hablando con un esfuerzo vocal elevado (*raised vocal effort*). El programa de cálculo contiene espectros de discursos para cada banda de octava, definidos como densidades espectrales en las frecuencias centrales y como media masculina y femenina. Los valores del nivel de presión sonora (SPL), calculados e incluidos en el programa, como constantes predeterminados son:

125 Hz → 55,5 dB
 250 Hz → 61,5 dB
 500 Hz → 65,6 dB
 1000 Hz → 62,4 dB
 2000 Hz → 56,8 dB
 4000 Hz → 51,3 dB

lo que corresponde a un nivel de presión sonora de 66,5 dB(A).

Los receptores que simulan los micrófonos ocupan también la misma posición que la utilizada en las mediciones *in situ*, es decir, se distribuyen cubriendo todas las zonas ocupadas por bancos y zonas de audiencia. La altura de los micrófonos sobre el nivel del suelo es de 1,20 m, tal y como se indica en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. Además, con objeto de minimizar los errores, se comprobó que las distancias emisor-receptor no superaran en más de 20 cm las determinadas a partir de las respuestas al impulso medidas.

- **Establecimiento de las condiciones de cálculo:** las condiciones para el cálculo de las simulaciones depende del motor de cálculo empleado en el software de simulación: *CATT-Acoustic v8.0k* o *CATT TUCT v1.0f*.

Para el *CATT-Acoustic v8.0k* fueron las siguientes:

- Número de rayos (*ray tracing*): variable según la geometría y características de cada iglesia.
- Orden de las reflexiones especulares: 6
- Tiempo de truncado de rayos (parte inicial): variable según la geometría y características de cada iglesia.
- Tiempo de truncado (cálculo detallado): variable según la geometría y características de cada iglesia.
- Nivel de ruido de fondo: espectro correspondiente a la medición acústica *in situ*, en cada iglesia.

- Temperatura, humedad relativa y densidad del aire: según las condiciones ambientales registradas en cada iglesia en el momento de la realización de las mediciones *in situ*.

Para el *CATT TUCT v1.0f* fueron las siguientes:

- Algoritmo de cálculo: 2, cálculo completo, auralización detallada.
- Número de rayos/conos: variable según la geometría y características de cada iglesia.
- Ecogramas / respuesta al impulso: variable según la geometría y características de cada iglesia.
- Absorción del aire: activada.

5.3.1. SOFTWARE DE SIMULACIÓN INFORMÁTICO

Como se ha indicado antes, en las simulaciones acústicas se ha empleado el software *CATT-Acoustic*¹⁵, desarrollado por la empresa *CATT (Computer Aided Theatre Technique)* de Gothenburg (Suecia), con dos motores de cálculo diferentes: *CATT-Acoustic v.8.0k* y *CATT TUCT v1.0f*.

5.3.1.1. CATT-Acoustic

La versión tradicional del programa (*CATT-Acoustic*) está estructurado en varios módulos, con una interface de rápido acceso a los diferentes datos:

- 1.- Módulo de predicción
- 2.- Módulo de propiedades de las superficies
- 3.- Módulo de directividad
- 4.- Módulo de visualización e impresión de ficheros
- 5.- Módulo de adición de múltiples fuentes
- 6.- Módulo de postprocesado binaural
- 7.- Módulo de procesado secuencial por lotes

El módulo de predicción constituye el núcleo fundamental, ya que sirve para introducir la geometría del recinto y las propiedades absorbentes de sus revestimientos interiores. Posteriormente permite chequear la geometría y dispone de tres posibilidades de cálculo: mapas de área de audiencia, reflexiones iniciales y cálculo detallado completo, las cuales se describen a continuación:

- Trazado de mapas en el área de audiencia, utilizando un algoritmo de trazado de rayos estándar con receptores esféricos. Este algoritmo es muy útil para predecir valores numéricos de los parámetros y los resultados se suelen presentar mediante mapas sobre los planos de audiencia con escala de colores para diversos parámetros acústicos.
- Reflexiones iniciales: utiliza el algoritmo de las fuentes imagen, añadiendo las reflexiones difusas de primer orden. Realiza un análisis cualitativo de las reflexiones iniciales (de primer orden), pero no estima los parámetros acústicos de las mismas.
- Cálculo detallado completo: utiliza el algoritmo del trazado de conos con corrección estadística de la cola (RTC, *Randomized Tail-corrected Cone-tracing*), que combina características del trazado especular de conos, del trazado de rayos estándar y del algoritmo de las fuentes imagen. Este método permite la predicción numérica de parámetros acústicos, así como la creación de ecogramas que pueden ser utilizados en auralizaciones.

A continuación se describe brevemente, el proceso de funcionamiento del programa, desde la realización del modelo, hasta obtener los resultados del comportamiento acústico del mismo.

¹⁵ CATT. Mariagatan 16A, SE-41471 Gothenburg, SWEDEN. E-mail: info@catt.se, URL: <http://www.catt.se>.

Datos de entrada

El primer paso para la realización de las simulaciones es facilitar al programa los datos de entrada, a partir de la creación y lectura de una serie de ficheros:

Mediante el *fichero de configuración* (*.PRD) se establecen los parámetros generales de funcionamiento del programa, entre los cuales se encuentran la creación de los directorios para los ficheros de entrada y salida de datos, la configuración de los emisores y receptores, la determinación del espectro del ruido de fondo, el establecimiento de las condiciones ambientales de cálculo y la indicación de preferencias del usuario (bases de datos de materiales, de fuentes sonoras, etc.).

El *fichero de la geometría* (*.GEO) contiene los datos que describen la geometría y propiedades acústicas del recinto. La configuración geométrica del recinto que se va a analizar puede ser generada en el programa de dos formas diferentes. La primera de ellas consiste en la introducción directa de las coordenadas de los vértices que conforman la geometría del recinto y, a partir de éstos, se construyen los planos mediante una secuencia ordenada de vértices. El otro método consiste en la generación del modelo tridimensional en un programa externo de dibujo asistido por ordenador (como se comentó anteriormente, en este caso cada modelo se realizó con un programa de CAD) y, posteriormente, exportarlo a ficheros de *CATT-Acoustic*.

Una vez definida la geometría, se han de describir las propiedades acústicas de cada plano, es decir, la asignación a cada uno de los mismos de los correspondientes coeficientes de absorción y dispersión sonora, para las distintas bandas de octava, al menos entre 125 y 4000 Hz.

Mediante los *ficheros de receptores y emisores* (*.LOC) se le indica al programa los identificadores, coordenadas de posición y propiedades acústicas de las fuentes generadoras de niveles sonoros y de los puntos de recepción.

Antes de realizar el proceso de cálculo, se chequea la geometría para verificar que esté correctamente definida, sin errores en las superficies que pudieran ocasionar la pérdida de rayos, así como que no haya ningún parámetro erróneo que no permita el correcto funcionamiento del programa.

Opciones de cálculo del módulo de predicción

A continuación se describen cada uno de los distintos tipos de cálculo que es posible realizar desde el módulo de predicción del programa, así como los resultados y utilidad de los mismos.

Módulo de predicción: trazado de mapas en el área de audiencia

Con esta opción de cálculo se realizan estimaciones de los niveles de presión sonora a diferentes intervalos de tiempo, la influencia de la energía lateral y se determinan otros parámetros acústicos (D_{50} , C_{50} , C_{80} , etc.) sobre las áreas de audiencia de la sala. Utiliza el algoritmo de trazado de rayos sobre una malla de receptores esféricos, donde se tienen en cuenta las directividades de las fuentes.

Los mapas se realizan sobre una malla cuadrada, pudiendo el usuario, dimensionar el tamaño de la cuadrícula y su posición (altura), respecto al área de audiencia. Para conseguir niveles de presión correctos, el número de rayos utilizados debe ser al menos 10.000.

El sonido directo se calcula por separado, independientemente del número de rayos trazados, conectando la fuente directamente con el centro de cada uno de los receptores, y teniendo en cuenta las posibles superficies que interfieran en este camino.

El programa tiene la opción de asignar automáticamente el número de rayos a trazar, para asegurar que llegue:

- 1.- Un rayo directo por metro cuadrado a todas las posiciones en los 80 ms posteriores a la

llegada del sonido directo.

2.- Un rayo directo por cada cuatro metros cuadrados a la dimensión más larga del recinto (aquellos de grandes dimensiones).

3.- Un rayo por cada cuadrícula del mapa en los siguientes 80 ms a la llegada del sonido directo (mapas con alta densidad de cuadrículas).

El tiempo para el truncado de rayos se recomienda que corresponda, al menos, a la mitad del tiempo de reverberación, para asegurar una caída de 30 dB, y puede calcularse automáticamente mediante el tiempo de reverberación estimado.

Módulo de predicción: reflexiones iniciales

En este cálculo se genera la información detallada y cualitativa de las reflexiones generadas en los primeros instantes. Para ello se utiliza el algoritmo de las fuentes imagen, generándose éstas hasta un orden máximo prefijado o hasta que se excede un tiempo máximo de llegada al receptor más cercano a la fuente, prefijado de antemano.

Las imágenes calculadas surgen del orden de reflexión escogido. Una vez calculadas todas las imágenes, los tiempos de llegada de las reflexiones se calculan a partir de la longitud de los vectores tridimensionales que unen la fuente imagen con cada receptor. El nivel de cada una de ellas se determina a partir de la potencia y directividad de la fuente, la ley de la inversa del cuadrado, los coeficientes de absorción y dispersión de las superficies involucradas en la obtención de la fuente imagen correspondiente y de la absorción del aire.

Desde el cuadro de diálogo *Early part detailed ISM*, se fija el orden de las reflexiones especulares S, el orden de reflexión difusa D y el tiempo de truncado t_t . El software permite hasta reflexiones especulares de orden nueve y la posibilidad de difusión, que en esta versión está limitada a un único orden (modelo de Lambert). Asimismo, se pueden seleccionar qué tipos de ficheros gráficos, y para qué bandas de octava, deseamos generar: espacio de las fuentes imagen, historias de las reflexiones y ecograma. Además, permite generar los ficheros necesarios para implementar auralizaciones y sumar la contribución de las diferentes fuentes.

Módulo de predicción: cálculo completo detallado

Este método, como se comentó anteriormente, utiliza el algoritmo del trazado de conos con corrección estadística de la cola (RTC, *Randomized Tail-corrected Cone-tracing*), que combina características del trazado especular de conos, del trazado de rayos estándar y del algoritmo de las fuentes imagen.

Al efectuar este cálculo, el programa sugiere considerar las siguientes recomendaciones:

- 1.- El número de rayos debe ser al menos igual al estimado por el programa automáticamente.
- 2.- El tiempo de truncado de rayos se debe corresponder con una caída de -60 dB, es decir, dicho tiempo de truncado debe ser mayor o igual al tiempo de reverberación.
- 3.- Las reflexiones difusas son muy importantes tanto para el cálculo del tiempo de reverberación como para el cálculo de otros parámetros, por lo que es fundamental estimar correctamente los valores de los coeficientes de dispersión. Se recomiendan valores del 20% en el caso de superficies planas y lisas de tamaño medio (10% si su tamaño es grande); entre el 30% y el 80% para la audiencia (30% a 125 Hz y creciendo hasta el 80% a 4000 Hz); valores altos (80%) para superficies irregulares para la banda de octava cuya longitud de onda sea del mismo orden que el de las irregularidades. En caso de duda, es preferible asignar coeficientes de dispersión por exceso que por defecto.

Este método permite la predicción numérica así como la creación de ecogramas que pueden ser utilizados en auralizaciones. Entre los resultados que encontramos tenemos planos con valores numéricos de los parámetros escogidos, ecogramas (figura 5.14), caídas integradas mediante el

método de Schröder, con las regresiones correspondientes a T_{R15} y T_{R30} (figura 5.15), o un resumen de los diferentes tiempos de reverberación (figura 5.16), estimados y calculados, junto con diferentes valores de la absorción media.

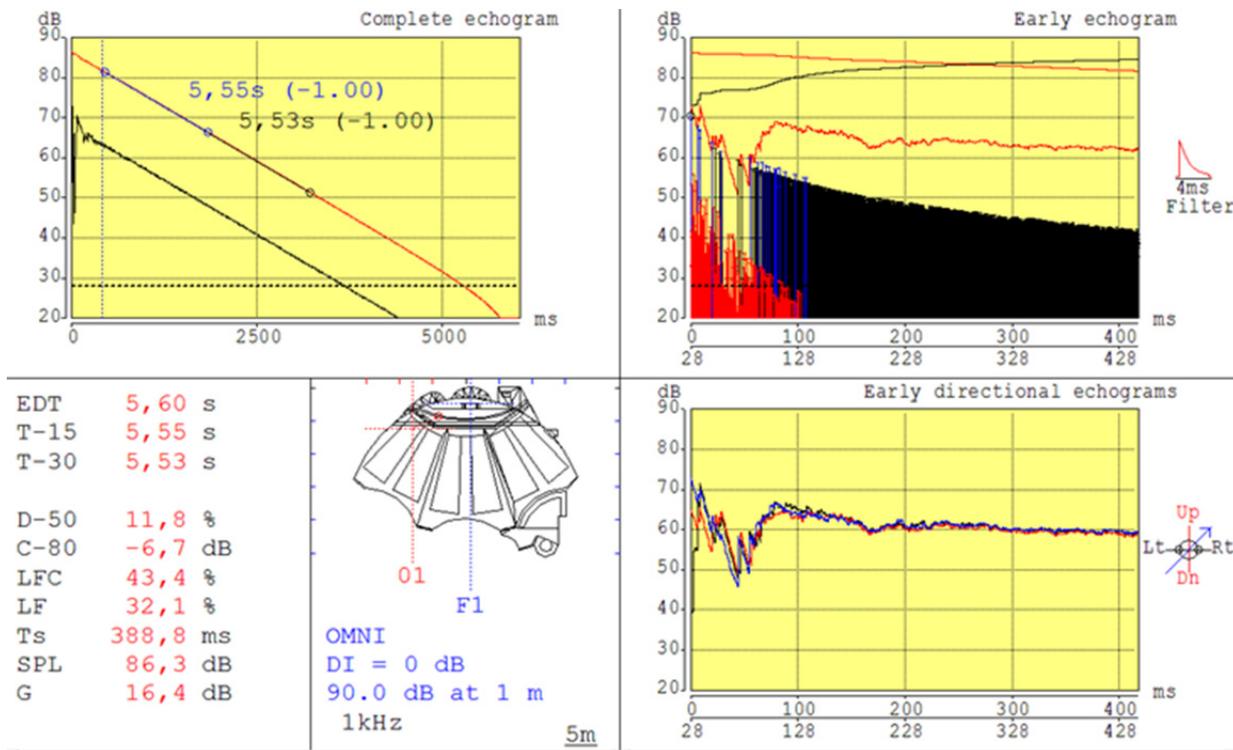


Figura 5.14. Curvas de caída simuladas, ecograma inicial, valores numéricos de los parámetros y ecogramas direccionales generados por Catt-Acoustic (de izq. a dcha. y de arriba abajo).

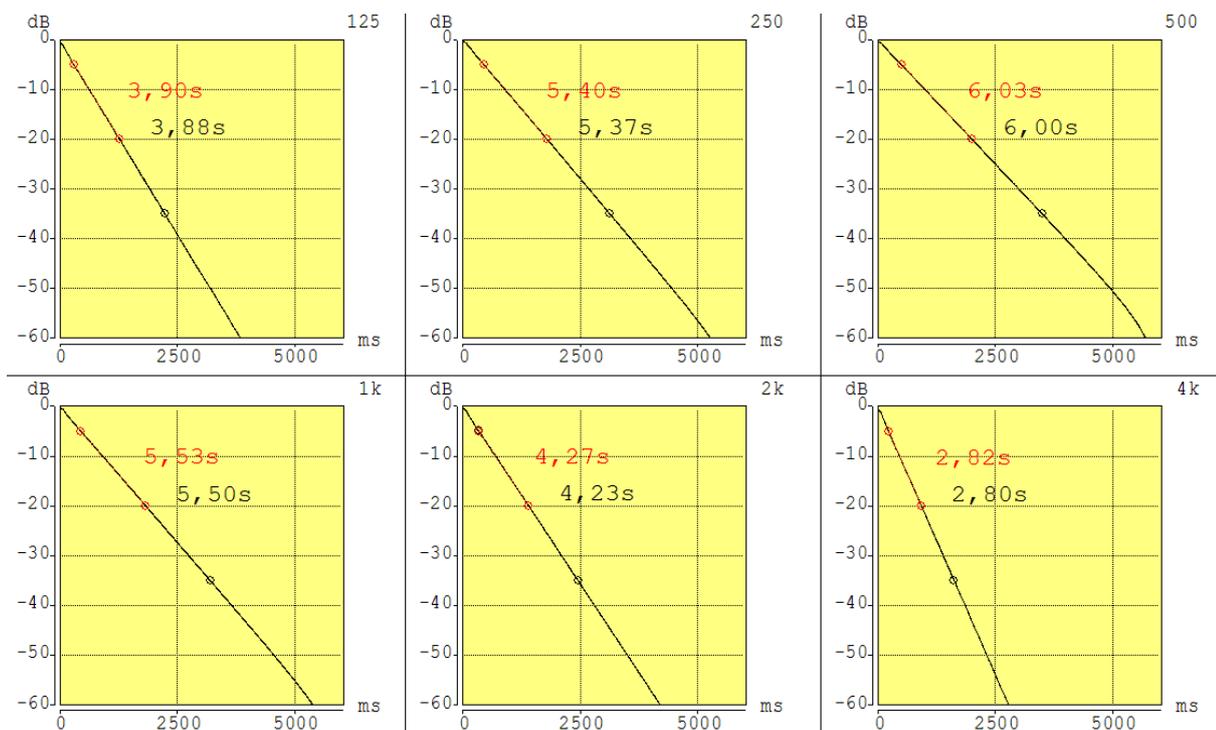


Figura 5.15. Caídas integradas y rectas de regresión para evaluar el tiempo de reverberación.

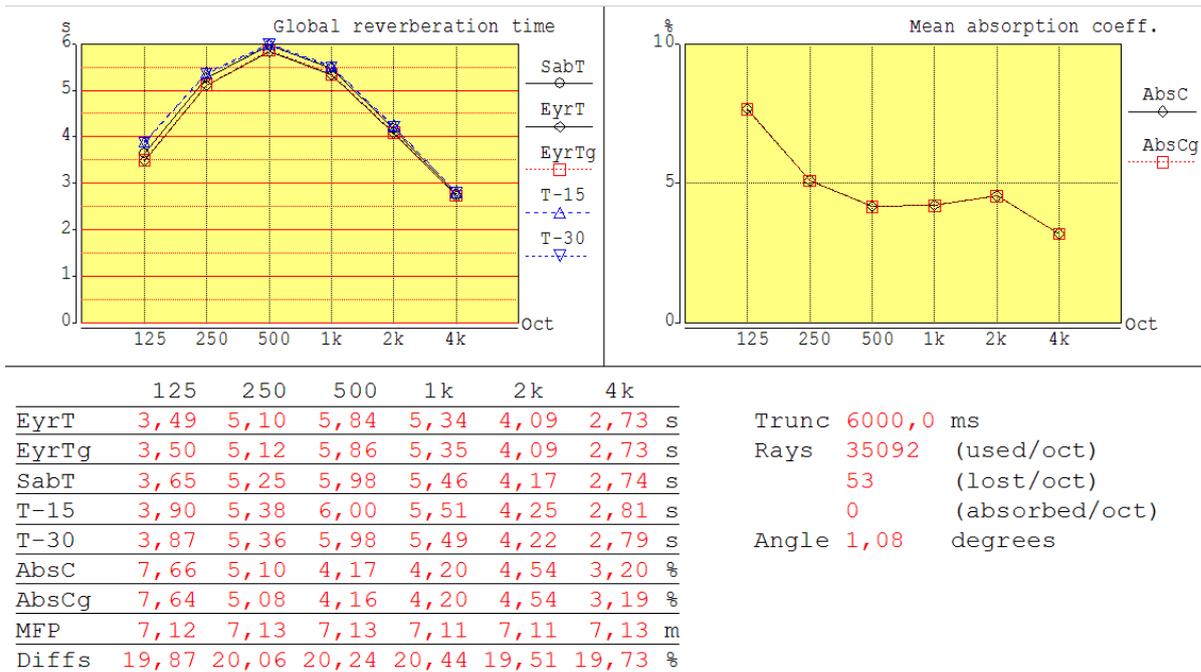


Figura 5.16. Tiempos de reverberación y coeficiente medio de absorción estimados y calculados en una simulación de la iglesia de Santa Ana de Moratalaz.

5.3.1.2. CATT TUCT (*The Universal Cone-Tracer*)

The Universal Cone-Tracer, TUCT, es un nuevo motor de cálculo para la simulación acústica y auralización de recintos, integrado con *CATT-Acoustic*. TUCT no dispone de herramientas para la realización de los modelos geométricos de los espacios a analizar, ni permite modificar las propiedades acústicas de las superficies que lo forman, ni tampoco incorporar fuentes y micrófonos. Estas herramientas, necesarias para las fases previas a la simulación, las incluye y proporciona *CATT-Acoustic* original, *software* de apoyo y complementario de TUCT. En este contexto, la estimación interactiva del tiempo de reverberación (*Interactive RT Estimate*) incluida en el módulo de predicción de *CATT-Acoustic*, resulta muy útil en la fase inicial de ajuste del modelo informático, al permitir ajustar y depurar las propiedades acústicas de las superficies, para posteriormente, obtener con TUCT un análisis y una auralización más detallada del recinto.

CATT TUCT posee tres algoritmos distintos, fundamentados en el trazado de conos (*cone tracing*), que permiten obtener los principales parámetros acústicos, ecogramas y respuestas al impulso, correspondientes a cada combinación de fuente y receptor considerada en el modelo simulado. Posee además, otro algoritmo para el mapeado de superficies ocupadas por la audiencia.

La selección del algoritmo de cálculo a emplear para la simulación acústica se realiza en el módulo de predicción de ecogramas y respuestas al impulso para las fuentes y los receptores previamente definidos (*predict SxR*). En general, el algoritmo número 1 se usará para chequeos iniciales y ajustes en las propiedades acústicas del recinto, obteniéndose un cálculo rápido con resultados de parámetros aproximados, mientras que con los algoritmos números 2 y 3 se obtendrán resultados más precisos. Casos concretos, como la presencia de ecos flotantes (*flutter echoes*) o una distribución no homogénea de la absorción de la sala, requieren la utilización, al menos, del algoritmo número 2 para mayor fiabilidad de los resultados. El algoritmo número 3 se usará en casos especiales como recintos abiertos complejos.

En los tres algoritmos el sonido directo y las reflexiones especulares de primer orden son siempre tratados de un modo determinista, con el método de la fuente imagen (ISM). Las reflexiones difusas de primer orden reciben idéntico tratamiento, introduciéndose como novedad un proceso aleatorio de división de rayos (*random split-up*). A semejanza de *CATT-Acoustic*, el sonido reflejado de manera

difusa se estudia en función de la frecuencia, aunque con *TUCT* se amplía el rango estudiado cubriendo las bandas de octava entre 125 Hz y 16 kHz.

A diferencia de *CATT-Acoustic*, en *TUCT* no hay recreación idealizada de la cola reverberante en la última parte del ecograma, siendo necesario, como contrapartida, considerar mayor número de conos en auralización para garantizar la precisión suficiente en la respuesta al impulso.

Los resultados correspondientes a cada combinación de fuente y receptor, que facilita *TUCT* con el módulo *predict SxR*, están formados por los siguientes elementos:

- Ecogramas en bandas de octava basados en el análisis del contenido energético (E) de cada reflexión.
- Respuestas al impulso derivadas a partir del análisis en el tiempo de la presión (h) y adaptadas a las características binaurales del oído humano (hL , hR) y a la función de transferencia de la cabeza ($HRTF$) escogida para ello. La auralización en cada punto de recepción se obtiene a partir de la convolución de una señal anecoica emitida por la fuente con la respuesta al impulso de la sala.
- La mayoría de los parámetros acústicos pueden calcularse de ambas formas, tanto a partir del procesado de los ecogramas (E), como de las respuestas al impulso (h) antes mencionadas.

En modelos basados en el coeficiente de absorción, los valores obtenidos del análisis energético (E) y de presión (h) pueden diferir considerablemente en razón de la negación de fenómenos de fase. Diferencias significativas de sus respectivos valores, pone en duda la fiabilidad de los resultados y de las auralizaciones calculadas a partir de la respuesta al impulso de la sala (h), aunque normalmente, esas diferencias tienen lugar en las bandas de octava de 125 Hz y 250 Hz, y ocasionalmente, para 500 Hz. Este hecho pone de manifiesto las limitaciones de la acústica geométrica y es un problema común a todos los *softwares* similares.

De acuerdo con la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, el programa proporciona los resultados de los parámetros acústicos procesando la respuesta al impulso (h), es decir, filtra la respuesta al impulso en bandas de octava, la eleva al cuadrado y la integra hacia atrás en el tiempo, hasta obtener la curva de decrecimiento energético.

Por otro lado, los resultados generados por el módulo correspondiente al mapeado de las áreas de audiencia (*map measures*) se basan en el cálculo de ecogramas en bandas de octava basados en el análisis del contenido energético (E) de cada reflexión. Se trata de una variante del algoritmo 1 que crea los ecogramas considerando sólo el contenido energético de las reflexiones, aunque también presenta la opción de realizar un análisis de fase para el sonido directo.

Se describen a continuación las características de los tres algoritmos implementados en *TUCT* en el módulo de predicción. Se emplearán esquemas en árbol para ilustrar cómo son las reflexiones de los rayos, según su naturaleza y la dirección de las mismas. En estos esquemas, las ramas de color verde corresponden a las reflexiones de tipo especular (S), y las ramas amarillas a las de tipo difusas (D). Asimismo, la dirección de las reflexiones representadas con trazo continuo se asigna de forma determinista, mientras que la dirección de las líneas discontinuas se selecciona mediante un proceso estocástico.

De forma genérica, cuando un rayo sonoro alcanza una superficie, su energía puede ser absorbida o reflejada por dicha superficie, de manera difusa siguiendo la ley de Lambert, o especularmente, dependiendo de las propiedades absorbentes y difusoras de la superficie.

Algoritmo 1

Con este algoritmo, las reflexiones especulares y las difusas de orden n menor o igual a 1 son definidas de manera determinista, mientras que las reflexiones de tipo difuso son creadas por el proceso de división de los rayos *split-up*. Las reflexiones de tipo difuso para un orden mayor o igual a $n+1$, se definen aleatoriamente según el coeficiente de dispersión, s , determinándose la dirección reflejada según la ley de Lambert. A continuación se representa, mediante esquema de árbol, las reflexiones generadas por este algoritmo (figura 5.17).

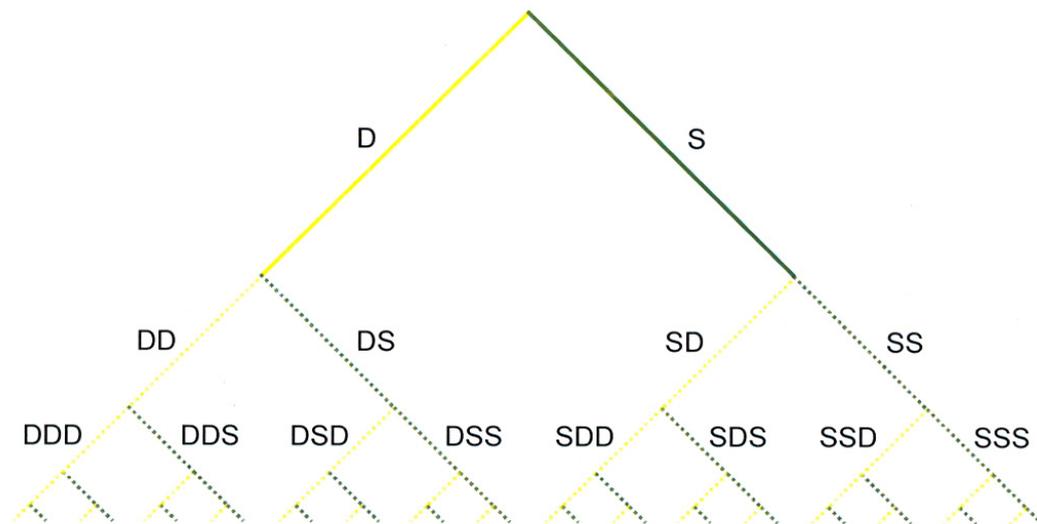


Figura 5.17. Algoritmo 1. Máximo orden de división igual a 1. (S: reflexiones especulares; D: reflexiones difusas).

Por tratarse este algoritmo de un proceso aleatorio, dos simulaciones con los mismos datos de partida, nunca proporcionarán resultados idénticos, pero, en general, la diferencia entre los mismos no será significativa. Por el contrario, si en tales simulaciones aparecen reflexiones tardías significativas o ecos flotantes (*flutter echoes*), o se trata de modelos con recintos abiertos al exterior o modelos geométricos sin cerrar, las reflexiones al final del ecograma provocarán que los resultados de dos simulaciones con las mismas condiciones iniciales sean bastante dispares, por lo que en estos casos especiales se recomienda el cálculo con los algoritmos 2 ó 3, más precisos y de mayor complejidad.

El algoritmo 1 es adecuado para simulaciones de recintos cerrados, delimitados por superficies de formas heterogéneas y con altos coeficientes de dispersión, pues las reflexiones aisladas que pudieran aparecer al final del ecograma serán poco importantes y no serán audibles. Sin embargo, en salas de gran volumen y con superficies muy absorbentes dichas reflexiones acusarán ese problema.

Finalmente, el mapeado de las áreas de audiencia en *TUCT* (*map measures*) constituye una variante de este algoritmo, cuyo orden máximo de división de rayos (*split-order*) implícito es 1, creando ecogramas basados en el análisis del contenido energético de cada reflexión. El procedimiento de cálculo, estructurado en dos etapas, analiza la distribución del sonido directo y un primer orden de reflexión empleando el modelo de las fuentes imagen, *ISM*, en la primera fase, mientras que en la segunda, realiza un trazado de rayos convencional.

Algoritmo 2

Este algoritmo, a diferencia del anterior, hace extensivo el método de división de rayos (*split-up*) a cualquier orden de reflexión, por lo que todas las ramas del esquema de árbol correspondientes a los tipos especular-especular (SS) y especular-difusa (SD) son deterministas (figura 5.18).

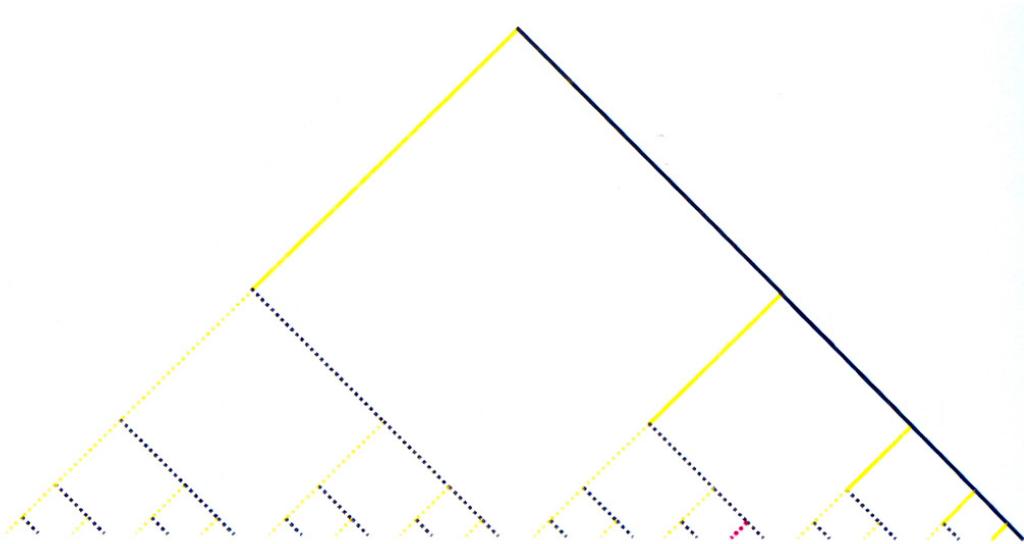


Figura 5.18. Algoritmo 2. Esquema de árbol.

El resto de combinaciones posibles es de naturaleza aleatoria y siguen el procedimiento general del algoritmo 1, con la salvedad, de que la energía transportada por dichas combinaciones aleatorias es pequeña con respecto a la asociada a las reflexiones deterministas, con lo que la variación entre simulaciones consecutivas será insignificante, ya que no se percibirán reflexiones dirigidas aleatoriamente en la última parte del ecograma.

Del diagrama de árbol de este algoritmo se deduce que cuando un rayo sonoro alcanza una superficie, con coeficientes de absorción α y dispersión s , la energía se distribuye en tres porciones: la primera, se refleja de manera especular, según un factor $(1-s)(1-\alpha)$; la segunda, de modo difuso, es proporcional al producto $s(1-\alpha)$; y, el resto, es absorbida por el material impactado en relación a su coeficiente α .

En las simulaciones a calcular con este algoritmo, no están limitadas las reflexiones especulares pero sí el número finito de rayos, a partir del cual, aparecerán reflexiones especulares en la última parte del ecograma procedentes de superficies de pequeño tamaño, que pueden causar ecos no deseados. Con la siguiente fórmula puede estimarse el número de rayos a emplear en una simulación concreta sin que aparezca el fenómeno descrito:

$$N > 4\pi \frac{(c_0 \cdot t)^2}{S_h}$$

siendo N el número de rayos, c_0 la velocidad del sonido en el aire (≈ 343 m/s), t el tiempo máximo para la llegada de reflexiones desde el momento de excitación de la fuente expresado en segundos, y S_h el área, en metros cuadrados, de la mínima superficie que se pretende asegurar que será alcanzada por algún rayo.

Algoritmo 3

Al igual que el algoritmo 2, utiliza el método de división de rayos (*split-up*) a cualquier orden de reflexión, pero en este algoritmo 3, un mayor número de reflexiones generadas por la división de rayos, son de tipo determinista.

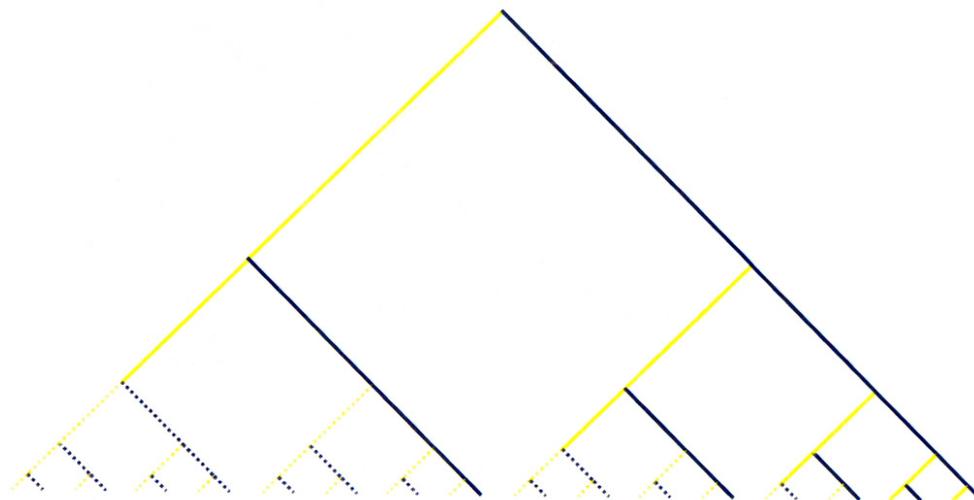


Figura 5.19. Algoritmo 3. Esquema de árbol.

En este caso, las ramas de reflexiones sucesivas, siguiendo las secuencias recogidas a continuación, serán deterministas: especular-... (S^i), especular-...-difusa (S^iD), especular-...-difusa-especular-... (S^iDS^i), especular-...-difusa-difusa (S^iDD), difusa-especular-... (DS^i) y difusa-difusa (DD). Combinaciones de reflexión diferentes a estas, se rigen por el tratamiento aleatorio como en el algoritmo 1 (figura 5.19).

A priori, este módulo de cálculo podría programarse para procesar más secuencias de reflexiones adicionales de tipo determinista, albergando órdenes superiores de reflexión difusa, pero la disminución de la energía registrada para reflexiones difusas en sucesivos órdenes de reflexión, unido a la potencia que requeriría el equipo informático para su procesado, hacen desaconsejable su implementación.

5.4. AJUSTE DE LOS MODELOS INFORMÁTICOS

El objetivo de esta fase es conseguir, para cada iglesia, un modelo informático tridimensional con un comportamiento acústico muy similar al que posee realmente el espacio eclesial, y cuyas características acústicas fueron determinadas con las mediciones realizadas *in situ*. Para ello, en cada modelo se modifican los coeficientes de absorción y dispersión de los materiales con más incertidumbre, para ajustar el tiempo de reverberación (T_{30})¹⁶ simulado con los valores medidos *in situ* para las distintas bandas de octava. Se ha considerado que una sintonización¹⁷ es válida cuando los valores simulados difieren menos del umbral perceptible *Just Noticeable Difference* (JND), que es en este caso porcentual (5% de los valores medidos para cada banda de octava).

La sintonización de cada modelo, en su estado actual, se ha realizado en la hipótesis de iglesia vacía de fieles y con la fuente en posición 1, al ser ésta la más representativa pues normalmente coincide con el altar.

¹⁶ Excepto para la iglesia de Santa María Magdalena, donde el ajuste se ha realizado ajustando el tiempo de reverberación inicial EDT, según se describe en el apartado 6.3.2.2 del capítulo 6.

¹⁷ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2009). Acoustic simulations of mudejar-gothic churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126 (3), p. 1207-1218.

Para obtener un primer ajuste del tiempo de reverberación en las simulaciones se emplearon dos herramientas: a) la estimación interactiva del tiempo de reverberación (*Interactive RT Estimate*), contrastada con el módulo de cálculo detallado completo de *CATT-Acoustic* v.8.0k, y; b) el algoritmo de cálculo 1 de *CATT TUCT* v1.0f.

A continuación, para obtener unos resultados precisos de los diferentes parámetros se realizaron simulaciones utilizando el algoritmo de cálculo número 2 de *CATT TUCT* v1.0f, hasta alcanzar el ajuste del modelo a partir de los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) medido *in situ*.

En el capítulo 6, concretamente en los apartados *Medición in situ. Análisis y valoración de las condiciones acústicas* de cada iglesia, se ofrecen los valores del T_{30} , tanto los simulados como los medidos *in situ* para las distintas posiciones de la fuente, así como la comparación con los tiempos de reverberación recomendables para el uso musical y de la palabra.

De forma similar, en los apartados *Ajuste del modelo informático* del citado capítulo 6, se muestran los coeficientes de absorción y dispersión sonora de los materiales de revestimiento existentes en cada recinto eclesial. En ella se destacan los materiales que han sido ajustados para la sintonización del tiempo de reverberación (T_{30}).

5.5. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO DE LOS RECINTOS EN LAS HIPÓTESIS DE IGLESIA VACÍA Y OCUPADA

Una vez ajustado cada modelo de iglesia en su estado actual, se realizan las simulaciones para cada una de las fuentes, tanto en la hipótesis de iglesia vacía como ocupada.

Al igual que las mediciones acústicas *in situ*, las simulaciones informáticas proporcionan información sobre aspectos subjetivos del oyente asociadas a diferentes magnitudes acústicas. Los resultados de los parámetros acústicos analizados en esta fase de trabajo, y que se muestran para cada iglesia en el apartado *Análisis comparativo entre la medición in situ y la simulación* del capítulo 6, son aquellos que proporciona el programa informático y que previamente han sido obtenidos en la medición acústica *in situ* de cada iglesia. Éstos son los siguientes:

- Tiempo de reverberación (T_{30}).
- Reverberación percibida: Tiempo de reverberación inicial (EDT, *Early decay time*).
- Inteligibilidad de la palabra: Índice de transmisión de la palabra (STI, *Speech Transmission Index*).
- Claridad del sonido percibida: Definición (D_{50}), Claridad para la palabra (C_{50}), Claridad musical (C_{80}) y Tiempo central (T_s).
- Nivel sonoro subjetivo: Fuerza sonora (G).
- Impresión espacial: Ancho aparente de la fuente, mediante la energía lateral precoz (J_{LF}) y el coeficiente de correlación cruzada interaural temprano (IACC_E).

En dicho apartado, estos parámetros simulados se contrastan con los obtenidos a partir de las respuestas al impulso medidas *in situ* en cada recinto. El comportamiento espacial de los mismos, en cada caso e hipótesis, se valora mediante su desviación estándar.

El análisis de los parámetros debe demostrar que el comportamiento acústico del modelo, ajustado con el tiempo de reverberación T_{30} , es muy similar al real del recinto en su estado original. Este grado de aproximación entre valores medidos y simulados, para cada banda de octava, se considera válido admitiendo los *Just Noticeable Differences* JND recomendados por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 para los valores promediados en frecuencia. Existe un consenso¹⁸ que admite que para las simulaciones acústicas se tomen por aceptables diferencias menores de 2 JND.

¹⁸ **Vorländer, M. (2008).** *Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Berlin: Springer-Verlag.

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 Schroeder que se define por la ecuación [1]:

$$f_s \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (\text{Hz}) \quad [1]$$

donde T (s) es el tiempo de reverberación medio del recinto y V (m³) el volumen del mismo.

En nuestro caso, la frecuencia de Schroeder en cada iglesia, en sus configuraciones vacía y ocupada, es la que muestra la tabla 5.4.

IGLESIA	f_s		$4f_s$		Menor banda de octava fiable (Hz)	
	Vacío	Ocupado	Vacío	Ocupado	Vacío	Ocupado
SANTA ANA DE MORATALAZ	70	50	280	200	500	250
COLEGIO DE LA ASUNCIÓN CUESTABLANCA	66	51	264	204	500	250
SANTA MARÍA MAGDALENA SANTAMARCA	34	29	136	116	250	125
SANTA CRUZ DE OLEIROS	87	60	348	240	500	250
NUESTRA SEÑORA FLOR DEL CARMELO	65	50	260	200	500	250
SANTIAGO PUMAREJO DE TERA	68	58	272	232	500	250

Tabla 5.4. Frecuencia de Schroeder y menor banda de octava con resultados fiables.

Lo anterior no implica que los resultados de frecuencias inferiores deban ser rechazados, sino que deben ser tomados con precaución.

Posteriormente, y de forma sistemática para cada posición de la fuente, se muestran las gráficas de cada parámetro incorporando los resultados de la medición realizada *in situ* y las simulaciones del estado actual, en sus configuraciones de vacío y ocupado al 100%. Para cada parámetro, se muestran y se valoran los resultados promediados espacialmente, a las frecuencias comprendidas entre 125 y 4000 Hz, así como su distribución espacial mediante la desviación estándar. Para algunas magnitudes acústicas se presenta y analiza, además, el promedio en frecuencia de número único, comparando su valor con el rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, o en su defecto, con valoraciones internacionalmente aceptadas. Dicho promedio espectral, para las bandas de octava especificadas en la norma o para las más representativas, se realiza para cada punto de recepción en función de la distancia entre fuente y receptor.

Además de lo anterior, y dado que el programa de simulación *CATT TUCT v1.0f* permite visualizar la trayectoria de los rayos sonoros en el recinto mediante la herramienta *Time trace*, se han realizado animaciones de los frentes de ondas para evaluar la importancia relativa de las superficies implicadas al recibir los impactos de las ondas sonoras. Este estudio previo del comportamiento de los rayos sonoros se describe en el siguiente capítulo, para cada iglesia, y se considera fundamental para plantear las propuestas de rehabilitación acústica, ya que permite conocer aquellas superficies o elementos que más influyen en el comportamiento acústico del recinto.

5.6. PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA DE CADA IGLESIA

Tras el análisis y valoración de las mediciones acústicas *in situ* y de las simulaciones informáticas de cada iglesia, se dispone de información suficiente para realizar las propuestas de rehabilitación acústica.

Con el fin de mejorar el comportamiento acústico de cada iglesia, se propone la introducción de una serie de medidas correctoras bajo tres condiciones:

- Respetar la idea de proyecto del arquitecto, en cuanto a concepción espacial, formas y texturas de materiales principales.
- Que sean compatibles con el tipo de protección arquitectónica del edificio.
- Que sean propuestas reversibles, mediante el simple desmontaje de los elementos añadidos.

Cada propuesta de rehabilitación acústica consta de dos fases. La primera consiste en la introducción de una serie de revestimientos absorbentes, en zonas estratégicas desde el punto de vista acústico y arquitectónico, que consigan disminuir los elevados tiempos de reverberación actuales, para ajustarlos a los considerados como óptimos para los usos de palabra y música religiosa. Se busca también mejorar otros parámetros como la inteligibilidad de la palabra y la claridad musical, reduciendo la energía de las reflexiones tardías y aumentando la relación señal-ruido en los distintos puntos de recepción. La segunda fase, dada la importancia que tiene la inteligibilidad de la palabra en este tipo de recintos, consiste en proponer una adecuada instalación de apoyo electroacústico que mejore dicho aspecto.

Dado que es recomendable que la absorción de las áreas de audiencia no esté excesivamente condicionada por el grado de ocupación de las iglesias, en todas las propuestas de rehabilitación se ha intentado tener en cuenta este aspecto, con objeto de no condicionar la acústica del recinto al número de personas que lo ocupe.

En el apartado *Propuesta de rehabilitación acústica* del capítulo 6, se realiza, para cada iglesia, la descripción técnica y la justificación del conjunto de actuaciones propuestas, complementando esta información con una representación gráfica de las mismas.

5.7. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO DE LAS PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN

Para comprobar la idoneidad de cada propuesta, sus actuaciones se implementan en los modelos informáticos, previamente ajustados, y se procede a la simulación acústica del campo sonoro para las configuraciones de iglesia vacía y ocupada, utilizando las mismas condiciones de cálculo que en las sintonizaciones. Como en la medición *in situ* y en la simulación del estado previo, la fuente sonora se situó en la posición 1, coincidente normalmente con el altar. Sólo se ha simulado esta posición dado que, como se comprobará en el capítulo 6 al analizar los resultados de la medición *in situ*, las condiciones acústicas de cada iglesia no cambian significativamente con las diferentes posiciones de la fuente.

Los coeficientes de absorción y dispersión de los nuevos materiales propuestos para cada iglesia, se muestran en el apartado *Simulación acústica del campo sonoro* del capítulo 6.

Los resultados detallados de las simulaciones informáticas, tanto de los ajustes como de las propuestas de rehabilitación acústica de cada iglesia, se adjuntan en el anexo 4: *Resultados medición in situ y simulaciones informáticas* (DVD).

5.8. ANÁLISIS Y VALORACIÓN INDIVIDUAL DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS DE LAS PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN

En esta fase se ofrecen, para cada iglesia, los resultados de los principales parámetros acústicos relacionados con cada aspecto subjetivo del oyente, y que fueron especificados en el apartado 5.5 de este capítulo. De esta forma, y para las dos configuraciones de sala vacía y ocupada al 100%, se indican los valores de la medición realizada *in situ* y las simulaciones del estado actual (EA), así como los resultados correspondientes a las simulaciones de la propuesta de rehabilitación acústica (RE).

La comparativa de resultados en las diferentes hipótesis y configuraciones, facilita el análisis pormenorizado del efecto que produce la propuesta de rehabilitación en cada parámetro acústico.

Mediante la opción *map measure settings* (configuración de mapas de medida) que ofrece el *software* de cálculo *CATT TUCT v1.0f*, se analiza la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, estudiando el comportamiento de cuatro parámetros: claridad musical (C_{80}) en dB, fuerza acústica (G) en dB, fracción de energía lateral (J_{LF}) e índice de transmisión de la palabra (STI).

Para cada uno de estos parámetros se muestran los mapas de distribución correspondientes a la simulación del estado actual y tras la propuesta de rehabilitación acústica, ambos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente en posición 1. En el caso del STI se ofrece, además, el mapa correspondiente a la utilización del sistema de apoyo electroacústico.

Las condiciones de cálculo implementadas en el programa para la obtención de los diferentes mapas fueron los siguientes:

- Número de rayos/conos: variable según la geometría y características de cada iglesia.
- Ecogramas / respuesta al impulso: variable según la geometría y características de cada iglesia.
- Absorción del aire: activada y estimada por el *software*.
- Altura de los mapas de las áreas de audiencia sobre la misma: 0,25m.
- Paso de la cuadrícula de los mapas de las áreas de audiencia: 0,50m.

Por otro lado, como las propuestas de rehabilitación acústica cambian la absorción sonora actual de las iglesias, al final de este apartado se valora y cuantifica la evolución de esta magnitud, desde el estado actual (EA) hasta la propuesta de rehabilitación, en las dos hipótesis de ocupación. En las tablas y gráficas aportadas se muestra la absorción sonora de los elementos y materiales de revestimientos que más influencia tienen en el comportamiento acústico de la muestra. Para cada iglesia, el análisis se realiza agrupando los revestimientos en zonas: techo, bancos, muros de fondo y otros revestimientos.

En este apartado, el valor de la absorción sonora de los distintos materiales corresponde al valor promedio (en m^2) entre las banda de octava de 125 Hz y 4000 Hz, ya que se pretende que este análisis, y las conclusiones que de él pudieran derivarse, constituyan una herramienta de ajuste para los arquitectos. No obstante, para poder ampliar esta información con los resultados a frecuencias bajas, medias y altas, en el anexo 2, *Absorción sonora de las superficies de revestimiento. Resultados a frecuencias bajas, medias y altas* se aportan otras gráficas complementarias con el comportamiento espectral de cada recinto. En todas las figuras se indica la absorción total de la sala (A_t), correspondiente a esas bandas de frecuencias, y la superficie total de revestimientos (S_r) de la misma.

5.9. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA GLOBAL DE LA MUESTRA DE IGLESIAS

Con el fin de valorar el comportamiento acústico global de los recintos eclesiales, la última fase del trabajo de investigación consiste en un análisis del conjunto de la muestra, el cual se centra en diversos aspectos acústicos que se describen a continuación.

En primer lugar, se presentan y contrastan, de forma conjunta para las seis iglesias, los resultados de los parámetros acústicos que previamente se han analizado de manera individual en el capítulo 6. Estos indicadores acústicos son los especificados en el apartado 5.5 y corresponden a cada aspecto subjetivo del oyente: reverberación, inteligibilidad de la palabra y claridad musical, nivel sonoro subjetivo, impresión espacial y ruido de fondo.

Mediante la representación gráfica de los resultados de cada parámetro acústico, se valora de forma global el comportamiento sonoro actual del conjunto, así como el resultante de implementar en los recintos las propuestas de rehabilitación acústica. Los resultados se contrastan, además, con los valores típicos recogidos en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

A continuación, se procede a realizar una comparativa global de la absorción sonora de la muestra de iglesias en el estado actual (EA) y tras las propuestas de rehabilitación acústica (RE), tanto para el estado de iglesia vacía como ocupada.

Las relaciones geométricas estudiadas individualmente para cada iglesia en el capítulo 6 y especificadas en el apartado 5.2.2, se estudian de forma global para la muestra de estudio, comparando los resultados obtenidos con los valores recomendados para el uso de los recintos que nos ocupan. Seguidamente se ofrece una correlación del tiempo de reverberación con las relaciones geométricas y de aforo indicadas.

Por último, y con el objetivo de establecer una base que pudiera servir para la predicción de los principales parámetros acústicos en la tipología de iglesias objeto de estudio, se realiza un análisis energético utilizando el modelo analítico μ , desarrollado para las iglesias gótico-mudéjares.

6

ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL. PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA

En este capítulo se desarrolla un estudio pormenorizado de las iglesias que componen la muestra. Para cada una de ellas, la documentación se estructura en tres grandes apartados: datos generales e información, análisis y valoración sonora del estado actual y, por último, propuesta de rehabilitación acústica.

En el apartado de **Datos generales e información** se definen las características generales de la iglesia, comenzando con su identificación, fecha de construcción y tipo de protección arquitectónica. A continuación, se realiza una descripción de la iglesia, indicando las principales ideas de proyecto del arquitecto, la cual se complementa con un reportaje fotográfico y una planimetría a escala del estado actual de la iglesia. Por último, se facilitan los datos geométricos y de aforo, así como los materiales de revestimiento y acabados interiores.

El **Análisis y valoración sonora del estado actual** contempla un estudio detallado de la medición acústica realizada *in situ*, analizando las condiciones acústicas actuales de cada espacio eclesial. Para ello, se estudian los resultados de los parámetros acústicos (descritos en el apartado 5.2.2 del capítulo *Método de investigación*) asociados a cada aspecto acústico subjetivo del oyente: reverberación, inteligibilidad de la palabra y claridad musical, nivel sonoro subjetivo, impresión espacial y ruido de fondo.

A continuación se documenta el ajuste de los modelos informáticos realizados con el programa *CATT-Acoustic v.8.0.k*, utilizando como parámetro de convergencia el tiempo de reverberación T_{30} , en la hipótesis de iglesia vacía. En los procesos de sintonización de los diferentes modelos, se analiza el grado de ajuste de los mismos a las condiciones acústicas reales de cada una de las iglesias, determinadas a partir de las mediciones realizadas *in situ* y analizadas según se explica en el párrafo anterior.

Finalmente, se presenta un análisis comparativo de los resultados de la medición acústica realizada *in situ* y de la simulación informática del campo sonoro, para todas las posiciones de la fuente, en las configuraciones de iglesia vacía y ocupada. El análisis incluye los parámetros acústicos reseñados anteriormente.

La **Propuesta de rehabilitación acústica** comienza con la exposición de los objetivos que se pretenden alcanzar con la implementación de las medidas de corrección acústica, en función de los resultados del apartado anterior, así como con la descripción y justificación de los elementos y modificaciones que integran la propuesta de rehabilitación acústica.

Como en el proceso de ajuste de los modelos del estado actual, en este apartado se facilitan los datos relativos a la simulación del campo sonoro del recinto eclesial resultante de incorporar las actuaciones de la propuesta de rehabilitación. Para tener fiabilidad en las predicciones, todos los modelos de simulación del estado rehabilitado toman como base los modelos previamente ajustados.

El análisis y valoración de la rehabilitación acústica, en las hipótesis de iglesia vacía y ocupada, se realiza estudiando los principales parámetros acústicos (especificados en el apartado 5.5.) relacionados con cada aspecto de la sensación subjetiva del oyente. Los resultados de las diferentes

simulaciones de las propuestas de rehabilitación acústica, se contrastan y comparan con los obtenidos tanto en las medidas experimentales como en las simulaciones del estado actual.

Por la importancia que tiene la inteligibilidad de la palabra en este tipo de espacios, se ha estudiado el efecto que tendría la implementación de un adecuado sistema electroacústico, valorando la repercusión del mismo sobre el índice de transmisión de la palabra (STI). Todas las simulaciones con apoyo electroacústico se realizan con los modelos informáticos que incorporan las propuestas de rehabilitación, con el objetivo de mostrar el efecto combinado de ambas mejoras.

Como la absorción sonora juega un papel fundamental en el comportamiento acústico de cada iglesia, se realiza una valoración y comparación de la absorción sonora en el estado actual y tras la propuesta de rehabilitación acústica, tanto para el estado de iglesia vacía como ocupada.

Finalmente, para cada iglesia se ofrecen unas conclusiones sobre las condiciones acústicas actuales y la evolución de las mismas, tras la propuesta de rehabilitación.



6.1. IGLESIA PARROQUIAL DE SANTA ANA, MORATALAZ. MADRID

c/ Cañada, 35. 28030 Madrid

Fecha de construcción: 1965-1971

Edificio protegido arquitectónicamente

6.1.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN

El complejo parroquial se sitúa en un solar topográficamente accidentado, con un fuerte desnivel de unos siete metros de altura. Apoyándose en el programa de necesidades como elemento definidor del edificio, como si se tratara de un *traje hecho a la medida*¹, Fisac dispuso la iglesia en la parte más alta y las dependencias parroquiales a su alrededor, proyectando una compleja macla de volúmenes de distintas familias geométricas, formando una unidad jerárquica: la iglesia, con planta en forma de óvalo, y los espacios del pequeño patio de acceso, las dependencias parroquiales y la zona de residencia, que presentan trazado ortogonal.

Fue la primera iglesia que Fisac proyectó siguiendo las directrices litúrgicas del Concilio Vaticano II, un acontecimiento que cambió por completo el programa del templo. Dicho concilio fomentó la participación de los fieles en la Eucaristía, estableció el carácter simbólico de las celebraciones y subrayó la importancia de la palabra y la predicación del sacerdote, que ahora oficia mirando a los fieles y les habla en su lengua. Para Fisac estos hechos tenían unas implicaciones formales y acústicas muy importantes.

Planteó una iglesia de planta ovalada, con un marcado eje transversal, para conseguir una eficaz agrupación de la asamblea en torno al presbiterio, pues pensaba que esta sería la forma que esa misma asamblea tomaría si se reunieran en un espacio libre, y refuerza esta disposición, inclinando el pavimento en sentido descendente hacia el presbiterio.



Figura 6.1.1 Vista interior desde el presbiterio hacia los muros dispersivos.

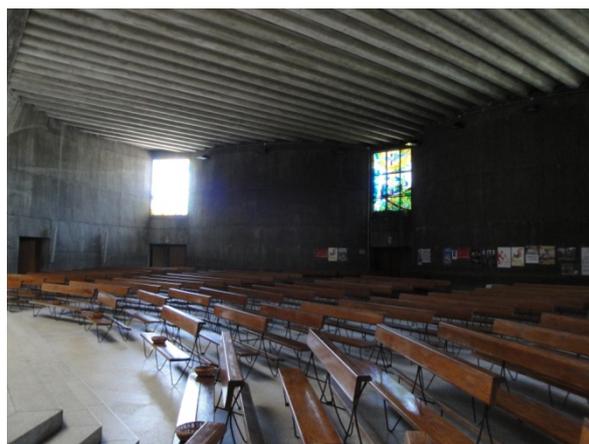


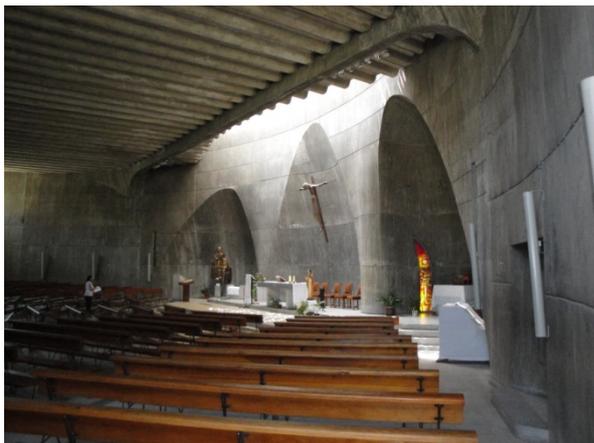
Figura 6.1.2. Vista lateral de la iglesia donde se aprecian los muros dispersivos.

En Santa Ana, el tema de la convergencia espacial queda definitivamente relegado frente al problema del sonido, que pasa a ocupar el primer lugar². El propio Fisac explicaba que, al no poder colocar en la iglesia materiales absorbentes por razones económicas, inventó para la pared posterior del óvalo, unas formas que dispersaran las ondas sonoras evitando así las concentraciones acústicas de su forma cóncava que perturbarían la audición. Por ello, *la acústica ha sido el elemento configurador en el aspecto del templo*³, y la razón por la que en la cara posterior del óvalo aparecen unas superficies convexas a modo de *muros dispersivos*, cuyas aristas de inflexión ensanchadas facilitan el acceso al templo desde el atrio, la sacristía, la capilla penitencial y bautismal y dependencias parroquiales, a la vez que facilitan, la iluminación natural y artificial del espacio para la asamblea, por la zona superior (figuras 6.1.1 y 6.1.2).

¹ Fisac, M. (1996). *El espacio religioso* (conferencia impartida por M. Fisac en E.T.S. de Arquitectura, Universidad de La Coruña, 11 de enero de 1996). [Video/DVD]. Biblioteca de Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla.

² Fernández Cobián, E. (2005). *El espacio sagrado en la arquitectura española contemporánea*. Santiago de Compostela: Colegio Oficial de Arquitectos de Galicia. p. 311.

³ Memoria del proyecto recogida en Delgado Orusco, E. (2007). *Santa Ana de Moratalaz, 1965-1971. Miguel Fisac*. Almería: Colegio de Arquitectos de Almería.



Figuras 6.1.3 y 6.1.4. Vistas interiores hacia el presbiterio.

La razón de ser del muro anterior que conforma el presbiterio, surge por la adecuación del mismo a los distintos momentos de la celebración litúrgica. Ahora el altar no es un foco único, sino un foco móvil, que Fisac materializa y distribuye apoyándose en tres concavidades practicadas en dicho muro, estableciendo en la primera concavidad el lugar para el ambón y 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 (figuras 6.1.3 y 6.1.4).

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 de hasta veinte metros de luz, según patente del arquitecto, dispuestas en la nave paralelamente al eje longitudinal que une 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. Para formalizar dicho lucernario, las cabezas de dichas vigas se recogen en una viga de hormigón ejecutada in situ y colgada de un arco, visible desde el exterior (figuras 6.1.5 y 6.1.6).



Figura 6.1.5. Lucernario sobre el presbiterio.



Figura 6.1.6. Lucernario, crucifijo y vigas hueso.

Finalmente, para que la iluminación cenital del presbiterio y la iluminación natural y artificial del espacio asambleario, respondieran a las exigencias acústicas y de dispersión luminosa necesarias⁴, Fisac dispuso, en ambos casos, vidrio normal armado y una celosía de lamas metálicas de aluminio anodizado, en color oro sobre el presbiterio y azul en los huecos de la nave. En la actualidad, el vidrio y los elementos difusores de los huecos situados encima de las puertas de acceso han sido sustituidos por vidrieras de colores, permaneciendo sólo el lucernario en su concepción original.

⁴ Memoria del proyecto recogida en Delgado Orusco, E. (2007). Opus cit.

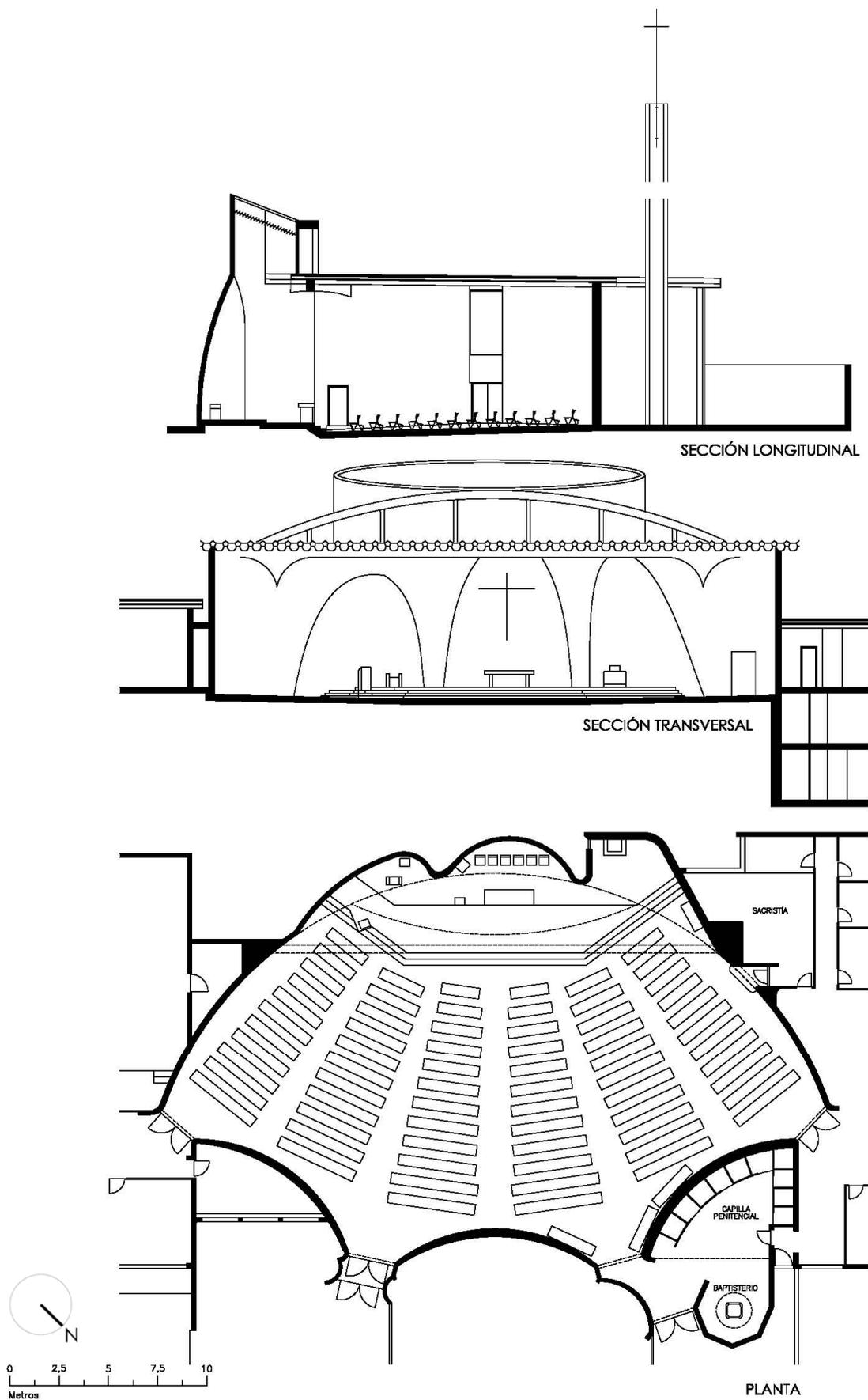


Figura 6.1.7. Plano de planta, sección transversal y sección longitudinal.

DATOS GEOMÉTRICOS Y DE AFORO	
VOLUMEN INTERIOR	
Iglesia y Capilla Bautismal-Penitencial (V):	3674 m ³
Iglesia:	3486,2 m ³
Capilla Bautismal-Penitencial:	187,8 m ³
SUPERFICIE ÚTIL	
Iglesia y Capilla Bautismal-Penitencial:	535,2 m ²
Iglesia:	482,7 m ²
Capilla Bautismal-Penitencial:	52,5 m ²
SUPERFICIE CONSTRUIDA	
Iglesia y Capilla Bautismal-Penitencial:	567,1 m ²
Superficie de revestimientos:	2062,8 m ²
Superficie del presbiterio:	83,6 m ²
Superficie de bancos:	209,6 m ²
Superficie acústica efectiva audiencia (S _A):	299,46 m ²
Superficie de pasillos:	189,45 m ²
DIMENSIONES	
Longitud media:	18,3 m
Anchura media:	22,5 m
Altura media:	8,9 m
CAPACIDAD (N)	466 personas
RELACIONES GEOMÉTRICAS	
V / N	7,88 m ³ /plaza
V / S _A	12,27 m ³ /m ²
S _A / N	0,64 m ² /plaza

Tabla 6.1.1. Datos geométricos y de aforo.

MATERIALES DE REVESTIMIENTO Y ACABADOS INTERIORES	
Suelo fieles:	Terrazo
Suelo presbiterio:	Terrazo
Techo:	Vigas hueso de hormigón prefabricado
Vigas:	Hormigón visto
Lucernario:	Vidrio y láminas metálicas
Paredes:	Hormigón visto
Puertas:	Madera
Ventanas:	Vidrieras
Altar:	Granito
Ambón:	Granito
Bancos:	Madera

Tabla 6.1.2. Materiales de revestimiento y acabados interiores.

6.1.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL

6.1.2.1. MEDICIÓN *IN SITU*. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

Como se indicó en el apartado 5.2.1 del capítulo 5, *Método de investigación*, la medida acústica *in situ* de esta iglesia se realizó el 15 de julio de 2010 a las 17:00 h, con una duración aproximada de cuatro horas. Se emplearon dos posiciones para la fuente sonora, según el uso habitual de la iglesia: la primera (F1), en el punto ocupado por el orador en el altar (figura 6.1.8) y, la segunda (F2), en el ambón, donde se leen las lecturas. Se distribuyeron catorce posiciones para el micrófono receptor, cubriendo las diferentes zonas de audiencia, de forma que sus posiciones fueran representativas de la totalidad del espacio (figura 6.1.9). Los valores medios de las variables ambientales registradas durante las medidas fueron 30°C de temperatura y 22% de humedad relativa.



Figura 6.1.8. Posición de la fuente F1 en el altar durante la medición acústica *in situ*.

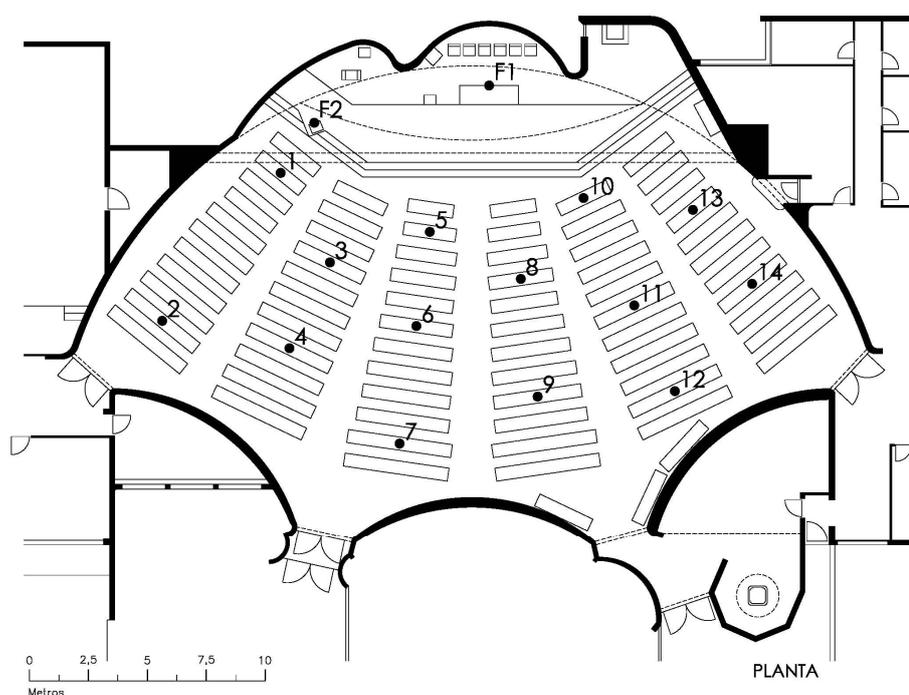


Figura 6.1.9. Posiciones de fuentes y receptores.

Reverberación

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_{30} (s)	F1	3,84	5,25	5,91	5,55	4,32	2,91
	σ F1	0,13	0,1	0,07	0,06	0,03	0,03
	F2	3,78	5,26	5,91	5,55	4,30	2,88
	σ F2	0,12	0,10	0,10	0,04	0,04	0,04
	Óptimo palabra	1,50	1,33	1,16	1,04	1,04	1,04
	Óptimo música	2,01	1,77	1,54	1,39	1,39	1,39
EDT (s)	F1	3,53	5,07	5,97	5,52	4,06	2,46
	σ F1	0,26	0,37	0,19	0,18	0,08	0,12
	F2	3,52	4,89	5,86	5,46	4,02	2,42
	σ F2	0,37	0,34	0,23	0,15	0,08	0,08

Tabla 6.1.3. Valores promediados espacialmente del tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s).

¹Desviación estándar.

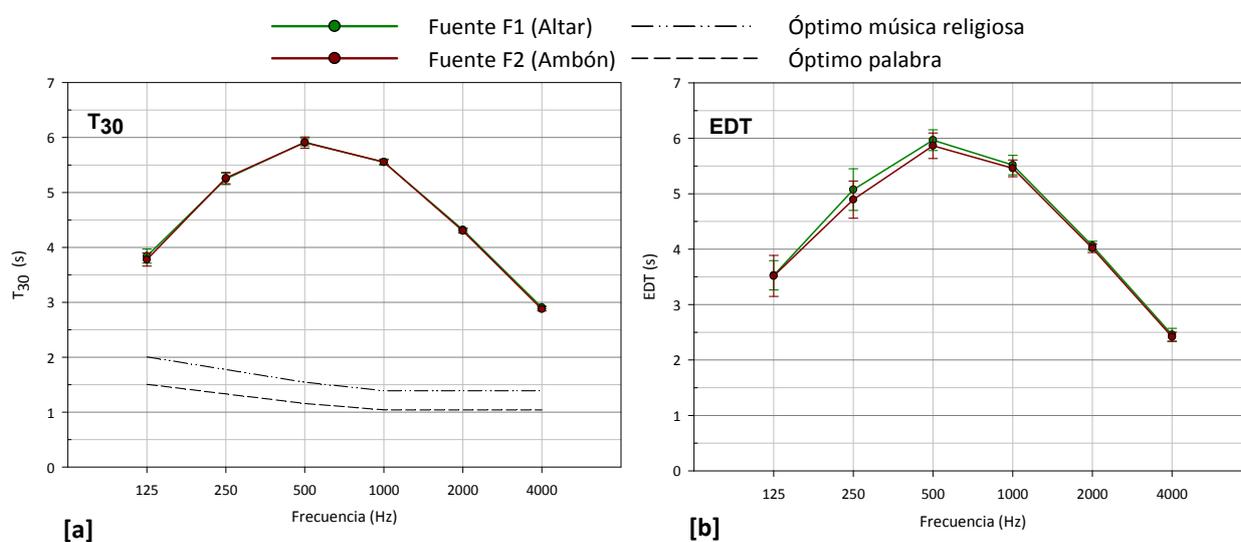


Figura 6.1.10. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

Como puede observarse en la figura 6.1.10 [a], los valores medidos del tiempo de reverberación (T_{30}) son muy similares para las dos posiciones de la fuente y la dispersión espacial (dada por la desviación estándar) es también similar y su valor pequeño (menor que 0,13 en todas las bandas de octava). Asimismo, los valores medidos son bastante más altos que los óptimos recomendados para este volumen, superándolos en más de 4 s en las frecuencias centrales.

En cuanto a los resultados del EDT (figura 6.1.10 [b]), los valores medidos también son muy similares para ambas fuentes y, a su vez, cercanos a los valores de T_{30} . La dispersión espacial es parecida para las dos posiciones de la fuente, presentando, a frecuencias bajas, valores más altos que los obtenidos para el T_{30} . El resultado del EDT_{mid} (media aritmética a las frecuencias de 500 y 1000 Hz) es superior al rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010, y que está entre 1,0 s y 3,0 s.

Los tiempos de reverberación medidos, tan alejados de los recomendados, dan lugar a deficiencias acústicas en el recinto. Como veremos más adelante, los demás parámetros acústicos presentan valores alejados de los recomendables.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

Los parámetros representados en las gráficas de este apartado: tiempo central (T_s), claridad para la palabra (C_{50}), definición (D_{50}) y claridad musical (C_{80}), corresponden al aspecto subjetivo de claridad del sonido percibida. Como es sabido, en ellos tiene una gran influencia las primeras reflexiones.

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_s (ms)	F1	237,93	368,71	433,00	391,93	279,57	165,93
	σ F1	22,19	30,90	30,93	23,28	30,27	23,57
	F2	216,64	340,00	405,07	377,86	268,43	156,00
	σ F2	26,73	51,41	57,56	39,99	37,50	29,56

Tabla 6.1.4. Valores promediados espacialmente del tiempo central T_s (ms). ¹Desviación estándar.

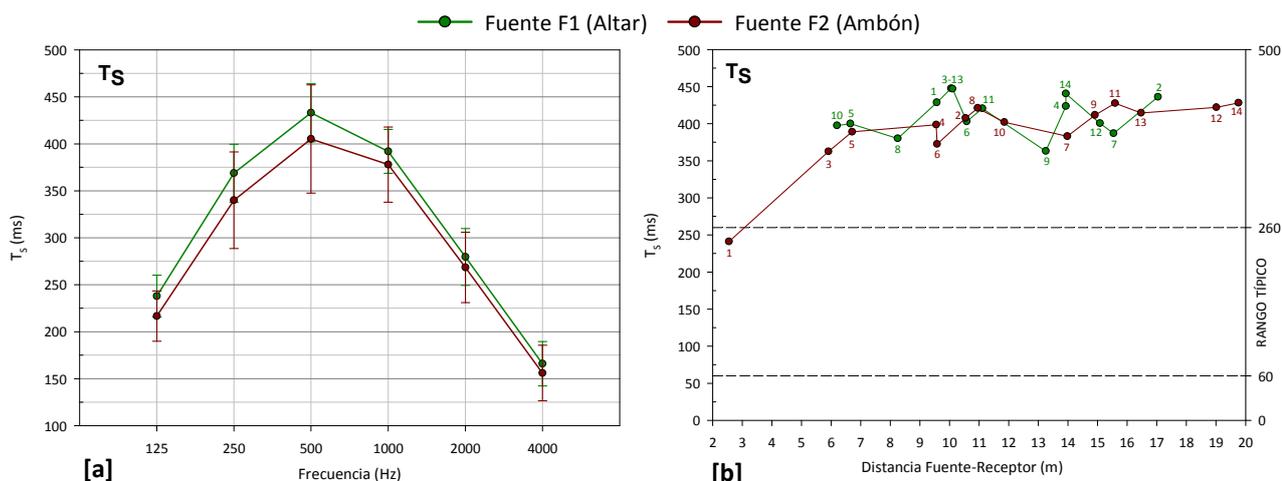


Figura 6.1.11. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

Para el tiempo central (figura 6.1.11 [a]), los valores medios registrados con la fuente situada en el altar (fuente 1), se mantienen por encima de los de la fuente 2, ubicada en el ambón. La diferencia entre los resultados de ambas fuentes es superior a 1 JND para casi todas las frecuencias. La dispersión espacial es mayor cuando la fuente se sitúa en el ambón (F2).

La gráfica que representa el promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor de este parámetro (figura 6.1.11 [b]), refleja un comportamiento similar para ambas posiciones de la fuente. Como puede observarse, los resultados obtenidos en todos los puntos de recepción situados en la zona de audiencia, se alejan del rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, excepto para el punto más próximo a la fuente 2, situado a sólo 2,55 m de distancia del ambón (punto 1).

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D_{50}	F1	0,29	0,13	0,13	0,15	0,21	0,31
	σ F1	0,06	0,04	0,05	0,05	0,08	0,11
	F2	0,33	0,19	0,17	0,17	0,23	0,34
	σ F2	0,10	0,11	0,12	0,09	0,12	0,14

Tabla 6.1.5. Valores promediados espacialmente de la definición D_{50} . ¹Desviación estándar.

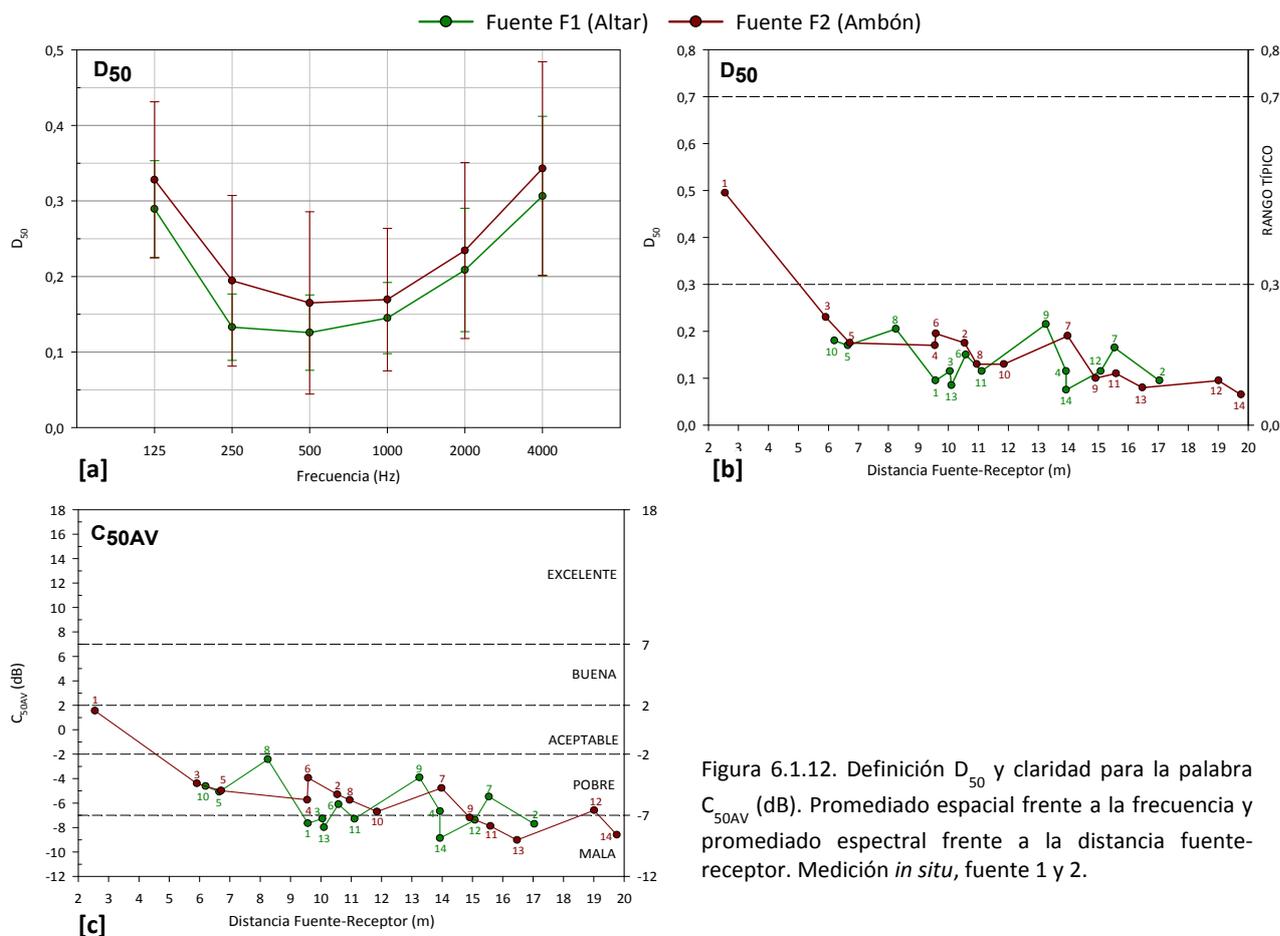


Figura 6.1.12. Definición D_{50} y claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

En cuanto al promediado espacial de la definición (figura 6.1.12 [a]), globalmente se obtienen mejores resultados de la cuando la fuente sonora se sitúa en el ambón, pero la dispersión espacial es mayor. Excepto para la frecuencia de 250 Hz, los resultados de este parámetro entre ambas fuentes difieren menos de 1 JND.

Las gráficas que representan el promedio espectral, en función de la distancia entre fuente y receptor, de la definición y la claridad para la palabra (figuras 6.1.12 [b] y [c]), reflejan resultados similares para ambas posiciones de la fuente. Los resultados obtenidos para el D_{50} , se alejan del rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. Igualmente, los resultados del C_{50AV} , según la escala de valoración de Marshall⁵, califica la claridad de la palabra entre pobre y mala. Como ambos indicadores están influenciados por la distancia a la fuente, en los puntos más alejados de obtienen los peores resultados.

PARÁMETRO	FUENTE - σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C_{80} (dB)	F1	-2,65	-6,50	-7,03	-6,24	-4,20	-1,51
	σ F1	1,51	1,51	1,53	1,32	1,60	1,52
	F2	-1,21	-4,79	-5,99	-5,59	-3,67	-0,80
	σ F2	1,73	2,12	2,52	1,82	1,94	2,06

Tabla 6.1.6. Valores promediados espacialmente de la claridad musical C_{80} (dB). ¹Desviación estándar.

PARÁMETRO	FUENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
STI	F1	0,29	0,32	0,3	0,33	0,41	0,38	0,37	0,42	0,37	0,36	0,32	0,31	0,27	0,28

Tabla 6.1.7. Valores del índice de transmisión de la palabra STI en cada punto de recepción.

⁵ Marshall, L.G. (1994). An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. *Journal of the Acoustical Society of America*, 96 (4), p. 2251-2261.

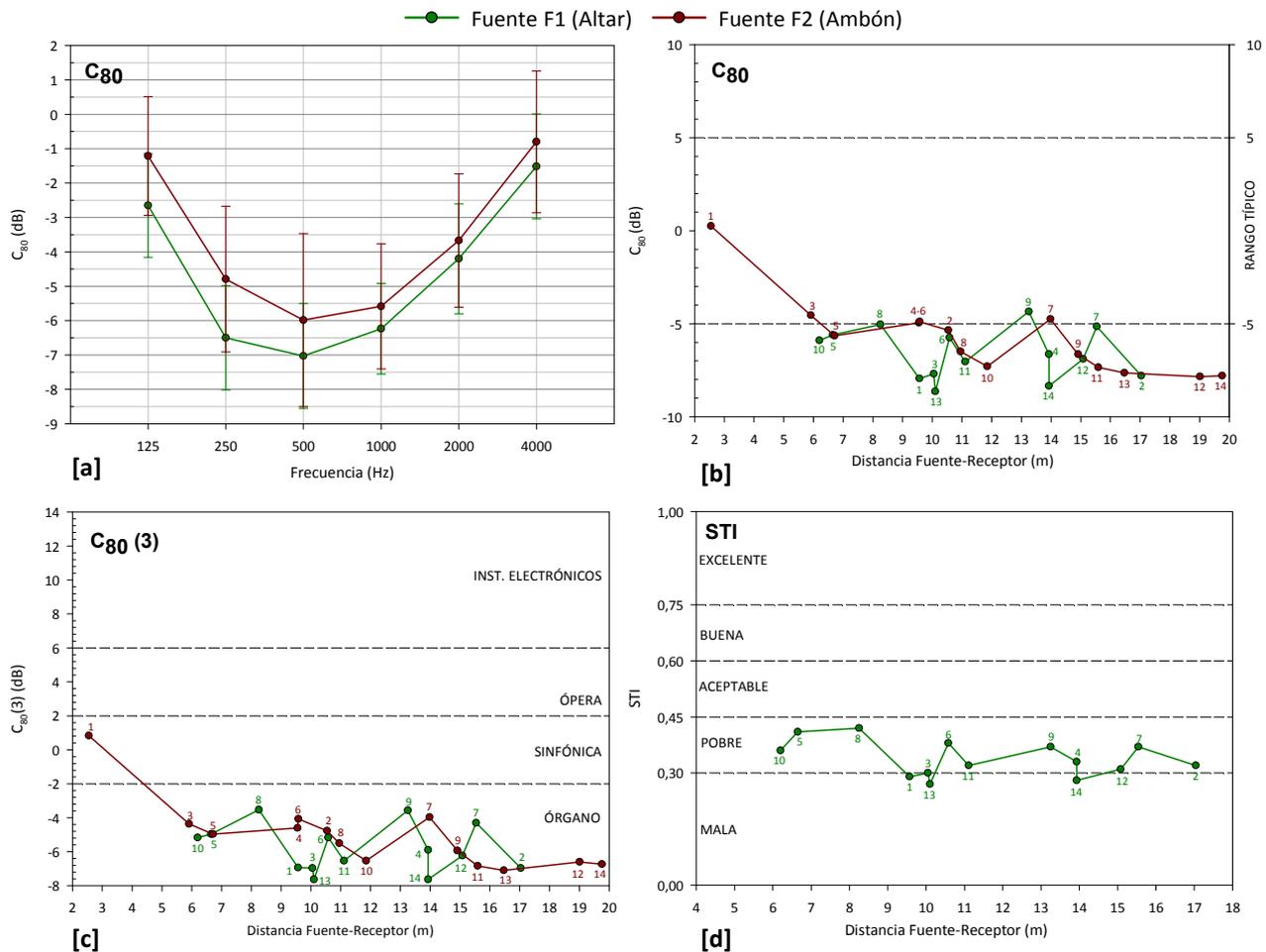


Figura 6.1.13. Claridad musical C_{80} (dB) e índice de transmisión de la palabra STI. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

En cuanto a la claridad musical (C_{80}), vemos que, tanto los resultados promediados espacialmente frente a la frecuencia (figura 6.1.13 [a]) como los promediados espectralmente frente a la distancia fuente y receptor (figura 6.1.13 [b]), conllevan observaciones similares a las descritas para la claridad de la palabra (C_{50}) y la definición (D_{50}). Excepto para el punto 1 con la fuente situada en el ambón, los resultados del $C_{80}(3)$ para todos los puntos de la audiencia, indican que la iglesia es adecuada para la música de órgano, resultado previsible dados los elevados tiempos de reverberación (figura 6.1.13 [c]).

De la comparación de los resultados obtenidos, para las dos fuentes sonoras en estos cuatro parámetros: T_s , C_{50} , D_{50} y C_{80} , podemos afirmar que, globalmente, la iglesia presenta mejores valores de la claridad del sonido percibida cuando la fuente se sitúa en el ambón (F2).

En cuanto a la inteligibilidad de la palabra, valorada por el índice STI, se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor, junto con la escala de interpretación subjetiva (figura 6.1.13 [d]). En este caso, para la fuente 1, la inteligibilidad, sin apoyo electroacústico, está considerada entre pobre y mala en todos los puntos de la zona de audiencia.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	F1	18,26	21,01	19,56	15,87	13,84	13,51
	σ F1	0,94	1,45	1,67	1,29	2,06	1,82
	F2	17,88	19,28	19,66	16,31	15,03	13,24
	σ F2	2,40	3,18	1,53	1,37	2,67	2,21

Tabla 6.1.8. Valores promediados espacialmente de la fuerza sonora G (dB). ¹Desviación estándar.

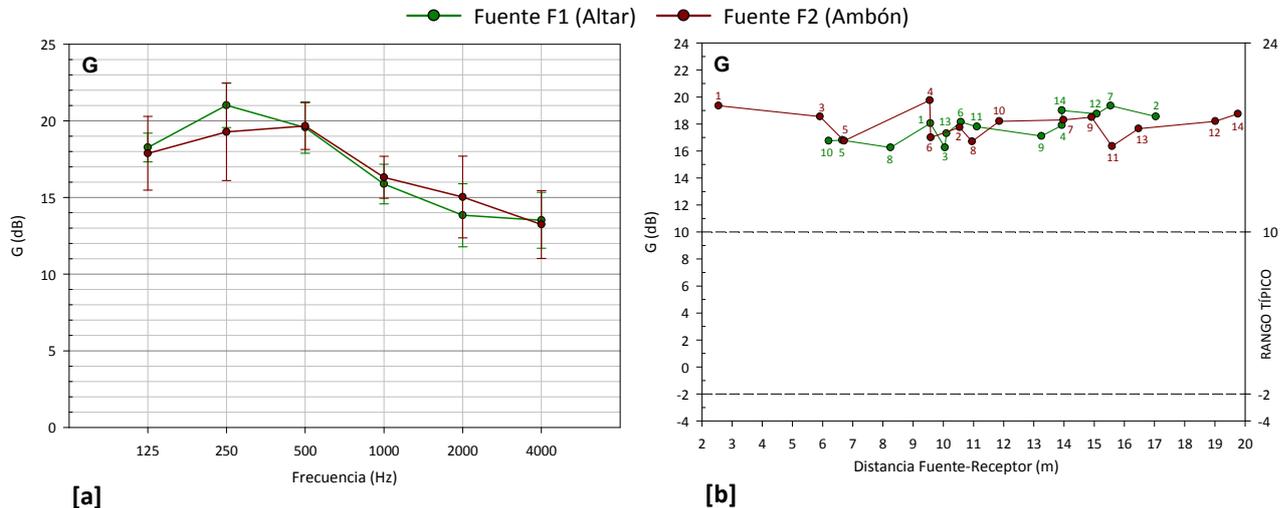


Figura 6.1.14. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

El nivel sonoro subjetivo, evaluado mediante la fuerza acústica (G) presenta, para las dos posiciones de la fuente, resultados promediados espacialmente muy altos, acordes con los elevados tiempos de reverberación registrados y la poca absorción sonora de la sala, proporcionando un nivel del campo reverberado muy elevado. La dispersión espacial es mayor para la fuente 2 situada en el ambón (figura 6.1.14 [a]).

Al representar los valores obtenidos de G en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.1.14 [b]), vemos que en todos los casos, los valores son muy altos y se sitúan muy por encima del rango típico recogido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

Impresión espacial

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
L_j (dB)	F1	9,05	14,19	13,90	10,32	7,10	6,46
	σ F1	1,68	1,82	1,67	1,62	2,94	2,52
	F2	7,83	11,97	13,57	10,39	7,94	5,55
	σ F2	2,50	3,14	1,65	1,12	2,67	2,29
J_{LF}	F1	0,07	0,16	0,21	0,19	0,15	0,17
	σ F1	0,04	0,08	0,08	0,07	0,06	0,07
	F2	0,08	0,17	0,23	0,23	0,20	0,23
	σ F2	0,03	0,05	0,08	0,06	0,05	0,06

Tabla 6.1.9. Valores promediados espacialmente del nivel sonoro lateral final L_j (dB) y fracción de energía lateral precoz J_{LF} . ¹Desviación estándar.

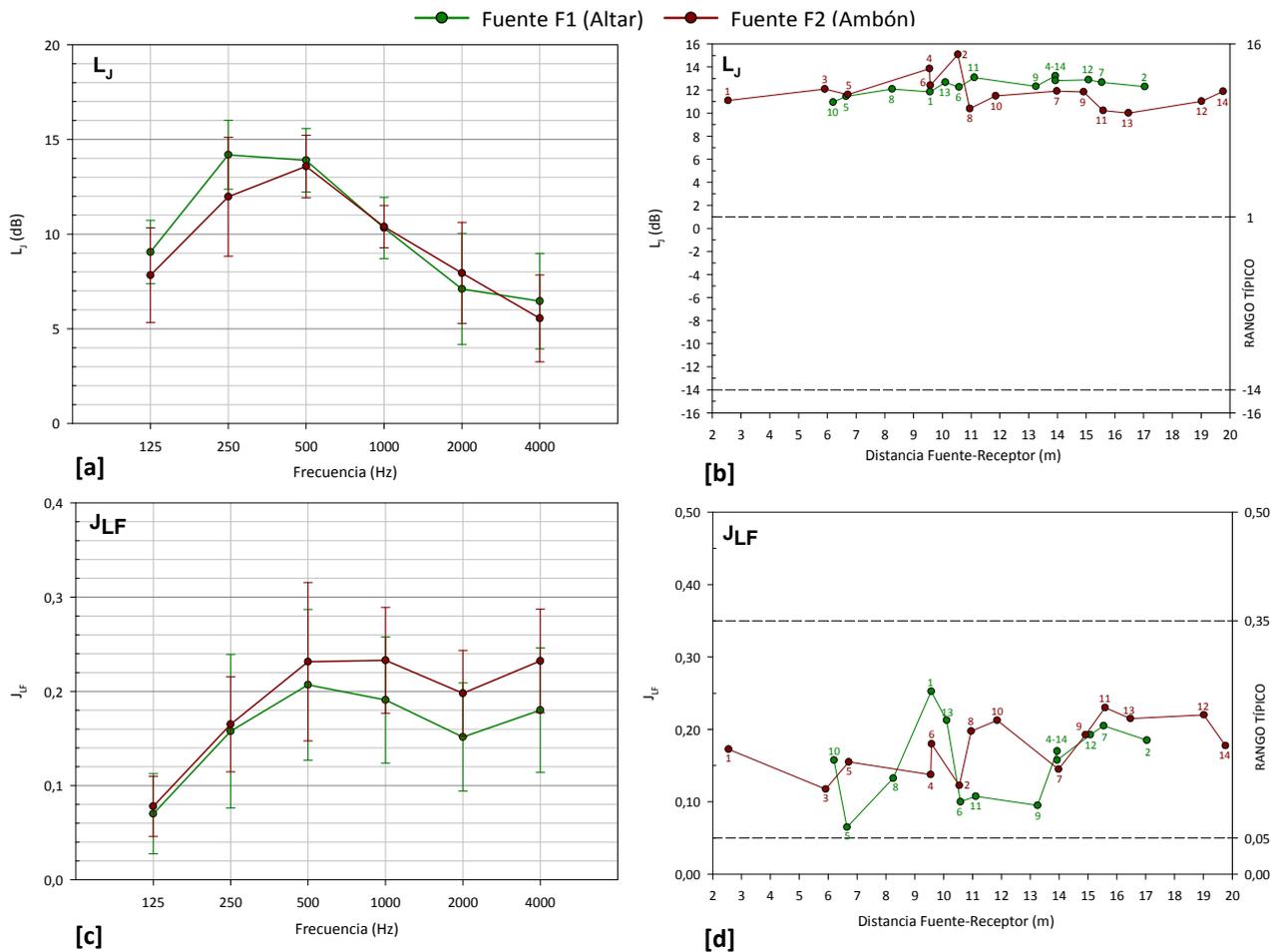


Figura 6.1.15. Nivel sonoro lateral final L_J (dB) y fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

La sensación espacial de sentirse envuelto por el sonido en el recinto está relacionada con los valores del nivel sonoro lateral final (L_J). En la figura 6.1.15 [a], puede observarse que los resultados obtenidos para las dos posiciones de la fuente son altos en todas las frecuencias, como era previsible a la vista de los elevados tiempos de reverberación. Asimismo, los valores del promediado espectral se alejan del rango típico que establece la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 (figura 6.1.15 [b]). A la vista de todo lo anterior, es normal que los resultados de este indicador den lugar a una sensación sonora envolvente del oyente en todas las frecuencias.

En cuanto a la anchura aparente de la fuente, definida por la energía lateral precoz (J_{LF}), la figura 6.1.15 [c] muestra valores diferentes para las dos posiciones de la fuente a partir de 500 Hz, ya que, por definición⁶, se trata de un parámetro muy sensible a la posición de la misma, si bien es cierto que esas diferencias son menores que el valor umbral perceptible (JND)⁷. Para todos los puntos de recepción, los valores del promediado espectral se sitúan dentro del rango típico establecido por la norma ISO (figura 6.1.15 [d]). Los niveles de J_{LF} registrados corresponden a una anchura de fuente adecuada, dado que casi todos los resultados están comprendidos entre 0,1 y 0,25.

Los resultados de estos dos últimos parámetros indican que el oyente está inmerso dentro del discurso oral o musical con una localización adecuada de la fuente sonora. Este hecho se corrobora con los coeficientes de correlación cruzada interaural ($IACC_L$, $IACC_E$ y $IACC_A$), que se indican en la tabla 6.1.10 y se representan en la figura 6.1.16.

⁶ Kürer, K. (1969). Zur gewinnung von eizahlkriterien bei impulsmessungen in der raumakustik, *Acustica* 21, p. 370.

⁷ Bork, I. (2005). Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation - Part II: Calculations. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(4), p. 753-763.

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
IACC _L	F1	0,87	0,60	0,22	0,10	0,05	0,06
	σ F1	0,04	0,17	0,23	0,03	0,02	0,02
	F2	0,86	0,58	0,16	0,10	0,05	0,06
	σ F2	0,05	0,15	0,03	0,02	0,02	0,02
IACC _E	F1	0,94	0,74	0,45	0,31	0,25	0,21
	σ F1	0,05	0,21	0,23	0,11	0,13	0,11
	F2	0,92	0,72	0,45	0,28	0,21	0,16
	σ F2	0,06	0,15	0,15	0,08	0,14	0,07
IACC _A	F1	0,89	0,62	0,24	0,11	0,09	0,10
	σ F1	0,04	0,17	0,23	0,03	0,06	0,06
	F2	0,88	0,59	0,21	0,10	0,09	0,08
	σ F2	0,05	0,16	0,06	0,03	0,08	0,05

Tabla 6.1.10. Valores promediados espacialmente de los coeficientes de correlación cruzada interaural: IACC_L, IACC_E y IACC_A. ¹Desviación estándar.

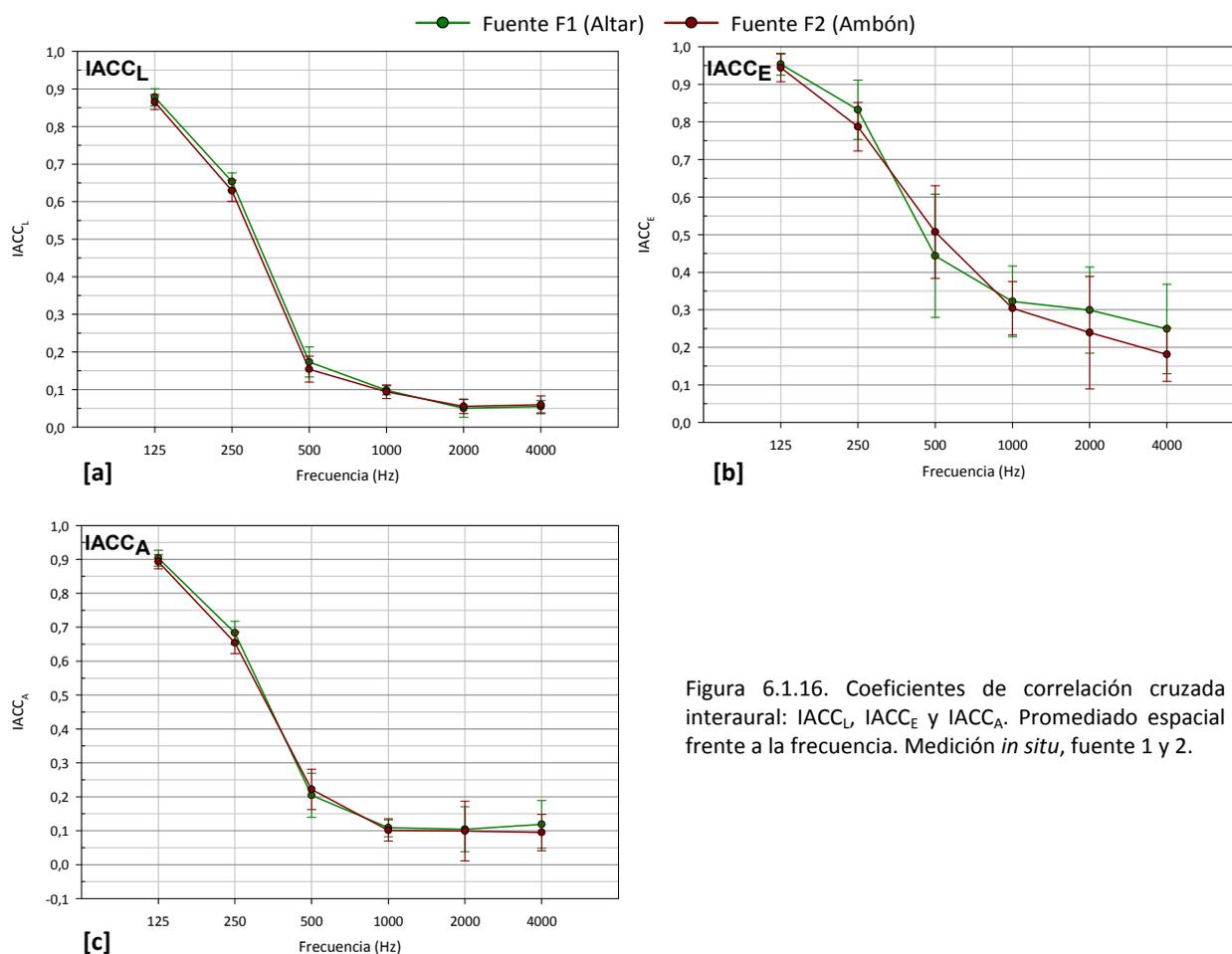


Figura 6.1.16. Coeficientes de correlación cruzada interaural: IACC_L, IACC_E y IACC_A. Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

Como se desprende del análisis de la figura 6.1.16 [a], la parte final de las respuestas al impulso, valoradas por el índice IACC_L, son casi idénticas para las dos posiciones de la fuente. Su desviación estándar es muy pequeña, presentando valores muy bajos a los sonidos agudos. La similitud de la primera parte de las respuestas al impulso, relacionada con las reflexiones tempranas y representada por el índice IACC_E (figura 6.1.16 [b]), muestra ligeras diferencias entre las posiciones de la fuente, aunque las curvas presentan la misma tendencia. La dispersión espacial es mayor que para el anterior coeficiente, y algo mayores para la fuente 1. Las respuestas completas, representadas mediante IACC_A en la figura 6.1.16 [c], son casi idénticas para ambas posiciones de fuente, siendo la dispersión espacial mayor que para el IACC_L.

Los resultados obtenidos para el IACC_{L3} (0,12, para la fuente 1, y 0,1, para la fuente 2) y para el IACC_{E3} (0,33, para la fuente 1, y 0,31, para la fuente 2) corresponderían a una sensación de sonido

envolvente y a una amplitud de la fuente sonora recomendadas por Beranek⁸ como excelentes, según el estudio que realizó en auditorios y salas de concierto.

Ruido de fondo

PARÁMETRO	PUNTO	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
RF (dB)	6	31,28	36,06	31,81	28,27	21,49	17,71

Tabla 6.1.11. Espectro de ruido de fondo registrado (dB).

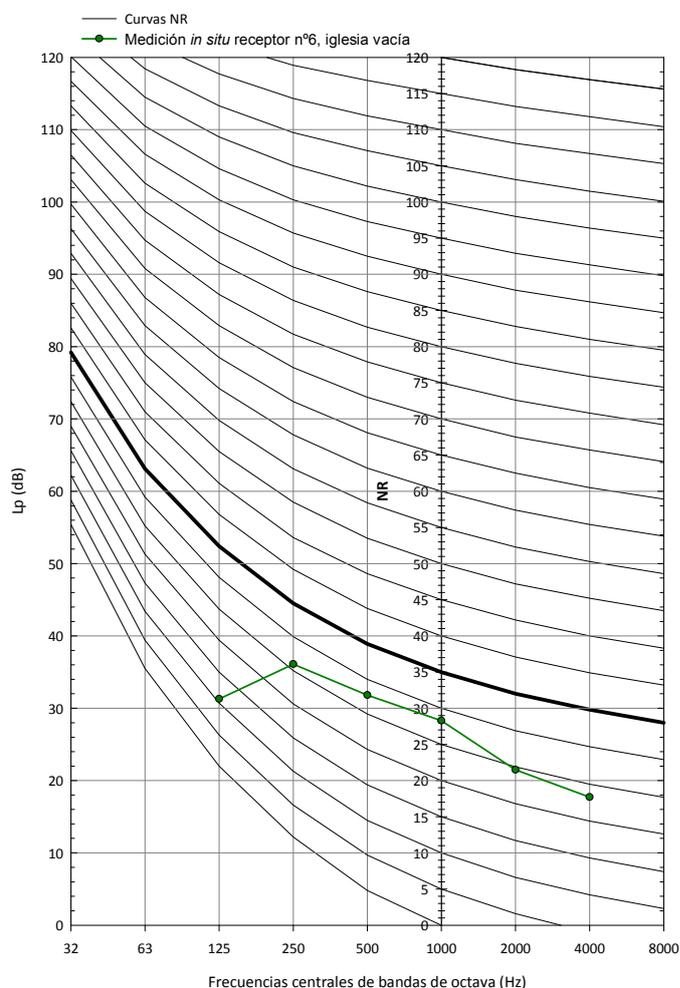


Figura 6.1.17. Curvas NR y espectro de ruido de fondo registrado (dB).

El espectro de ruido de fondo se registró promediando durante cuatro minutos en el punto 6. En la figura 6.1.17, dicho registro se ha superpuesto sobre las curvas NR, obteniéndose un índice NR de 30, valor inferior al máximo recomendado para los recintos de culto (NR 35). En este buen comportamiento influye tanto la ubicación del espacio principal de la iglesia como sus características constructivas. El arquitecto la situó en la zona más alta de la parcela y en el centro del complejo parroquial, con el resto de dependencias parroquiales a su alrededor. A su vez, el conjunto parroquial se encuentra en un barrio residencial, con zonas peatonales adyacentes, donde la calzada rodada más cercana discurre a distinta cota. Asimismo, los gruesos muros de hormigón, con pocos huecos al exterior, son favorables desde el punto de vista del aislamiento acústico.

⁸ Beranek, L. L. (1996). *Concert and opera halls: How they sound*. Nueva York: Acoustical Society of America. p. 466-473.

Parámetros geométricos y de aforo

V/N (m ³ /plaza)	V/S _A (m ³ /m ²)	S _A /N (m ² /plaza)
7,88	12,27	0,64

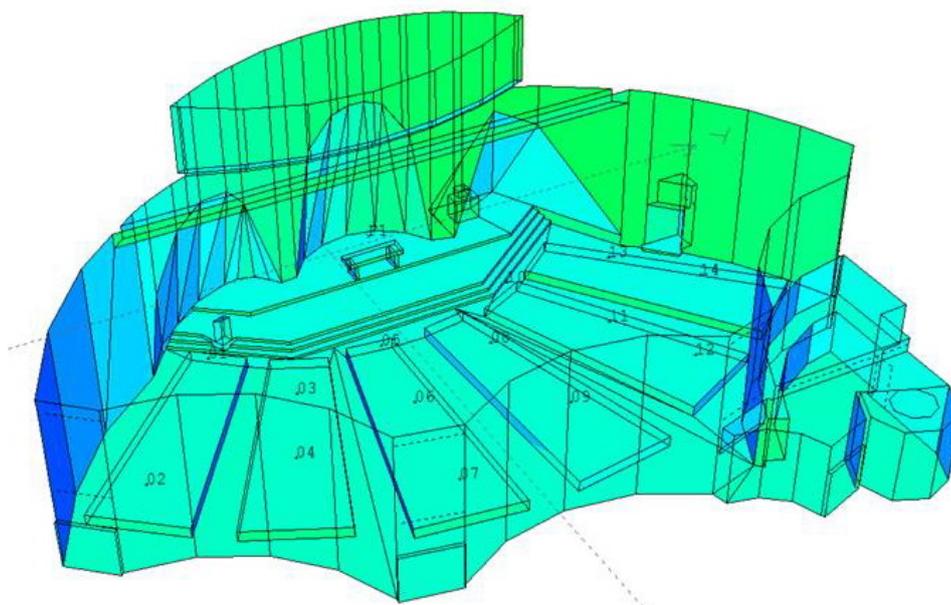
Tabla 6.1.12. Valores de parámetros geométricos y de aforo.

En la iglesia de Santa Ana, la relación geométrica V/N se encuentra dentro del rango establecido para las iglesias (5,1-9,1 m³/plaza) y coincide con el valor recomendado para las salas de conciertos.

Para las relaciones geométricas V/S_A y S_A/N, los autores Haan y Fricke no aportan valores recomendados ni rango específico para iglesias. En la iglesia de Santa Ana, el resultado de V/S_A coincide con el valor recomendado para salas de concierto (12,2 m³/m²), mientras que el valor de S_A/N corresponde al recomendado para teatros (0,64 m²/plaza).

6.1.2.2. AJUSTE DEL MODELO INFORMÁTICO

En la figura 6.1.18, se muestra el modelo informático tridimensional utilizado con el programa *CATT-Acoustic* v.8.0k, y que reproduce el interior de la iglesia.

Figura 6.1.18. Modelo tridimensional realizado con el programa *CATT-Acoustic*.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.1.13.

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
Hormigón visto	Paredes laterales y del presbiterio	631,7	30,6
Vigas hueso de hormigón visto	Techo	443,6	21,5
Terrazo	Suelo	327,4	15,9
Banco de madera	Zona de audiencia	285,2	13,8
Hormigón visto	Pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	232,2	11,3
Puerta de madera	Puertas de acceso y confesionarios	55,8	2,7
Vidrio (en área grande)	Vidrieras y lucernario baptisterio	36,6	1,8
Vidrio con lamas metálicas	Lucernario presbiterio	36,0	1,7
Granito	Altar, ambón, sede	7,4	0,4
Tela de algodón	Altar	6,9	0,3
TOTAL REVESTIMIENTOS		2062,8	100

Tabla 6.1.13. Áreas de revestimientos.

Para el ajuste del modelo informático a partir del tiempo de reverberación T_{30} , se emplearon las condiciones de cálculo especificadas en la tabla 6.1.14, y los coeficientes de absorción y de dispersión sonora de los revestimientos del estado actual presentados en la tabla 6.1.15.

DATOS Y CONDICIONES DE CÁLCULO	
Algoritmo de cálculo	Nº2, cálculo completo, auralización detallada
Número de conos/rayos	30.000
Ecograma/respuesta al impulso	6 s
Densidad del aire	1,15 kg/m ³
Absorción del aire	Activada
Ruido de fondo	Según espectro medido <i>in situ</i>
Condiciones ambientales	30°C, 22%
Tiempo de cálculo	35 horas, 11 minutos (iglesia vacía)
Número de fuentes	2
Número de receptores	14
Número de planos	257

Tabla 6.1.14. Datos y condiciones de cálculo.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DEL ESTADO ACTUAL (%)							
REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Hormigón visto y granito	α	1	1	2	2	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Vigas hueso de hormigón visto	α	16	6	3	3	3	3
	s	15	15	20	20	25	25
Terrazo	α	1	1	1	1	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Banco de madera vacío	α	16	18	16	16	17	7
	s	30	40	50	60	70	80
Banco de madera ocupado	α	57	61	75	86	91	86
	s	30	40	50	60	70	80
Hormigón visto (muros dispersivos)	α	1	1	2	2	2	2
	s	40	25	15	10	10	10
Puerta de madera	α	14	10	6	8	10	10
	s	10	10	10	10	10	10
Vidrio en área grande (vidrieras)	α	24	10	4	3	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Vidrio con lamas metálicas (lucernario)	α	34	15	4	3	2	2
	s	15	15	20	20	25	25
Tela de algodón	α	3	4	11	17	24	35
	s	10	10	10	10	10	10

Tabla 6.1.15. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos del estado actual. Los valores resaltados (color rojo) son los ajustados en el proceso de sintonización.

En esta tabla se muestran los coeficientes de absorción y dispersión sonora de los materiales de revestimiento existentes en el recinto eclesial, destacándose (en color rojo) los materiales con más incertidumbre y cuyos valores han sido ajustados para la sintonización del tiempo de reverberación (T_{30}). Como puede comprobarse, los principales coeficientes de absorción que han sido ajustados, solamente a bajas frecuencias, son los de las *vigas hueso* de hormigón, el lucernario y las vidrieras. En el resto de frecuencias (medias y altas) se han utilizado los coeficientes reconocidos⁹ para estos materiales.

⁹ Vorländer, M. (2008). *Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Berlin: Springer-Verlag.

El ajuste de los coeficientes de absorción a bajas frecuencias se apoya en dos conceptos: la geometría de estos revestimientos y su sistema constructivo. En referencia al primer aspecto, previamente al ajuste se efectuó una primera estimación del coeficiente de absorción atendiendo a la superficie real de los materiales ajustados. Es reconocido¹⁰ que simular una superficie con irregularidades como si fuera una superficie plana, afecta no sólo al coeficiente de dispersión sino también al de absorción. En cuanto al segundo concepto, el techo de la iglesia, formado por *vigas hueso* de hormigón prefabricado que salvan una gran luz, hace que éste se comporte como un resonador de membrana, aumentando la absorción a bajas frecuencias. Igualmente, el lucernario con lamas de aluminio anodizado y las vidrieras, constituyen grandes superficies con capacidad de vibración. El efecto combinado de resonador y las irregularidades de las superficies, unido al análisis del comportamiento en frecuencia del tiempo de reverberación medido (figura 6.1.10 [a]), justifica la corrección de los valores del coeficiente de absorción a bajas frecuencias de estos elementos, especialmente en la banda de octava de 125 Hz.

Los coeficientes de absorción de los bancos de madera corresponden a fuentes publicadas¹¹, excepto a la frecuencia de 4000 Hz, donde se ha realizado el ajuste disminuyendo su valor.

Para los coeficientes de *scattering*, se ha admitido un valor por defecto del 10% en todas las bandas de octava analizadas, excepto en los siguientes casos: para los bancos de madera vacíos y los bancos ocupados, se han adoptado los coeficientes de bibliografía publicada^{12, 13}; para el lucernario, el techo de *vigas hueso* de hormigón armado y los muros dispersivos, los valores se han estimado a partir del tamaño de las irregularidades, la profundidad media estructural y la longitud media estructural, para las correspondientes longitudes de onda implicadas. Este aspecto cobra más relevancia en el caso de los *muros dispersivos*. Sus coeficientes de difusión, recogidos en la tabla 6.1.15, contemplan, implícitamente, los fenómenos de dispersión de ondas sonoras que Fisac buscaba en su proyecto, y que justifican la forma de los citados muros.

6.1.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN *IN SITU* Y LA SIMULACIÓN

A partir del modelo ajustado del estado actual (EA) con la iglesia vacía, y utilizando las mismas condiciones de cálculo, se procedió a realizar la simulación acústica de la iglesia ocupada, tanto con la fuente situada en el altar (F1) como en el ambón (F2). Para la fuente F2 también se hizo la simulación sin presencia de público en las zonas de audiencia.

Los resultados de las simulaciones, para cada fuente, se comparan con los obtenidos en las medidas experimentales. Para facilitar el análisis de resultados en este apartado, las gráficas situadas en la columna izquierda muestran los valores correspondientes a la fuente 1, y las gráficas de la columna derecha, los de la fuente 2.

¹⁰ Martellotta, F. (2009). Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's basilica in Rome. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(3), p. 1175-1186.

¹¹ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2009). Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(3), p. 1207-1218.

¹² Cox, T.J. y D'Antonio, P. (2004). *Acoustic absorbers and diffusers. Theory, design and application*. London: Spon.

¹³ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2009). Opus cit.

Reverberación

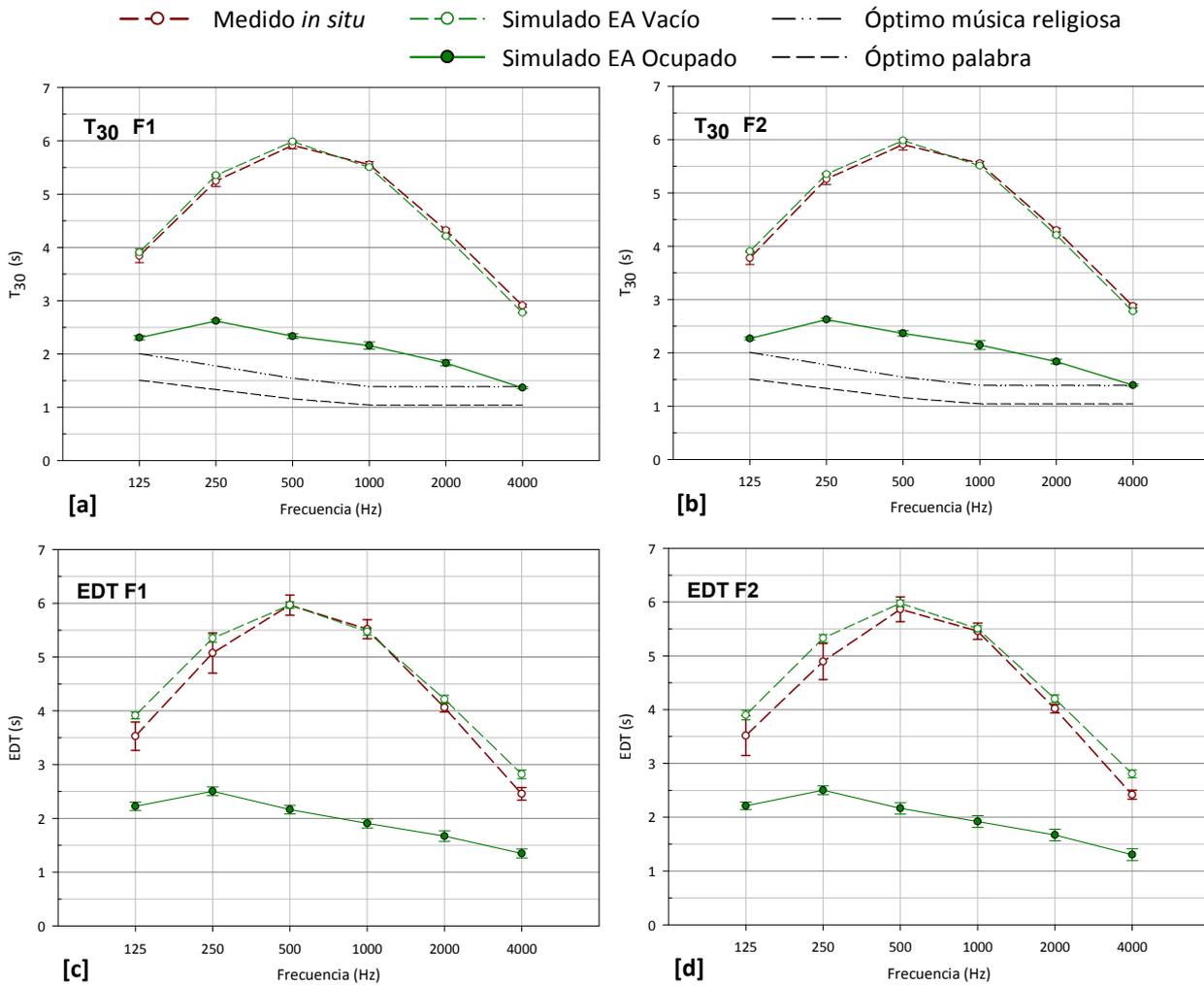


Figura 6.1.19. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

En la figura 6.1.19 [a], observamos que los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) ajustados en la simulación acústica del campo sonoro de la iglesia, en la hipótesis vacía de fieles y con la fuente situada en el altar (F1), difieren menos del umbral perceptible *Just Noticeable Difference* (JND), que corresponde a un 5% de los valores medidos *in situ* para las distintas bandas de octava, lo que demuestra la idoneidad del modelo informático, pues reproduce el estado real de la iglesia con suficiente aproximación y fiabilidad.

Aunque la sintonización del modelo tridimensional de iglesia se ha realizado con la fuente en posición 1 (coincidente con el altar), en la figura 6.1.19 [b] vemos que, con la fuente en posición 2 (en el ámbón), la diferencia entre valores medidos y simulados del T_{30} , también son inferiores a 1 JND en todas las frecuencias estudiadas.

Al realizar la simulación acústica del recinto ocupado, los valores del tiempo de reverberación disminuyen considerablemente, para ambas fuentes, aunque siguen siendo superiores a los óptimos recomendados.

En las figuras 6.1.19 [c] y [d], puede observarse que los resultados del EDT para las dos posiciones de la fuente, se ajustan bastante a los obtenidos en las medidas experimentales, para todas las bandas de octava estudiadas. Las diferencias que se aprecian son inferiores a 2 JND, valores aceptables para simulaciones, según se indicó en el apartado 5.5 del capítulo de *Método de investigación*.

En cuanto a la dispersión espacial, destacar que para ambas fuentes, es muy pequeña en el caso del T_{30} y, algo mayor para el EDT.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

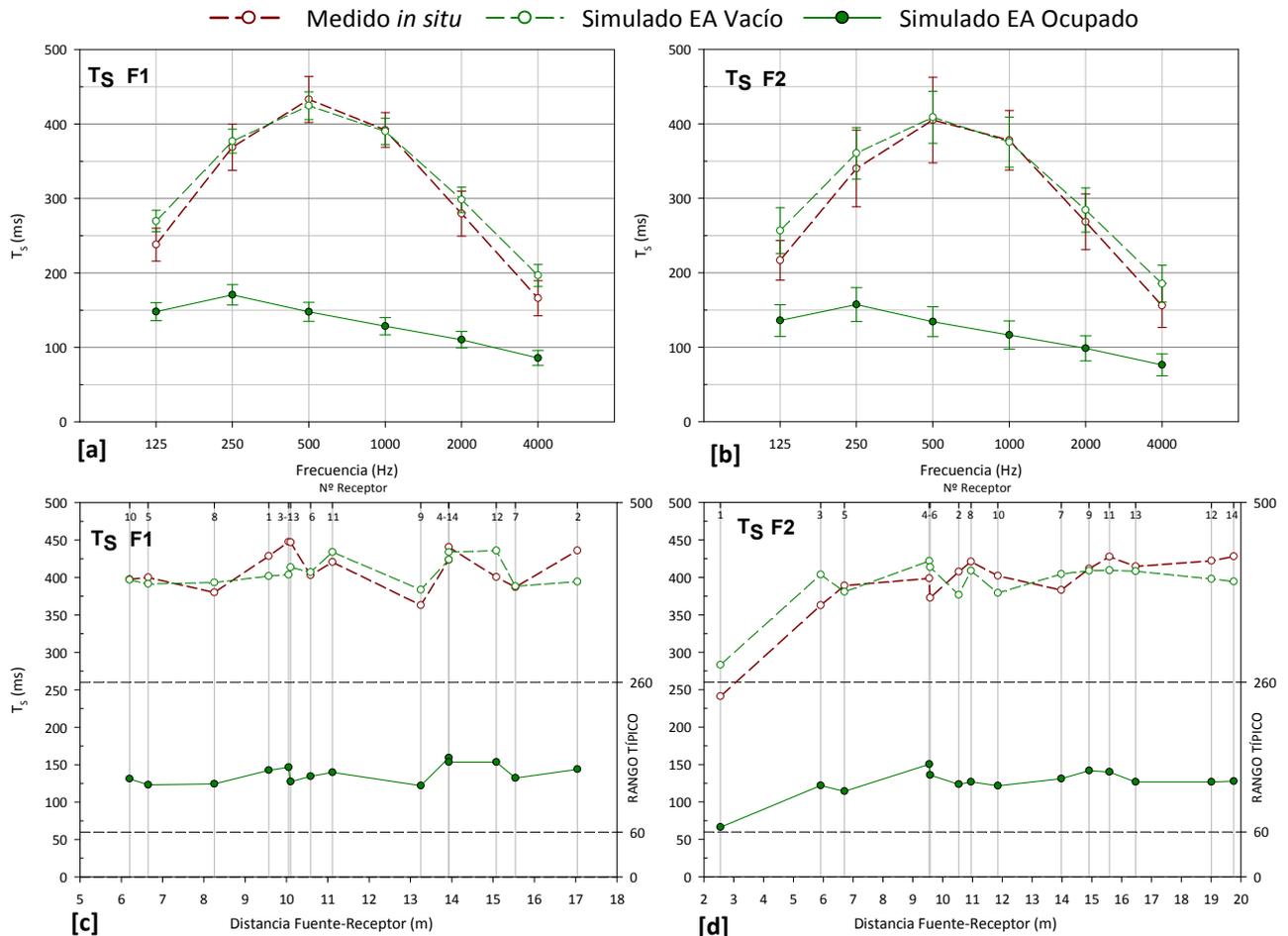


Figura 6.1.20. Tiempo central T_5 (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Con puede comprobarse en las gráficas de la figura 6.1.20 [a] y [b], para las dos posiciones de la fuente, los resultados del tiempo central T_5 obtenidos en la simulación acústica, están muy próximos a los obtenidos en las medidas para todas las bandas de octava estudiadas, siendo las diferencias inferiores a 2 JND. La dispersión espacial presenta valores inferiores en los resultados de la simulación acústica frente a los obtenidos en la medición *in situ*.

La representación de los resultados del T_5 en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figuras 6.1.20 [c] y [d]), muestran que los valores medidos y simulados presentan tendencias y rangos similares.

Al igual que ocurría con los parámetros relacionados con la reverberación, la presencia de los fieles en la iglesia reduce considerablemente los valores del T_5 , mejorando la nitidez del sonido en todos los puntos de recepción y para ambas posiciones de la fuente. En este caso, el T_5 se encuentra dentro del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, lo que revela el efecto beneficioso de las superficies absorbentes para la mejora de las condiciones acústicas de esta iglesia.

Las gráficas correspondientes a los resultados de la definición D_{50} corroboran que, el modelo informático reproduce la realidad acústica del recinto con suficiente aproximación y fiabilidad. Las diferencias entre los resultados medidos y calculados, promediados espacialmente frente a la frecuencia (figuras 6.1.21 [a] y [b]), para la sala vacía y para ambas posiciones de la fuente, son

inferiores a 2 JND. Es de destacar que los resultados a las frecuencias medias, casi coinciden con los valores medidos *in situ*. De nuevo, la dispersión espacial, es menor en la simulación que en la medición *in situ*, y mayor cuando la fuente se sitúa en el ámbón (F2), tanto en la configuración vacía como ocupada.

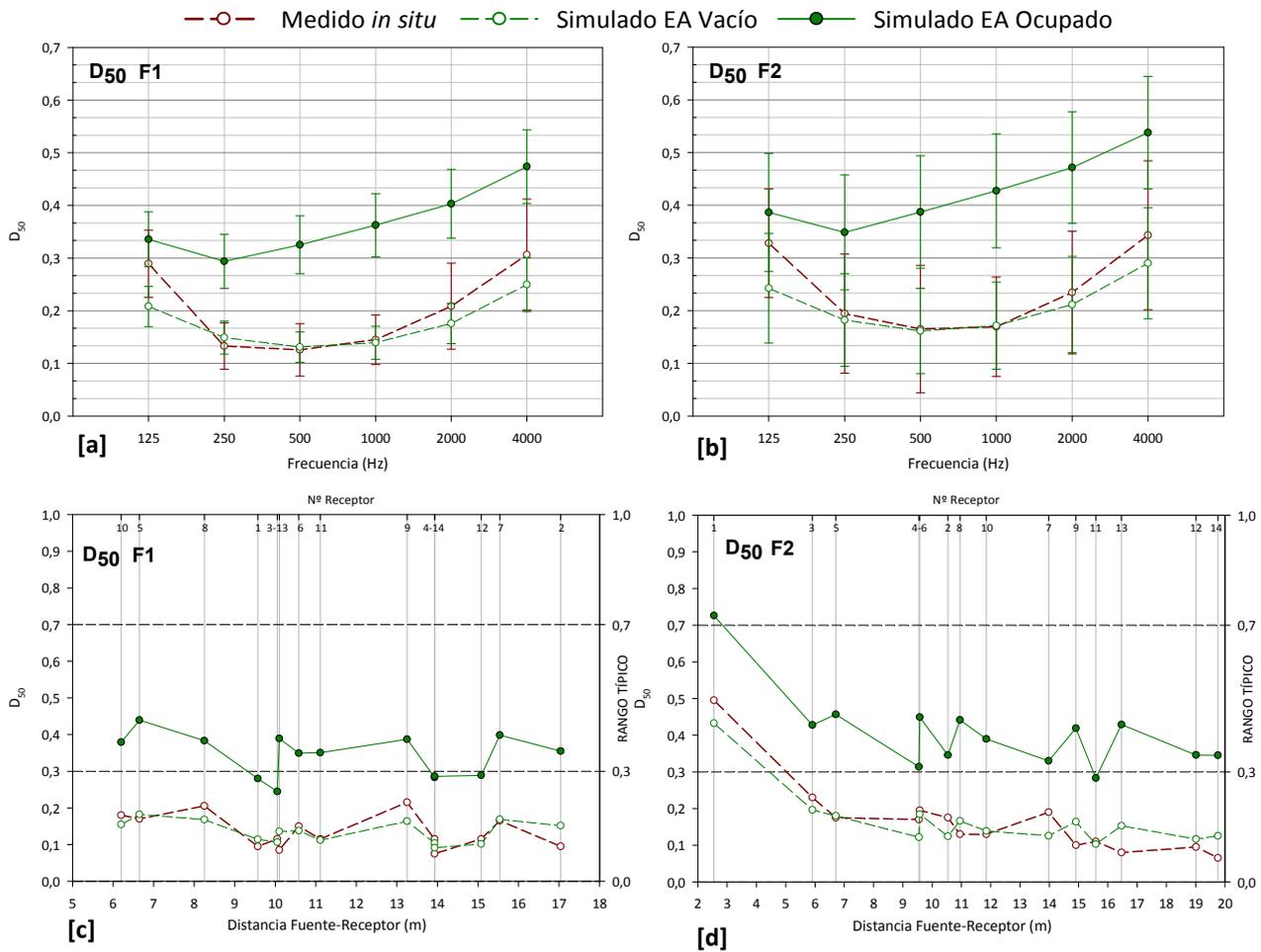


Figura 6.1.21. Definición D_{50} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Para la iglesia ocupada, los resultados en la mayoría de los puntos de recepción de la zona de audiencia, se encuentran dentro del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 (figuras 6.1.21 [c] y [d]).

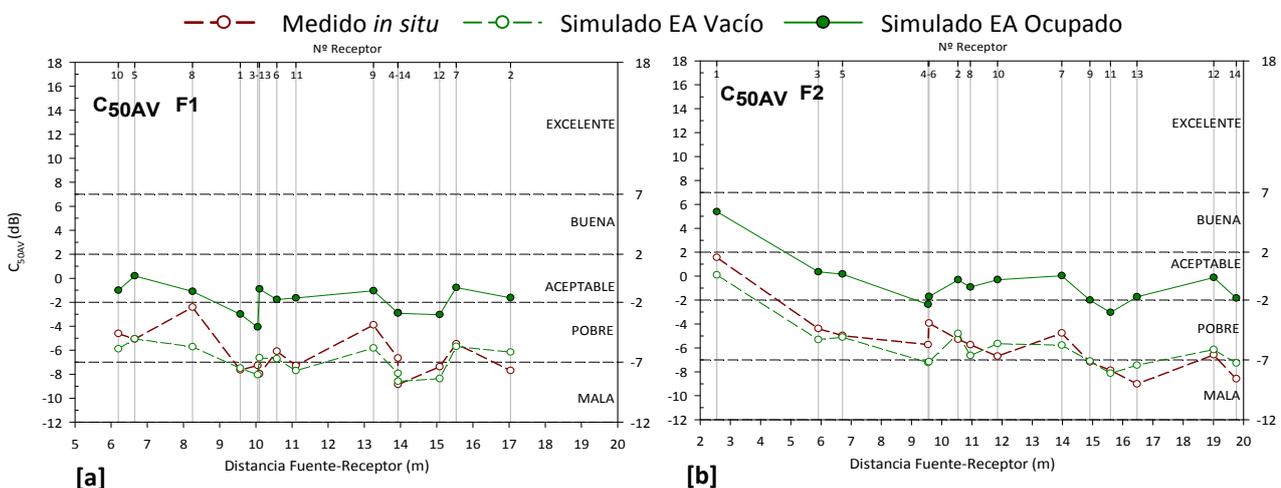


Figura 6.1.22. Claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Como en las magnitudes acústicas simuladas y analizadas anteriormente, los resultados del C_{50AV} (figura 6.1.22) mejoran cuando la iglesia está ocupada por los fieles, pudiendo calificarse la claridad para la palabra, en casi todos los puntos de recepción y para las dos fuentes, como aceptable, según la escala de interpretación de Marshall.

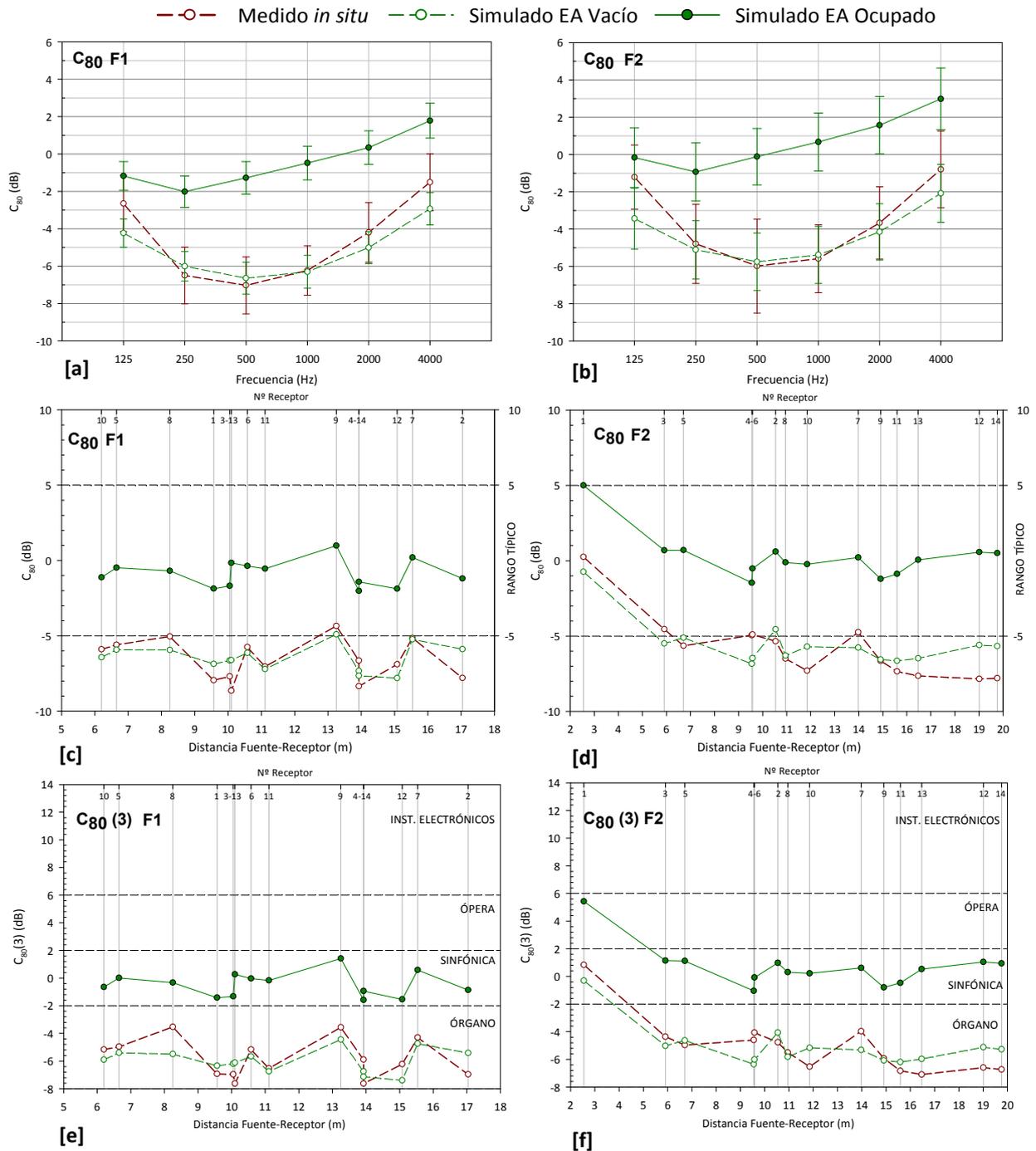


Figura 6.1.23. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Para la claridad musical (C_{80}), cuyos datos promediados espacialmente frente a la frecuencia se representan en las figuras 6.1.23 [a] y [b], se obtienen buenas aproximaciones entre las medidas y los cálculos informáticos. Para ambas fuentes, las mayores diferencias se aprecian a las frecuencias de 125 Hz y 4000 Hz, pero en todos los casos son inferiores a 2 JND. La dispersión espacial sigue siendo inferior en los valores simulados frente a los medidos.

Los resultados promediados espectralmente, en función de la distancia fuente-receptor, tanto para el C_{80} (figuras 6.1.23 [c] y [d]) como para el $C_{80}(3)$ (figuras 6.1.23 [e] y [f]) en la hipótesis de iglesia vacía, son muy parecidos en casi todos los puntos de recepción, con diferencias medias globales inferiores a 2 JND en la mayoría de los puntos. Ambos parámetros acústicos reflejan que, cuando la iglesia está ocupada, mejora la claridad musical para ambas posiciones de fuente y para todos los puntos de recepción. Finalmente, los resultados del C_{80} se encuentran dentro del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, mientras que el $C_{80}(3)$ califica el recinto como adecuado para la audición de música sinfónica.

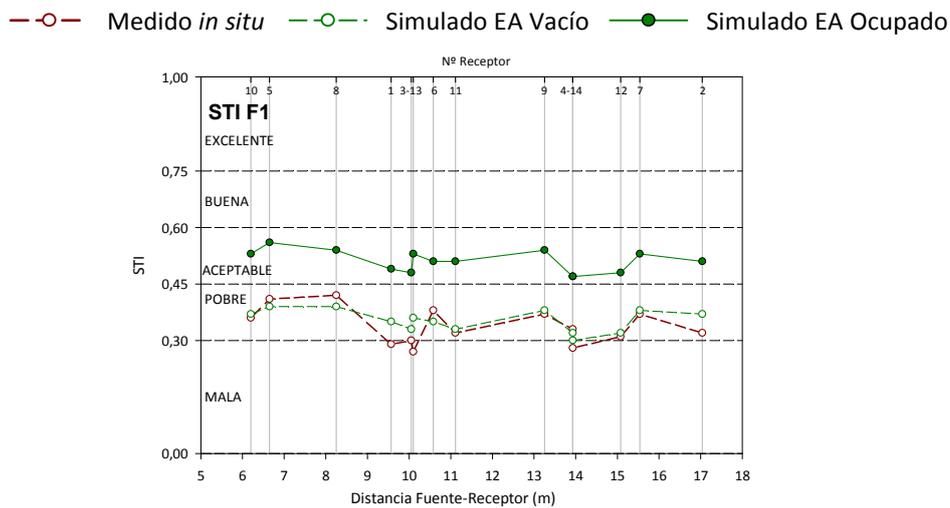


Figura 6.1.24. Índice de transmisión de la palabra STI, frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1.

Respecto al índice de transmisión de la palabra (STI), en la figura 6.1.24 se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor, junto con la escala de inteligibilidad subjetiva. 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} . Como era de esperar, la presencia de los fieles supone una mejora de la inteligibilidad, ya que ésta pasa a ser aceptable.

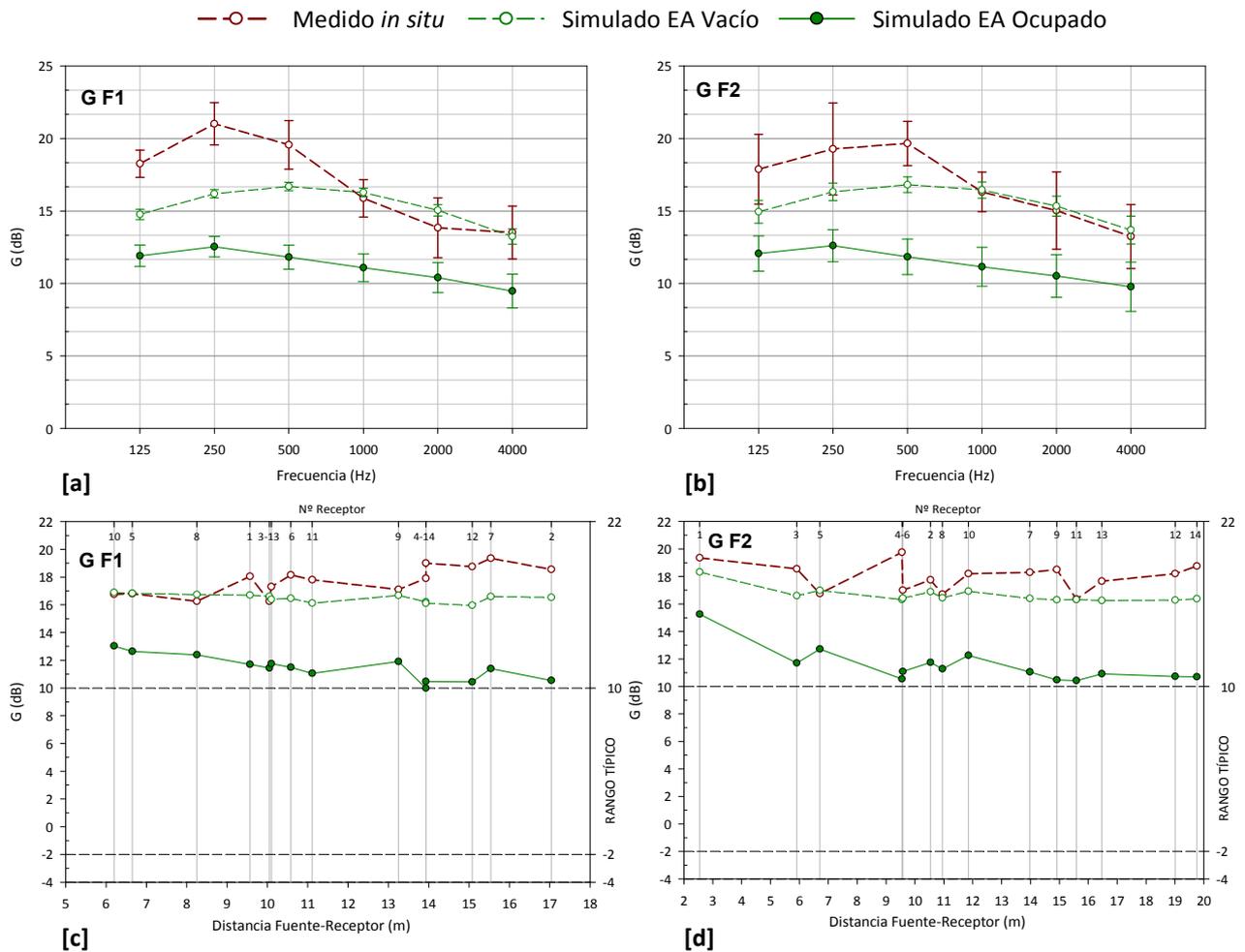
Nivel sonoro subjetivo

Figura 6.1.25. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Mención especial merece la fuerza sonora (G) de la iglesia, donde se obtienen buenas aproximaciones entre los resultados simulados y medidos a partir de los 500 Hz, para ambas posiciones de fuente (figuras 6.1.25 [a] y [b]). Son 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, ya que no fue posible realizar un ajuste de toda la cadena de medida. Además, el programa toma por defecto como sonido directo toda aportación energética dentro del intervalo de 5 ms a partir de la llegada del sonido directo, lo que se traduce en poca precisión para frecuencias inferiores a 200 Hz. En el apartado 5.5 del capítulo anterior, se explicó la limitación de la técnica de trazado de conos y se especificó que la frecuencia de Schroeder en esta iglesia es de 500 Hz, en la configuración vacía, y de 250 Hz para la iglesia ocupada.

En cuanto al promediado espectral de G frente a la distancia fuente-receptor, las figuras 6.1.25 [c] y [d] reflejan, para las dos posiciones de la fuente, diferencias superiores a 2 JND entre los valores medidos y simulados con la iglesia vacía, en muchos puntos de la audiencia.

Impresión espacial

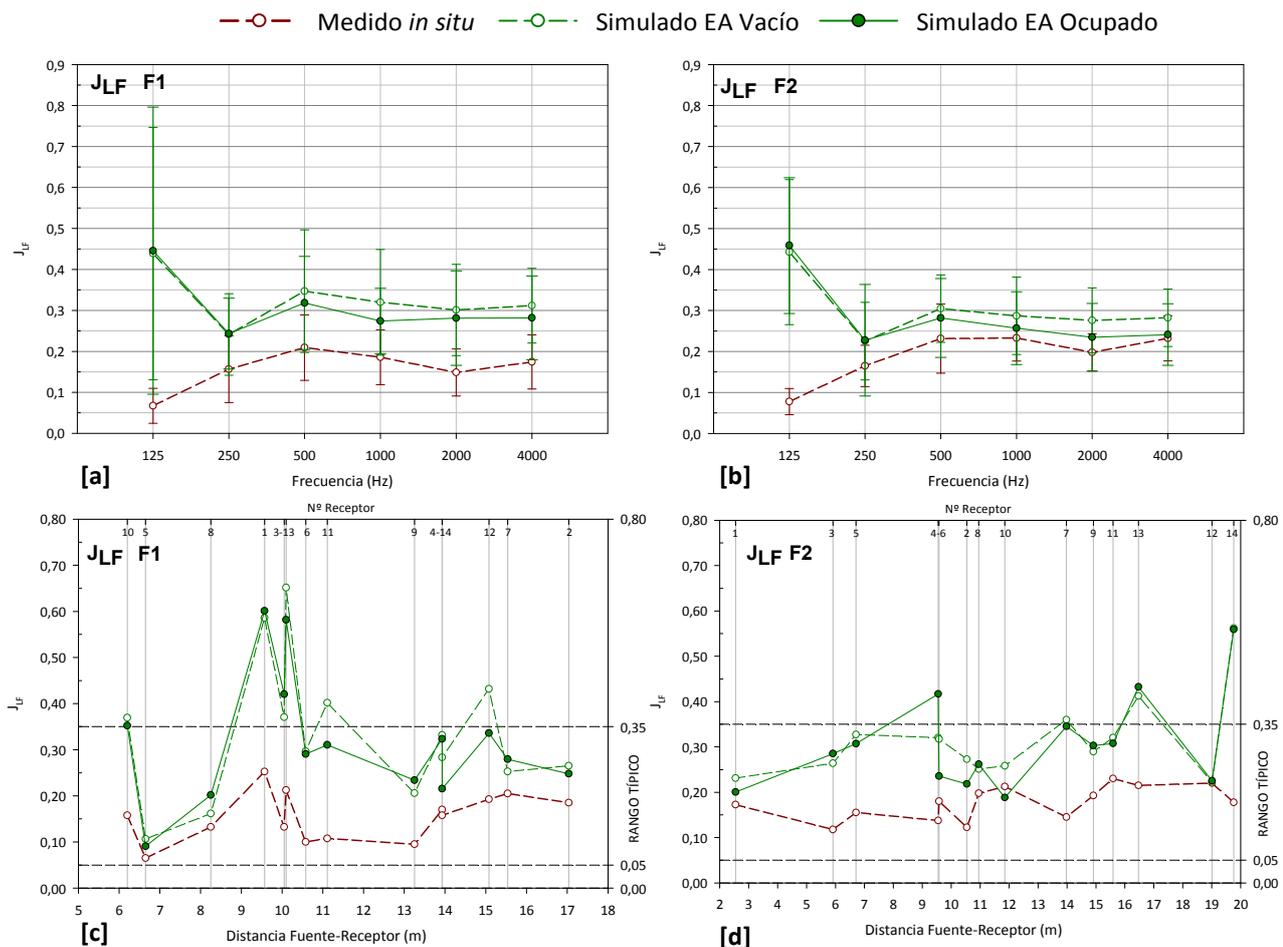


Figura 6.1.26. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Los resultados simulados que menos se ajustan a los medidos *in situ*, los encontramos en los parámetros relacionados con el ancho aparente de la fuente, la envolvente y la audición binaural, representados aquí por J_{LF} e $IACC_E$. Las diferencias superan ligeramente 2 JND en la mayoría de bandas de octava analizadas.

Para la fracción de energía lateral precoz (figura 6.1.26), las simulaciones informáticas proporcionan resultados similares en las configuraciones vacío y ocupado, distanciándose ambas sensiblemente de los resultados obtenidos en las medidas, quedando patente que se trata de uno de los parámetros acústicos más difícil de simular. No obstante, a diferencia de los parámetros analizados anteriormente, la desviación estándar para ambas fuentes es mayor en las simulaciones que en las mediciones *in situ*.

Por último, los datos obtenidos para el coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACC_E$) presentados en la figura 6.1.27, indican que la información espacial está asociada a las medias y altas frecuencias. Al igual que ocurría con el J_{LF} , los valores simulados se distancian de los obtenidos en las medidas a estas frecuencias, siendo a su vez parecidos los obtenidos con las simulaciones del recinto vacío y ocupado.

AL igual que con J_{LF} , la desviación estándar de este parámetro es mayor en las simulaciones informáticas que en las mediciones *in situ*.

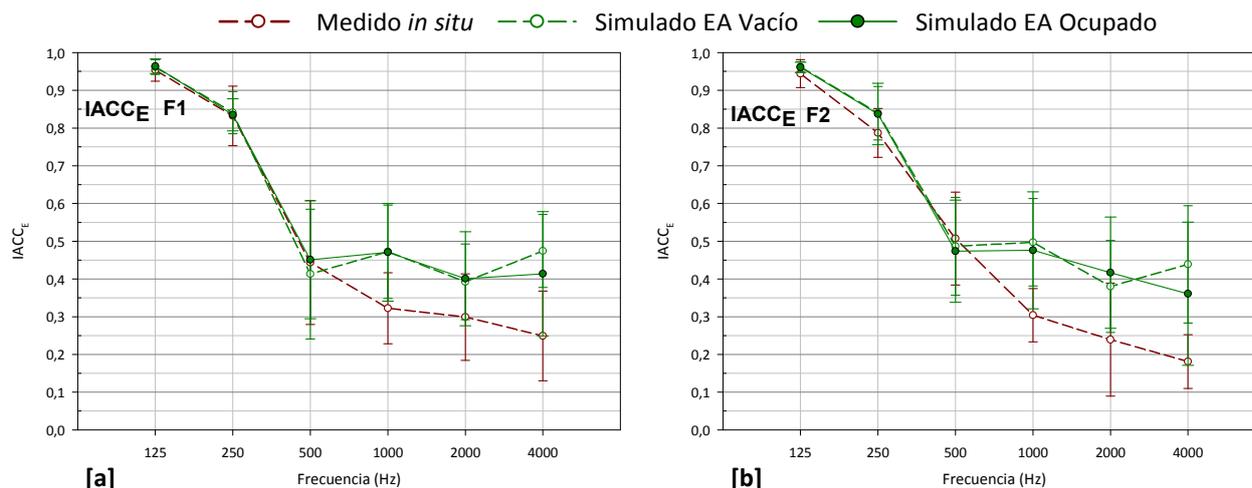


Figura 6.1.27. Coeficiente de correlación cruzada interaural inicial IACC_E. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

6.1.2.4. VALORACIÓN GLOBAL

Como conclusión de este análisis comparativo entre la medición *in situ* y las simulaciones informáticas, podemos afirmar que modelo informático tridimensional, ajustado a partir del tiempo de reverberación (T_{30}) y con la fuente en posición coincidente con el altar, presenta un comportamiento acústico muy similar al que posee realmente el recinto en su estado original.

En general, la posición de la fuente en el altar o en el ambón no conlleva diferencias significativas en los parámetros acústicos analizados. Los resultados de magnitudes acústicas relacionadas con la reverberación son claramente indiferentes a la posición de la fuente; sin embargo, los parámetros relacionados con la inteligibilidad de la palabra y la claridad del sonido percibida, presentan resultados algo mejores para la fuente situada en el ambón (F2).

Apoyándonos en lo anterior, al incorporar al modelo ajustado la propuesta de rehabilitación acústica, únicamente se presentarán los resultados para una sola posición de fuente, ya que las conclusiones que se obtendrían, para ambas posiciones de la fuente, serían similares. En el caso de la iglesia que nos ocupa, el estudio se realizará para la fuente situada en el altar (F1), que además es la más representativa y habitual en el uso cotidiano del recinto.

Por otro lado, según se explicó en el apartado 5.5 del capítulo anterior, para plantear la propuesta de rehabilitación acústica, resulta fundamental el estudio previo del comportamiento de las ondas sonoras en el recinto, para evaluar la importancia relativa de las superficies implicadas al recibir los impactos de los rayos sonoros. En esta iglesia, para la fuente situada en el altar (F1), el frente de onda avanza hacia la audiencia, generándose en los paramentos que forman el lucernario, bastantes reflexiones tardías. La disposición asamblearia de la iglesia, con forma de óvalo, provoca que se generen pocas reflexiones en las paredes laterales, mientras que las mayores aportaciones corresponden al techo y a la pared de fondo formada por los muros dispersivos. La capacidad de dispersión de las ondas sonoras de dichos muros se observa beneficiosa para la audiencia de las últimas filas de bancos. Además, como veremos más adelante, la disposición asamblearia hace que la distribución espacial sobre la superficie de audiencia sea bastante homogénea y sin zonas de concentración de reflexiones.

6.1.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA

6.1.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

Tras las deficiencias acústicas detectadas en el análisis de las condiciones del estado actual de la iglesia, la intervención propuesta intentará alcanzar los objetivos generales descritos en el apartado 5.6 del capítulo *Método de investigación*, así como los siguientes objetivos específicos:

- Disminuir los elevados tiempos de reverberación actuales, para ajustarlos a los considerados como óptimos para los usos de palabra y música religiosa. El tiempo de reverberación es el indicador que evalúa de forma global el comportamiento acústico del recinto y es el primer parámetro que debemos ajustar para conseguir condiciones acústicas adecuadas. Esta medida permitirá, a su vez, mejorar otros parámetros acústicos como la inteligibilidad de la palabra y la claridad musical, así como reducir la energía de las reflexiones largas en los distintos puntos de recepción.
- Mantener la buena distribución sonora existente en el recinto.
- Lograr que la iglesia tenga un buen comportamiento sonoro, independientemente del grado de ocupación de la misma, de tal forma que su acústica no esté tan condicionada por el número de personas que la ocupen.
- Por la importancia de la inteligibilidad de la palabra en el recinto, proponer una adecuada instalación de megafonía, que mejore la inteligibilidad en el recinto.

Para conseguir lo anterior, la propuesta de rehabilitación acústica se apoya en un conjunto de actuaciones, orientadas, en su mayoría, a la implementación en el recinto de revestimientos absorbentes, dispuestos estratégicamente desde el punto de vista acústico y arquitectónico. El conjunto de revestimientos, cuya localización se representa en la figura 6.1.28, se describen a continuación:

- Moqueta de lana 2,3 kg/m² en el suelo del presbiterio.
- Panel mural de lana de roca de 40 mm de espesor, fijado mediante una estructura auxiliar en el muro alto que forma el lucernario. El panel propuesto es el modelo VertiQ A24, sistema T de la marca comercial Rockfon. Esta operación es sólo visible desde el presbiterio y disminuirá la concentración de reflexiones tardías que tienen lugar en el lucernario.
- Puerta de vidrio en el acceso al baptisterio, con lo que al eliminar este espacio, el volumen del recinto eclesial disminuye 187,8 m³, pasando a ser ahora de 3486,2 m³. La puerta de vidrio, por su naturaleza liviana y transparente, permitirá la relación espacial existente entre baptisterio y nave.
- Panel acústico de lana de roca de 30 mm de espesor adosado a las franjas planas de las vigas hueso del techo (marca: Rockfon, modelo: Mono Acoustic TE 1200x1200x30 mm). Con esta operación, se aporta absorción sonora a una de las superficies que recibe más impactos de ondas sonoras.
- Zócalo de 2,15 m de altura instalado sobre los muros curvos del fondo de la sala (*muros dispersivos*) y en las puertas de acceso a la iglesia. El zócalo está formado por un panel de madera de tipo ranurado (ranuras de 8 mm) y 12,5 mm de espesor, fieltro acústico, lana mineral de 40 mm de espesor y cámara de aire 30 mm de espesor (marca: Gustafs, modelo: RS8C40). La introducción de este elemento absorbente se justifica por el uso habitual de la zona practicable de los muros dispersivos en la parroquia (con numerosos carteles, posters, etc.) y a la incidencia sobre la pared de fondo de gran cantidad de impactos de ondas y reflexiones tardías.
- Incorporación de absorción sonora en el respaldo de los bancos de madera, mediante la utilización del panel ranurado descrito anteriormente (figura 6.1.29). Como el comportamiento de la iglesia vacía difiere mucho del ocupado, con esta operación se dota de absorción sonora al propio banco, consiguiéndose que las condiciones acústicas no dependan tanto del estado de ocupación de la iglesia.

6.1.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LA PROPUESTA

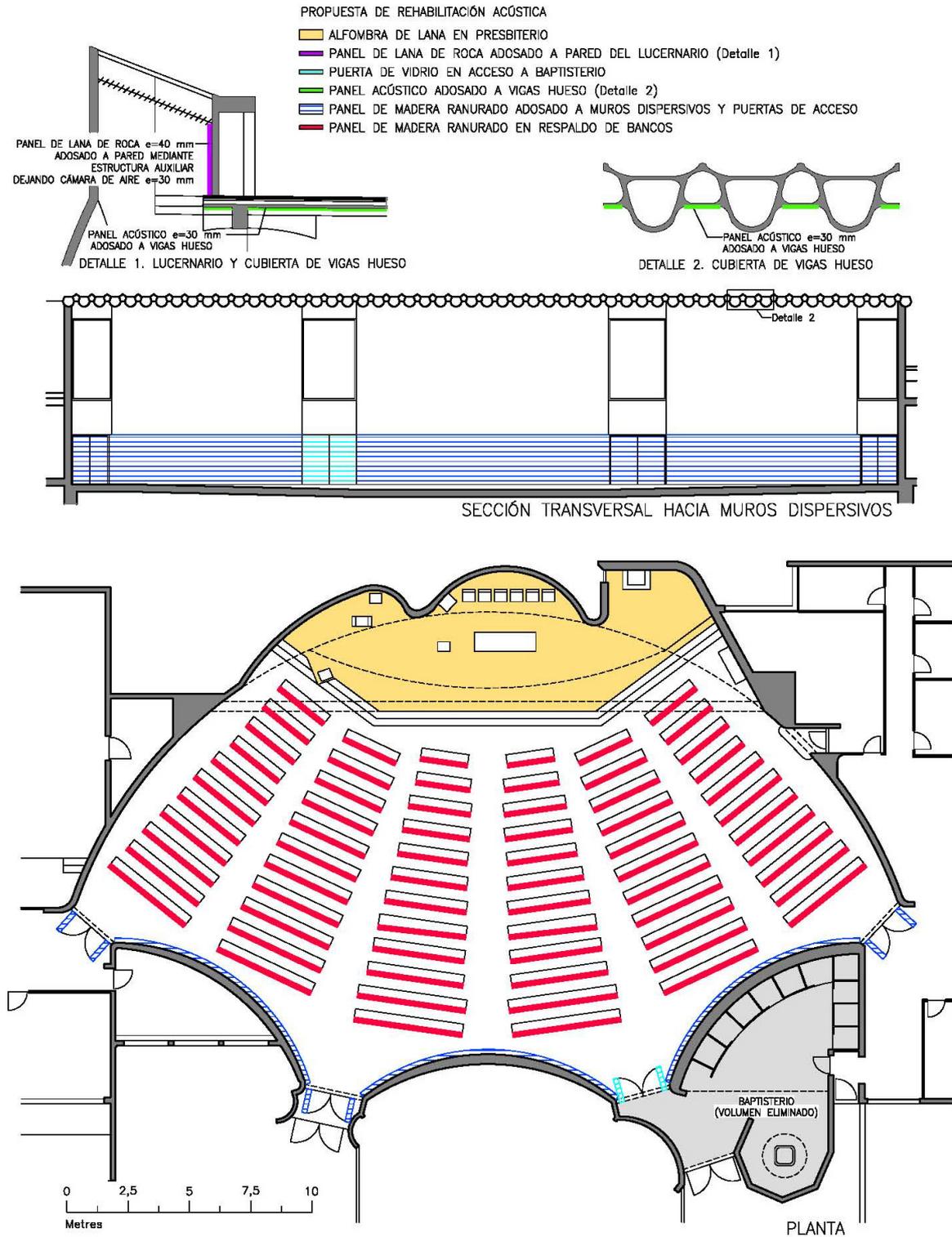


Figura 6.1.28. Planta y sección. Situación de materiales de revestimiento propuestos.

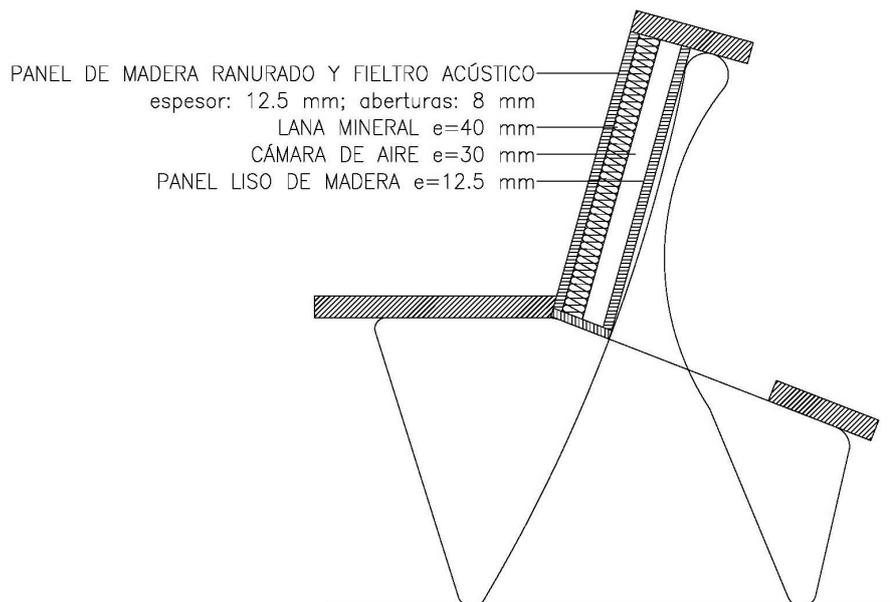


Figura 6.1.29. Sección del banco propuesto.

6.1.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO

En la figura 6.1.30, se muestran dos axonometrías del modelo informático tridimensional del espacio interior de la iglesia, realizado con el programa *CATT-Acoustic v.8.0k*, en el que se han incorporado los elementos propuestos para la rehabilitación acústica de la misma.

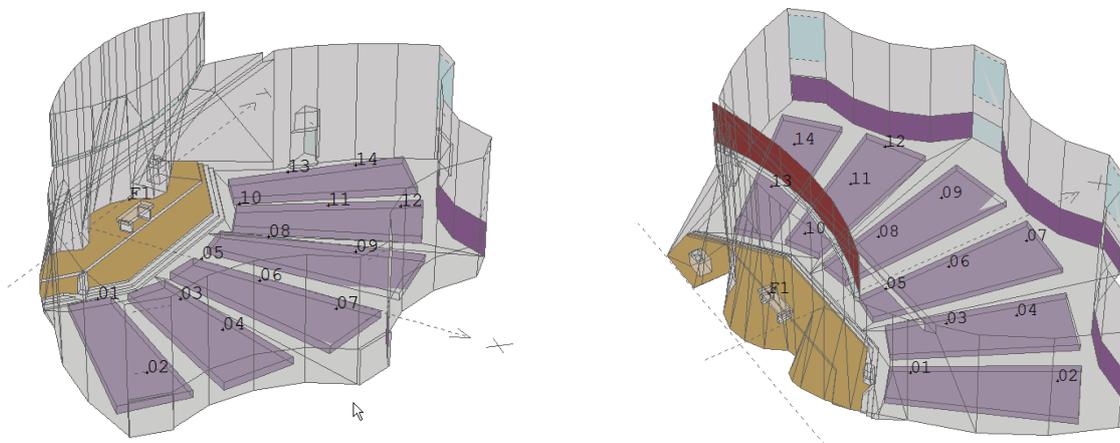


Figura 6.1.30. Modelo tridimensional de la iglesia con la propuesta de rehabilitación acústica.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.1.16.

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
Hormigón visto	Paredes laterales y del presbiterio	475	25.8
Vigas hueso de hormigón con panel absorbente	Techo	416.1	22.6
Banco de madera con respaldo ranurado	Zona de audiencia	285.2	15.5
Terrazo	Suelo	215.1	11.7
Hormigón visto	Pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	166.3	9.1
Panel de madera ranurado	Pared de fondo (<i>zócalo muros dispersivos</i>) y puertas de acceso	79.9	4.3
Moqueta de lana	Presbiterio	69.7	3.8
Panel de lana de roca adosado	Muro alto presbiterio	40	2.2
Vidrio con lamas metálicas	Lucernario presbiterio	36	2.0
Vidrio (en área grande)	Vidrieras y lucernario baptisterio	32.4	1.8
Granito	Altar, ambón, sede	7.4	0.4
Tela de algodón	Altar	6.9	0.4
Vidrio (en área grande)	Puerta de acceso a baptisterio	4.8	0.3
Puerta de madera	Confesionarios	2.9	0.1
TOTAL REVESTIMIENTOS		1837.8	100

Tabla 6.1.16. Áreas de revestimientos. Las filas resaltadas corresponden a los materiales propuestos para la rehabilitación.

Para la simulación del nuevo modelo informático, en las hipótesis de iglesia vacía y ocupada, se emplearon las condiciones de cálculo especificadas en la tabla 6.1.17, y los coeficientes de absorción y de dispersión sonora de los nuevos revestimientos presentados en la tabla 6.1.18.

DATOS Y CONDICIONES DE CÁLCULO	
Algoritmo de cálculo	Nº2, cálculo completo, auralización detallada
Número de conos/rayos	30.000
Ecograma/respuesta al impulso	3 s
Densidad del aire	1,15 kg/m ³
Absorción del aire	Activada
Ruido de fondo	Según espectro medido <i>in situ</i>
Condiciones ambientales	30°C, 22%
Tiempo de cálculo	1 hora, 56 minutos (iglesia vacía)
Número de fuentes	1
Número de receptores	14
Número de planos	230

Tabla 6.1.17. Datos y condiciones de cálculo.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DE LA PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA (%)							
MATERIAL		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Moqueta de lana 2,3 kg/m ²	α	17	18	21	50	63	83
	s	10	10	10	10	10	10
Panel de lana de roca (muro presbiterio)	α	25	75	100	100	100	100
	s	10	10	10	10	10	10
Vidrio en área grande (puerta baptisterio)	α	18	6	4	3	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Vigas hueso de hormigón con panel absorbente	α	17	19	31	31	31	31
	s	15	15	20	20	25	25
Panel de madera ranurado (<i>muros dispersivos</i>)	α	35	70	85	70	55	45
	s	40	25	15	10	10	10
Panel de madera ranurado (puertas de acceso)	α	35	70	85	70	55	45
	s	10	10	10	10	10	10
Banco de madera con respaldo ranurado (vacío)	α	24	40	45	39	33	23
	s	30	40	50	60	70	80

Tabla 6.1.18. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos introducidos en el recinto eclesial con la propuesta de rehabilitación acústica.

En la tabla 6.1.18 se muestran los coeficientes de absorción y *scattering* de los revestimientos utilizados para la simulación de las condiciones acústicas con la propuesta de rehabilitación. Los valores de los mismos han sido obtenidos de fuentes reconocidas y publicadas internacionalmente, así como de los propios fabricantes de los productos seleccionados (en el anexo 3, *Coefficientes de absorción y difusión sonora (DVD)*, se muestra un listado completo de todos los coeficientes de los materiales utilizados en esta investigación, así como la fuente de donde se han obtenido). Los valores de los coeficientes de absorción correspondientes a revestimientos heterogéneos, como la cubierta de vigas hueso con el panel acústico o los bancos de madera con respaldo absorbente, han sido obtenidos analíticamente, a partir de las proporciones geométricas de los elementos que integran el conjunto. Los coeficientes de dispersión sonora de estas superficies son los mismos que los empleados para el ajuste del modelo informático (tabla 6.1.15)

6.1.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

En este apartado se analizan los resultados de los principales parámetros acústicos. Sistemáticamente, las tablas y las gráficas de cada parámetro muestran los resultados de la medición realizada *in situ*, las simulaciones del estado actual (EA), en sus configuraciones de vacío y ocupado, así como los valores de las simulaciones de la propuesta de rehabilitación acústica (RE), con la sala vacía y ocupada al 100%, correspondiendo todos estos resultados a la fuente en posición 1.

Reverberación

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T ₃₀ (s)	MEDIDO Vacío	3,84 0,13	5,25 0,1	5,91 0,07	5,55 0,06	4,32 0,03	2,91 0,03
	SIMULADO EA Vacío	3,91 0,02	5,35 0,02	5,99 0,01	5,50 0,01	4,21 0,01	2,78 0,01
	SIMULADO EA Ocupado	2,30 0,04	2,62 0,03	2,33 0,04	2,16 0,07	1,83 0,05	1,37 0,02
	SIMULADO RE Vacío	2,62 0,02	1,99 0,03	1,72 0,05	1,72 0,03	1,62 0,03	1,27 0,02
	SIMULADO RE Ocupado	1,90 0,03	1,78 0,05	1,57 0,08	1,59 0,13	1,45 0,10	1,09 0,05
	Óptimo palabra	1,48	1,31	1,14	1,02	1,02	1,02
	Óptimo música	1,97	1,74	1,52	1,36	1,36	1,36
EDT (s)	MEDIDO Vacío	3,53 0,26	5,07 0,37	5,97 0,19	5,52 0,18	4,06 0,08	2,46 0,12
	SIMULADO EA Vacío	3,91 0,06	5,35 0,07	5,97 0,06	5,47 0,07	4,21 0,08	2,82 0,08
	SIMULADO EA Ocupado	2,22 0,08	2,50 0,08	2,16 0,08	1,90 0,08	1,67 0,10	1,35 0,08
	SIMULADO RE Vacío	2,56 0,06	1,89 0,08	1,54 0,09	1,54 0,08	1,49 0,08	1,24 0,07
	SIMULADO RE Ocupado	1,81 0,08	1,61 0,10	1,33 0,12	1,26 0,11	1,17 0,11	0,99 0,09

Tabla 6.1.19. Valores del tiempo de reverberación T₃₀ (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

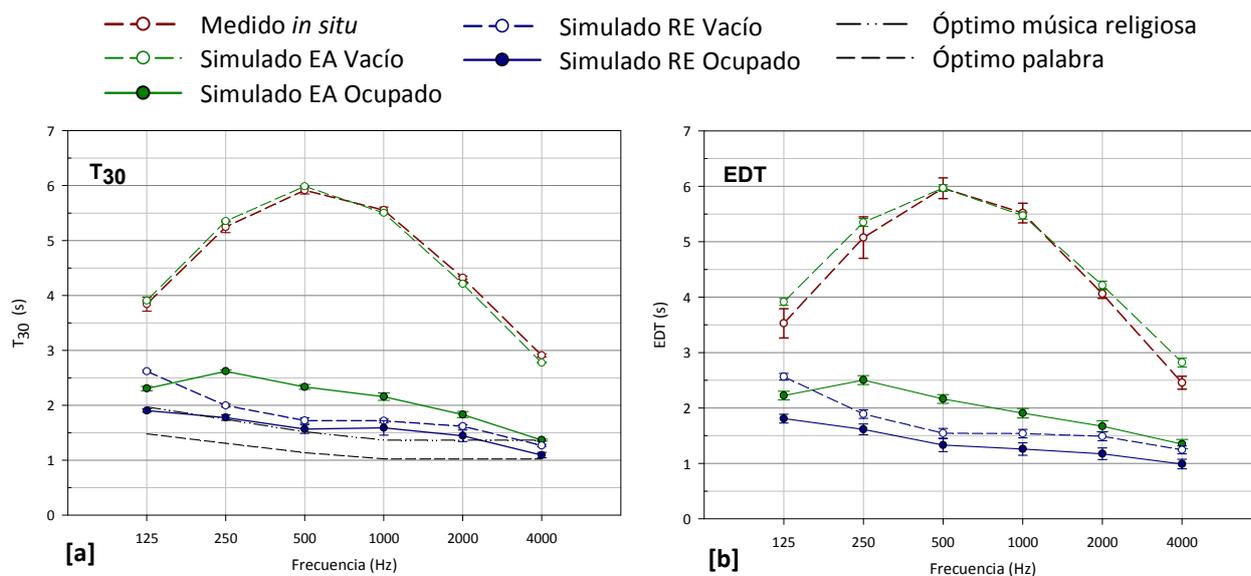


Figura 6.1.31. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Como puede comprobarse en las gráficas de la figura 6.1.31, con la propuesta de rehabilitación se reducen notablemente los tiempos de reverberación del recinto, valorados con el T_{30} , tanto con la sala vacía como ocupada. En la hipótesis de sala ocupada, los tiempos de reverberación obtenidos se ajustan a los valores óptimos para la música religiosa (figura 6.1.31 [a]). Los valores de los tiempos de reverberación óptimos especificados en la tabla 6.1.19 y representados en la figura 6.1.31 [a], son los correspondientes al nuevo volumen del recinto eclesial, una vez que se ha segregado el espacio del baptisterio.

En cuanto al EDT (figura 6.1.31 [b]), vemos que para las configuraciones de sala vacía y ocupada, los valores a las frecuencias medias son inferiores a 2,0 s, con lo que los resultados correspondientes al promediado en frecuencia de número único se encuentran en la media del rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010 (entre 1,0 s y 3,0 s).

Como en el estado actual, al incorporar la propuesta de rehabilitación acústica, la dispersión espacial en estos parámetros relacionados con la reverberación sigue siendo muy pequeña, tanto para la iglesia vacía como ocupada (figura 6.1.19).

Al valorar la idoneidad de la propuesta de rehabilitación acústica en las fases iniciales, comprobamos que la reducción del volumen de la iglesia, al segregar el baptisterio del espacio eclesial mediante una puerta de vidrio, contribuía a mejorar algo los resultados del tiempo de reverberación en el recinto, aunque dicha mejora no era determinante, frente al resto de las medidas descritas en el apartado 6.1.3.1.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_s (ms)	MEDIDO Vacío	237,93	368,71	433,00	391,93	279,57	165,93
		22,19	30,90	30,93	23,28	30,27	23,57
	SIMULADO EA Vacío	269,57	376,84	424,46	389,96	298,18	196,45
		14,50	16,01	18,61	17,57	17,09	14,78
	SIMULADO EA Ocupado	147,93	170,45	147,64	128,36	110,27	85,62
		12,11	13,70	12,76	11,72	11,06	9,98
	SIMULADO RE Vacío	171,18	122,39	94,48	93,74	90,50	72,46
		10,15	9,34	9,76	10,54	10,74	10,03
	SIMULADO RE Ocupado	117,65	102,17	78,21	70,94	64,43	51,06
		10,06	10,14	10,11	10,86	10,77	9,47

Tabla 6.1.20. Valores del tiempo central T_s (ms). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

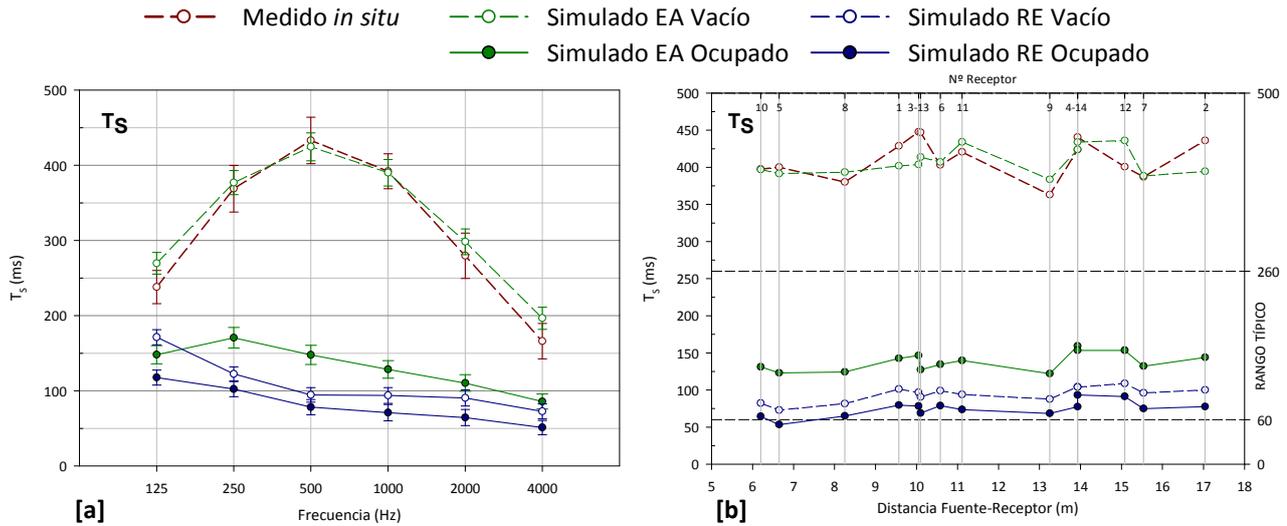


Figura 6.1.32. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

En la gráfica 6.1.32 [a], vemos que al introducir las medidas correctoras de revestimientos en el recinto eclesial, los valores del tiempo central (T_s) disminuyen considerablemente, lo que refleja mayor nitidez en el sonido percibido.

Al representar los valores del tiempo central en cada punto de recepción (gráfica 6.1.32 [b]), se aprecia que, para las configuraciones de iglesia vacía y ocupada, prácticamente todos los resultados se encuentran dentro del intervalo establecido por la norma de referencia ya citada.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D_{50}	MEDIDO Vacío	0,29	0,13	0,13	0,15	0,21	0,31
		0,06	0,04	0,05	0,05	0,08	0,11
	SIMULADO EA Vacío	0,21	0,15	0,13	0,14	0,18	0,25
		0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
	SIMULADO EA Ocupado	0,34	0,29	0,33	0,36	0,40	0,47
		0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07
	SIMULADO RE Vacío	0,31	0,39	0,48	0,48	0,48	0,55
		0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07
	SIMULADO RE Ocupado	0,40	0,44	0,54	0,57	0,60	0,66
		0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08

Tabla 6.1.21. Valores de la definición D_{50} . Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo) Fuente 1.

Como se aprecia en la figura 6.1.33 [a], tras la intervención propuesta, la definición (D_{50}) mejora sensiblemente a todas las frecuencias, especialmente en las bandas con más repercusión en la inteligibilidad de la palabra.

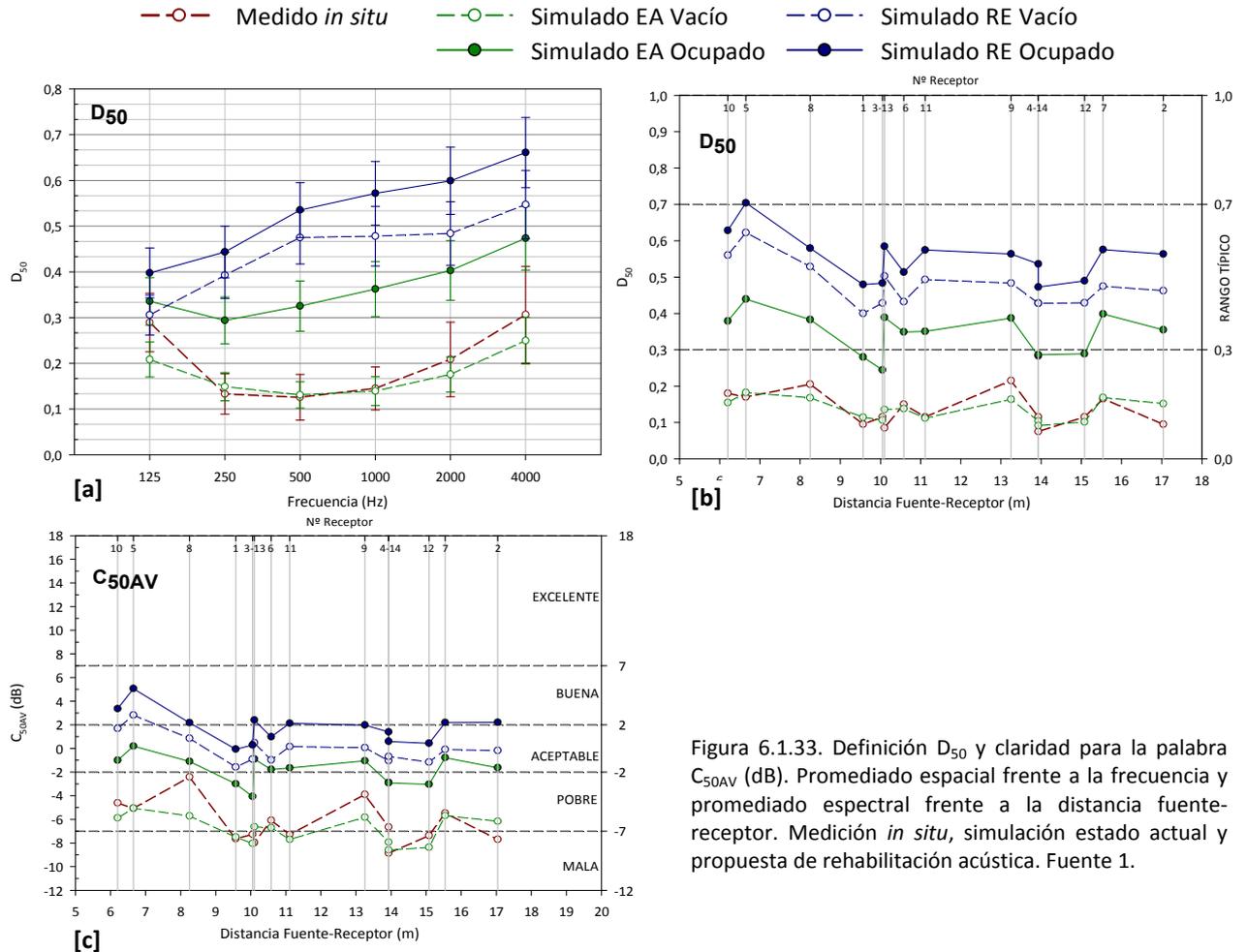


Figura 6.1.33. Definición D_{50} y claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

En cuanto al promedio espectral del D_{50} (figura 6.1.33 [b]), vemos que para ambas configuraciones de ocupación, todos los valores se encuentran dentro del rango típico que recoge la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. La valoración de la claridad para la palabra (C_{50AV}) según la escala de interpretación de Marshall, pasa a calificarse entre aceptable y buena, tanto para la iglesia vacía como ocupada (figura 6.1.33 [c]).

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C_{80} (dB)	MEDIDO Vacío	-2,65	-6,50	-7,03	-6,24	-4,20	-1,51
	SIMULADO EA Vacío	1,51	1,51	1,53	1,32	1,60	1,52
	SIMULADO EA Ocupado	-4,23	-6,01	-6,65	-6,30	-5,01	-2,94
	SIMULADO RE Vacío	-1,17	-2,02	-1,28	-0,48	0,35	1,78
	SIMULADO RE Ocupado	0,77	0,84	0,87	0,90	0,90	0,93
	SIMULADO RE Vacío	-1,86	-0,09	1,45	1,50	1,66	2,95
	SIMULADO RE Ocupado	0,08	0,92	2,62	3,28	3,87	5,27
		0,76	0,80	0,86	0,98	1,02	1,14

Tabla 6.1.22. Valores de la claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

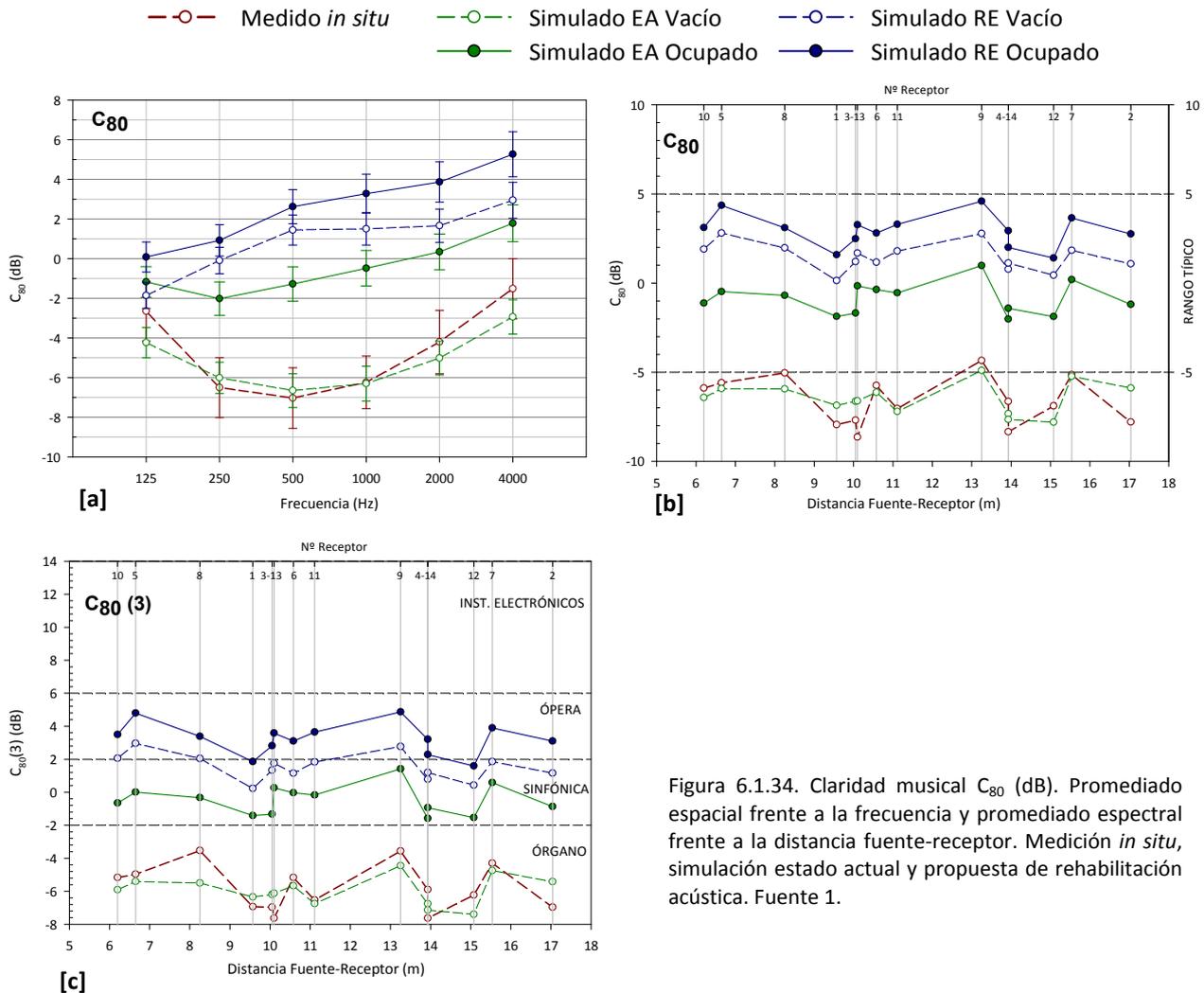


Figura 6.1.34. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

En correspondencia con los resultados comentados anteriormente, la claridad musical C_{80} experimenta una significativa mejora a todas las frecuencias, sobre todo en las bandas centrales (figura 6.1.34). De igual forma, el promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor de este parámetro (figura 6.1.34 [b]), tanto para la iglesia vacía como ocupada, se encuentra dentro del rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

Los resultados obtenidos para el $C_{80}(3)$ (figura 6.1.34 [c]), en la mayoría de los puntos de recepción para la iglesia vacía, indican que el recinto es adecuado para la audición de música sinfónica. Cuando la zona de audiencia está ocupada al 100%, este índice aumenta más aún, por lo que la adecuación pasa a ser óptima para un uso equivalente a música de ópera.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.1.35, se aportan los mapas de resultados de la claridad musical (C_{80}) global en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA) y tras la propuesta de rehabilitación acústica (RE), ambos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente en posición 1 (altar).

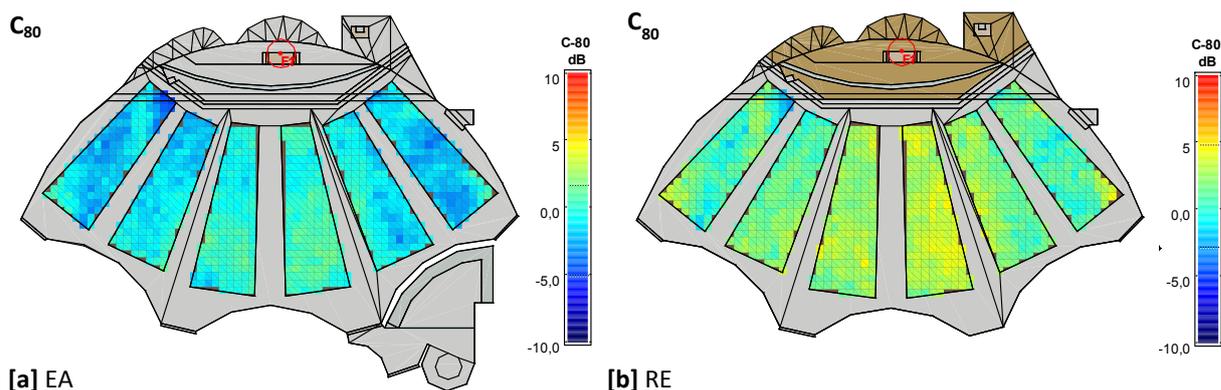


Figura 6.1.35. Claridad musical C_{80} global (dB). Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

Debido a la forma y disposición asamblearia de la audiencia, en ambos mapas de distribución espacial de la claridad musical (C_{80}), puede observarse que los valores más elevados se registran en las franjas centrales de la audiencia, mientras que los más bajos se concentran en el entorno de las paredes laterales de la iglesia.

En la figura 6.1.35 [b], se aprecia que la incorporación de las medidas correctoras hace que los valores de la claridad musical aumenten casi al doble en todas las zonas de audiencia de forma homogénea, manteniendo una distribución espacial similar por la influencia de la forma de la sala. En esta configuración, el valor medio de C_{80} es de 1,8 dB, frente a 0,93 dB, obtenido para el estado actual.

En general, podemos afirmar que los resultados de las magnitudes acústicas relacionadas con el aspecto subjetivo del oyente sobre claridad del sonido percibida, mejoran notablemente con la propuesta de rehabilitación acústica. Es de destacar, la sensible mejora de los parámetros analizados cuando la iglesia está vacía, en comparación con los resultados tan desfavorables del estado actual, existiendo muy poca diferencia entre los resultados de las hipótesis de iglesia vacía y ocupada.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	MEDIDO Vacío	18,26	21,01	19,56	15,87	13,84	13,51
		0,94	1,45	1,67	1,29	2,06	1,82
	SIMULADO EA Vacío	14,76	16,18	16,69	16,28	15,05	13,23
		0,36	0,29	0,29	0,29	0,39	0,52
	SIMULADO EA Ocupado	11,90	12,53	11,81	11,08	10,40	9,47
		0,74	0,70	0,83	0,95	1,04	1,17
	SIMULADO RE Vacío	12,55	10,88	9,45	9,22	9,04	8,15
		0,50	0,80	1,07	1,01	0,97	1,11
	SIMULADO RE Ocupado	10,68	9,88	8,35	7,57	7,12	6,40
		0,81	1,01	1,33	1,42	1,48	1,60

Tabla 6.1.23. Valores de la fuerza sonora G (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

Como era esperable por la disminución de los tiempos de reverberación iniciales y, en consecuencia, la reducción del nivel sonoro del campo reverberado, los valores simulados de la fuerza acústica (G), en todas las bandas de octava, disminuyen sensiblemente respecto a los resultados del estado actual. Esta disminución es de unos 8 dB en la hipótesis de iglesia ocupada y algo menor con la iglesia vacía (figura 6.1.36 [a]). No obstante, como puede observarse en la gráfica de la figura 6.1.36 [b], en casi todos los puntos de recepción distribuidos en la zona de audiencia, los valores de G se sitúan dentro del rango típico establecido en la norma UNE de referencia.

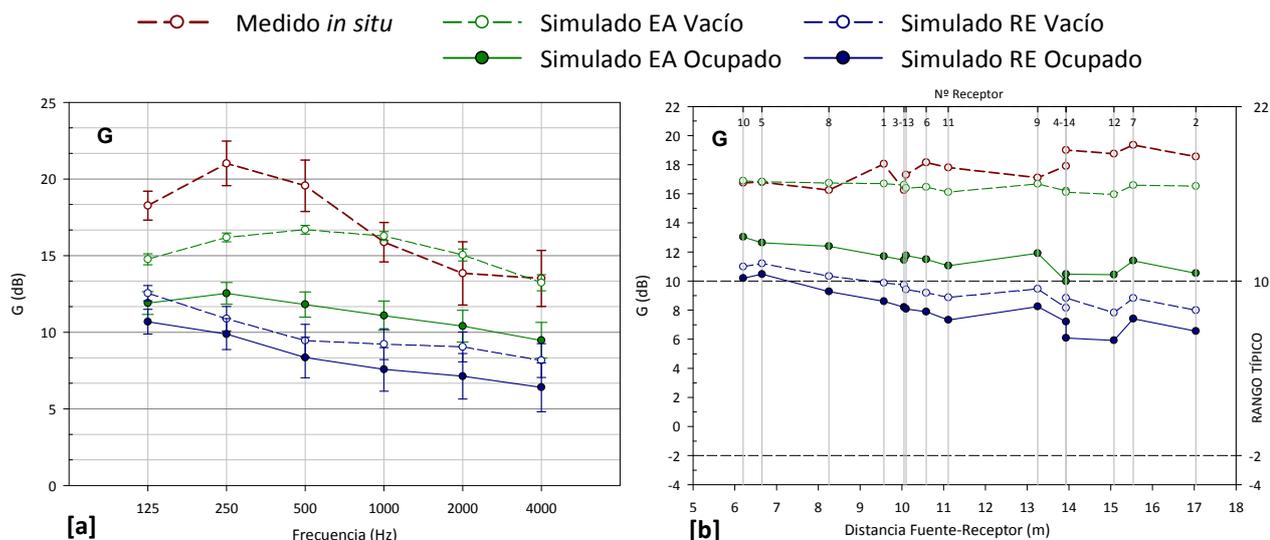


Figura 6.1.36. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.1.37 se aportan los mapas de la fuerza sonora G global en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA) y a la propuesta de rehabilitación acústica (RE), para la configuración de iglesia ocupada con la fuente en la posición 1, coincidente con el altar.

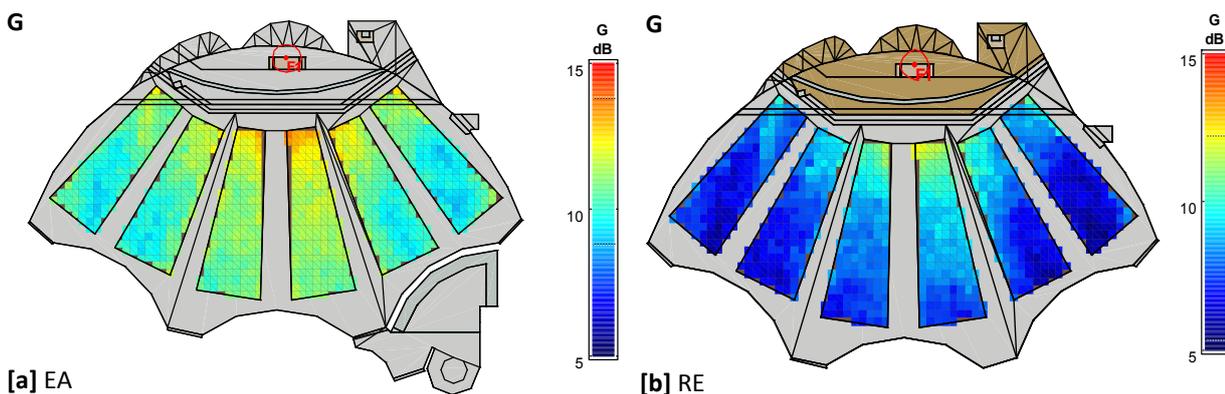


Figura 6.1.37. Fuerza sonora G global en dB. Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

En el mapa de distribución espacial correspondiente a la simulación del estado actual (figura 6.1.37 [a]), puede comprobarse que los valores más elevados se registran en las zonas más cercanas a la fuente sonora y en las franjas centrales de la audiencia, mientras que los valores más bajos en las franjas laterales más alejadas de la fuente sonora. El valor medio de G , para esta configuración, es de 10,69 dB y la desviación estándar es inferior a 0,9 dB.

En la figura 6.1.37 [b], con la incorporación de los materiales absorbentes en el recinto eclesial e independizar el baptisterio, los valores de la fuerza acústica disminuyen sensiblemente, al no tener ahora tanta influencia el campo reverberado. Con la propuesta de rehabilitación acústica, el valor medio de G es 7,94 dB y la desviación estándar de 1,21 dB.

En ninguno de los dos estados analizados se observan zonas de concentración sonora o con deficiencia de nivel, lo que corrobora la idoneidad de las formas propuestas por Fisac así como el funcionamiento de sus *muros dispersivos*.

Impresión espacial

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
J_{LF}	MEDIDO Vacío	0,07	0,16	0,21	0,19	0,15	0,17
		0,04	0,08	0,08	0,07	0,06	0,07
	SIMULADO EA Vacío	0,44	0,24	0,35	0,32	0,30	0,31
		0,31	0,10	0,15	0,13	0,11	0,09
	SIMULADO EA Ocupado	0,45	0,24	0,32	0,27	0,28	0,28
		0,35	0,09	0,11	0,08	0,12	0,10
SIMULADO RE Vacío	0,44	0,19	0,33	0,26	0,26	0,27	
	0,41	0,10	0,15	0,09	0,11	0,10	
SIMULADO RE Ocupado	0,44	0,20	0,30	0,24	0,25	0,25	
	0,40	0,09	0,16	0,10	0,13	0,10	
$IACC_E$	MEDIDO Vacío	0,94	0,74	0,45	0,31	0,25	0,21
		0,05	0,21	0,23	0,11	0,13	0,11
	SIMULADO EA Vacío	0,96	0,84	0,41	0,47	0,39	0,47
		0,02	0,06	0,17	0,12	0,10	0,10
	SIMULADO EA Ocupado	0,96	0,84	0,45	0,47	0,40	0,41
		0,02	0,04	0,16	0,13	0,12	0,16
SIMULADO RE Vacío	0,97	0,86	0,44	0,51	0,43	0,47	
	0,02	0,05	0,17	0,12	0,11	0,13	
SIMULADO RE Ocupado	0,97	0,85	0,48	0,49	0,46	0,42	
	0,02	0,06	0,16	0,13	0,13	0,17	

Tabla 6.1.24. Valores de la fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

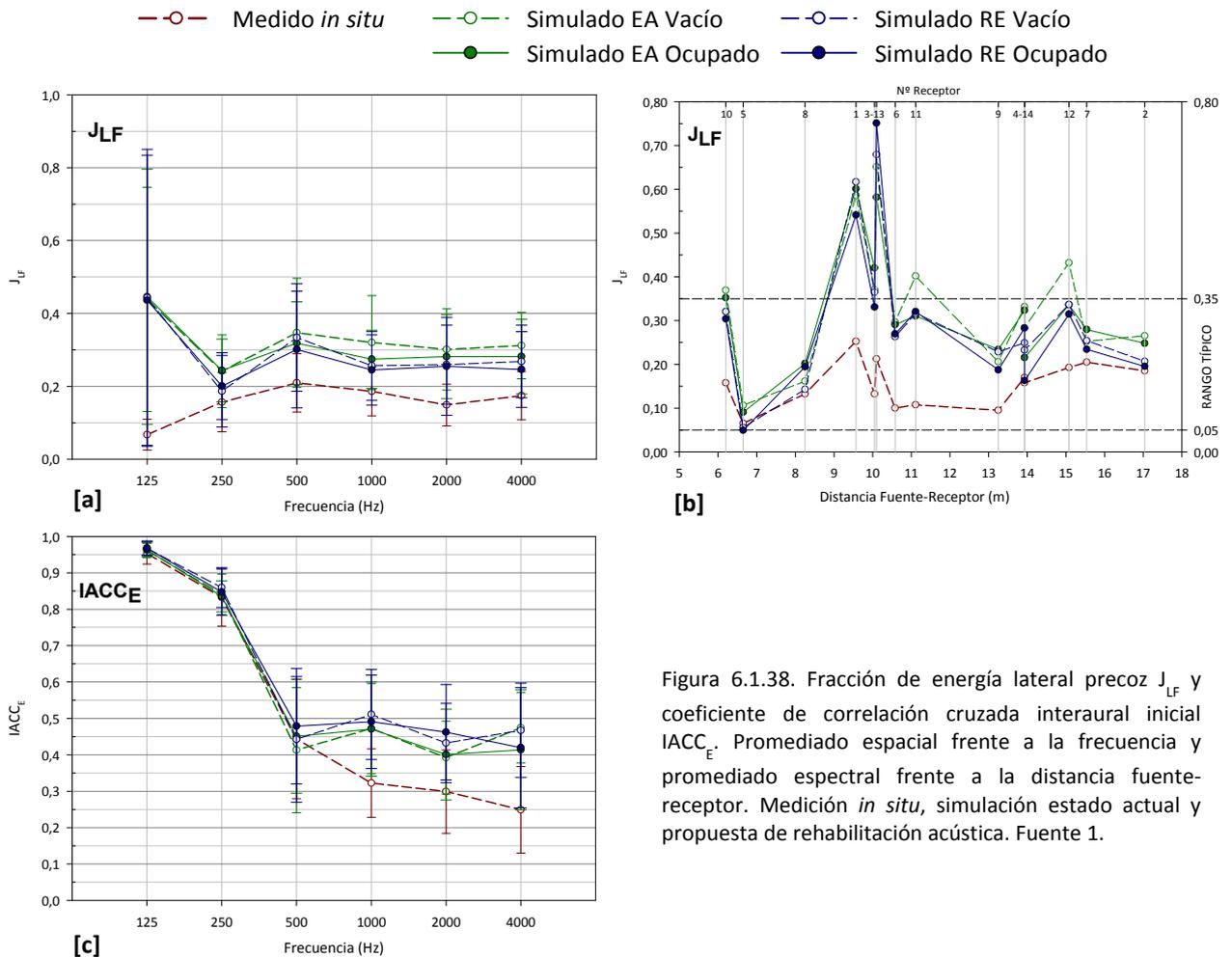


Figura 6.1.38. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Los resultados de los parámetros relacionados con la impresión espacial, fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACC_E$) indican que tras la intervención acústica, el oyente sigue manteniendo condiciones de espacialidad similares a las del estado actual. Los resultados obtenidos con la propuesta de mejora, para ambos parámetros, son muy similares en las configuraciones de recinto vacío y ocupado y, a su vez, parecidos a los obtenidos con las simulaciones informáticas del estado actual (figura 6.1.38).

En el promediado espectral de la fracción de energía lateral precoz (J_{LF}), representado en la figura 6.1.38 [b], de nuevo vemos que las diferencias entre los resultados de los distintos puntos de recepción distribuidos por la zona de audiencia son muy elevadas, ya que se trata de un parámetro acústico difícil de simular.

El análisis comparativo realizado, entre la medición *in situ* y la simulación del estado actual, para estos parámetros en el apartado 6.1.2.3, refleja la dificultad del programa para simular los parámetros de impresión espacial conforme a las medidas experimentales. Los resultados simulados para el J_{LF} corresponden a una mayor amplitud de la fuente sonora, pero los del $IACC_{E3}$ reflejan lo contrario. Por ello, si consideramos que con el programa de simulación debíamos haber obtenido, para el estado actual, características de espacialidad similares a las medidas, podemos confiar que, con la propuesta de rehabilitación, se mantienen las condiciones de impresión espacial existentes en el recinto, al conservarse las condiciones simuladas del estado actual. Recordemos que los resultados medidos *in situ* corresponden a una sensación de sonido envolvente y a una adecuada amplitud de la fuente sonora.

La distribución espacial de la fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) global sobre la superficie de la audiencia, muestra resultados muy similares tanto en el estado actual (figura 6.1.39 [a]) como con la propuesta de rehabilitación (figura 6.1.39 [b]). La forma geométrica de la sala y la disposición asamblearia, sin paredes laterales que generen reflexiones cortas, hace que este indicador tenga relevancia únicamente en las zonas delanteras de las franjas de audiencia laterales. En estos puntos, los valores son ligeramente mayores a la izquierda, ya que a la derecha la hornacina de mayor tamaño en la que se ubica el sagrario, tiene menos influencia en las reflexiones.

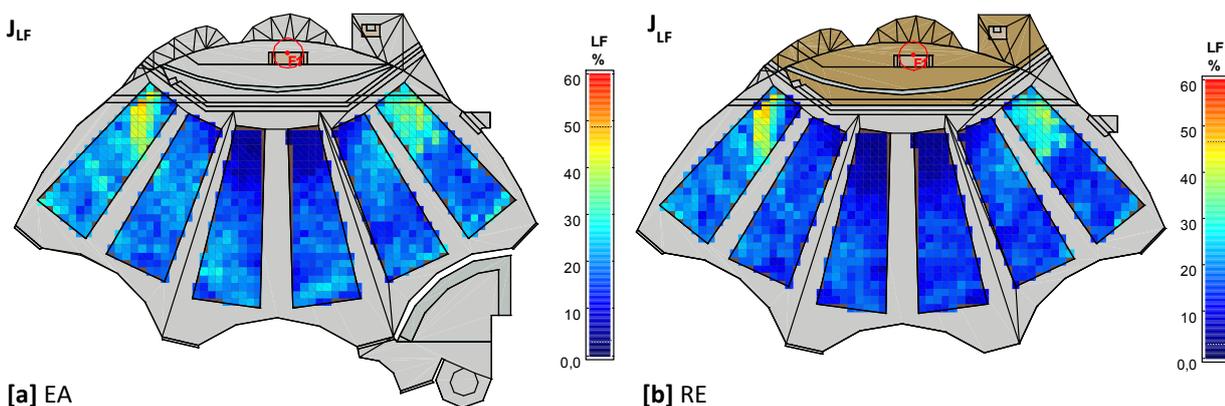


Figura 6.1.39. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} global (%). Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

Como puede apreciarse en las escalas laterales de valoración del J_{LF} los valores de este parámetro bajan ligeramente con la propuesta de rehabilitación.

6.1.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)

Con el fin de evaluar los resultados de la inteligibilidad de la iglesia, en la tabla 6.1.25 y en figura 6.1.40, se presentan los valores obtenidos del *Speech Transmission Index* (STI). Junto a las hipótesis estudiadas anteriormente para el resto de parámetros acústicos, se aportan, además, los resultados correspondientes a la simulación de la propuesta de rehabilitación acústica con apoyo electroacústico (AE) vacío y ocupado, ofreciéndose los datos registrados en los catorce puntos de recepción, frente a la distancia fuente-receptor. En la representación gráfica, los valores se contrastan con la escala de inteligibilidad subjetiva.

CONFIGURACIÓN		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
STI	MEDIDO Vacío	0,29	0,32	0,3	0,33	0,41	0,38	0,37	0,42	0,37	0,36	0,32	0,31	0,27	0,28	
	SIMULADO EA Vacío	0,35	0,37	0,33	0,32	0,39	0,35	0,38	0,39	0,38	0,37	0,33	0,32	0,36	0,30	
	SIMULADO EA Ocupado	0,49	0,51	0,48	0,47	0,56	0,51	0,53	0,54	0,54	0,53	0,51	0,48	0,53	0,47	
	SIMULADO RE Vacío	0,52	0,54	0,53	0,52	0,62	0,54	0,56	0,59	0,57	0,58	0,55	0,52	0,56	0,53	
	SIMULADO RE Ocupado	0,58	0,61	0,59	0,60	0,68	0,60	0,62	0,64	0,63	0,64	0,62	0,57	0,63	0,56	
	SIMULADO RE+AE Vacío	0,65	0,65	0,69	0,64	0,62	0,64	0,63	0,65	0,66	0,66	0,60	0,68	0,65	0,67	0,62
	SIMULADO RE+AE Ocupado	0,71	0,71	0,75	0,71	0,68	0,70	0,71	0,70	0,72	0,72	0,66	0,74	0,73	0,74	0,69

Tabla 6.1.25. Valores del índice de transmisión de la palabra STI en cada punto de recepción. Fuente 1.

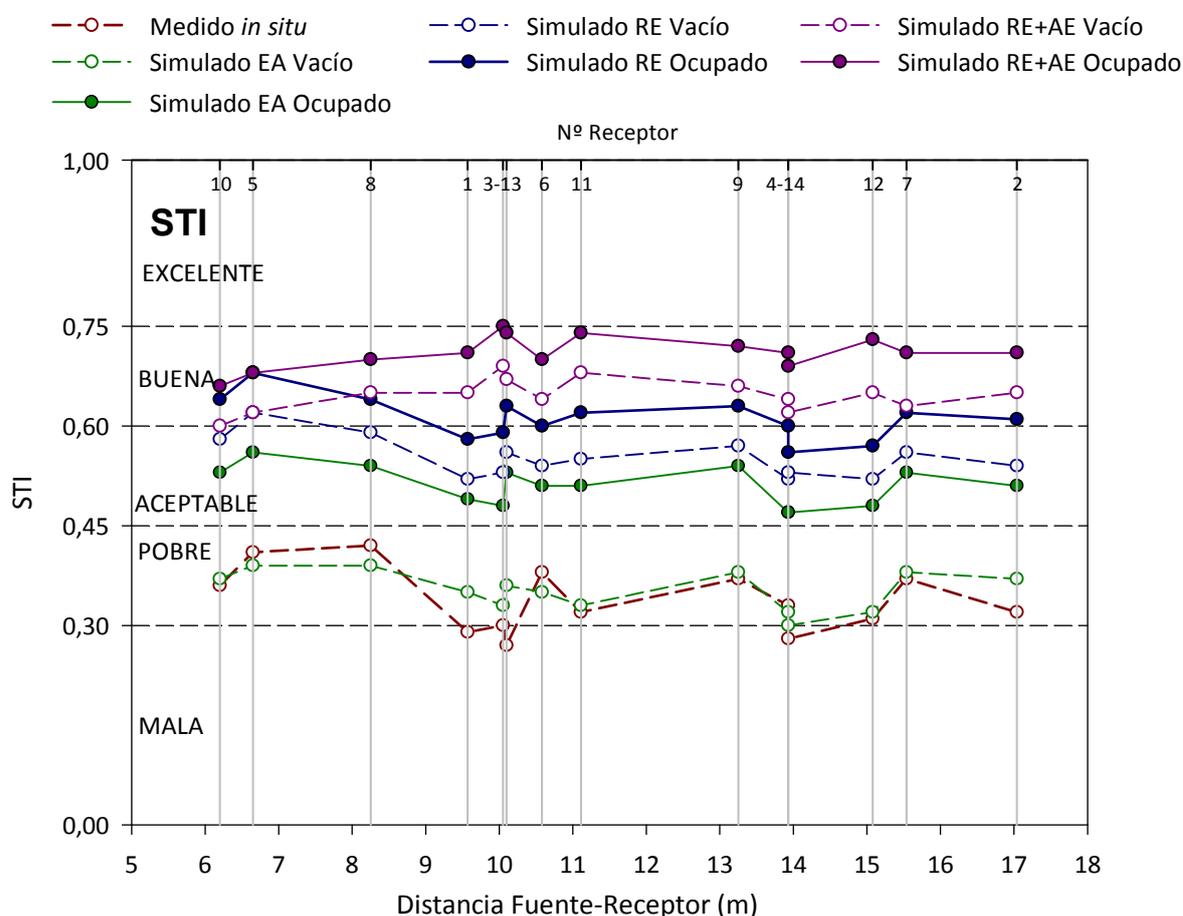


Figura 6.1.40. Índice de transmisión de la palabra STI frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual, propuesta de rehabilitación acústica y apoyo electroacústico. Fuente 1.

Como puede observarse, en el estado actual, los valores del índice STI de la iglesia, tanto los medidos *in situ* como los simulados con la sala vacía, califican a ésta como pobre y/o mala, en toda la zona de audiencia. En el caso de sala ocupada, los valores pasan a ser aceptables.

Con la propuesta de rehabilitación, y la incorporación de los nuevos revestimientos, se mejoran sensiblemente los resultados de la inteligibilidad. En el caso de la sala vacía, la inteligibilidad se califica entre aceptable y buena, mientras que con la sala ocupada se considera buena en casi todos sus puntos. El aumento medio de este parámetro es del 57% y 20% para la sala vacía y ocupada, respectivamente.

No obstante, y dado que uno de los objetivos más importantes de una iglesia, desde el punto de vista sonoro, es tener una buena inteligibilidad de la palabra, se ha estudiado el efecto que tendría la incorporación de un adecuado sistema de megafonía. Además, en casi todos estos recintos es frecuente la utilización de sistemas de apoyo electroacústico.

Tras sucesivas pruebas de tipo de altavoces, posición, altura y orientación de los mismos, el sistema propuesto y simulado consta de dos altavoces de columna (marca Duran Audio BV, modelo DC180 Axyx Intellivox), dispuestos en el presbiterio a una altura de 2 m desde el suelo al centro del altavoz (figura 6.1.41). Estos altavoces incorporan la tecnología *Digital Directivity Control* (DDC) que permite controlar el patrón de directividad vertical del producto *Intellivox* y dirigir el sonido hacia el oyente, manteniendo una cobertura uniforme en el plano de audiencia, evitando que el haz de rayos incida en superficies que pueden causar reflexiones no deseadas. El sistema permite obtener relaciones entre sonido directo y reverberante muy elevadas, situación que favorece la adecuada inteligibilidad de la palabra.

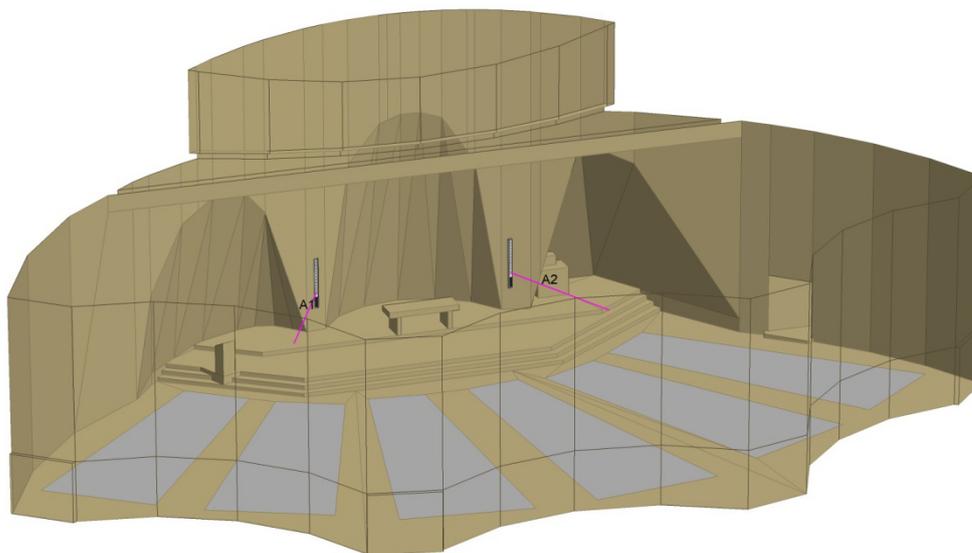


Figura 6.1.41. Modelo tridimensional: posición de altavoces.

Como puede observarse en la figura 6.1.40, el uso del apoyo electroacústico en el recinto proporciona resultados homogéneos del STI en el área de la audiencia, mejorando los resultados de este parámetro en torno al 18 y 16 % en las opciones estudiadas de sala vacía y ocupada, respectivamente. En ambos casos, la inteligibilidad se califica como buena, e incluso, algunos valores de la configuración ocupada se sitúan en el límite que permite considerar la inteligibilidad como excelente.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.1.42 se aportan los mapas de resultados del índice de transmisión de la palabra (STI), correspondientes a la simulación del estado actual (EA), tras la propuesta de rehabilitación acústica (RE) y tras dicha propuesta con la utilización del sistema de apoyo electroacústico (AE), todos ellos en su

configuración de iglesia ocupada y con la fuente en posición 1, coincidente con el altar, o con los altavoces en el presbiterio.

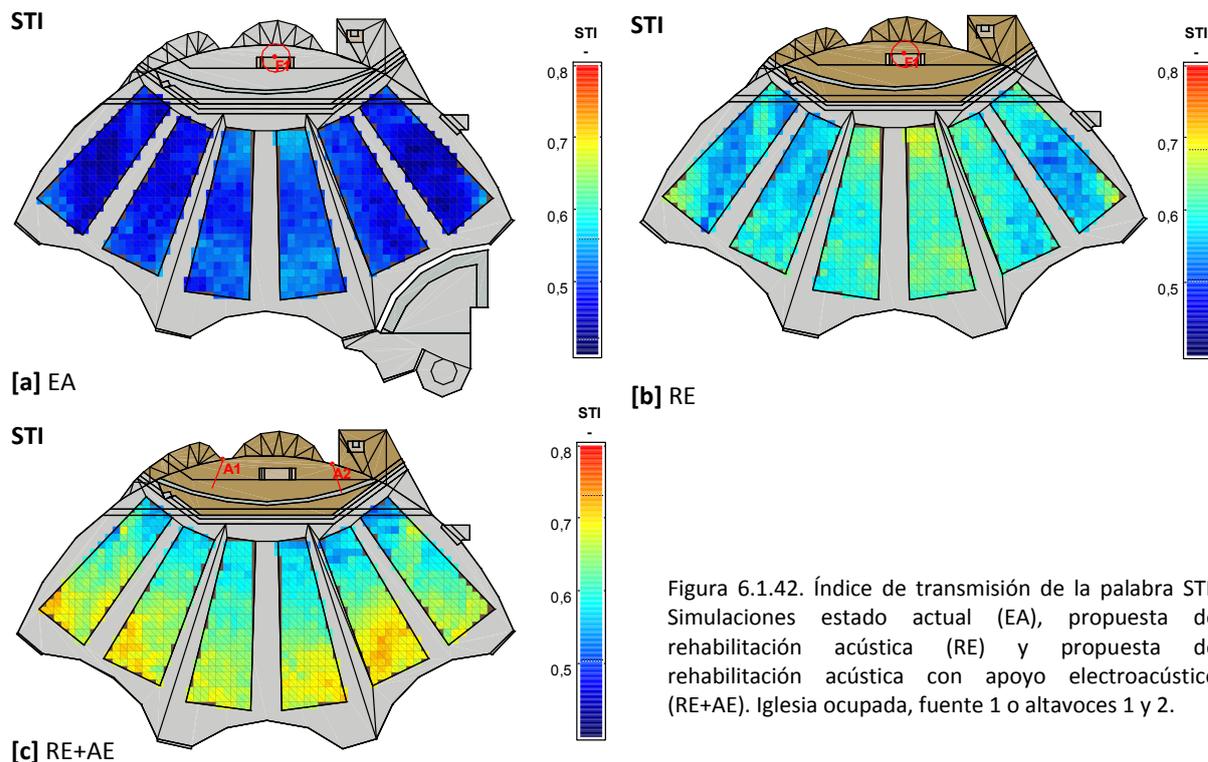


Figura 6.1.42. Índice de transmisión de la palabra STI. Simulaciones estado actual (EA), propuesta de rehabilitación acústica (RE) y propuesta de rehabilitación acústica con apoyo electroacústico (RE+AE). Iglesia ocupada, fuente 1 o altavoces 1 y 2.

En el mapa del STI del estado actual (figura 6.1.42 [a]), los resultados presentan una distribución bastante homogénea, siendo los valores ligeramente mejores en las franjas centrales de la audiencia. En la figura 6.1.42 [b], se observa la repercusión que la propuesta de rehabilitación acústica tiene sobre el STI en la totalidad de la zona de la audiencia. En esta situación el valor medio obtenido es de 0,59, valor muy próximo al umbral que califica la inteligibilidad como buena (0,60). Como en el estado actual, los mejores resultados se obtienen en las franjas centrales de la audiencia.

Si unimos a las medidas correctoras el sistema de megafonía propuesto (figura 6.1.42 [c]), el STI alcanza valores aún más favorables. En la zona de audiencia el valor medio pasa a ser 0,63, siendo más notable la mejora en las zonas de audiencia cercanas a los muros dispersivos, donde se alcanzan valores del STI superiores a 0,70. Esto hecho pone de manifiesto que la disposición asamblearia, cuando los muros dispersivos cuentan con la suficiente absorción, contribuyen a mejorar la inteligibilidad de la palabra. En dicho mapa de distribución se observa que en las filas delanteras de la audiencia se registran los valores más bajos del STI. No obstante, hay que tener en cuenta que estas zonas, al estar más cercanas a la fuente sonora, contarán con el sonido directo que proviene directamente del orador, además del propio del sistema electroacústico.

6.1.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO

Como se describe en el capítulo de método, en este apartado se hace una valoración y comparación de la absorción sonora de la iglesia en el estado actual (EA) y tras las propuestas de rehabilitación acústica (RE), tanto para el estado de iglesia vacía como ocupada.

La tabla 6.1.26 y la figura 6.1.43 muestran la absorción sonora de los elementos y materiales de revestimientos más significativos, y que más influencia han tenido en el comportamiento acústico de este recinto. Recordemos que el valor de la absorción sonora de los distintos materiales corresponde al valor promedio (en m^2) entre las banda de octava de 125 Hz y 4000 Hz, y que para cada configuración, se aporta la absorción total de la sala (A_t) y la superficie total de revestimientos (S_r).

Los resultados de la absorción sonora desglosados a frecuencias bajas, medias y altas, se recogen en la figura A2.1 del anexo 2.

REVESTIMIENTO	ABSORCIÓN SONORA (m ²)			
	EA VACÍO	EA OCUP	RE VACÍO	RE OCUP
TECHO	28,74	28,74	113,72	113,72
BANCOS	42,78	216,75	96,97	216,75
MURO DE FONDO	7,98	7,98	53,42	53,42
SUELO PRESBITERIO	0,93	0,93	29,27	29,27
MURO ALTO PRESBITERIO	0,67	0,67	33,33	33,33
OTROS MATERIALES	18,54	18,54	12,28	12,28
ABSORCIÓN TOTAL (A_t)	99,63	273,6	338,99	458,78

Tabla 6.1.26. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²).

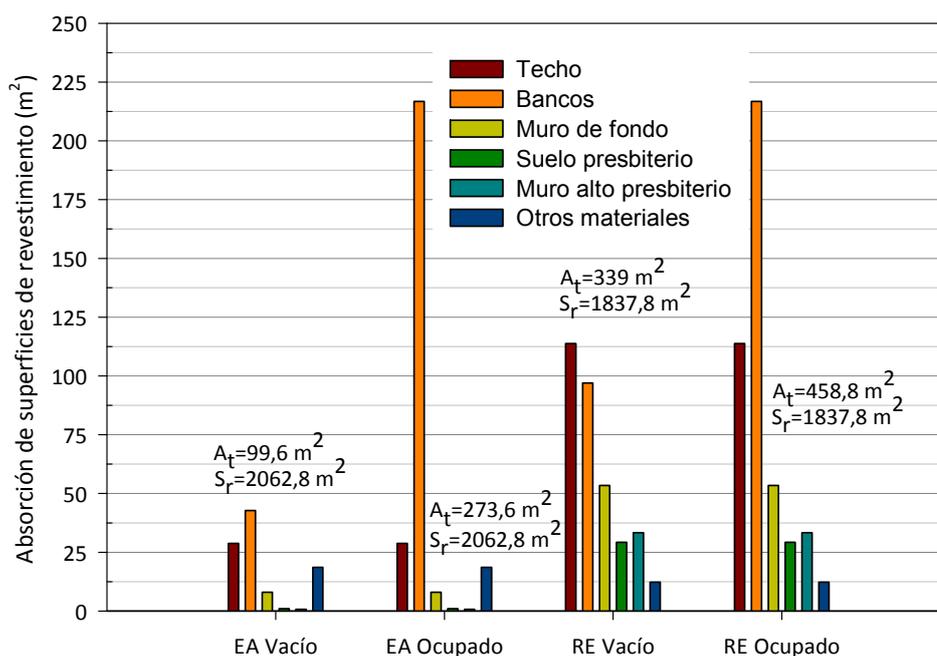


Figura 6.1.43. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promediados en frecuencia del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica (RE).

En el estado actual, la zona con mayor absorción se localiza en las áreas de audiencia (bancos), apreciándose una importante diferencia entre ambos estados de ocupación que se debe, por un lado, a la escasa absorción de los bancos vacíos y, por otro, a la gran capacidad absorbente de las personas. Como se aprecia en la figura, el techo es la segunda zona más destacada en cuanto a absorción sonora.

Con la propuesta de rehabilitación acústica, al dotar de absorción sonora al propio banco, la diferencia entre ambos estados de ocupación del recinto se reduce. A esto también contribuye el considerable aumento de absorción en el resto de zonas (techo, muros de fondo, suelo presbiterio, etc.), la cual ha sido clave en la mejora de las condiciones acústicas cuando la iglesia está ocupada, ya que, como puede comprobarse en la figura, la absorción sonora del público no varía entre el estado actual y la propuesta de rehabilitación.

A pesar de que con la propuesta de rehabilitación la superficie total de revestimientos (S_r) disminuye al separar el volumen del baptisterio del espacio principal, la absorción sonora del recinto vacío es 3,4 veces superior a la del estado actual. Para la iglesia ocupada, la intervención propuesta incrementa la absorción sonora del recinto 1,7 veces sobre el estado inicial.

6.1.3.7. CONCLUSIONES

La aplicación de los conocimientos acústicos de M. Fisac en la iglesia de Santa Ana, dieron lugar a una sala difusa, con distribución sonora muy homogénea y buena impresión espacial, tal y como ponen de manifiesto los resultados de los parámetros medidos *in situ*.

Sin embargo, y aunque el arquitecto era consciente de ello, no consiguió aportar la necesaria absorción sonora que él hubiera deseado, al no poder emplear materiales absorbentes por razones económicas. Esta falta de absorción sonora da lugar a elevados tiempos de reverberación y, como consecuencia, una deficiente inteligibilidad de la palabra y claridad musical.

La propuesta de rehabilitación acústica consigue corregir estas deficiencias, realizando un conjunto de actuaciones totalmente reversibles, que no desvirtúan los aspectos espaciales, formales y materiales con que el arquitecto concibió el proyecto, siendo, a su vez, compatibles con su condición de edificio arquitectónicamente protegido.

Caso especial merece la inteligibilidad de la palabra por el uso principal del edificio. Aunque la introducción de las medidas correctoras mejoran la inteligibilidad de la iglesia en las dos configuraciones estudiadas, el empleo adicional del sistema de megafonía propuesto consigue poder calificar dicha inteligibilidad como buena, tanto en la iglesia vacía como ocupada por los fieles. Es en esta última configuración donde algunos valores del STI, se sitúan en el umbral que permite calificar la inteligibilidad como excelente¹⁴.

¹⁴ **Bueno, A.M., León, A.L., y Galindo, M. (2012).** Acoustic rehabilitation of the church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid. *Archives of Acoustics*, 37(4), p. 435-446.



6.2. IGLESIA DEL COLEGIO DE LA ASUNCIÓN CUESTABLANCA. MADRID

c/ de Asunción Cuestablanca, 11. 28050 Madrid

Fecha de construcción: 1965

Edificio sin protección arquitectónica

6.2.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN

En la planta de la Capilla del Colegio de las Religiosas de la Asunción en el Cerro del Aire de Madrid, Fisac emplea las ideas desarrolladas en la iglesia de Santa Ana de Moratalaz, aunque con un carácter más sobrio, resultando una forma ovalada con marcado eje transversal, que consigue una mayor aproximación entre el presbiterio y la nave, y por tanto un espacio asambleario (figura 6.2.1). En la cara posterior del óvalo se disponen los *muros dispersivos* formados por elementos cilíndricos convexos (figuras 6.2.2 y 6.2.3). La cara anterior del óvalo envuelve la nave y el presbiterio, mediante dos segmentos curvos que se superponen en el presbiterio dejando un hueco de iluminación natural entre ambos.



Figura 6.2.1. Vista interior hacia el presbiterio.

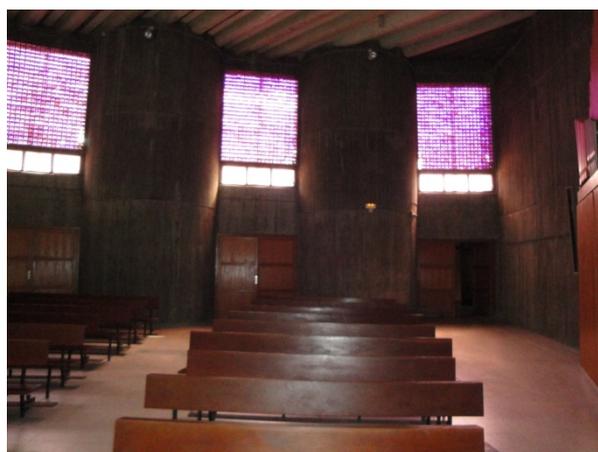


Figura 6.2.2. Vista interior lateral y *muros dispersivos*.

En esta iglesia, Fisac vuelve emplear el hormigón visto en todos los paramentos verticales y resuelve la cubierta mediante *vigas hueso* de hormigón prefabricado, dispuestas paralelamente a la línea que une el presbiterio y los *muros dispersivos* y con ligera pendiente ascendente hacia el presbiterio. En las uniones de dichas vigas hueso, colocó placas lineales de cartón-yeso que a su vez ocultan el cableado de la instalación de iluminación del espacio (figura 6.2.6).



Figuras 6.2.3 y 6.2.4. *Muros dispersivos* y huecos para iluminación en paramentos verticales.



El arquitecto ensayó una nueva forma de iluminación natural, que consistía en perforar la parte no estructural de determinadas vigas para crear un lucernario en celosía sobre el presbiterio (figura 6.2.5). Además, sobre las aberturas de los *muros dispersivos* se abrieron huecos de iluminación, así como en el encuentro de las *alas* curvas que conforman el presbiterio y el espacio para la asamblea (figuras 6.2.4).

Al igual que en la iglesia de Santa Ana de Moratalaz, Fisac enfatizó el carácter asambleario y de reunión del espacio, inclinando el pavimento de la zona ocupada por los fieles, desde el altar hasta los muros dispersivos.



Figura 6.2.5. Lucernario sobre presbiterio.



Figura 6.2.6. Vigas hueso con paneles de cartón-yeso en uniones.



Figura 6.2.7. Vista lateral del presbiterio.

En el proyecto se repetía la misma disposición de elementos sobre el presbiterio que en Santa Ana, pero finalmente y por deseo de la propiedad, el sagrario se colocó en el centro del presbiterio, desplazando ligeramente el altar. La imaginería del templo, compuesta por un Crucificado y una imagen de la Virgen con el Niño, fue realizada por el escultor Amadeo Gabino (figura 6.2.7).

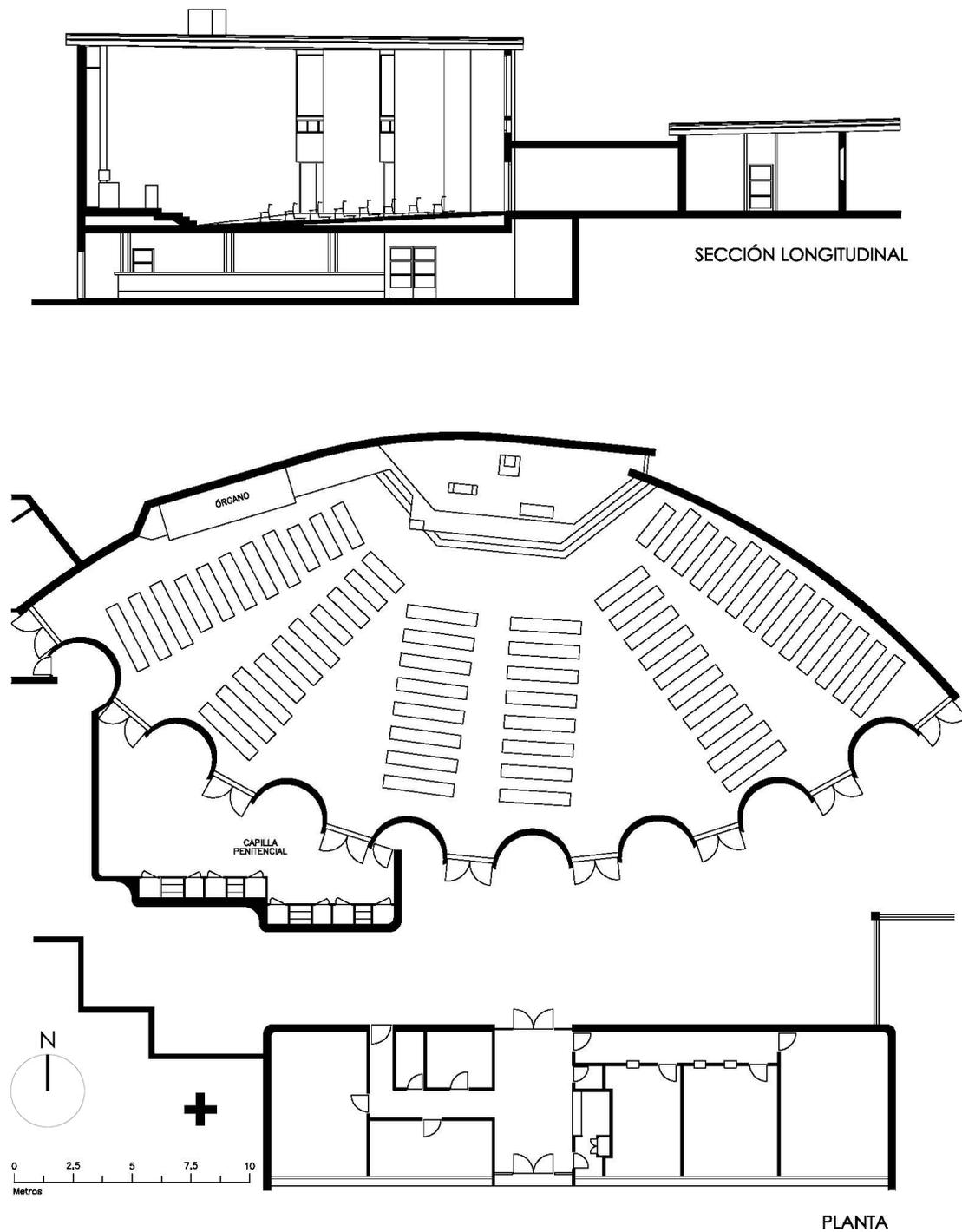


Figura 6.2.8. Plano de planta y sección longitudinal.

DATOS GEOMÉTRICOS Y DE AFORO	
VOLUMEN	
Volumen interior iglesia (V):	3188 m ³
SUPERFICIES	
Superficie útil iglesia:	452,5 m ²
Superficie construida iglesia:	473,6 m ²
Superficie de revestimientos:	1726,3 m ²
Superficie del presbiterio:	44,7 m ²
Superficie de bancos:	159,7 m ²
Superficie acústica efectiva audiencia (S _A):	240,97 m ²
Superficie de pasillos:	248,2 m ²
DIMENSIONES	
Longitud media:	13,9 m
Anchura media:	25,8 m
Altura media:	8,9 m
AFORO (N)	325 personas
RELACIONES GEOMÉTRICAS	
V / N	9,81 m ³ /plaza
V / S _A	13,23 m ³ /m ²
S _A / N	0,74 m ² /plaza

Tabla 6.2.1. Datos geométricos y de aforo.

MATERIALES DE REVESTIMIENTO Y ACABADOS INTERIORES	
Suelo fieles:	Terrazo
Suelo presbiterio:	Terrazo
Techo:	Vigas hueso de hormigón prefabricado con listón de cartón-yeso en uniones
Lucernario:	Vidrio en vigas hueso horadadas
Paredes:	Hormigón visto
Puertas:	Madera
Ventanas:	Pavés y vidrio simple en ventana practicable
Altar:	Granito
Ambón:	Granito
Bancos:	Madera
Órgano:	Madera y tubos metálicos

Tabla 6.2.2. Materiales de revestimiento y acabados interiores.

6.2.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL

6.2.2.1. MEDICIÓN *IN SITU*. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

La medición acústica *in situ* de esta iglesia se realizó el 15 de julio de 2010 a las 10:00 h, con una duración aproximada de cuatro horas. Se emplearon dos posiciones para la fuente sonora, según el uso habitual de la iglesia: la primera (F1), en el punto ocupado por el orador en el altar (figura 6.2.9) y, la segunda (F2), junto al órgano, separada 1 m de distancia de éste. Se distribuyeron catorce posiciones para el micrófono receptor, cubriendo las diferentes zonas de audiencia, de forma que sus posiciones fueran representativas de la totalidad del espacio (figura 6.2.10). Los valores medios de las variables ambientales registradas durante las medidas fueron 30,9°C de temperatura y 24% de humedad relativa.



Figura 6.2.9. Fuente direccional situada en el altar (F1) durante la medición acústica *in situ*.

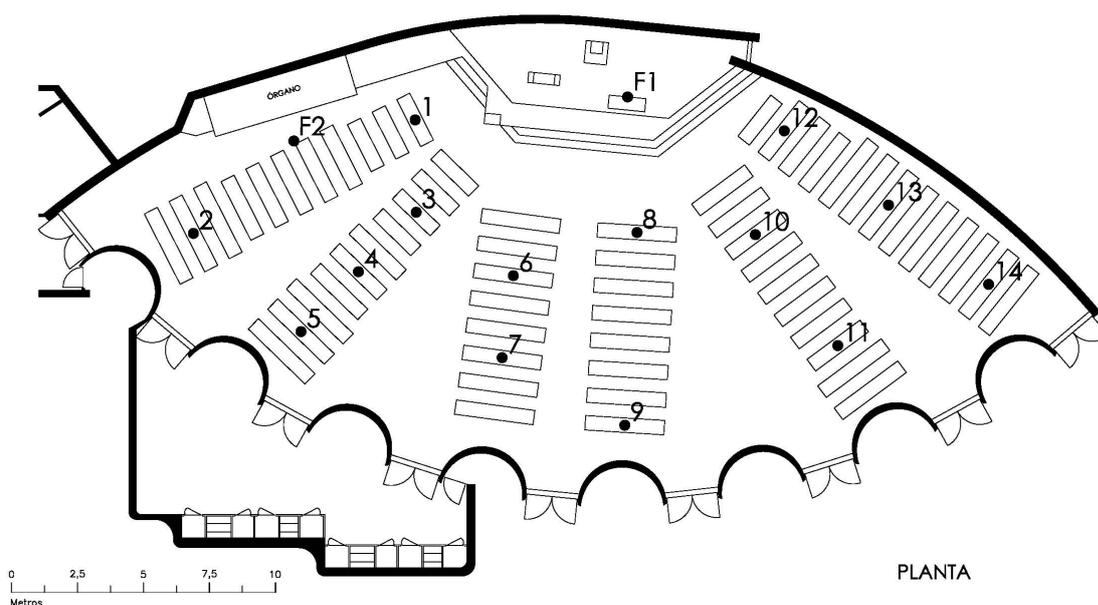


Figura 6.2.10. Posiciones de fuentes y receptores.

Reverberación

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_{30} (s)	F1	2,98	4,11	4,48	3,75	3,30	2,53
	σ F1	0,12	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02
	F2	3,00	4,14	4,48	3,72	3,28	2,51
	σ F2	0,12	0,11	0,08	0,05	0,03	0,04
	Óptimo palabra	1,43	1,27	1,10	0,99	0,99	0,99
	Óptimo música	1,91	1,69	1,47	1,32	1,32	1,32
EDT (s)	F1	2,72	4,06	4,47	3,69	3,15	2,20
	σ F1	0,34	0,32	0,17	0,11	0,09	0,06
	F2	2,72	3,62	4,43	3,67	3,15	2,15
	σ F2	0,28	0,26	0,26	0,22	0,21	0,21

Tabla 6.2.3. Valores promediados espacialmente del tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s).

¹Desviación estándar.

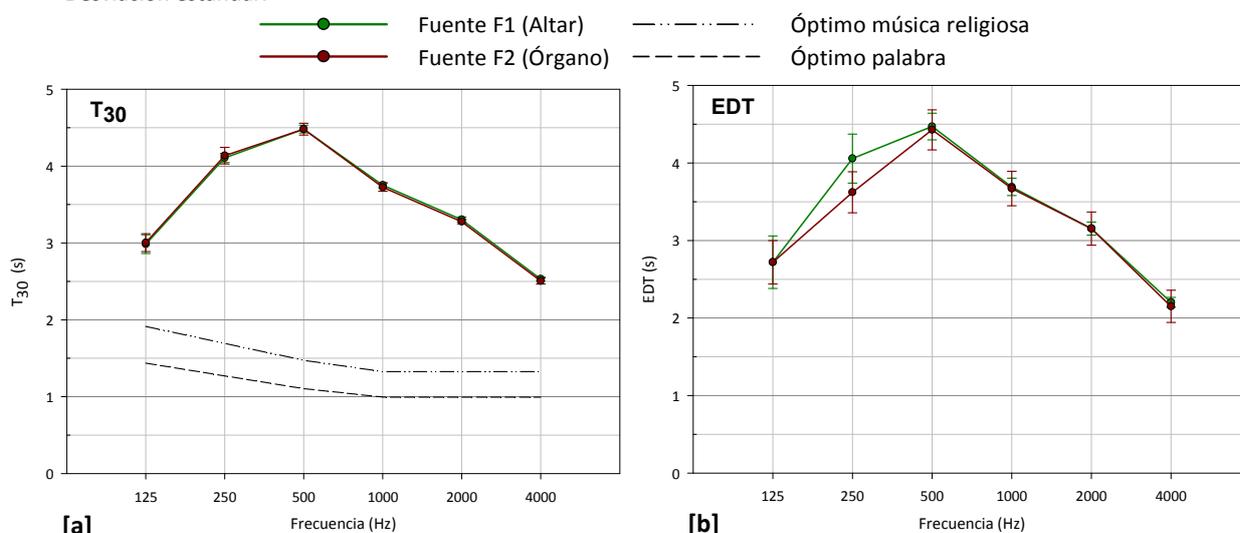


Figura 6.2.11. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

En la figura 6.2.11 [a] se aprecia que los valores medidos del tiempo de reverberación (T_{30}) son muy similares para las dos posiciones de la fuente y la dispersión espacial (dada por la desviación estándar) es también similar y su valor pequeño (el valor más alto es de 0,12 a la frecuencia de 125 Hz para las dos fuentes). Asimismo, los valores medidos son bastante más altos que los óptimos recomendados para este volumen, siendo dichos valores óptimos superados en más de 2,5 s a las frecuencias medias.

En cuanto a los resultados del EDT (figura 6.2.11 [b]), los valores medidos son muy similares para ambas fuentes y, a su vez, similares a los valores de T_{30} , excepto a la frecuencia de 250 Hz, donde se obtiene, para la fuente en el altar (F1), un valor de EDT 0,5 s superior que para la fuente situada junto al órgano (F2). Los valores de la dispersión espacial son más altos que los obtenidos para el T_{30} . En las frecuencias bajas, las dispersiones espaciales del EDT son superiores para la fuente 1 y para las medias y altas frecuencias, son mayores las desviaciones estándar de la fuente 2. El valor del EDT_{mid} (media aritmética a las frecuencias de 500 y 1000 Hz) es superior al rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010, y que está entre 1,0 s y 3,0 s.

Los tiempos de reverberación medidos, tan alejados de los recomendados, dan lugar a deficiencias acústicas en el recinto. Aunque, como se indicó en apartados anteriores, el tiempo de reverberación es el indicador que evalúa de forma global el comportamiento acústico del recinto, en los siguientes apartados analizaremos los resultados de los demás parámetros acústicos y sus interpretaciones sobre las condiciones acústicas del recinto.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

En este apartado se analizan los resultados de los parámetros acústicos relativos al aspecto subjetivo de la claridad del sonido percibida, es decir, tiempo central (T_s), claridad para la palabra (C_{50}), definición (D_{50}) y claridad musical (C_{80}).

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_s (ms)	F1	176,07	281,29	310,43	253,00	219,79	151,93
	σ F1	10,46	30,37	22,44	20,80	17,82	12,42
	F2	181,29	257,14	301,50	246,14	214,64	146,07
	σ F2	28,80	38,03	60,21	51,76	43,97	32,92

Tabla 6.2.4. Valores promediados espacialmente del tiempo central T_s (ms). ¹Desviación estándar.

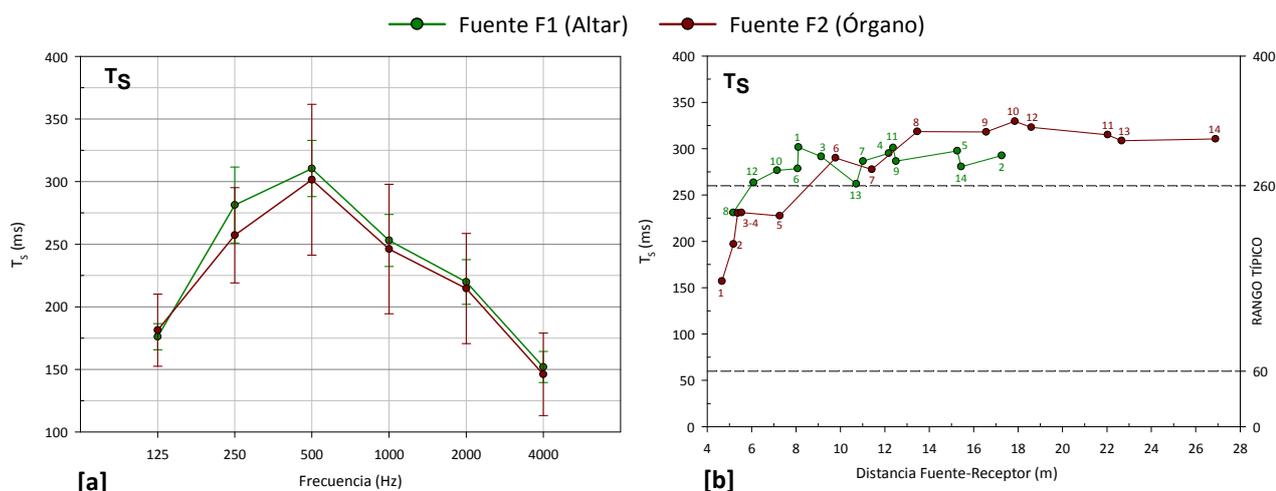


Figura 6.2.12. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

Para el tiempo central (figura 6.2.12 [a]), los valores medios registrados con la fuente situada en el altar (F1), se mantienen por encima a los resultantes para la fuente 2, ubicada junto al órgano. Salvo a la frecuencia de 250 Hz, la diferencia entre los resultados para las dos fuentes es inferior a 1 JND. La dispersión espacial es mayor con esta posición descentrada de la fuente (F2).

En la gráfica que representa el promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor de este parámetro (figura 6.2.12 [b]), vemos que para la fuente situada en el altar, los resultados obtenidos en todos puntos de recepción (salvo en el punto más cercano a la fuente sonora y situado en una posición centrada de la iglesia, punto nº 8) son superiores al rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. Con la fuente sonora situada junto al órgano (F2), los resultados obtenidos son similares a los anteriores, excepto en los puntos cercanos a la fuente sonora (a menos de 7 m de distancia), cuyos resultados se encuentran dentro del rango típico de la citada norma.

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D_{50}	F1	0,36	0,20	0,19	0,23	0,23	0,32
	σ F1	0,10	0,10	0,06	0,06	0,06	0,06
	F2	0,32	0,20	0,19	0,24	0,26	0,33
	σ F2	0,12	0,10	0,15	0,13	0,13	0,14

Tabla 6.2.5. Valores promediados espacialmente de la definición D_{50} . ¹Desviación estándar.

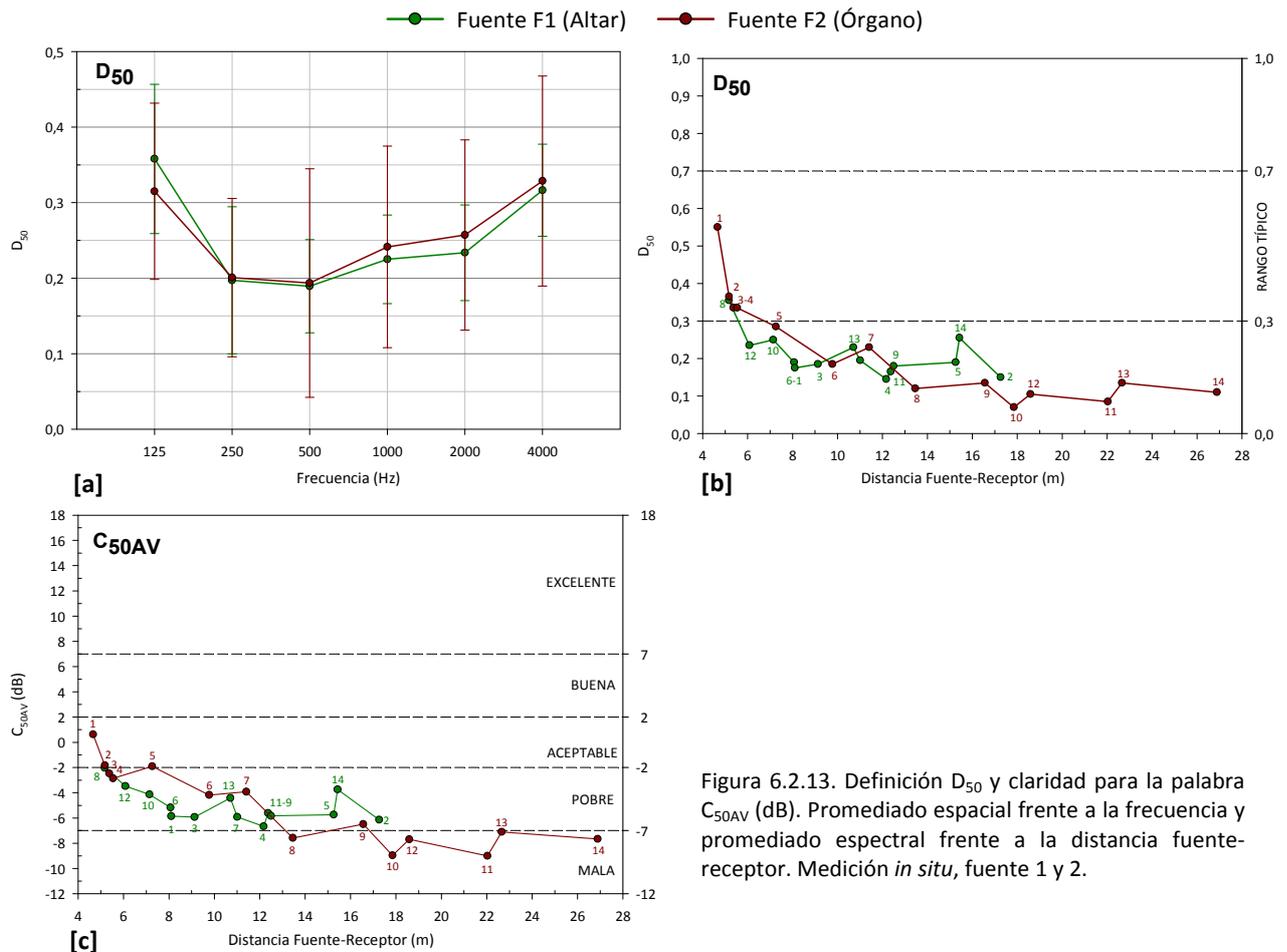


Figura 6.2.13. Definición D_{50} y claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

El comportamiento espacial por banda de octava de la definición (D_{50}) para las dos posiciones de la fuente es muy parecido, obteniéndose resultados con diferencias inferiores a 1 JND (figura 6.2.13 [a]). Sin embargo, la desviación estándar es mayor para la fuente situada junto al órgano (F2).

Las gráficas que representan el promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor del D_{50} y del C_{50AV} (figuras 6.2.13 [b] y [c]), reflejan resultados similares para ambas posiciones de la fuente. Los resultados obtenidos para el D_{50} , en ambas posiciones de la fuente, son inferiores al rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. En ambos casos, esto se cumple para todos los puntos de recepción situados en la zona de audiencia, excepto en los puntos más próximos a las fuentes sonoras.

En el caso del C_{50AV} , la escala de valoración de Marshall califica la claridad de la palabra en todos los puntos de recepción, con la fuente en el altar, como pobre (F1). Al situar la fuente sonora junto al órgano (F2), vemos la atenuación de la claridad de la palabra con la distancia fuente-receptor. Así, en los puntos más cercanos a la fuente sonora (situados a una distancia inferior a 5,5 m) la claridad es aceptable. Los resultados registrados en los receptores situados entre 5,5 m y 13 m de distancia, corresponden a una claridad para la palabra pobre, y para los puntos situados a más de 13 m de distancia de la fuente, la claridad disminuye, calificándose como mala.

PARÁMETRO	FUENTE - σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C_{80} (dB)	F1	-1,12	-3,96	-4,71	-3,54	-3,14	-1,06
	σ F1	1,82	1,99	1,20	1,06	1,12	0,75
	F2	-1,04	-3,72	-4,61	-3,57	-2,81	-0,74
	σ F2	1,75	2,24	3,20	2,99	2,54	2,32

Tabla 6.2.6. Valores promediados espacialmente de la claridad musical (C_{80}). ¹Desviación estándar.

PARÁMETRO	FUENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
STI	F1	0,19	0,20	0,25	0,22	0,21	0,26	0,27	0,36	0,25	0,22	0,21	0,21	0,21	0,23

Tabla 6.2.7. Valores del índice de transmisión de la palabra STI en cada punto de recepción.

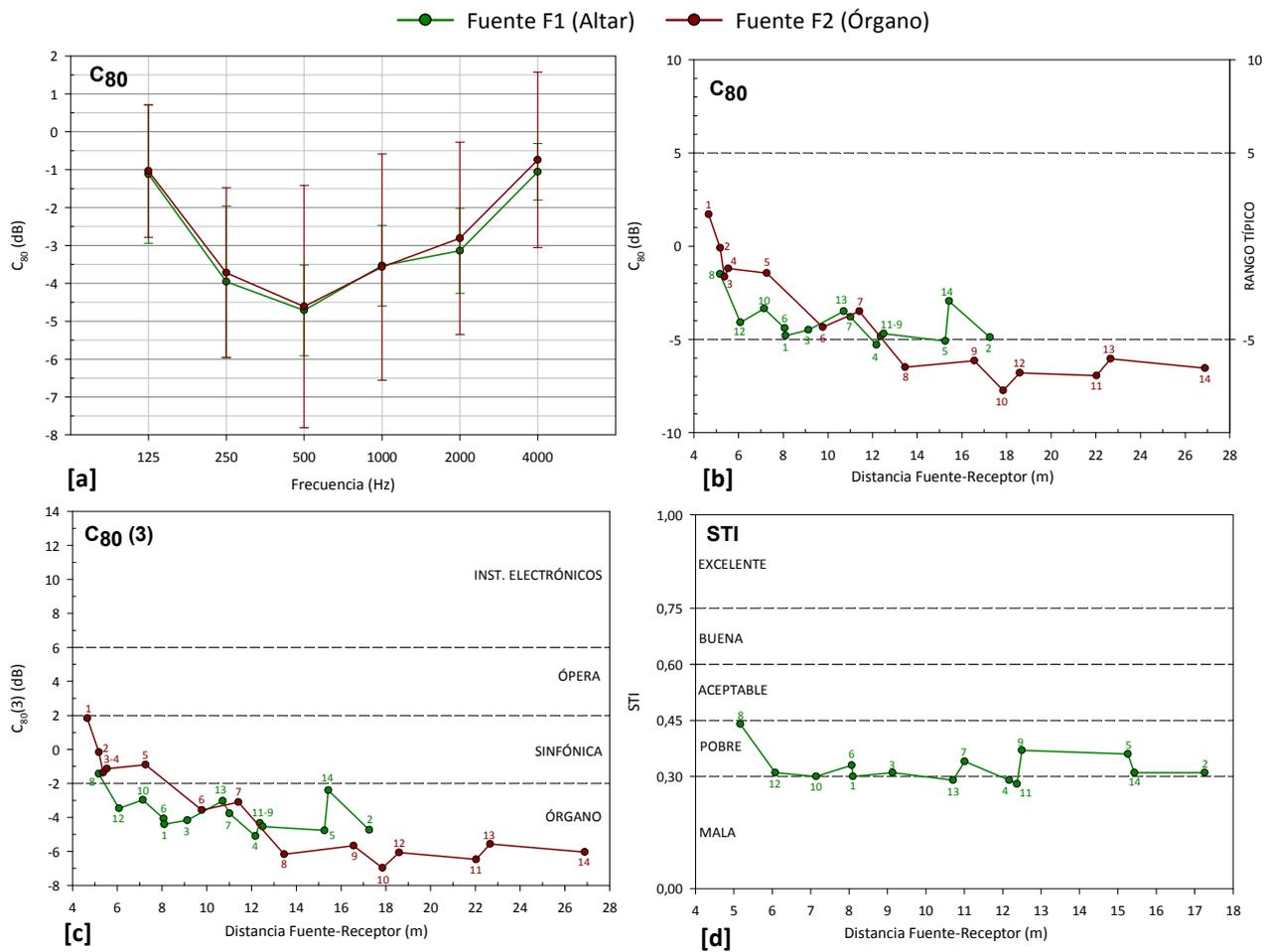


Figura 6.2.14. Claridad musical C_{80} (dB) e índice de transmisión de la palabra STI. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectralmente frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

En cuanto a la claridad musical (C_{80}), vemos que, tanto los resultados promediados espacialmente frente a la frecuencia (figura 6.2.14 [a]) como los promediados espectralmente frente a la distancia fuente y receptor (figura 6.2.14 [b]), conllevan observaciones similares a las descritas para la claridad de la palabra (C_{50}) y la definición (D_{50}). Excepto para los puntos más cercanos a las fuentes sonoras, los resultados del $C_{80}(3)$, indican que la iglesia es adecuada para la música de órgano, resultado previsible dados los elevados tiempos de reverberación (figura 6.2.14 [c]).

De la comparación de los resultados obtenidos, para las dos fuentes sonoras en estos cuatro parámetros: T_s , C_{50} , D_{50} y C_{80} , vemos que la iglesia presenta similares valores de la claridad del sonido percibida con la fuente centrada en el presbiterio (F1) y junto al órgano (F2), que corresponde a una posición descentrada respecto a la planta de la iglesia.

En cuanto a la inteligibilidad de la palabra, valorada por el índice STI, se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor, junto con la escala de

interpretación subjetiva (figura 6.2.14 [d]). En esta iglesia, para la fuente 1, la inteligibilidad, sin apoyo electroacústico, está considerada entre mala y pobre, ya que más de la mitad de los puntos de la zona de audiencia se sitúan en torno al límite de ambas calificaciones y sólo en cinco puntos, los valores registrados corresponden a una inteligibilidad pobre.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	F1	18,57	21,14	16,08	14,03	15,60	14,87
	σ F1	1,77	2,21	1,45	1,32	1,80	2,02
	F2	15,59	17,05	18,24	14,01	14,73	13,99
	σ F2	3,58	2,90	1,95	1,84	2,64	2,38

Tabla 6.2.8. Valores promediados espacialmente de la fuerza sonora G (dB). ¹Desviación estándar.

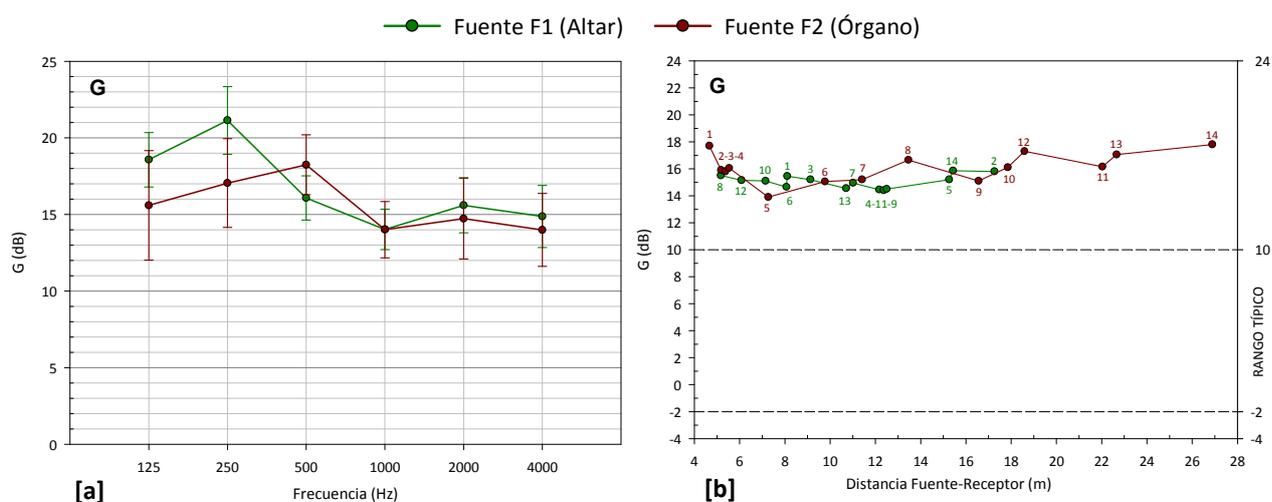


Figura 6.2.15. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

El nivel sonoro subjetivo, evaluado mediante la fuerza acústica (G) presenta, para las dos posiciones de la fuente, resultados promediados espacialmente muy altos, acordes con los elevados tiempos de reverberación registrados y la poca absorción sonora de la sala, proporcionando un nivel del campo reverberado muy elevado. La dispersión espacial es mayor para la fuente 2 situada junto al órgano (figura 6.2.15 [a]). Para frecuencias a partir de 1000 Hz, la diferencia entre los resultados de las dos fuentes son inferiores a 1 JND.

Al representar los valores obtenidos de G en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.2.15 [b]), la gráfica refleja que en todos los casos, los valores son muy altos y se sitúan muy por encima del rango típico recogido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

Impresión espacial

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
L_j (dB)	F1	8,05	13,91	9,99	8,04	8,64	7,59
	σ F1	1,92	2,02	1,51	1,25	1,70	2,06
	F2	5,29	9,23	11,85	7,54	7,28	6,14
	σ F2	3,01	2,42	2,52	1,49	2,21	2,31
J_{LF}	F1	0,09	0,15	0,19	0,18	0,18	0,19
	σ F1	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06
	F2	0,15	0,25	0,25	0,22	0,22	0,23
	σ F2	0,07	0,11	0,12	0,08	0,07	0,07

Tabla 6.2.9. Valores promediados espacialmente del nivel sonoro lateral final L_j (dB) y la fracción de energía lateral precoz J_{LF} . ¹Desviación estándar.

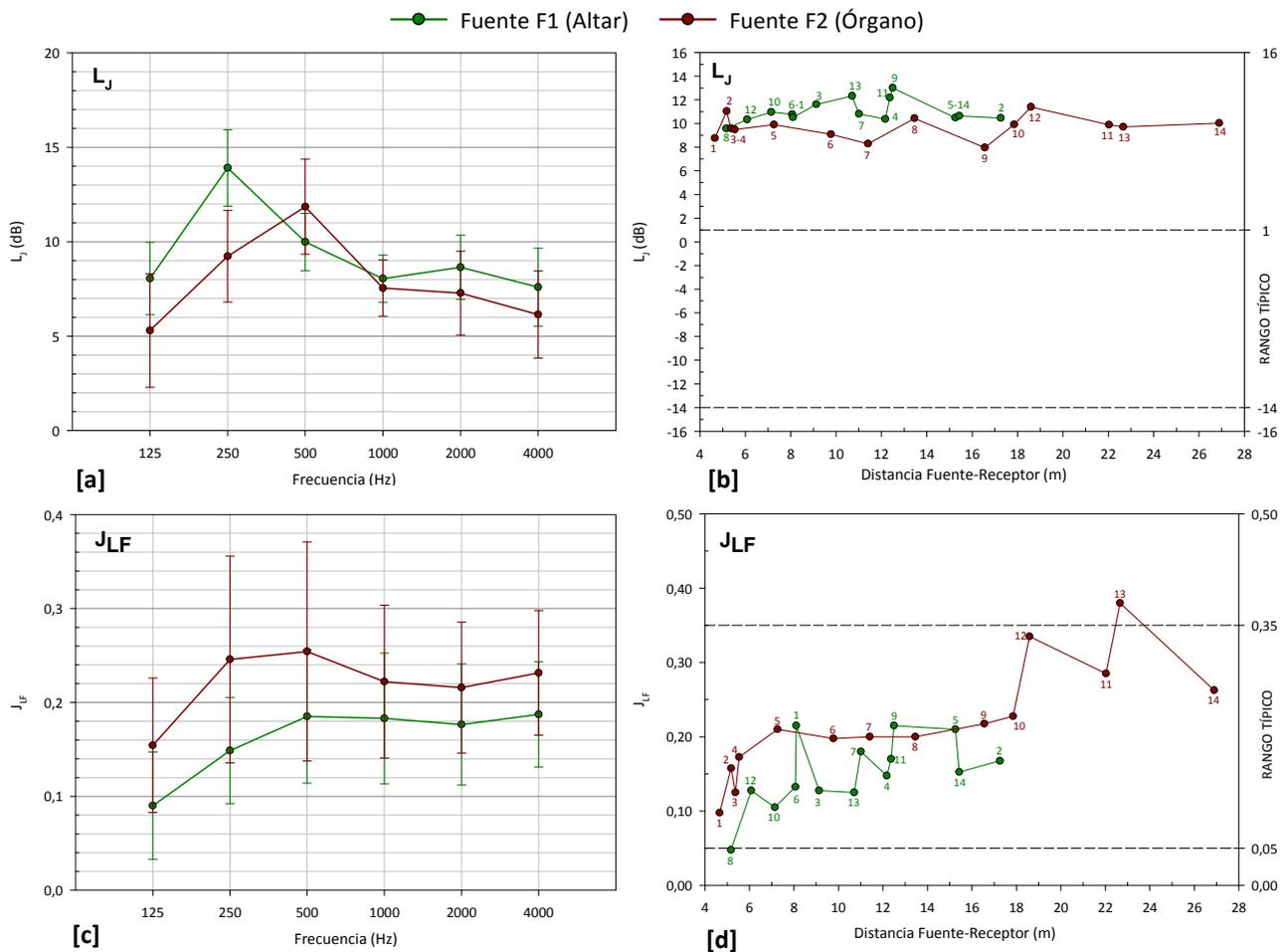


Figura 6.2.16. Nivel sonoro lateral final L_j (dB) y fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

En cuanto a la sensación espacial de sentirse envuelto por el sonido en el recinto, definida por el nivel sonoro lateral final (L_j), la figura 6.2.16 [a] refleja que los resultados obtenidos para las dos posiciones de la fuente son muy altos en todas las frecuencias, como era previsible por los excesivos tiempos de reverberación obtenidos. Asimismo, los valores del promediado espectral se alejan del rango típico que establece la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 (figura 6.2.16 [b]). De lo anterior, se deduce que los valores de la energía acústica lateral tardía corresponden a una sensación sonora envolvente del oyente en todas las frecuencias.

Para la anchura aparente de la fuente, valorada por la energía lateral precoz (J_{LF}), destacar que sus resultados, representados en las figuras 6.2.16 [c] y [d], reflejan valores diferentes para las dos posiciones de la fuente, ya que, como indicamos al analizar la anterior iglesia, se trata de un parámetro muy sensible a la posición de la misma y del receptor. Los valores registrados son más altos al situar la fuente en posición asimétrica respecto a la planta (F2), correspondiendo, por tanto, a una mayor amplitud de la fuente sonora. Las diferencias entre los resultados obtenidos para las fuentes F1 y F2 son superiores al valor umbral perceptible (JND), para frecuencias inferiores a 1000 Hz. Para casi todos los puntos de recepción y ambas posiciones de la fuente, los valores del promediado espectral se sitúan dentro del rango típico establecido por la norma ISO. Los niveles de J_{LF} registrados corresponden a una adecuada amplitud de la fuente sonora (entre 0,1 y 0,25). Cabe destacar que en los puntos de recepción 11 a 14 y con la fuente en posición 2, se percibe una mayor anchura de la fuente sonora (con valores de J_{LF} entre 0,26 y 0,38), pues la pared lateral que los envuelve favorece la recepción de reflexiones cortas sobre dichos puntos.

Los resultados de estos dos últimos parámetros indican que el oyente está inmerso dentro del discurso oral o musical con una localización adecuada de la fuente sonora. Este hecho se corrobora

con los coeficientes de correlación cruzada interaural ($IACC_L$, $IACC_E$ y $IACC_A$) que se indican en la tabla 6.2.10, donde $IACC_{L3}=0,11$, para las dos fuentes, y $IACC_{E3}= 0,376$ y $0,326$, para F1 y F2, respectivamente. Los resultados de estos dos parámetros se encuentran dentro del rango de valores obtenidos por Beranek en auditorios y salas de concierto, cuya acústica se considera excelente.

PARÁMETRO	FUENTE - σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
$IACC_L$	F1	0,88	0,63	0,15	0,12	0,06	0,06
	σ F1	0,03	0,04	0,03	0,02	0,01	0,02
	F2	0,87	0,64	0,17	0,11	0,06	0,05
	σ F2	0,05	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01
$IACC_E$	F1	0,95	0,83	0,47	0,40	0,26	0,25
	σ F1	0,04	0,08	0,19	0,12	0,16	0,14
	F2	0,91	0,70	0,45	0,36	0,17	0,14
	σ F2	0,05	0,10	0,18	0,13	0,03	0,04
$IACC_A$	F1	0,91	0,68	0,20	0,12	0,10	0,12
	σ F1	0,02	0,04	0,05	0,03	0,06	0,08
	F2	0,87	0,63	0,23	0,17	0,07	0,06
	σ F2	0,04	0,05	0,07	0,06	0,02	0,03

Tabla 6.2.10. Valores promediados espacialmente de los coeficientes de correlación cruzada interaural: $IACC_L$, $IACC_E$ y $IACC_A$. ¹Desviación estándar.

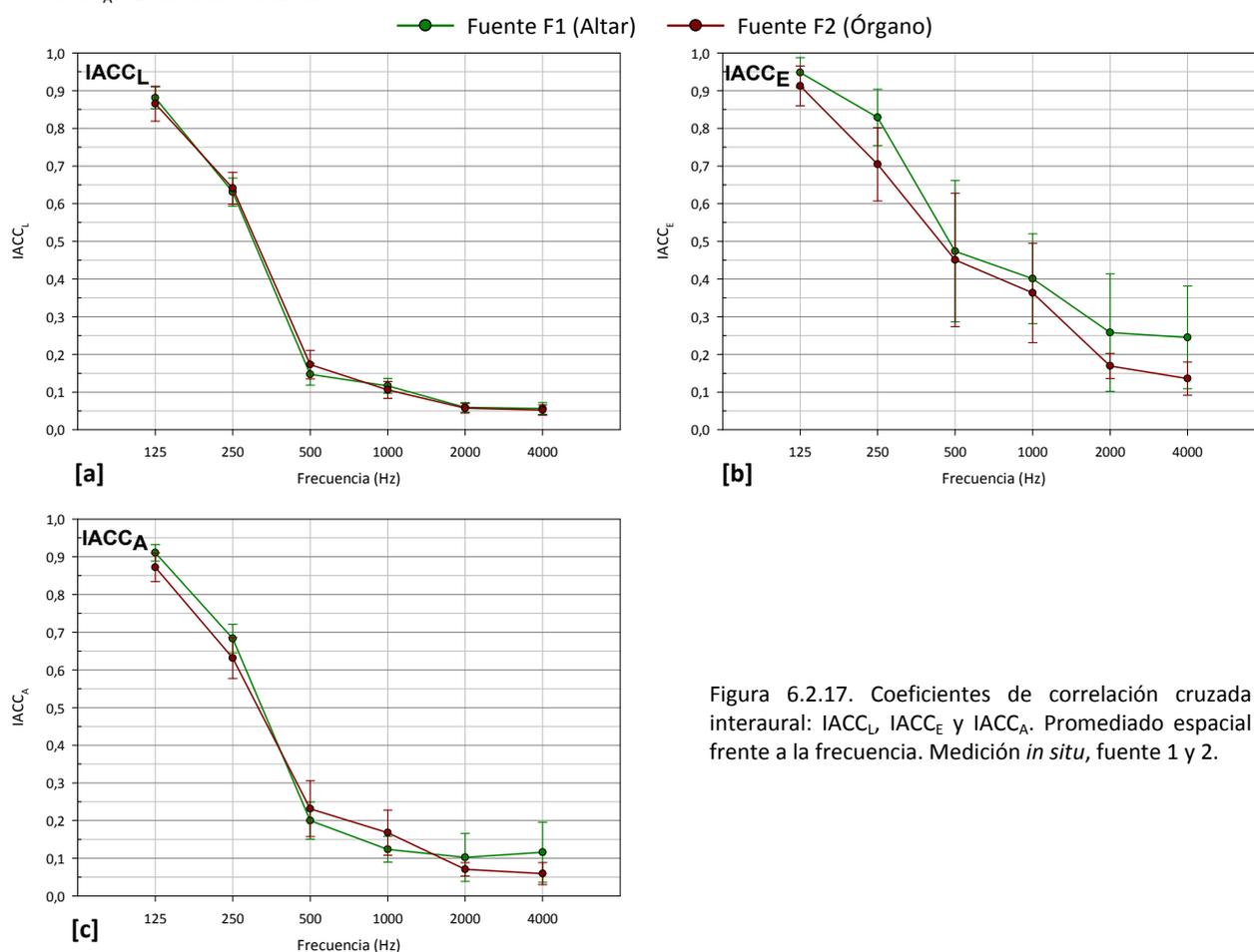


Figura 6.2.17. Coeficientes de correlación cruzada interaural: $IACC_L$, $IACC_E$ y $IACC_A$. Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

La figura 6.2.17 [a] indica que la parte final de las respuestas al impulso, valoradas por el índice $IACC_L$, son casi idénticas para las dos posiciones de la fuente y su desviación estándar muy pequeña, presentando valores muy bajos a altas frecuencias. La similitud de la primera parte de las respuestas al impulso, relacionada con las reflexiones tempranas y representada por el índice $IACC_E$ (figura 6.2.17 [b]), muestra ligeras diferencias entre las posiciones de la fuente, aunque las curvas presentan la misma tendencia. La dispersión espacial es mayor que para el anterior coeficiente, y son algo mayores para la fuente 1 a frecuencias altas. Las respuestas completas, representadas mediante

IACC_A en la figura 6.2.17 [c], son muy parecidas para ambas posiciones de fuente, siendo la dispersión espacial mayor que para el IACC_L.

Ruido de fondo

PARÁMETRO	PUNTO	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
RF (dB)	6	37,49	40,64	36,29	35,59	37,39	46,80

Tabla 6.2.11. Espectro de ruido de fondo registrado (dB).

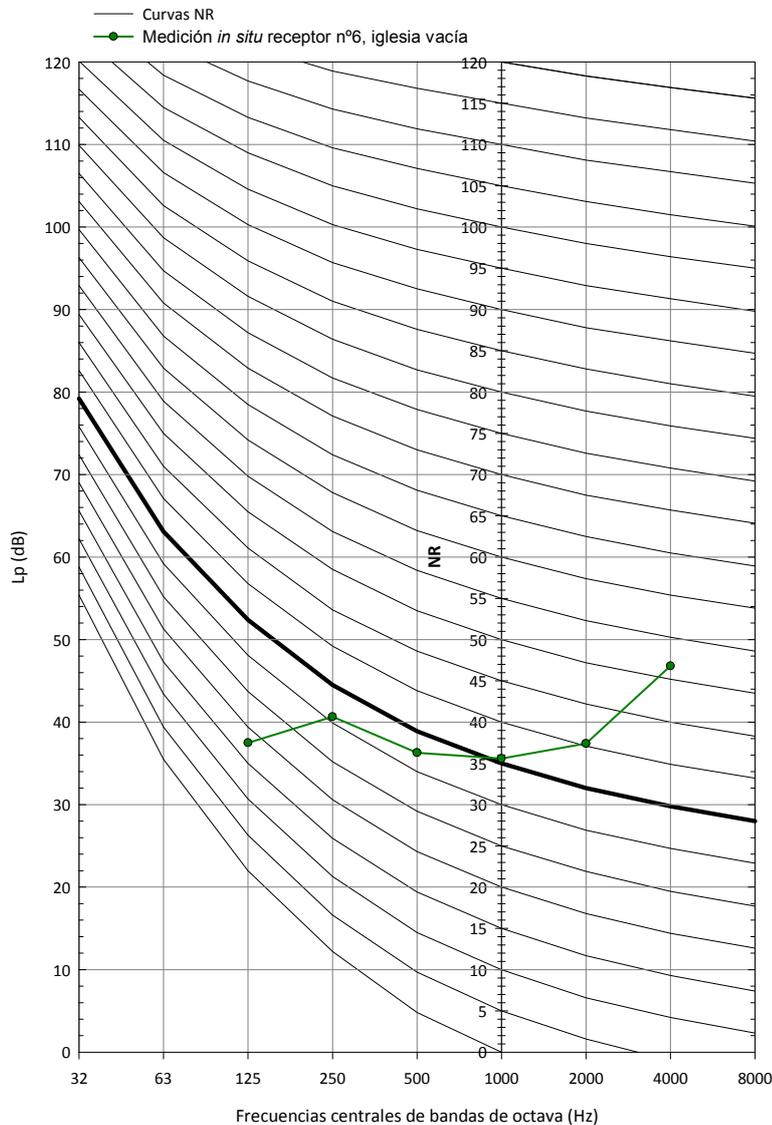


Figura 6.2.18. Curvas NR y espectro de ruido de fondo registrado (dB).

El espectro de ruido de fondo se registró promediando durante cuatro minutos en el punto 6. En la figura 6.2.18, dicho registro se ha superpuesto sobre las curvas NR, el cual corresponde a un índice de NR 52, valor superior al máximo recomendado para los recintos de culto (NR 35). Los valores recomendados se superan claramente para las frecuencias de 2000 y 4000 Hz, es decir, en las bandas asociadas a sonidos agudos. La justificación de este alto resultado, junto con la descripción del entorno y las condiciones en que se realizó la medición acústica *in situ*, se realiza a continuación.

El colegio se asienta en un solar muy grande situado en lo alto de un cerro y rodeado de terreno libre, donde las edificaciones más cercanas son de uso administrativo, residencial público y residencial vivienda. A poca distancia, pero a distinto nivel, discurren autovías de circunvalación de la ciudad, con alta densidad de tráfico.

Se trata de un colegio muy grande, que cuenta con unidades desde Educación Infantil hasta segundo de Bachillerato. La iglesia se sitúa en la zona más alta del solar, rodeada de dependencias y sin fachada al exterior. Sus características constructivas, con muros gruesos de hormigón y pocos huecos al exterior, son favorables para el buen aislamiento acústico del recinto.

Aunque la fecha de la medición acústica *in situ*, coincidió con las vacaciones estivales, y sólo se encontraban en el colegio, unos veinticinco niños que asistían a un campamento de verano, en el momento en que se registró el espectro de ruido de fondo, estos niños se encontraban en el comedor, situado debajo de la iglesia, lo que justifica los resultados obtenidos a frecuencias altas.

Por tanto, el ruido de fondo, que afectará a las condiciones acústicas de la iglesia, será el correspondiente al uso habitual del propio edificio docente, registrándose valores altos, como los de la figura 6.2.18, en determinados momentos del día.

Parámetros geométricos y de aforo

V/N (m^3/plaza)	V/S_A (m^3/m^2)	S_A/N (m^2/plaza)
9,81	13,23	0,74

Tabla 6.2.12. Valores de parámetros geométricos y de aforo.

En esta iglesia, la relación geométrica V/N se encuentra fuera del rango establecido para las iglesias ($5,1-9,1 m^3/\text{plaza}$) y, sin embargo, dentro del rango recomendado para las salas de conciertos ($6,2-10,8 m^3/\text{plaza}$). El valor obtenido es bastante mayor que el recomendado para las iglesias ($7,2 m^3/\text{plaza}$).

Para las relaciones geométricas V/S_A y S_A/N , los autores Haan y Fricke no aportan valores recomendados ni rango específico para iglesias. En esta iglesia, el resultado de V/S_A se sitúa dentro del rango establecido para salas de concierto ($10,2-14,2 m^3/m^2$), mientras que el valor de S_A/N se encuentra dentro del rango recomendado para locales polifuncionales ($0,63-0,75 m^2/\text{plaza}$) y teatros ($0,53-0,75 m^2/\text{plaza}$).

6.2.2.2. AJUSTE DEL MODELO INFORMÁTICO

En la figura 6.2.19, se muestra el modelo informático tridimensional realizado con el programa informático, que reproduce el interior de la iglesia, donde puede observarse que los elementos curvos y la zona de audiencia han sido simplificados según se explicó en el apartado 5.3 del capítulo anterior.

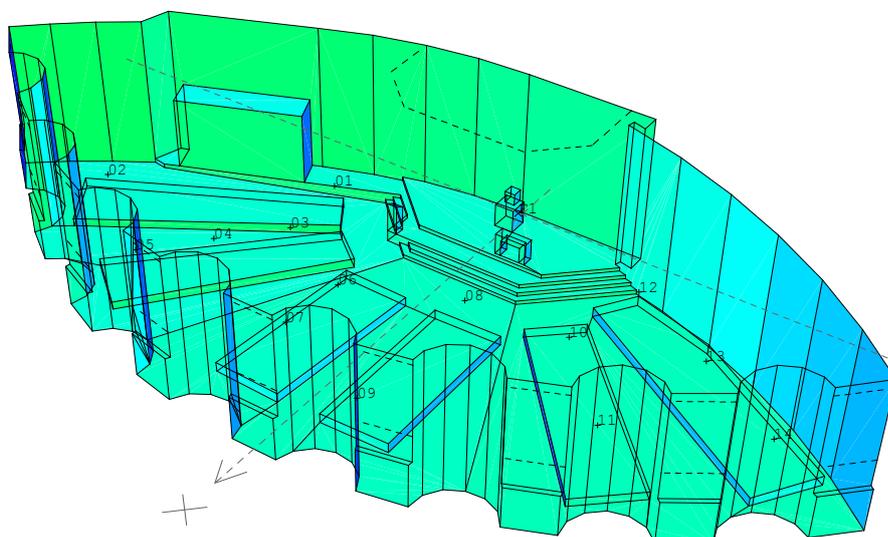


Figura 6.2.19. Modelo tridimensional realizado con el programa CATT-Acoustic.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.2.13.

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
Vigas hueso de hormigón con panel de cartón-yeso	Techo	410,1	23,8
Hormigón visto	Paredes laterales y del presbiterio	346,9	20,1
Terrazo	Suelo	296,8	17,2
Hormigón visto	Pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	251,1	14,5
Banco de madera	Zona de audiencia	227,3	13,2
Vidrio (en área grande)	Ventanas	68,8	4,0
Vidrio en vigas hueso	Lucernario presbiterio	39,4	2,3
Puerta de madera	Puertas de acceso	36,9	2,1
Panel de madera 10-13 mm con cámara 50-100 mm	Órgano	36,5	2,1
Granito	Altar, ambón, sede, base Sagrario	9,5	0,6
Tela de algodón	Altar	1,7	0,1
Metal	Paredes Sagrario	1,2	0,1
TOTAL REVESTIMIENTOS		1726,3	100

Tabla 6.2.13. Áreas de revestimientos.

Para el ajuste del modelo informático con el tiempo de reverberación T_{30} , se emplearon las condiciones de cálculo especificadas en la tabla 6.2.14, y los coeficientes de absorción y de dispersión sonora de los revestimientos del estado actual presentados en la tabla 6.2.15.

DATOS Y CONDICIONES DE CÁLCULO	
Algoritmo de cálculo	Nº2, cálculo completo, auralización detallada
Número de conos/rayos	50.000
Ecograma/respuesta al impulso	4,7 s
Densidad del aire	1,15 kg/m ³
Absorción del aire	Activada
Ruido de fondo	Según espectro medido <i>in situ</i>
Condiciones ambientales	30,9°C, 24%
Tiempo de cálculo	146 horas (iglesia vacía)
Número de fuentes	2
Número de receptores	14
Número de planos	191

Tabla 6.2.14. Datos y condiciones de cálculo.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DEL ESTADO ACTUAL

REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Vigas hueso de hormigón con panel de cartón-yeso	α	23	12	9	14	12	3
	s	15	15	20	20	25	25
Hormigón visto y granito	α	1	1	2	2	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Terrazo	α	1	1	1	1	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Hormigón visto <i>muros dispersivos</i>	α	1	1	2	2	2	2
	s	50	65	30	20	10	10
Banco de madera vacío	α	16	18	18	17	17	16
	s	30	40	50	60	70	80
Banco de madera ocupado	α	57	61	75	86	91	86
	s	30	40	50	60	70	80
Vidrio (en área grande)	α	18	6	4	3	2	2
	s	10	10	10	10	10	10

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DEL ESTADO ACTUAL

REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Vidrio en <i>vigas hueso</i> (lucernario)	α	21	9	6	5	4	4
	s	15	15	20	20	25	25
Puerta de madera	α	14	10	6	8	10	10
	s	10	10	10	10	10	10
Panel de madera con cámara (órgano)	α	30	25	20	17	15	10
	s	10	10	10	10	10	10
Tela de algodón	α	3	4	11	17	24	35
	s	10	10	10	10	10	10
Metal (Sagrario)	α	14	10	6	8	10	10
	s	10	10	10	10	10	10

Tabla 6.2.15. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos del estado actual. Los valores resaltados (en color rojo) son los ajustados en el proceso de sintonización.

En esta tabla se muestran los coeficientes de absorción y dispersión sonora de los materiales de revestimiento existentes en el recinto eclesial, destacándose los materiales con más incertidumbre y cuyos valores han sido ajustados para la sintonización del tiempo de reverberación (T_{30}). Este ajuste concierne a las *vigas hueso* de hormigón con paneles de cartón-yeso y al lucernario, donde las modificaciones afectan a casi todas las frecuencias, aunque los mayores ajustes corresponden a las bajas frecuencias.

De forma similar a la iglesia de Santa Ana, el ajuste de los coeficientes de absorción de estos elementos se apoya en dos conceptos: la geometría de estos revestimientos y su sistema constructivo. En referencia al primer aspecto, previamente a la sintonización se efectuó una primera estimación del coeficiente de absorción atendiendo a la superficie real de los materiales ajustados. En cuanto al segundo concepto, el techo de la iglesia, formado por *vigas hueso* de hormigón prefabricado que salvan una gran luz y paneles de cartón-yeso en las uniones, hace que éste se comporte como un resonador de membrana, aumentando la absorción a bajas frecuencias. También el lucernario, formalizado al sustituir el ala no estructural de las *vigas hueso* por piezas de vidrio, constituye una gran superficie con capacidad de vibración. El efecto combinado de resonador y las irregularidades de las superficies, unido al análisis del comportamiento en frecuencia del tiempo de reverberación medido (figura 6.2.11 [a]), justifica la corrección de los valores del coeficiente de absorción de estos elementos, especialmente en la banda de octava de 125 Hz.

Para los coeficientes de *scattering*, se ha admitido un valor por defecto del 10% en todas las bandas de octava analizadas, excepto en los siguientes casos: para los bancos de madera vacíos y los bancos ocupados, se han adoptado los coeficientes de bibliografía publicada y especificada en el análisis de la iglesia de Santa Ana; para el lucernario, el techo de *vigas hueso* de hormigón armado con paneles de cartón-yeso y los muros dispersivos, los valores se han estimado a partir del tamaño de las irregularidades, la profundidad media estructural y la longitud media estructural, para las correspondientes longitudes de onda implicadas. Con los valores de los coeficientes de dispersión sonora de los *muros dispersivos* presentados en la tabla 6.2.15, se incluyen, implícitamente, los fenómenos de dispersión de ondas sonoras que Fisac consideró al proyectar la iglesia, y que justifican la forma de los citados muros.

6.2.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN *IN SITU* Y LA SIMULACIÓN

A partir del modelo ajustado del estado actual (EA) de la iglesia vacía, se procedió, con las mismas condiciones de cálculo, a la simulación acústica de la iglesia ocupada con la fuente situada en el altar (F1) y, posteriormente, a las simulaciones para las configuraciones vacía y ocupada, con la fuente situada junto al órgano, separado 1 m de distancia (F2).

Los resultados de las simulaciones para cada fuente, se comparan con los obtenidos en las medidas experimentales. Para facilitar el análisis de resultados en este apartado, las gráficas situadas en la columna izquierda muestran los valores correspondientes a la fuente 1, y las gráficas de la columna derecha, los de la fuente 2.

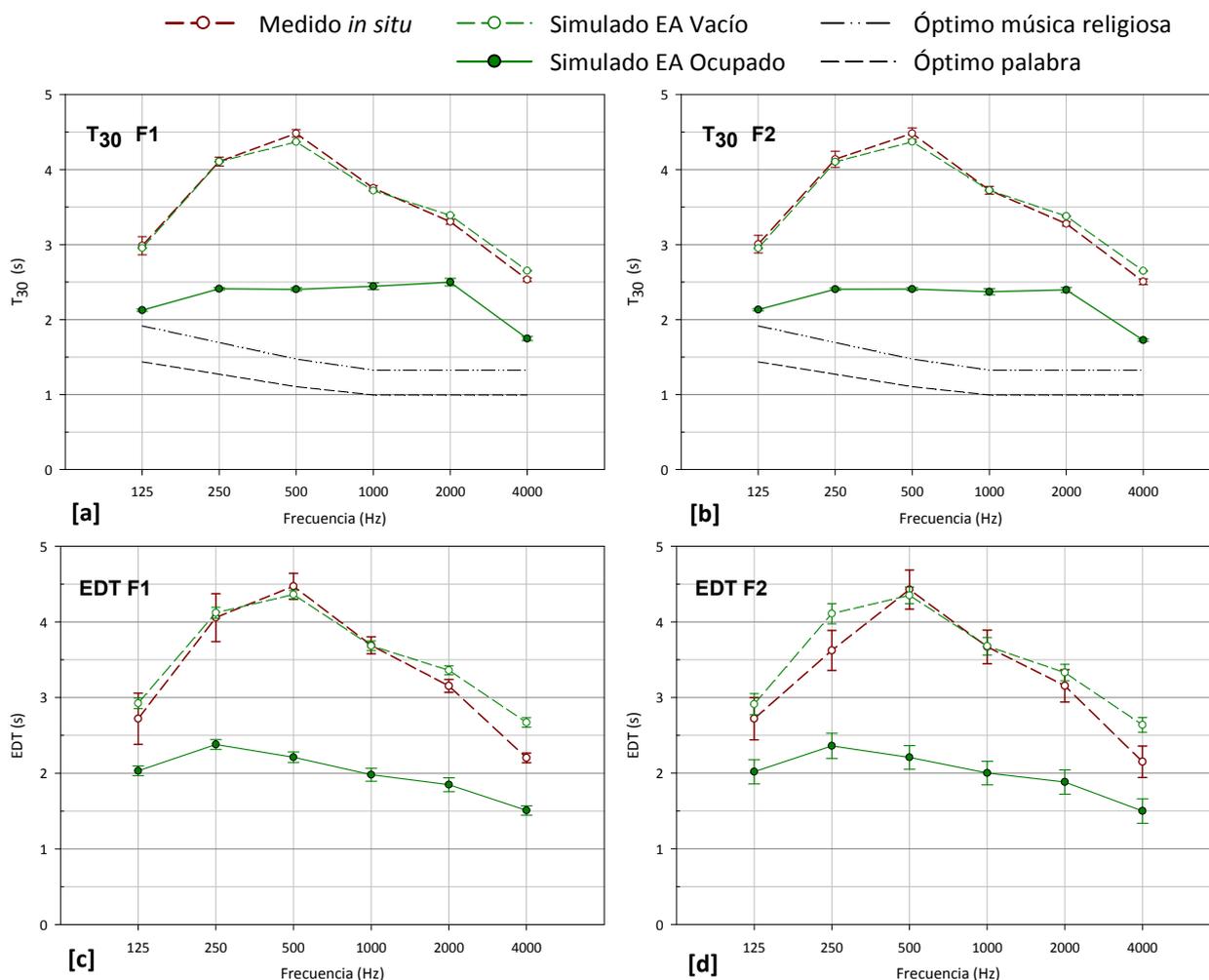
Reverberación

Figura 6.2.20. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

En la figura 6.2.20 [a], observamos que los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) ajustados en la simulación acústica del campo sonoro de la iglesia, en la hipótesis vacía de fieles y con la fuente situada en el altar (F1), difieren menos del umbral perceptible *Just Noticeable Difference* (JND), que corresponde a un 5% de los valores medidos *in situ* para las distintas bandas de octava, lo que demuestra la idoneidad del modelo informático, pues reproduce el estado real de la iglesia son suficiente aproximación y fiabilidad.

Aunque la el ajuste del modelo tridimensional de iglesia se ha realizado con la fuente en posición 1 (coincidente con el altar), en la figura 6.2.20 [b] vemos que, con la fuente en posición 2 (junto al

órgano), la diferencia entre valores medidos y simulados del T_{30} , también son inferiores a un JND en todas las frecuencias estudiadas.

Al realizar la simulación acústica del recinto ocupado, los valores del tiempo de reverberación disminuyen considerablemente, para ambas fuentes, aunque son superiores a los óptimos recomendados.

En las figuras 6.2.20 [c] y [d], vemos que los resultados calculados del EDT para las dos posiciones de la fuente, son similares a los obtenidos en las medidas experimentales, a partir de la respuesta al impulso. Para todas las bandas de octava estudiadas, excepto para 4000 Hz en ambas posiciones de la fuente, las diferencias son inferiores a 2 JND, valores aceptables para simulaciones, según se indicó en el apartado 5.5 del capítulo de *Método de investigación*.

En cuanto a la dispersión espacial de ambos parámetros, para ambas fuentes, vemos que, es menor en las simulaciones que en las medidas experimentales.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

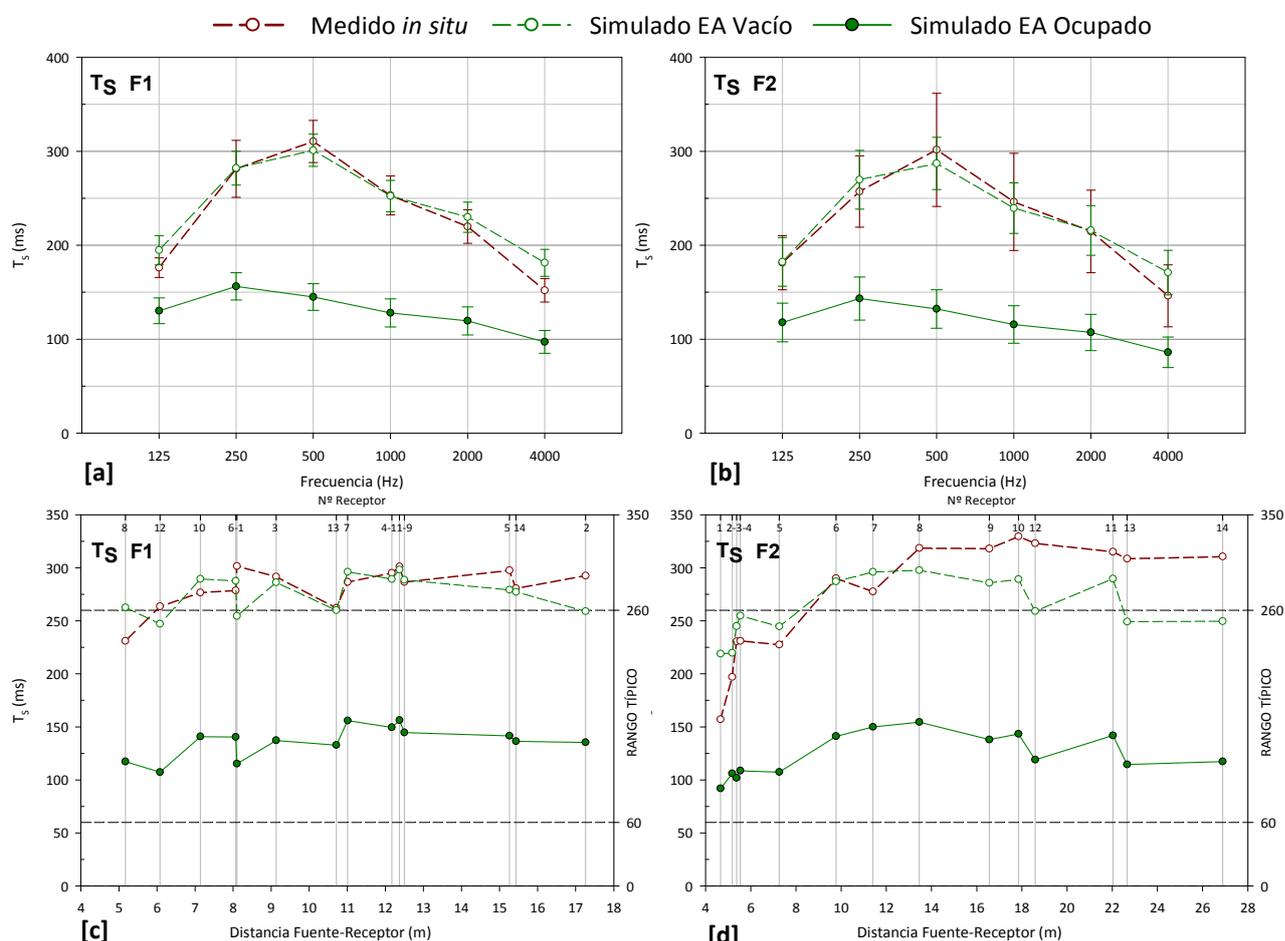


Figura 6.2.21. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Como se observa en las gráficas de la figura 6.2.21 [a] y [b], para las dos posiciones de la fuente (la primera en el altar y la segunda en el órgano), los resultados del tiempo central T_s calculados en la simulación acústica, son muy afines a los obtenidos en las medidas experimentales, a partir de la respuesta al impulso, para todas las bandas de octava estudiadas, siendo las diferencias inferiores a 2 JND. En cuanto a la dispersión espacial, vemos que presenta valores inferiores en los resultados de la simulación acústica que en los obtenidos en la medición *in situ*.

La representación de los resultados del T_5 en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figuras 6.2.21 [c] y [d]), muestran que los valores medidos y simulados presentan tendencias y valores similares con la fuente ubicada en el altar (F1), mientras que para la fuente 2, se aprecian diferencias notables en los puntos situados a más de 15 m de distancia del órgano.

Al igual que ocurría con los parámetros relacionados con la reverberación, la presencia de los fieles en la iglesia reduce considerablemente los valores del T_5 , mejorando la nitidez del sonido, que para todos los puntos de recepción y para ambas posiciones de la fuente, se encuentra dentro del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, hecho que revela el efecto positivo de las superficies absorbentes para la mejora de las condiciones acústicas de esta iglesia.

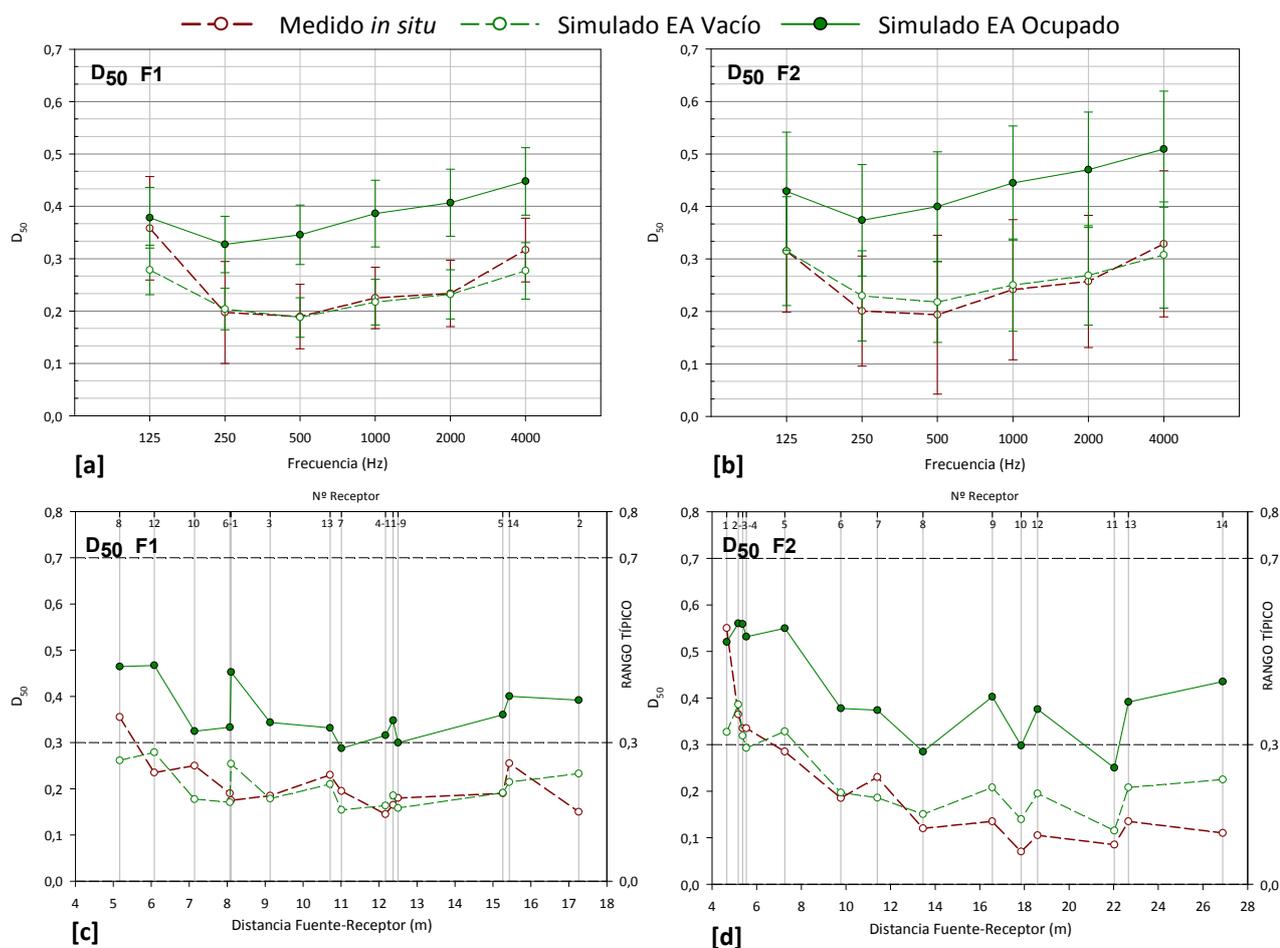


Figura 6.2.22. Definición D_{50} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

En cuanto a la definición (D_{50}), en la gráfica correspondiente al promediado espacial frente a la frecuencia, con la fuente situada en el altar (figura 6.2.22 [a]), vemos que para las frecuencias medias, los resultados calculados, con la iglesia vacía, son muy parecidos a los obtenidos en las medidas experimentales. Sin embargo, al situar la fuente sonora junto al órgano, las mayores aproximaciones se obtienen para las frecuencias de 125 Hz y 4000 Hz (figura 6.2.22 [b]). Para ambas fuentes, las diferencias obtenidas son inferiores a 2 JND. De nuevo, la dispersión espacial, es menor en los resultados de la simulación que en la medición *in situ*, y mayor cuando la fuente se sitúa junto al órgano (F2), tanto en la configuración vacía como ocupada.

Para la iglesia ocupada, los resultados en la mayoría de los puntos de recepción de la zona de audiencia, se encuentran dentro del rango típico establecido por la norma UNE citada anteriormente.

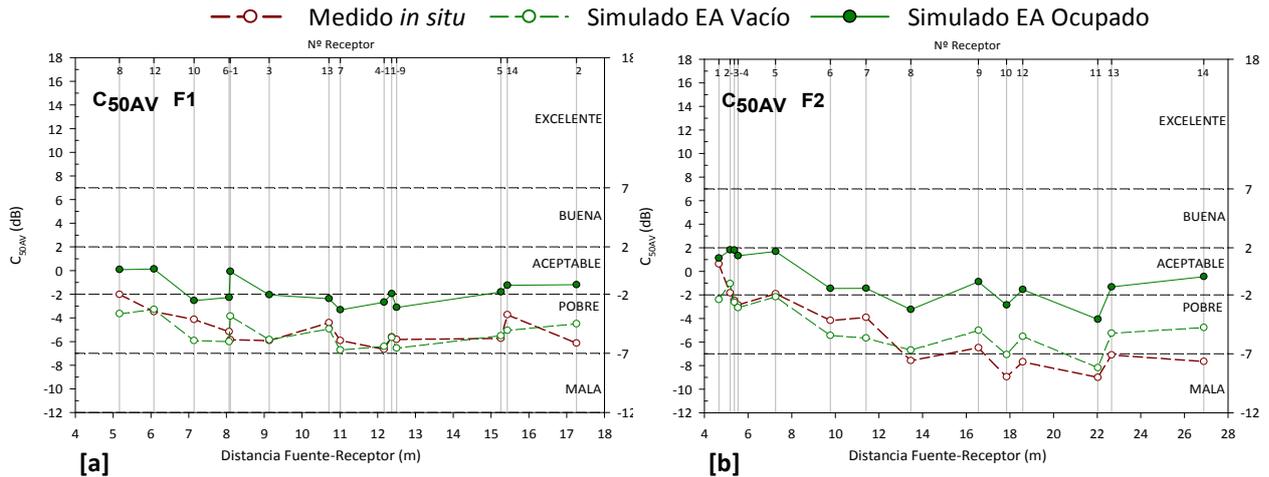


Figura 6.2.23. Claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Como en las magnitudes acústicas simuladas y analizadas anteriormente, los resultados de este parámetro mejoran cuando la iglesia está ocupada por los fieles, pudiendo calificarse la claridad para la palabra, para las dos fuentes, entre pobre y aceptable, según la escala de interpretación de Marshall (figuras 6.2.23 [a] y [b]).

Para la claridad musical (C_{80}), cuyos resultados promediados espacialmente frente a la frecuencia están representados en las figuras 6.2.24 [a] y [b], se obtienen buenas aproximaciones entre las medidas y los cálculos informáticos. Al igual que con el C_{50} , para la fuente situada en el altar (F1), las mayores diferencias se aprecian a las frecuencias de 125 Hz y 4000 Hz, y al situar la fuente junto al órgano (F2), es a frecuencias medias donde las diferencias son más acusadas, siendo, en ambos casos, inferiores a 2 JND. En cuanto a la dispersión espacial, vemos que presenta valores inferiores en los resultados de la simulación acústica que en los obtenidos en la medición *in situ*, y que son inferiores para la fuente 1 que para la fuente 2.

Los resultados promediados espectralmente, en función de la distancia fuente-receptor y para ambas posiciones de la fuente, tanto para el C_{80} (figuras 6.2.24 [c] y [d]) como para el $C_{80}(3)$ (figuras 6.2.24 [e] y [f]) y en la hipótesis de iglesia vacía, se obtienen resultados simulados y medidos muy parecidos, en casi todos los puntos de recepción, apreciándose las mayores diferencias en los receptores más alejados de la fuente situada a 1 m del órgano (F2). Ambos parámetros acústicos reflejan, que cuando la iglesia está ocupada mejora la claridad musical, pues para ambas posiciones de fuente y para todos los puntos de recepción, los resultados del C_{80} encuentran dentro del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. El $C_{80}(3)$ califica el recinto adecuado para la audición de música sinfónica, salvo para los puntos situados a menos de 8 m distancia de la fuente 2, donde el recinto es apropiado para un uso equivalente a música de ópera.

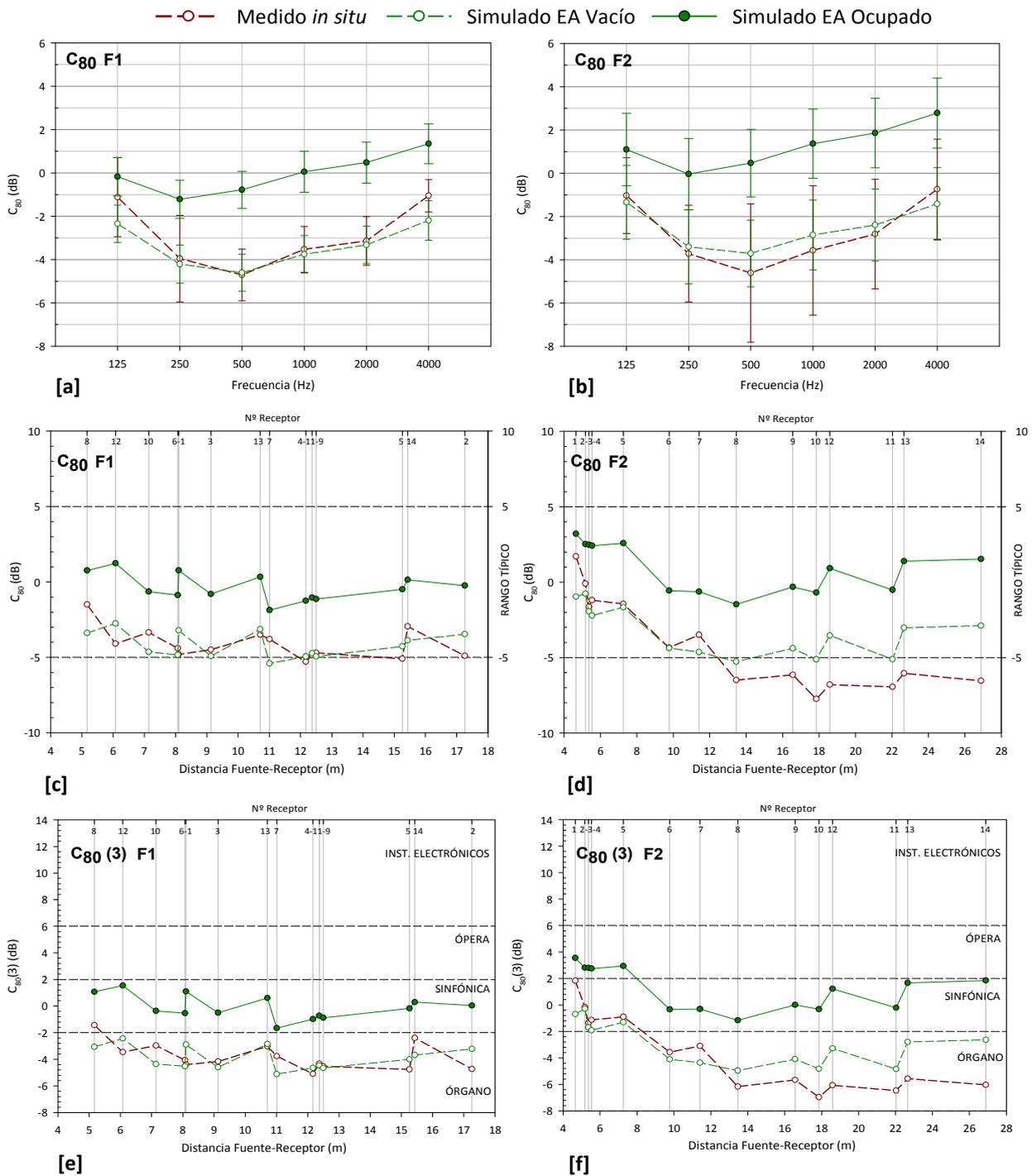


Figura 6.2.24. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Respecto al índice de transmisión de la palabra (STI), en la figura 6.2.25, se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente (F1) y receptor, junto con la escala de inteligibilidad subjetiva. Los resultados de la simulación en la configuración desocupada son parecidos a los resultados de la medida experimental, que en su conjunto permitan calificar la inteligibilidad de la sala como pobre 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 la totalidad de los fieles supone una mejora en la inteligibilidad, pasando a calificarse como aceptable.

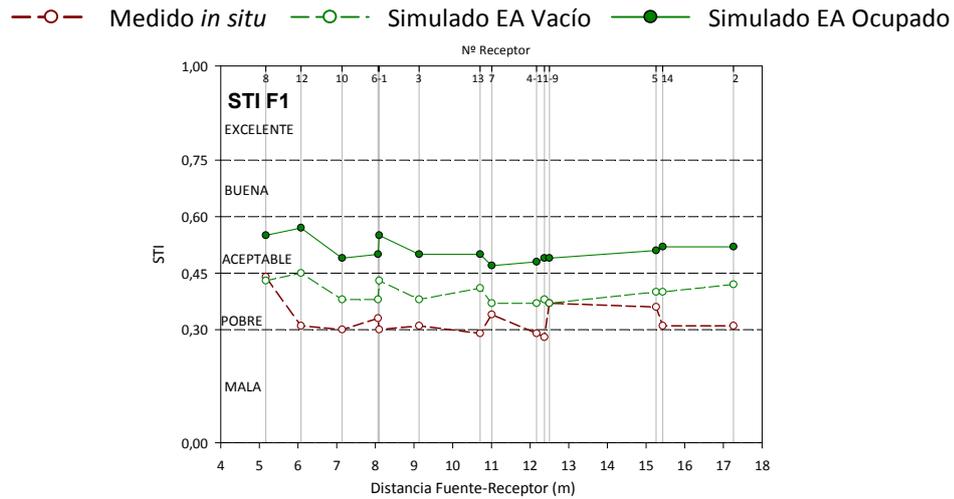


Figura 6.2.25. Índice de transmisión de la palabra STI, frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1.

Nivel sonoro subjetivo

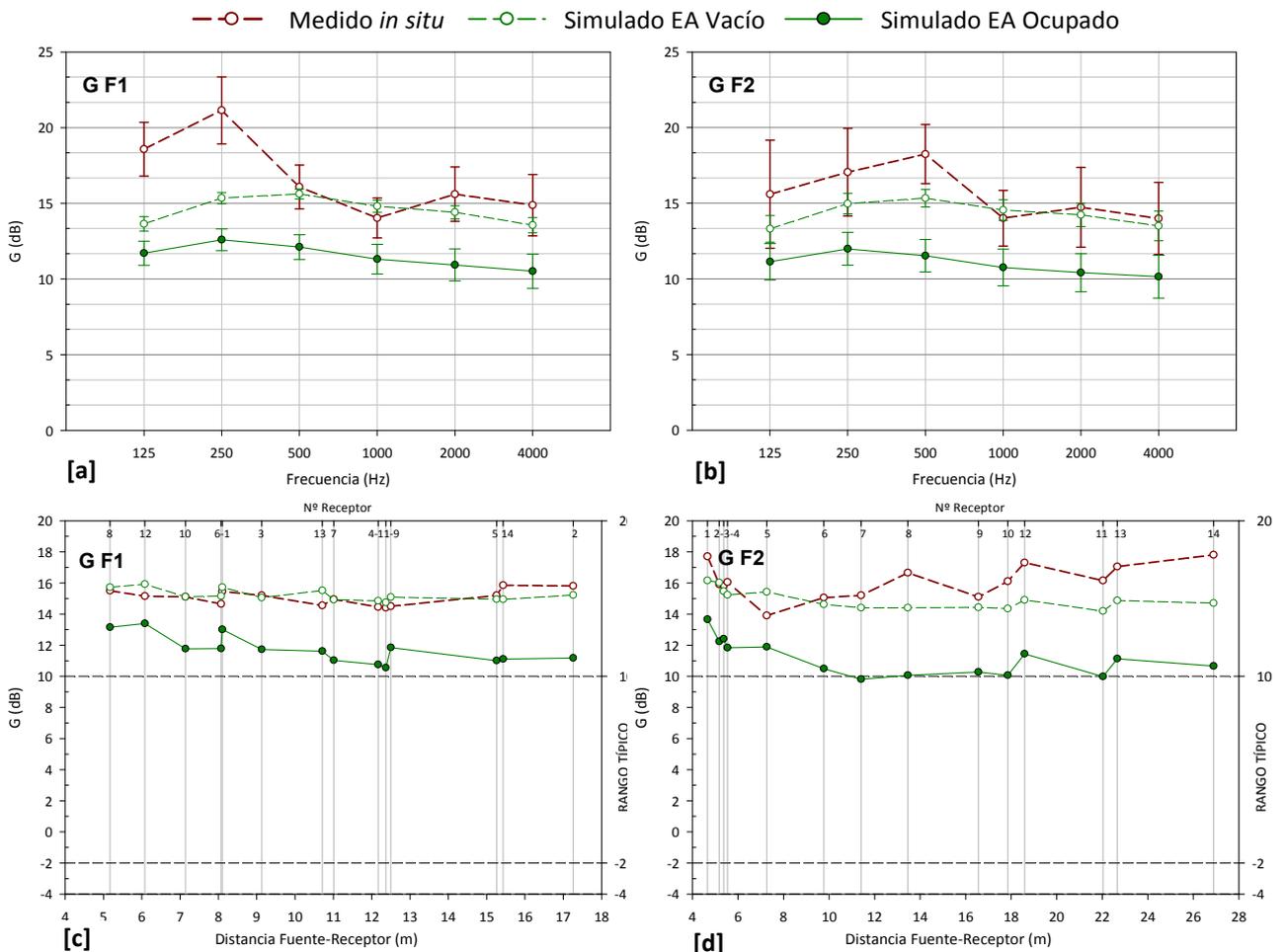


Figura 6.2.26. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Al igual que ocurría en la iglesia de Santa Ana y por los motivos expuestos en el apartado 6.1.2.3, para la fuerza sonora (G) de la iglesia, se obtienen aproximaciones inferiores a 2 JND entre los resultados simulados y medidos a partir de los 500 Hz, para ambas posiciones de fuente (figura 6.2.26 [a]).

En cuanto a los resultados de G , promediados espectralmente en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.2.26 [b]), las mejores aproximaciones entre valores simulados y medidos, se obtienen con la fuente en el altar.

Como en los anteriores parámetros acústicos, la presencia de los fieles en la iglesia mejora los resultados de la fuerza sonora.

Impresión espacial

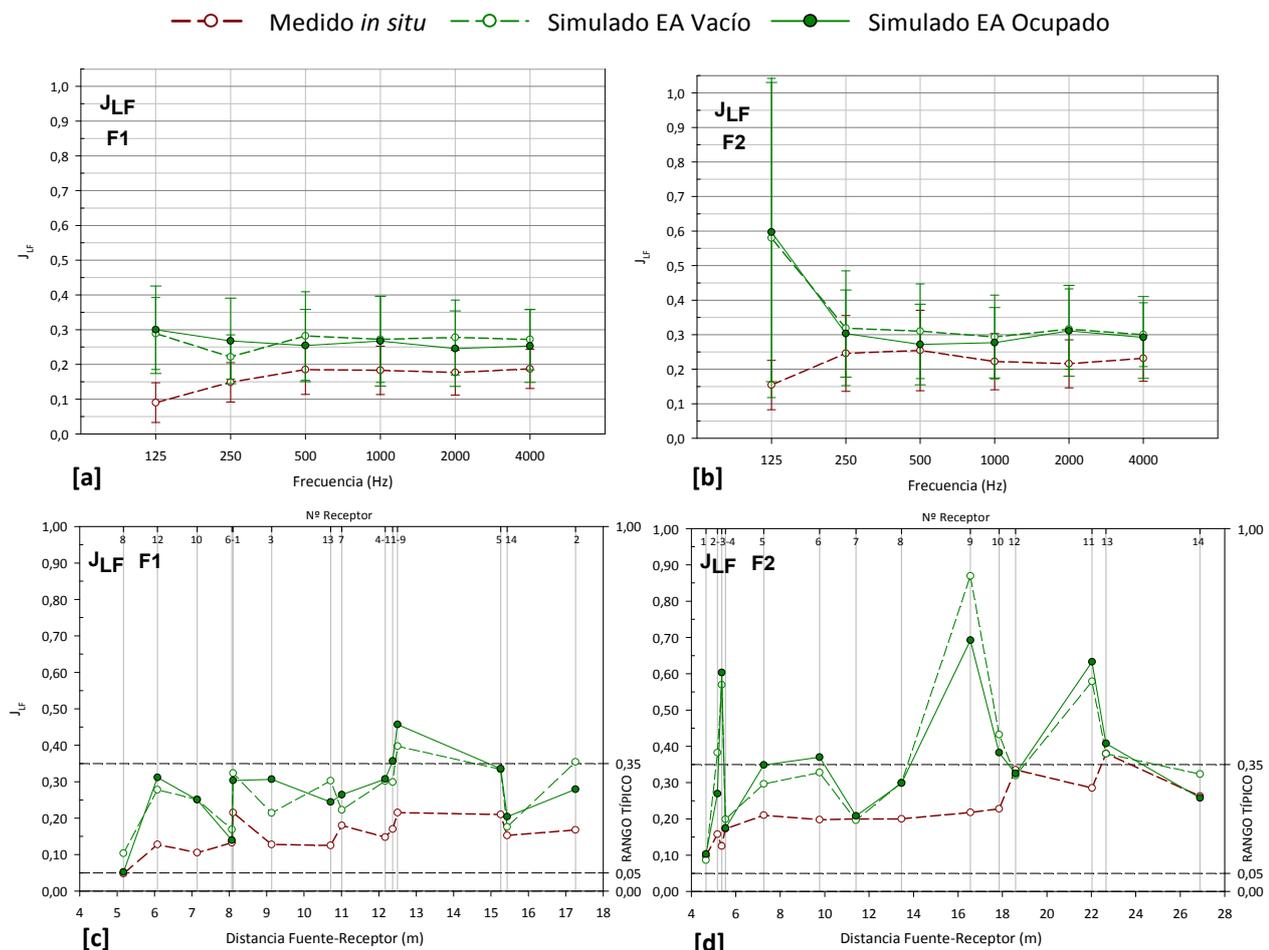


Figura 6.2.27. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Al igual que ocurría en la iglesia de Santa Ana, en este recinto eclesial los resultados simulados que menos se ajustan a los medidos *in situ*, los encontramos en los parámetros relacionados con el ancho aparente de la fuente, la envolvente y la audición binaural, representados aquí por J_{LF} e $IACC_E$. Las diferencias superan ligeramente 2 JND en la mayoría de bandas de octava analizadas (figura 6.2.27).

De nuevo, para la fracción de energía lateral precoz, las simulaciones informáticas proporcionan resultados similares en las configuraciones vacío y ocupado, distanciándose ambas sensiblemente de los resultados obtenidos en las medidas, quedando patente que se trata de uno de los parámetros acústicos más difícil de simular. Además, a diferencia de los parámetros analizado anteriormente, la desviación estándar para ambas fuentes es mayor en las simulaciones que en las mediciones *in situ*.

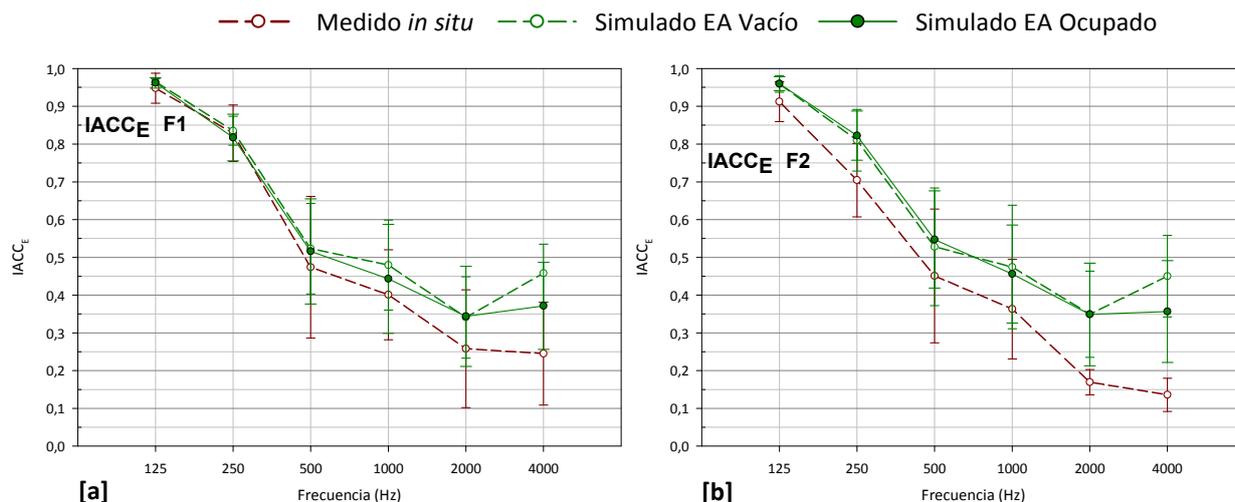


Figura 6.2.28. Coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

El análisis de las gráficas del coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACC_E$), representadas en la figura 6.2.28, indican que la información espacial está asociada a las medias y altas frecuencias, y al igual que ocurría con J_{LF} , los valores simulados se distancian de los obtenidos en las medidas a estas frecuencias, siendo a su vez parecidos los obtenidos con las simulaciones del recinto vacío y ocupado.

En cuanto a la dispersión espacial de este parámetro, destacar que para ambas fuentes y para la mayoría de las frecuencias, la desviación estándar es mayor en las medidas experimentales que en las simulaciones informáticas.

6.2.2.4. VALORACIÓN GLOBAL

Como conclusión de este análisis comparativo entre la medición *in situ* y las simulaciones informáticas, podemos decir que modelo informático tridimensional, sintonizado con el tiempo de reverberación (T_{30}) y con la fuente en posición coincidente con el altar, posee un comportamiento acústico muy similar al que posee realmente el recinto en su estado original.

En general, la posición de la fuente en el altar o junto al órgano no produce grandes diferencias significativas en los parámetros acústicos analizados. Los resultados de magnitudes acústicas relacionadas con la reverberación son indiferentes a la posición de la fuente; sin embargo, parámetros relacionados con la inteligibilidad de la palabra y la claridad del sonido percibida, presentan resultados algo mejores para la fuente situada junto al órgano (F2). En cuanto a la espacialidad del sonido, los valores de los parámetros de impresión espacial son más favorables para la fuente F2.

Según lo anterior, al incorporar al modelo ajustado la propuesta de rehabilitación acústica, únicamente se presentarán los resultados para una sola posición de fuente, ya que las conclusiones que se obtendrían, para ambas posiciones de la fuente, serían similares. En el caso de la iglesia que nos ocupa, el estudio se realizará para la fuente situada en el altar (F1), que además es la más representativa y habitual en el uso cotidiano del recinto.

Como estudio previo al planteamiento de la propuesta de rehabilitación acústica, se ha analizado el comportamiento de las ondas sonoras en el recinto, con el fin de evaluar la importancia relativa de las superficies implicadas al recibir los impactos de los rayos sonoros. Es de destacar que en esta iglesia, con acusada disposición asamblearia, cuando la fuente situada en el altar (F1), emite un sonido, las superficies que más impactos de ondas sonoras reciben, son el techo y la pared de fondo, formada por los *muros dispersivos*. La gran abertura de las paredes laterales, hace que en ellas se produzcan pocas reflexiones.

Al situar la fuente sonora junto al órgano (F2), de nuevo, las mayores aportaciones corresponden al techo y a la pared de fondo. En este caso, con la fuente en posición asimétrica en un lateral de la iglesia, el frente de ondas avanza en dirección casi perpendicular al eje de simetría de la iglesia.

En general, la capacidad de dispersión de rayos de dichos muros se aprecia beneficiosa para la audiencia de las últimas filas de bancos. Además, como veremos más adelante, la disposición asamblearia hace que la distribución espacial sobre la superficie de audiencia sea bastante homogénea y sin zonas de concentración de reflexiones.

6.2.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA

6.2.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

Para solventar las deficiencias acústicas detectadas en el análisis de las condiciones del estado actual de la iglesia, la intervención propuesta intentará alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Disminuir los elevados tiempos de reverberación actuales, para ajustarlos a los considerados como óptimos para los usos de palabra y música religiosa, consiguiendo, a su vez, mejorar otros parámetros acústicos como la inteligibilidad de la palabra y la claridad musical, reduciendo la energía de las reflexiones largas en los distintos puntos de recepción.
- Mantener la buena distribución sonora existente en el recinto.
- Lograr que la iglesia tenga un buen comportamiento sonoro, independientemente del grado de ocupación de la misma, de tal forma que su acústica no esté tan condicionada por el número de personas que la ocupen.
- Por la importancia de la inteligibilidad de la palabra en el recinto, proponer una instalación de megafonía, que mejore la inteligibilidad en el recinto.

Para conseguir estos objetivos específicos y los generales descritos en el apartado 5.6 del capítulo *Método de investigación*, en esta iglesia, se han realizado dos propuestas de rehabilitación acústica distintas, ambas consistentes en la introducción de una serie de revestimientos absorbentes, en zonas estratégicas desde el punto de vista acústico y arquitectónico, que permitirán comparar la influencia de determinados elementos constructivos, en el comportamiento acústico del recinto.

La descripción y la justificación de las dos propuestas se realiza a continuación, mientras que la disposición planimétrica de las distintas actuaciones de ambas opciones, se incluyen en el apartado 6.2.3.2.

Propuesta 1

La primera opción propone intervenir sólo sobre los muros dispersivos situados en la pared de fondo de la iglesia y sobre el respaldo de los bancos para los fieles. Las características de dichas actuaciones se describen a continuación:

- Mortero acústico sistema Baswaphon Fine espesor 70 mm, en muros dispersivos a partir de 2.10 m de altura. Hasta esta altura, coincidente con el dintel de las puertas de acceso y para facilitar el mantenimiento de la zona practicable por el público, se dispondrá lana mineral revestida con acabado de yeso, siendo el espesor total de esta capa, al igual que la de mortero acústico, de 70 mm. La actuación sobre estos elementos curvos se debe a la incidencia sobre la pared de fondo de gran cantidad de impactos de ondas y reflexiones tardías. El deterioro que el mortero acústico sufriría en las zonas bajas de los muros, a su vez, costoso y complicado de reparar, justifica la colocación de un zócalo con acabado de yeso convencional.
- Incorporación de absorción sonora en el respaldo en los bancos de madera, mediante un panel de madera de tipo ranurado (ranuras de 5 mm) de 18 mm de espesor, fieltro acústico, lana mineral de 50 mm de espesor y cámara de aire 30 mm de espesor (Marca: Gustafs, Modelo: Qs). En la parte posterior del respaldo, se dispone un panel de madera liso de 12,5

mm de espesor (figura 6.2.29). Como el comportamiento de la iglesia vacía difiere mucho del ocupado, con esta operación se dota de absorción sonora al propio banco, consiguiéndose que las condiciones acústicas no dependan tanto del estado de ocupación de la iglesia.

Propuesta 2

La segunda propuesta consiste en introducir materiales absorbentes en determinadas zonas o elementos constructivos como son el presbiterio, el techo, las piezas rectas de la pared de fondo de la iglesia y los bancos para los fieles.

Las características de dichas actuaciones se describen a continuación:

- Moqueta de lana 2,3 kg/m² en el suelo del presbiterio.
 - Panel acústico de lana de roca, de 30 mm de espesor, suspendido 10 cm en las franjas planas de las vigas hueso del techo (marca: Rockfon, modelo: Mono Acoustic TE 1200x1200x30 mm). Con esta operación de sustituir el panel de cartón-yeso existente, por un panel absorbente sonoro, que al descolgarse de las vigas, gana anchura y permite alojar el cableado existente de la instalación de iluminación, se aporta absorción sonora a una de las superficies que recibe más impactos de ondas sonoras.
 - Revestimiento de puertas de acceso con panel de madera de tipo ranurado (ranuras de 5 mm) de 18 mm de espesor, fieltro acústico, lana mineral de 50 mm de espesor y cámara de aire 30 mm de espesor (Marca: Gustafs, Modelo: Qs).
 - Panel acústico de lana de roca, de 30 mm de espesor, adosado a piezas de hormigón visto situadas entre las puertas de acceso y los huecos de iluminación natural.
- Con la introducción de estos dos últimos revestimientos se aporta absorción a la pared de fondo, con la intención de disminuir las reflexiones tardías provocadas con la gran cantidad de impactos de ondas.
- Nuevo respaldo en los bancos de madera, descrito en la primera opción 1 (figura 6.2.29).

6.2.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LA PROPUESTA

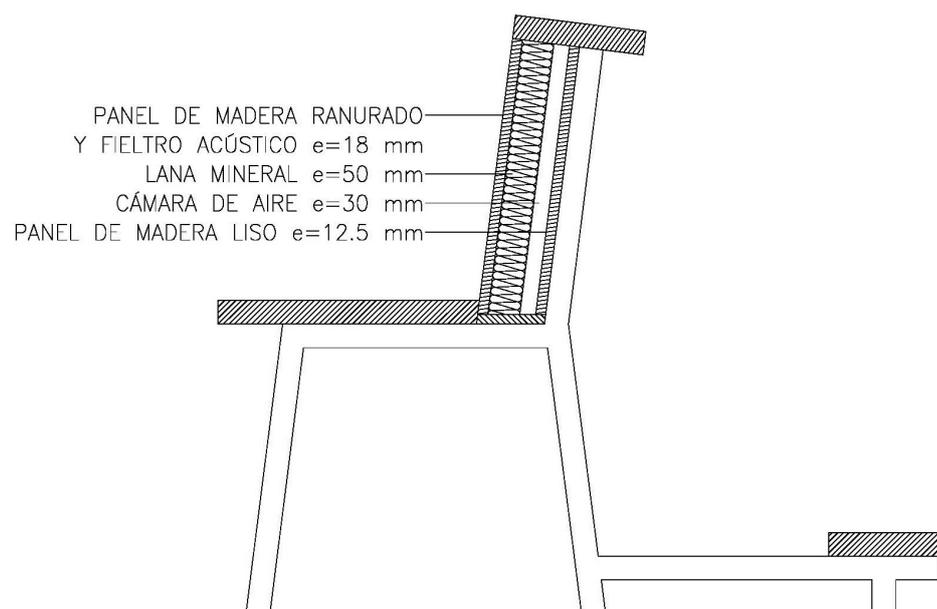


Figura 6.2.29. Sección del banco para las propuestas 1 y 2.

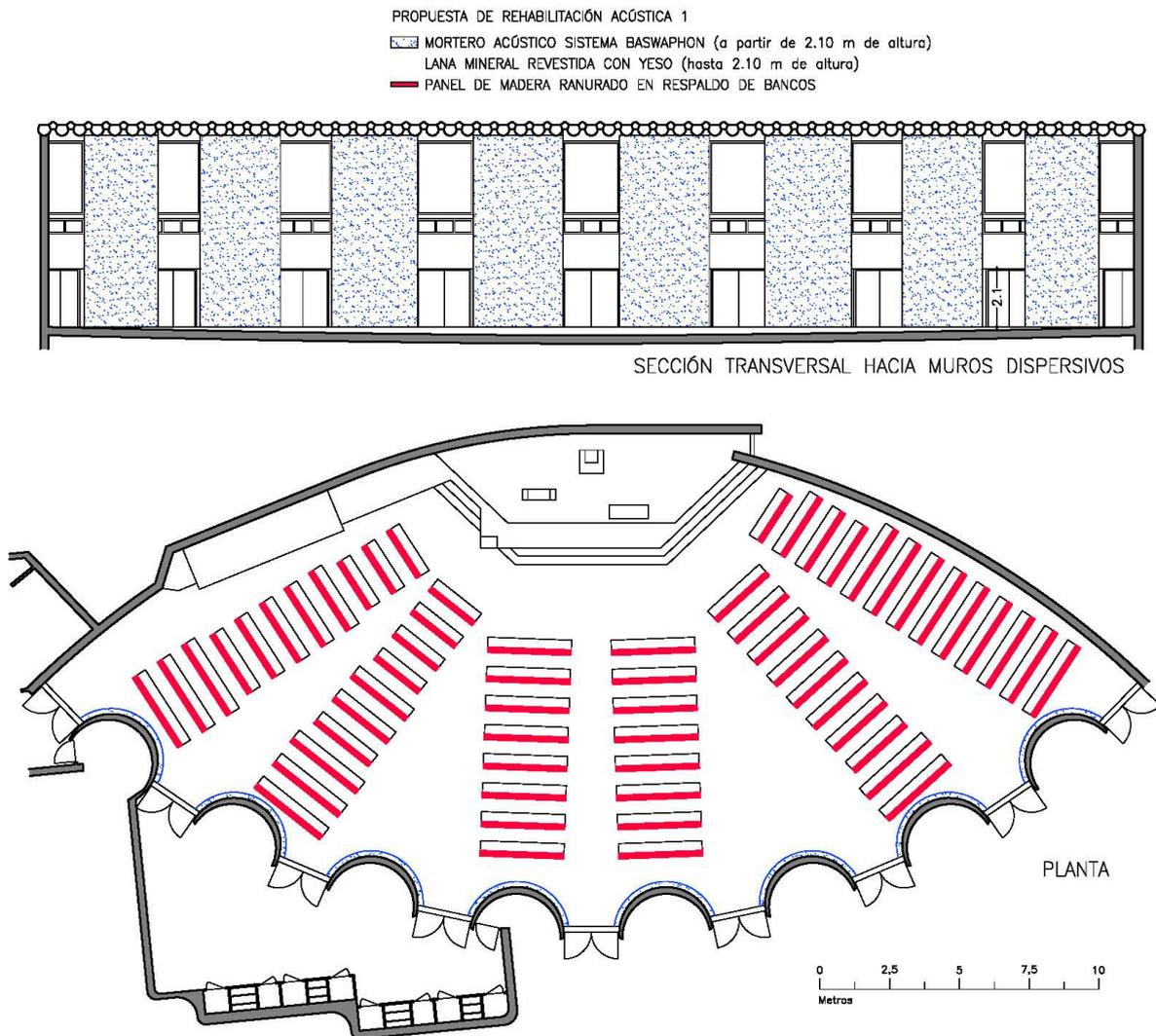


Figura 6.2.30. Planta y sección. Situación de materiales propuestos. Propuesta 1.

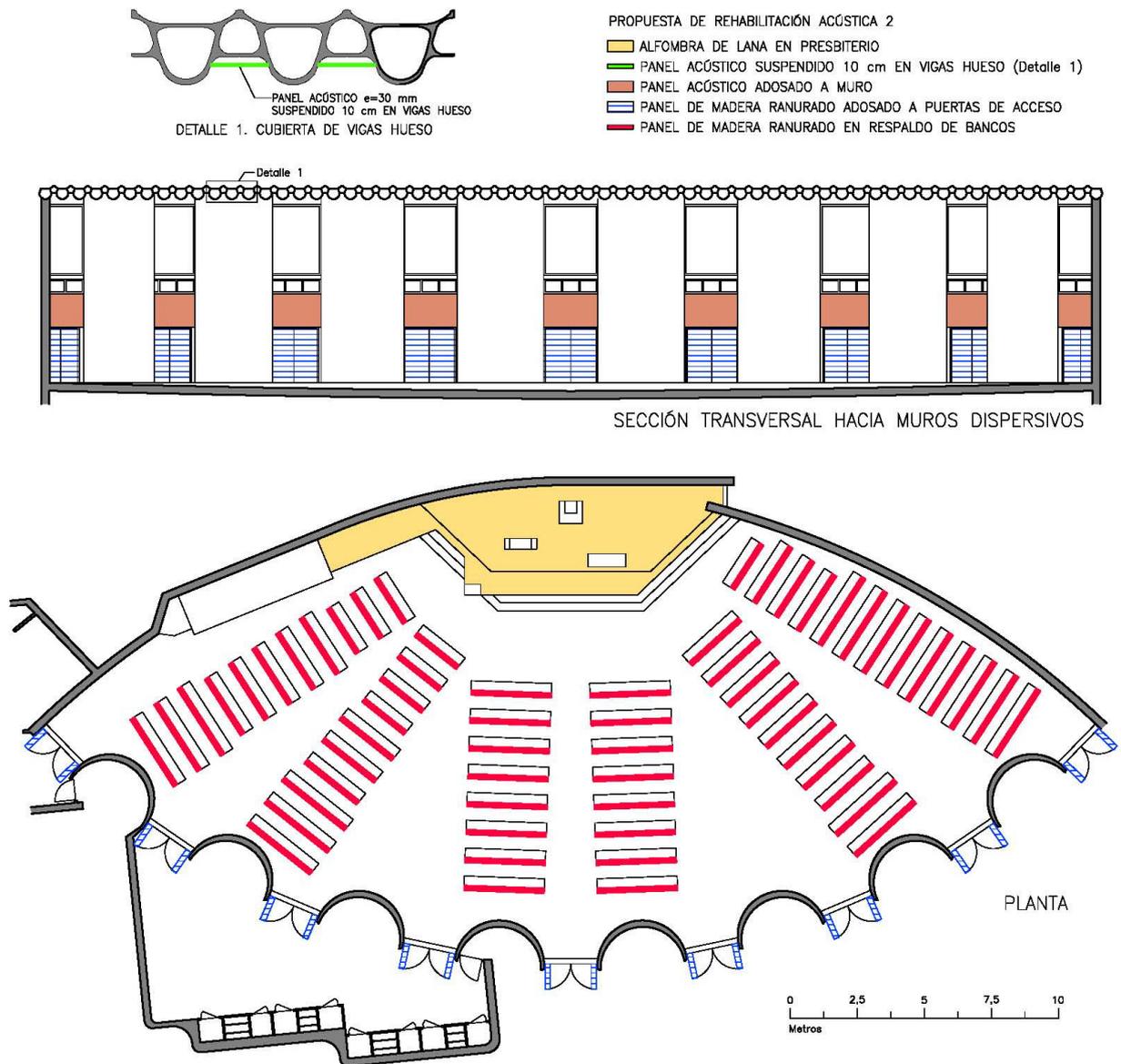


Figura 6.2.31. Planta y sección. Situación de materiales propuestos. Propuesta 2.

6.2.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO

En la figura 6.2.32, se muestra el modelo informático tridimensional del volumen interior de la iglesia, realizado con el programa *CATT-Acoustic v.8.0k*, en el que se han incorporado los elementos propuestos en la propuesta 1, para la rehabilitación acústica de la misma.

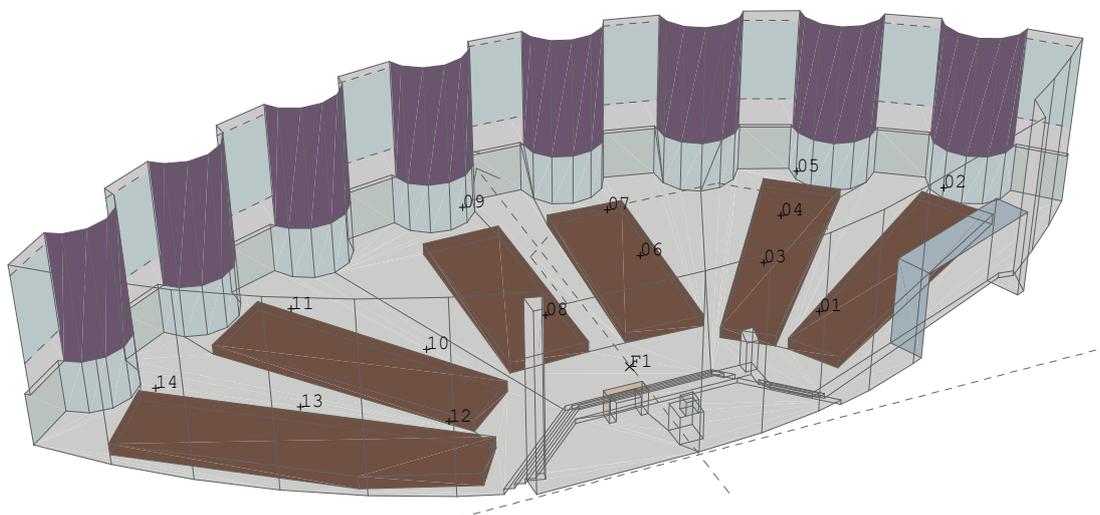


Figura 6.2.32. Modelo tridimensional de la iglesia con la propuesta de rehabilitación acústica 1.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores propuestos en la propuesta 1, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.2.16.

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
<i>Vigas hueso</i> de hormigón con panel de cartón-yeso	Techo	410,1	23,8
Hormigón visto	Paredes laterales y del presbiterio	346,9	20,1
Terrazo	Suelo	296,8	17,2
Banco de madera con respaldo de madera ranurado	Zona de audiencia	227,3	13,2
Mortero acústico <i>Sistema Baswaphon</i>	Pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	172,1	10,0
Yeso sobre lana mineral	Pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	79,0	4,6
Vidrio (en área grande)	Ventanas	68,8	4,0
Vidrio en <i>vigas hueso</i>	Lucernario presbiterio	39,4	2,3
Puerta de madera	Puertas de acceso	36,9	2,1
Panel de madera 10-13 mm con cámara 50-100 mm	Órgano	36,5	2,1
Granito	Altar, ambón, sede, base Sagrario	9,5	0,6
Tela de algodón	Altar	1,7	0,1
Metal	Paredes Sagrario	1,2	0,1
TOTAL REVESTIMIENTOS		1726,3	100

Tabla 6.2.16. Áreas de revestimientos. Las filas resaltadas corresponden a los materiales propuestos para la rehabilitación. Propuesta 1.

El modelo informático tridimensional del volumen interior de la iglesia, realizado con el programa *CATT-Acoustic v.8.0k*, correspondiente a la segunda propuesta de intervención, se muestra en la figura 6.2.33, donde se aprecia la incorporación de los nuevos materiales propuestos en esta opción, para la rehabilitación acústica de la iglesia.

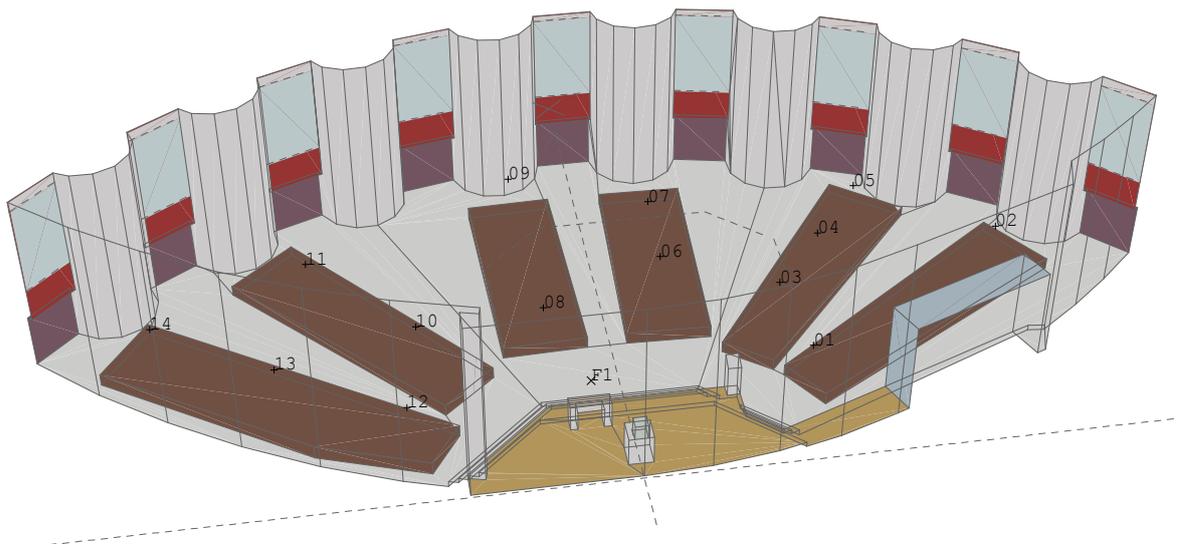


Figura 6.2.33. Modelo tridimensional de la iglesia con la propuesta de rehabilitación acústica 2.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores propuestos en la propuesta 2, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.2.17.

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
<i>Vigas hueso</i> de hormigón con panel absorbente	Techo	410,1	23,8
Hormigón visto	Paredes laterales y del presbiterio	323,3	18,7
Terrazo	Suelo	256,4	14,9
Hormigón visto	Pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	251,1	14,5
Banco de madera con respaldo de madera ranurado	Zona de audiencia	227,3	13,2
Vidrio (en área grande)	Ventanas	68,8	4,0
Moqueta de lana	Presbiterio	40,4	2,3
Vidrio en <i>vigas hueso</i>	Lucernario presbiterio	39,4	2,3
Panel de madera ranurado	Puertas de acceso	36,9	2,1
Panel de madera 10-13 mm con cámara 50-100 mm	Órgano	36,5	2,1
Panel de lana mineral adosado	Piezas de hormigón visto (entre puertas de acceso y ventanas)	23,6	1,4
Granito	Altar, ambón, sede, base Sagrario	9,5	0,6
Tela de algodón	Altar	1,7	0,1
Metal	Paredes Sagrario	1,2	0,1
TOTAL REVESTIMIENTOS		1726,3	100

Tabla 6.2.17. Áreas de revestimientos. Las filas resaltadas corresponden a los materiales propuestos para la rehabilitación. Propuesta 2.

Para la simulación de los nuevos modelos informáticos de las dos propuestas de rehabilitación, en las hipótesis de iglesia vacía y ocupada, se emplearon las condiciones de cálculo especificadas en la tabla 6.2.18.

IGLESIA DEL COLEGIO DE LA ASUNCIÓN CUESTABLANCA. MADRID

DATOS Y CONDICIONES DE CÁLCULO	
Algoritmo de cálculo	Nº2, cálculo completo, auralización detallada
Número de conos/rayos	30.000
Ecograma/respuesta al impulso	3 s
Densidad del aire	1,15 kg/m ³
Absorción del aire	Activada
Ruido de fondo	Según espectro medido <i>in situ</i>
Condiciones ambientales	30°C, 22%
Tiempo de cálculo	1 hora, 56 minutos (iglesia vacía)
Número de fuentes	1
Número de receptores	14
Número de planos	230

Tabla 6.2.18. Datos y condiciones de cálculo.

Los coeficientes de absorción y de dispersión sonora de los nuevos revestimientos propuestos en las opciones 1 y 2, introducidos en el programa informático para la simulación de las condiciones acústicas tras la rehabilitación, se presentan en las tablas 6.2.19 y 6.2.20, respectivamente.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DE LA PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA 1 (%)

REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Mortero acústico <i>Sistema Baswaphon</i>	α	35	92	83	72	63	59
	s	50	65	30	20	10	10
Yeso sobre lana mineral	α	14	10	6	4	4	3
	s	50	65	30	20	10	10
Banco de madera con respaldo ranurado (vacío)	α	24	37	37	38	36	32
	s	30	40	50	60	70	80

Tabla 6.2.19. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos introducidos en el recinto eclesial con la propuesta de rehabilitación acústica 1.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DE LA PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA 2 (%)

REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Moqueta de lana	α	17	18	21	50	63	83
	s	10	10	10	10	10	10
<i>Vigas hueso</i> de hormigón con panel absorbente	α	25	31	48	53	52	47
	s	15	15	20	20	25	25
Panel de madera ranurado (puertas acceso)	α	40	75	75	80	75	65
	s	10	10	10	10	10	10
Panel de lana mineral adosado (piezas hormigón)	α	20	50	99	99	99	99
	s	10	10	10	10	10	10
Banco de madera con respaldo ranurado (vacío)	α	24	37	37	38	36	32
	s	30	40	50	60	70	80

Tabla 6.2.20. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos introducidos en el recinto eclesial con la propuesta de rehabilitación acústica 2.

Los valores de los coeficientes de absorción y *scattering* de los materiales introducidos en el recinto eclesial han sido obtenidos de distintas fuentes publicadas internacionalmente reconocidas, así como de los propios fabricantes de los productos seleccionados (en el anexo 3 se muestra un listado completo de todos los coeficientes de los materiales utilizados en esta investigación, así como la fuente de donde se han obtenido). Los valores de los coeficientes de absorción correspondientes a revestimientos heterogéneos, como la cubierta de vigas hueso con el panel acústico o los bancos de madera con respaldo absorbente, han sido obtenidos analíticamente, a partir de las proporciones geométricas de los elementos que integran el conjunto. Los coeficientes de dispersión sonora de estas superficies son los mismos que los empleados para el ajuste del modelo informático (tabla 6.2.15)

6.2.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

En este apartado se analizan los resultados de los principales parámetros acústicos, para las dos propuestas de rehabilitación acústica planteadas. Para facilitar el análisis y la comparación de los resultados de ambas soluciones, las gráficas situadas en la columna izquierda muestran los valores correspondientes a la propuesta 1 (P1), y las gráficas de la columna derecha, los relativos a la propuesta 2 (P2). Sistemáticamente, las tablas y las gráficas de cada parámetro muestran los resultados de la medición realizada *in situ*, las simulaciones del estado actual (EA), en sus configuraciones de vacío y ocupado, así como los valores de las simulaciones de cada propuesta de rehabilitación acústica (RE), con la sala vacía y ocupada al 100%, correspondiendo todos estos resultados a la fuente en posición 1.

Reverberación

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T ₃₀ (s)	MEDIDO Vacío	2,98 0,12	4,11 0,06	4,48 0,05	3,75 0,03	3,30 0,03	2,53 0,02
	SIMULADO EA Vacío	2,95 0,01	4,11 0,01	4,37 0,00	3,72 0,01	3,39 0,01	2,65 0,01
	SIMULADO EA Ocupado	2,12 0,01	2,41 0,02	2,40 0,02	2,44 0,05	2,50 0,05	1,75 0,03
	SIMULADO RE Vacío P1	1,89 0,00	1,53 0,01	1,68 0,01	1,64 0,01	1,66 0,01	1,53 0,01
	SIMULADO RE Ocupado P1	1,57 0,01	1,36 0,03	1,39 0,02	1,39 0,03	1,37 0,03	1,18 0,02
	SIMULADO RE Vacío P2	2,34 0,01	1,83 0,01	1,63 0,04	1,63 0,05	1,64 0,05	1,26 0,03
	SIMULADO RE Ocupado P2	1,89 0,01	1,62 0,01	1,53 0,07	1,59 0,08	1,61 0,08	1,22 0,06
	Óptimo palabra	1,43	1,27	1,10	0,99	0,99	0,99
	Óptimo música	1,91	1,69	1,47	1,32	1,32	1,32
EDT (s)	MEDIDO Vacío	2,72 0,34	4,06 0,32	4,47 0,17	3,69 0,11	3,15 0,09	2,20 0,06
	SIMULADO EA Vacío	2,92 0,07	4,12 0,07	4,36 0,05	3,68 0,06	3,36 0,06	2,67 0,06
	SIMULADO EA Ocupado	2,03 0,06	2,38 0,07	2,21 0,07	1,98 0,09	1,85 0,09	1,51 0,06
	SIMULADO RE Vacío P1	1,86 0,07	1,50 0,09	1,65 0,08	1,61 0,08	1,64 0,07	1,53 0,07
	SIMULADO RE Ocupado P1	1,50 0,06	1,29 0,08	1,30 0,07	1,24 0,08	1,21 0,08	1,12 0,08
	SIMULADO RE Vacío P2	2,24 0,05	1,76 0,06	1,38 0,08	1,28 0,09	1,25 0,09	1,09 0,08
	SIMULADO RE Ocupado P2	1,76 0,05	1,53 0,06	1,20 0,08	1,12 0,11	1,09 0,12	0,95 0,09

Tabla 6.2.21. Valores del tiempo de reverberación T₃₀ (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

Como puede comprobarse en las gráficas de las figuras 6.2.34 [a] y [b], con las dos propuestas de rehabilitación se reducen notablemente los tiempos de reverberación del recinto, valorados con el T₃₀, tanto con la sala vacía como ocupada. Para la opción 1, en la hipótesis de sala ocupada, los tiempos de reverberación obtenidos, a casi todas las frecuencias, se encuentran dentro de la banda óptima delimitada por los valores recomendados para la palabra y música religiosa (figura 6.2.34 [a]). En la segunda propuesta (figura 6.2.34 [b]), los valores del T₃₀ obtenidos con la iglesia ocupada, se ajustan a los óptimos recomendados para la música religiosa, si bien, en esta opción 2, los resultados obtenidos a 1000 Hz y 2000 Hz se alejan de dichos óptimos algo más que en la propuesta 1.

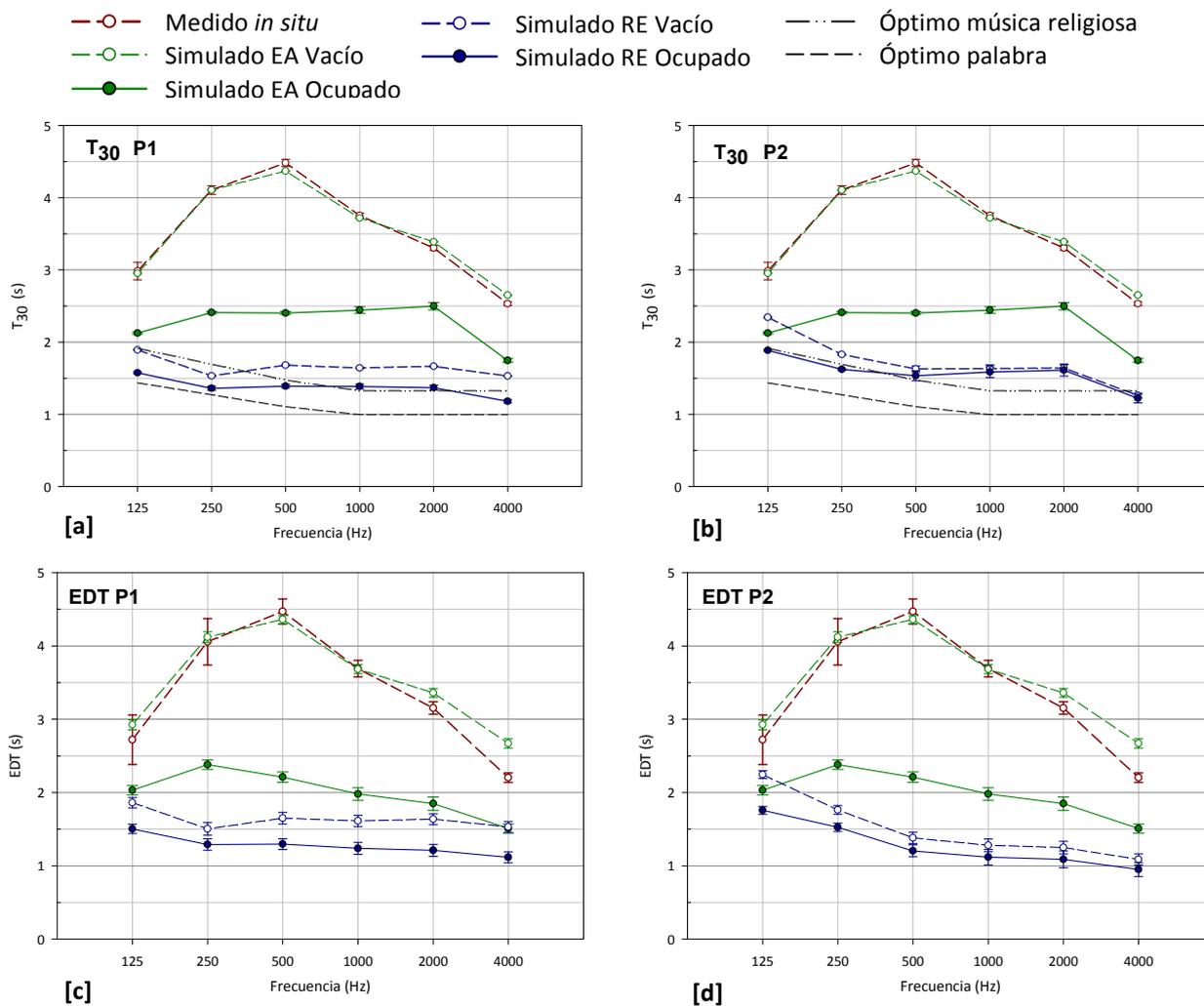


Figura 6.2.34. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

En ambas propuestas, los resultados de las simulaciones con la iglesia vacía son parecidos a los correspondientes a la iglesia ocupada, registrándose concretamente, para la opción 2 a medias y altas frecuencias, resultados casi coincidentes en ambas configuraciones.

En cuanto al EDT (figuras 6.2.34 [c] y [d]), destacar que en ambas propuestas y para las configuraciones de sala vacía y ocupada, los valores a las frecuencias medias son inferiores a 2,0 s, con lo que los resultados correspondientes al promediado en frecuencia de número único, en ambas opciones, se encuentran dentro del rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010 (entre 1,0 s y 3,0 s).

Como en el estado actual, al incorporar cada propuesta de rehabilitación acústica, la dispersión espacial en estos parámetros relacionados con la reverberación, es muy pequeña, tanto para la iglesia vacía como ocupada.

Al estudiar las posibles medidas correctoras a implementar en esta iglesia, vimos que una actuación factible podía ser aumentar la superficie de la audiencia, con lo que mejorarían los resultados del tiempo de reverberación, por el aumento de absorción sonora que representaba en la sala. Sin embargo, comprobamos que esta intervención, apenas mejoraba los valores del tiempo de reverberación, corroborando lo indicado en el apartado 6.2.2.4, acerca del análisis tridimensional sobre la trayectoria de las ondas sonoras en la iglesia, donde apuntábamos que el techo y la pared de fondo eran las superficies que más impactos de ondas sonoras recibían. Por tanto, las actuaciones

encaminadas a aportar absorción sonora a estas superficies serían decisivas para la disminución del tiempo de reverberación y, con ello, para la mejora de las condiciones acústicas en el recinto.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T _s (ms)	MEDIDO Vacío	176,07	281,29	310,43	253,00	219,79	151,93
		10,46	30,37	22,44	20,80	17,82	12,42
	SIMULADO EA Vacío	194,64	282,03	301,02	252,39	229,83	181,27
		15,54	18,08	17,17	16,62	16,02	14,39
	SIMULADO EA Ocupado	130,15	156,16	144,87	127,94	119,44	97,03
		13,66	14,48	14,14	14,97	15,01	12,14
	SIMULADO RE Vacío P1	119,34	93,95	106,34	104,46	106,86	99,14
		11,09	8,37	9,46	9,84	10,21	10,30
SIMULADO RE Ocupado P1	93,38	79,04	80,82	76,59	75,08	68,64	
	9,85	7,32	8,11	8,51	8,50	8,27	
SIMULADO RE Vacío P2	144,66	110,46	83,92	75,67	73,78	63,04	
	12,69	12,27	11,64	12,16	12,13	10,64	
SIMULADO RE Ocupado P2	110,67	94,05	71,71	64,43	62,33	52,74	
	13,19	12,65	12,25	12,80	12,71	10,94	

Tabla 6.2.22. Valores del tiempo central T_s (ms). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

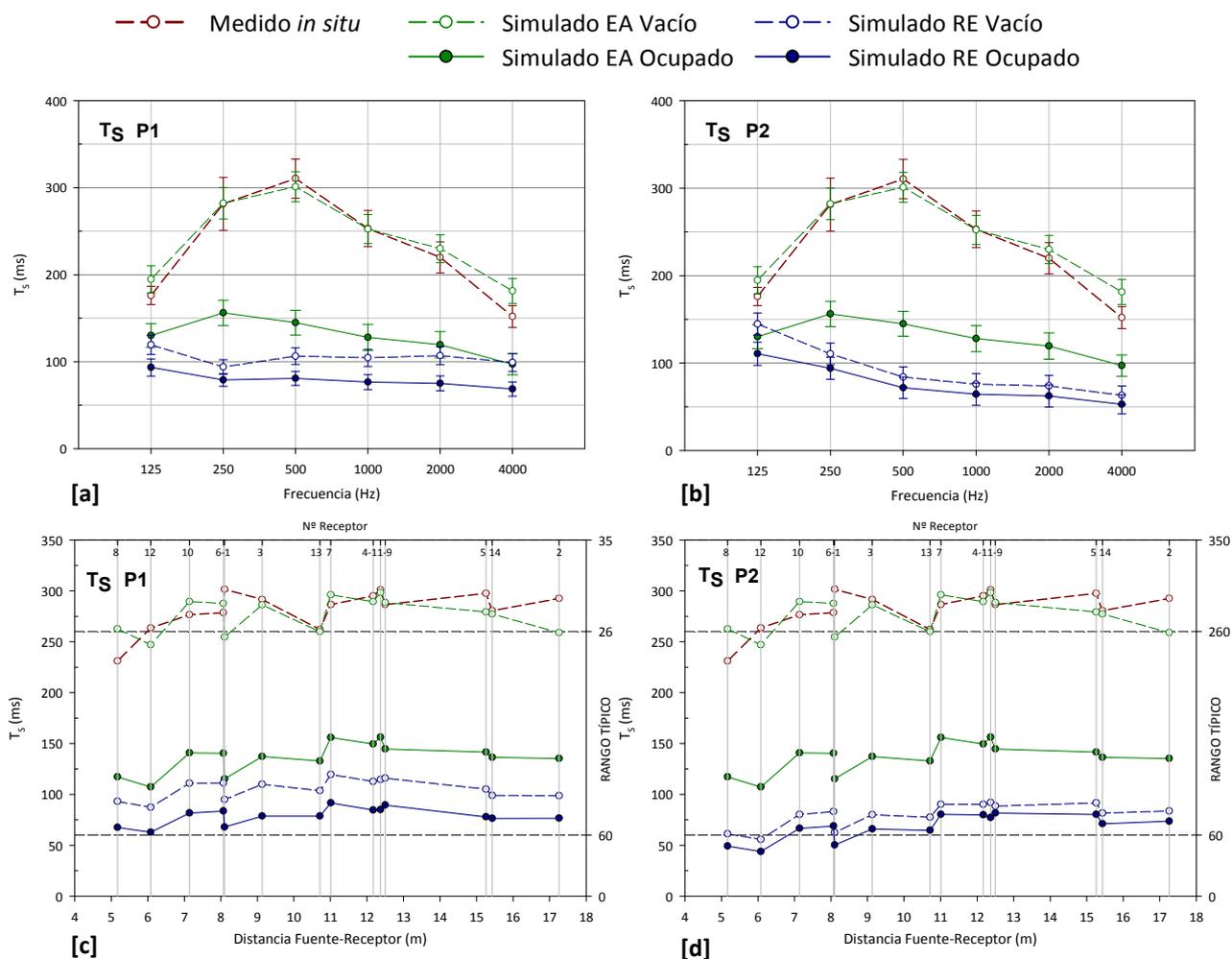


Figura 6.2.35. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

En las gráficas 6.2.35 [a] y [b], vemos que, al introducir las medidas correctoras de revestimientos en el recinto eclesial para las dos propuestas presentadas, los valores del tiempo central (T_s) disminuyen considerablemente, lo que refleja mayor nitidez en el sonido percibido.

Al representar los valores del tiempo central en cada punto de recepción (figuras 6.2.35 [c] y [d]), se aprecia que, para las configuraciones de iglesia vacía y ocupada, en las opción 1 y 2, prácticamente todos los resultados se encuentran dentro del intervalo establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. Para la opción 2, los resultados obtenidos en algunos puntos cercanos a la fuente sonora son ligeramente inferiores a los valores recomendados por la norma de referencia ya citada.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D ₅₀	MEDIDO Vacío	0,36	0,20	0,19	0,23	0,23	0,32
		0,10	0,10	0,06	0,06	0,06	0,06
	SIMULADO EA Vacío	0,28	0,20	0,19	0,22	0,23	0,28
		0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
	SIMULADO EA Ocupado	0,38	0,33	0,35	0,39	0,41	0,45
		0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06
	SIMULADO RE Vacío P1	0,40	0,47	0,42	0,42	0,41	0,43
		0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06
SIMULADO RE Ocupado P1	0,47	0,52	0,51	0,52	0,53	0,55	
	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	
SIMULADO RE Vacío P2	0,35	0,42	0,50	0,54	0,55	0,59	
	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,07	
SIMULADO RE Ocupado P2	0,42	0,47	0,55	0,60	0,61	0,65	
	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	

Tabla 6.2.23. Valores de la claridad para la palabra C₅₀ (dB) y la definición D₅₀. Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo) Fuente 1.

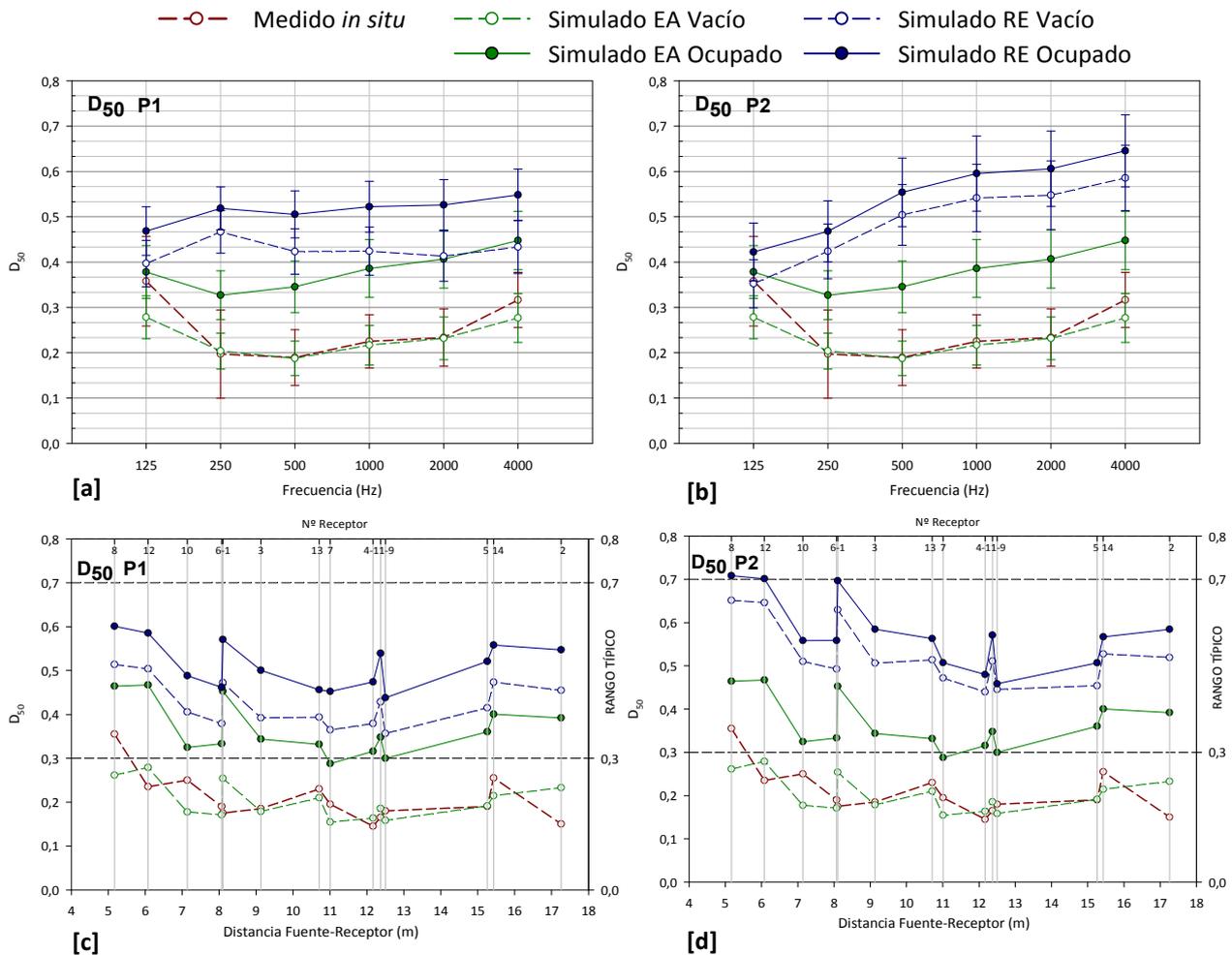


Figura 6.2.36. Definición D₅₀. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

El comportamiento espacial por banda de octava de la definición (D₅₀) es parecido (figuras 6.2.36 [a], [b]), lográndose con las dos intervenciones propuestas, una considerable mejora de sus valores. Para

la opción 1, los resultados obtenidos son similares para todas las frecuencias, mientras que para la opción 2, los valores van creciendo conforme aumentan las frecuencias. La dispersión espacial es mayor en las dos configuraciones de la opción 2.

Para el promedio espectral del D_{50} (figuras 6.2.36 [c] y [d]), para ambos estados de ocupación, prácticamente todos los valores se encuentra dentro del rango típico que recoge la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

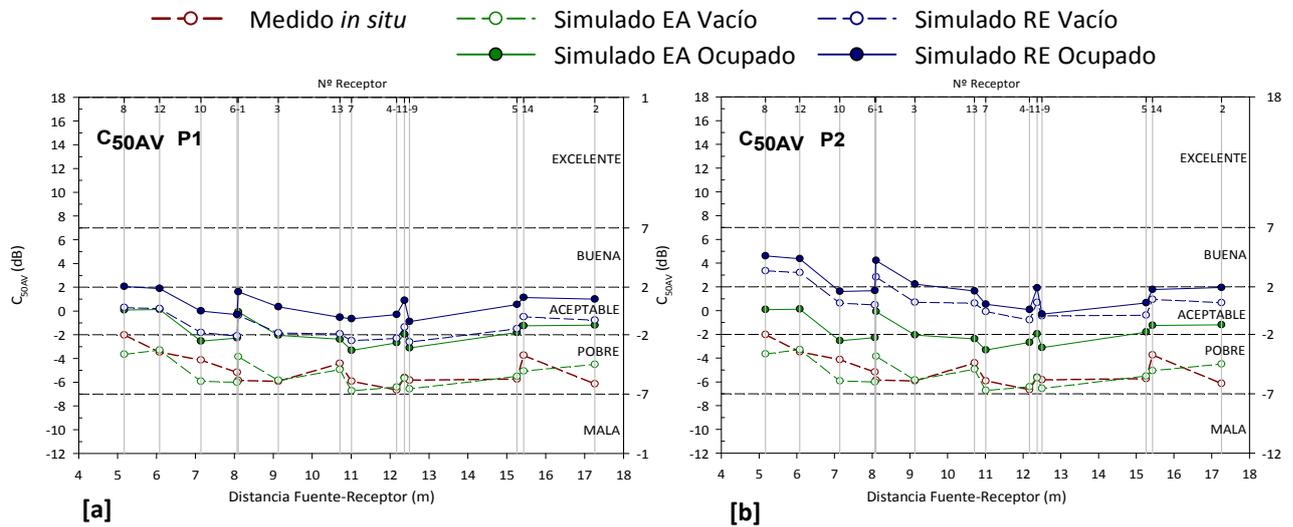


Figura 6.2.37. Claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica opciones 1 y 2. Fuente 1.

En cuanto a la representación de resultados en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor para el C_{50AV} , vemos que al introducir la primera propuesta de mejora, la escala de interpretación de Marshall, califica la claridad para la palabra, como aceptable, tanto para la iglesia vacía como ocupada (figura 6.2.37 [a]). Con la segunda propuesta, la claridad para la palabra se califica entre buena y aceptable (figura 6.2.37 [b]).

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C_{80} (dB)	MEDIDO Vacío	-1,12	-3,96	-4,71	-3,54	-3,14	-1,06
	SIMULADO EA Vacío	1,82	1,99	1,20	1,06	1,12	0,75
	SIMULADO EA Ocupado	-2,35	-4,21	-4,61	-3,76	-3,33	-2,19
	SIMULADO RE Vacío P1	-0,18	-1,22	-0,78	0,05	0,47	1,34
	SIMULADO RE Ocupado P1	0,89	0,88	0,85	0,95	0,95	0,92
	SIMULADO RE Vacío P2	0,17	1,53	0,75	0,83	0,67	1,10
	SIMULADO RE Ocupado P2	0,83	0,79	0,80	0,84	0,84	0,88
	SIMULADO RE Ocupado P2	1,60	2,57	2,37	2,73	2,84	3,36
		0,81	0,76	0,82	0,86	0,83	0,85
		-0,73	0,73	2,36	3,07	3,21	4,05
		0,80	0,87	0,97	1,13	1,14	1,17
		0,69	1,62	3,35	4,15	4,37	5,28
		0,98	1,02	1,20	1,39	1,43	1,44

Tabla 6.2.24. Valores de la claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

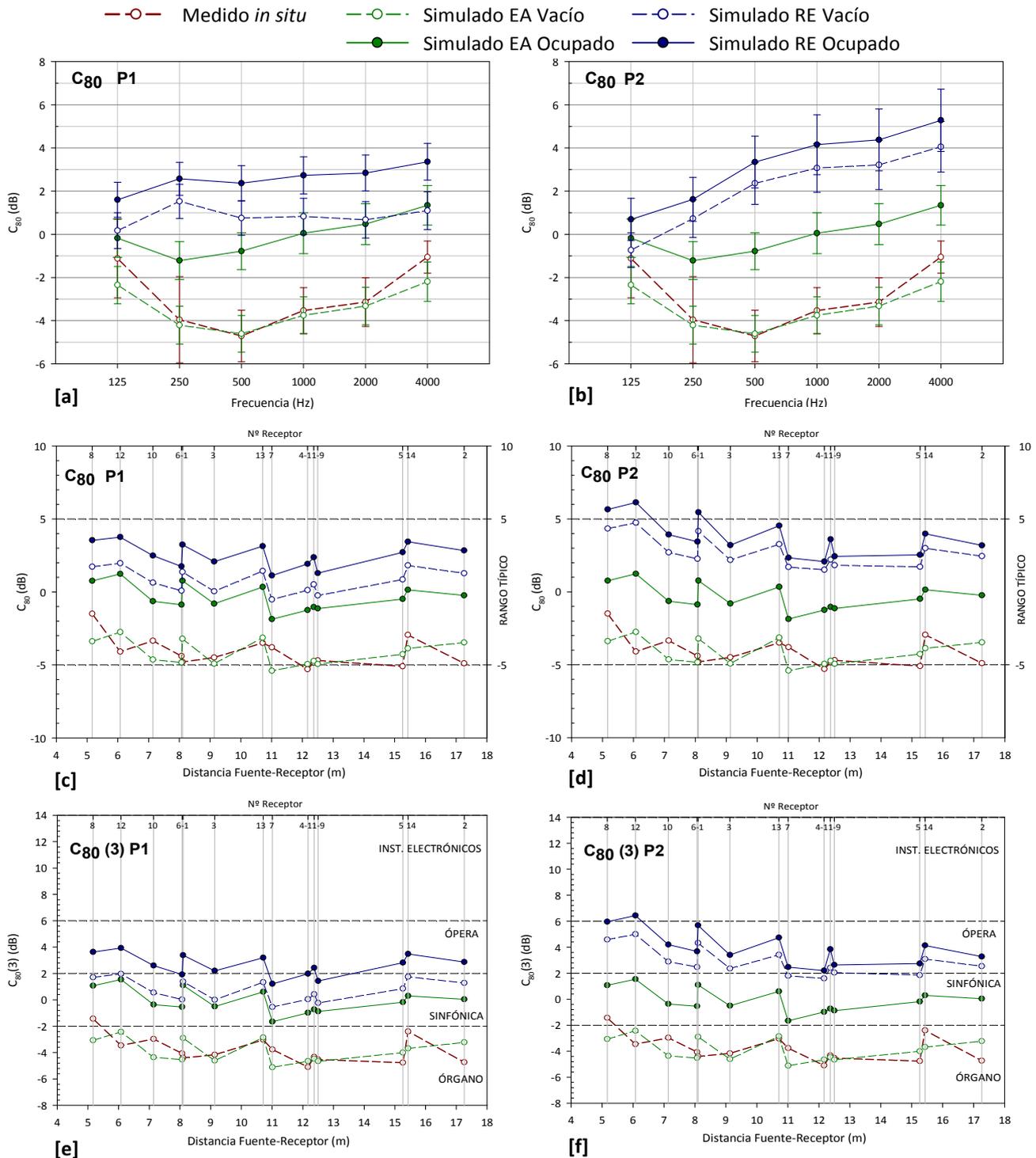


Figura 6.2.38. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

Al igual que los parámetros anteriores relacionados con la inteligibilidad de la palabra, las gráficas de la figura 6.2.38, reflejan que la propuesta de rehabilitación acústica mejora los resultados de la claridad musical (C_{80}). También en este parámetro, para la opción 1, los resultados obtenidos son similares para todas las frecuencias, mientras que para la opción 2, los valores van creciendo conforme aumentan las frecuencias. La dispersión espacial es mayor en las dos configuraciones de la opción 2 (figuras 6.2.38 [a] y [b]).

Los resultados del C_{80} obtenidos para las dos opciones (figuras 6.2.38 [c] y [d]), tanto para la iglesia vacía como ocupada, se encuentran dentro del rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO

3382-1:2010, a excepción de los valores correspondientes a los receptores situados en las primeras filas de la audiencia.

Los valores del $C_{80}(3)$, con la primera propuesta de actuación (figura 6.2.38 [e]), reflejan que para la iglesia vacía, el recinto es adecuado para la audición de música sinfónica, mientras que la presencia de los fieles hacen la iglesia apropiada para la ópera. Con la segunda propuesta de rehabilitación, tanto para la iglesia vacía como ocupada, los resultados del $C_{80}(3)$ indican que el recinto es óptimo para un uso equivalente a música de ópera (figura 6.2.38 [f]). Estos resultados favorables están relacionados con la disminución de los elevados tiempos de reverberación (figuras 6.2.34 [a] y [b]), y muestra la mejora conseguida en la claridad musical.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.2.39, se aportan los mapas de resultados de la claridad musical (C_{80}) global en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA) y tras las propuestas de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2), todos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente en posición 1, coincidente con el altar.

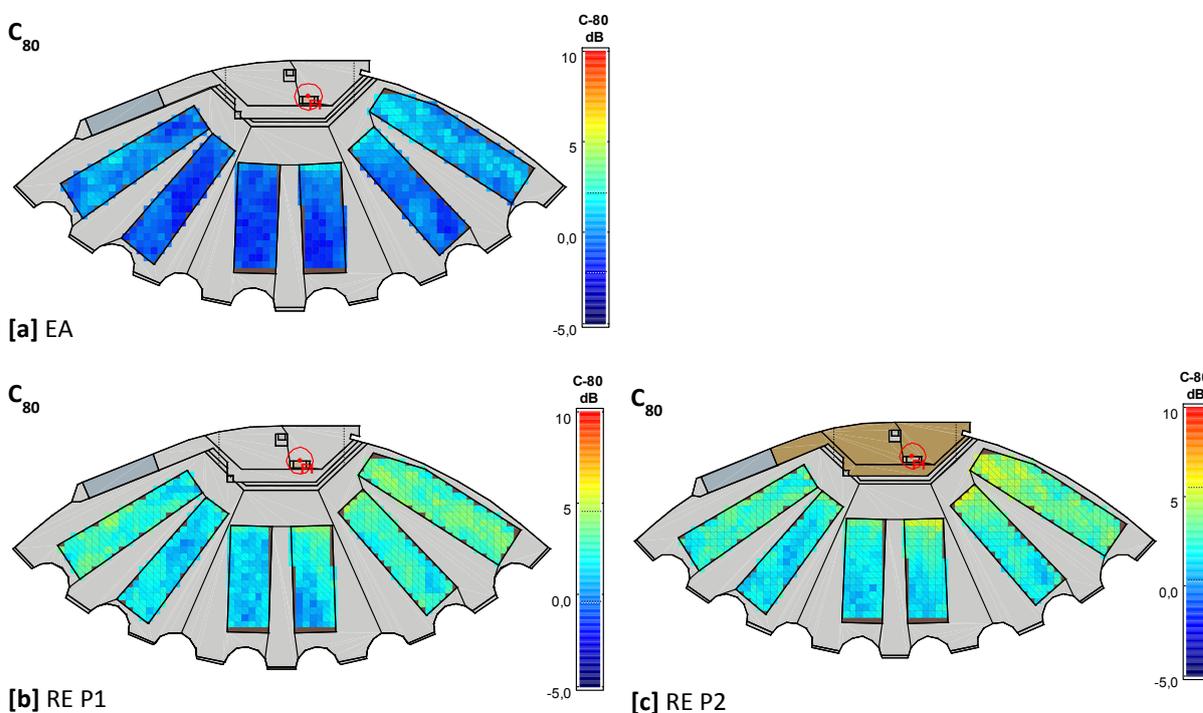


Figura 6.2.39. Claridad musical C_{80} global (dB). Simulaciones estado actual (EA) y propuestas de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2). Iglesia ocupada, fuente 1.

En el mapa de distribución espacial de la claridad musical (C_{80}), correspondiente a la simulación del estado actual (figura 6.2.39 [a]), se aprecia que los valores más elevados se registran en las franjas laterales de la audiencia y en la zona más cercana a la fuente sonora, mientras que los valores más bajos se concentran en las zonas traseras de los bancos centrales. Es de destacar, el efecto de la pared lateral derecha sobre los bancos más próximos, que al provocar pocas reflexiones tardías, hace que los valores de claridad musical sean los más elevados de la audiencia.

En las figuras 6.2.39 [b] y [c], vemos que al incorporar las medidas correctoras en las dos propuestas, los valores de la claridad musical aumentan sensiblemente, manteniendo una distribución espacial sobre la audiencia, similar a la anterior. El valor medio de C_{80} para las intervenciones 1 y 2 es de 2,26 dB y 2,58 dB, respectivamente, frente a -0,21 dB obtenido para el estado actual.

En general, podemos afirmar que los resultados de las magnitudes acústicas relacionadas con el aspecto subjetivo del oyente sobre claridad del sonido percibida, mejoran notablemente con las dos propuestas de rehabilitación acústica. Es de destacar, la sensible mejora de los parámetros

analizados cuando la iglesia está vacía, en comparación con los resultados tan desfavorables del estado actual, existiendo muy poca diferencia entre los resultados de las hipótesis de iglesia vacía y ocupada.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	MEDIDO Vacío	18,57	21,14	16,08	14,03	15,60	14,87
	SIMULADO EA Vacío	13,64	15,34	15,61	14,80	14,40	13,56
	SIMULADO EA Ocupado	0,48	0,36	0,33	0,40	0,44	0,51
	SIMULADO RE Vacío P1	11,70	12,59	12,11	11,31	10,92	10,51
	SIMULADO RE Vacío P1	0,79	0,72	0,82	0,98	1,06	1,13
	SIMULADO RE Ocupado P1	11,80	11,01	11,43	11,29	11,39	11,18
	SIMULADO RE Ocupado P1	0,80	1,10	1,01	0,99	0,94	0,94
	SIMULADO RE Ocupado P1	10,60	10,21	10,12	9,74	9,59	9,48
SIMULADO RE Vacío P2	1,04	1,27	1,29	1,39	1,40	1,37	
SIMULADO RE Ocupado P2	12,29	11,13	9,83	9,14	8,95	8,51	
SIMULADO RE Ocupado P2	0,59	0,84	1,15	1,27	1,30	1,37	
SIMULADO RE Ocupado P2	10,91	10,24	8,80	8,00	7,73	7,37	
SIMULADO RE Ocupado P2	0,90	1,09	1,48	1,67	1,75	1,81	

Tabla 6.2.25. Valores de la fuerza sonora G (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

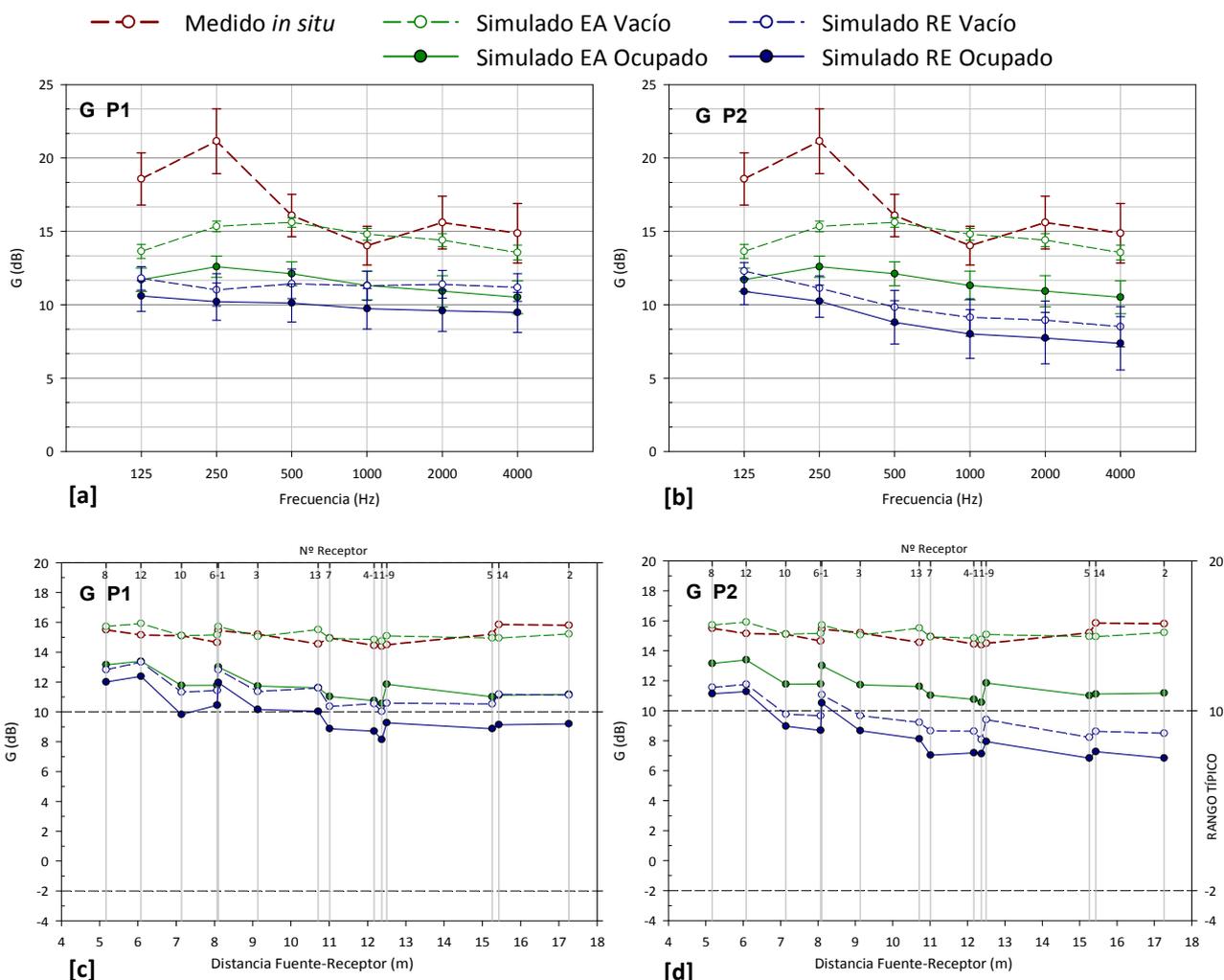


Figura 6.2.40. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

Las dos propuestas de rehabilitación acústica, tanto para la iglesia vacía como ocupada, disminuyen los valores de G medidos a todas las frecuencias, siendo esta disminución más acusada, a medias y altas frecuencias, para la propuesta 2 (figuras 6.2.40 [a] y [b]).

Las gráficas correspondientes al promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor (figuras 6.2.40 [c] y [d]), reflejan que, para la opción 1 con la iglesia ocupada, los resultados obtenidos en la mayoría de los puntos de recepción distribuidos en la zona de audiencia, sitúan los valores de G dentro del rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. Para la opción 2, casi la totalidad de los resultados obtenidos para la iglesia vacía y ocupada, se encuentran dentro del citado rango.

Los resultados favorables de la fuerza acústica (G), para las dos propuestas, están relacionados con la disminución del tiempo de reverberación y, en consecuencia, con la reducción del nivel del campo reverberante.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.2.41, se aportan los mapas de resultados de la fuerza sonora G global en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA) y tras la propuesta de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2), todos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente en posición 1, coincidente con el altar.

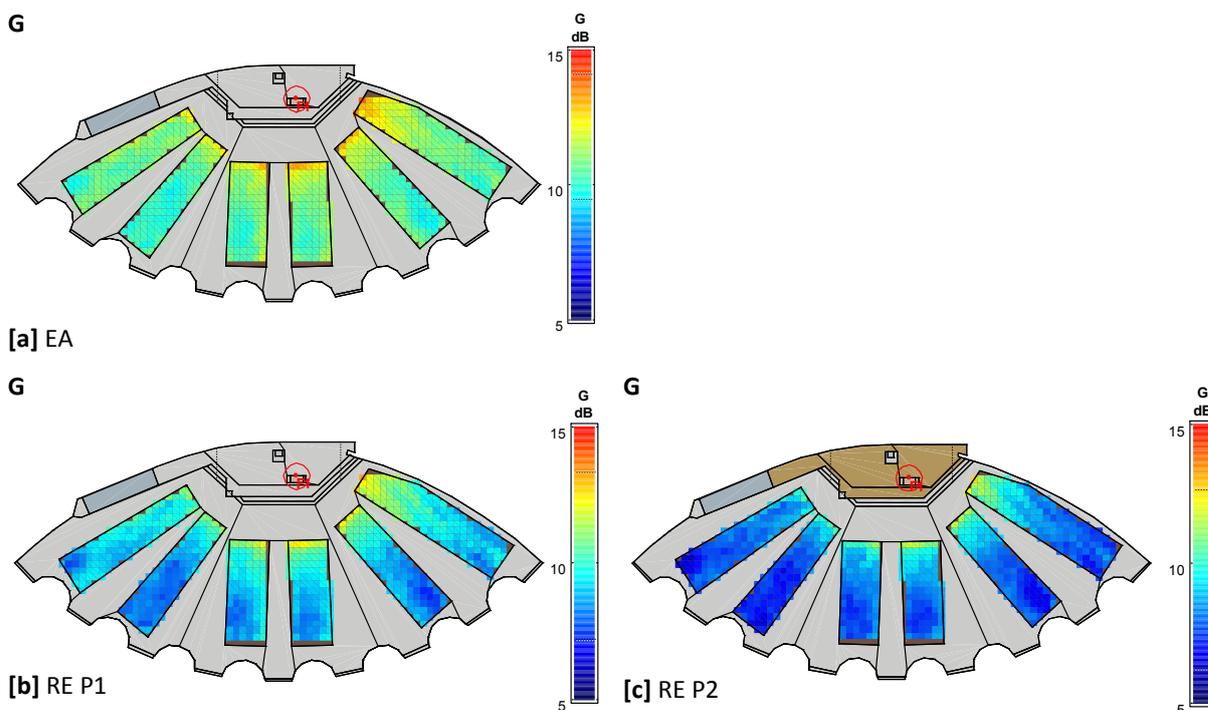


Figura 6.2.41. Fuerza sonora G global en dB. Simulaciones estado actual (EA) y propuestas de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2). Iglesia ocupada, fuente 1.

El mapa de distribución espacial de la fuerza sonora (G), correspondiente a la simulación del estado actual (figura 6.2.41 [a]), determina que el nivel del sonido es homogéneo sobre la superficie de audiencia, presentando un valor medio de 10,84 dB y una desviación estándar de 0,72 dB. Los valores más elevados se registran en las zonas más cercanas a la fuente sonora y los valores más bajos en las franjas más alejadas de la audiencia.

En las figuras 6.2.41 [b] y [c], vemos que al incorporar los materiales absorbentes en el recinto eclesial, al no tener tanta influencia el campo reverberado como en el caso anterior, los valores de G disminuyen sensiblemente, siendo esta disminución más acusada para la segunda propuesta de rehabilitación. Con la primera propuesta de rehabilitación acústica, el valor medio de la fuerza

acústica es 9,35 dB y la desviación estándar es 1 dB, mientras que para la segunda propuesta de rehabilitación acústica, el valor medio es 8,33 dB y la desviación estándar es 1,03 dB.

En ninguno de los estados analizados se observan zonas de concentración sonora o con deficiencia de nivel, lo que corrobora la idoneidad de las formas propuestas por Fisac así como el funcionamiento de sus *muros dispersivos*.

Impresión espacial

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
J_{LF}	MEDIDO Vacío	0,09 0,06	0,15 0,06	0,19 0,07	0,18 0,07	0,18 0,06	0,19 0,06
	SIMULADO EA Vacío	0,29 0,10	0,22 0,06	0,28 0,13	0,27 0,12	0,28 0,11	0,27 0,09
	SIMULADO EA Ocupado	0,30 0,13	0,27 0,12	0,25 0,10	0,27 0,13	0,25 0,11	0,25 0,10
	SIMULADO RE Vacío P1	0,28 0,13	0,21 0,08	0,22 0,08	0,23 0,09	0,22 0,09	0,24 0,11
	SIMULADO RE Ocupado P1	0,29 0,13	0,20 0,09	0,20 0,07	0,22 0,12	0,22 0,11	0,21 0,08
	SIMULADO RE Vacío P2	0,31 0,12	0,23 0,11	0,24 0,11	0,23 0,11	0,23 0,11	0,22 0,09
	SIMULADO RE Ocupado P2	0,34 0,13	0,23 0,12	0,21 0,09	0,22 0,14	0,21 0,11	0,21 0,13
	$IACC_E$	MEDIDO Vacío	0,95 0,04	0,83 0,08	0,47 0,19	0,40 0,12	0,26 0,16
SIMULADO EA Vacío		0,97 0,01	0,84 0,04	0,52 0,12	0,48 0,12	0,34 0,11	0,46 0,08
SIMULADO EA Ocupado		0,96 0,01	0,82 0,06	0,52 0,14	0,44 0,14	0,34 0,13	0,37 0,12
SIMULADO RE Vacío P1		0,97 0,01	0,85 0,06	0,58 0,12	0,50 0,13	0,36 0,13	0,44 0,10
SIMULADO RE Ocupado P1		0,97 0,01	0,86 0,05	0,59 0,09	0,49 0,13	0,36 0,13	0,41 0,10
SIMULADO RE Vacío P2		0,96 0,01	0,85 0,06	0,58 0,13	0,52 0,11	0,38 0,16	0,46 0,11
SIMULADO RE Ocupado P2		0,97 0,01	0,84 0,06	0,62 0,13	0,51 0,15	0,40 0,14	0,42 0,11

Tabla 6.2.26. Valores de la fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

Los resultados de los parámetros relacionados con la impresión espacial, fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACC_E$) indican que tras ambas intervenciones acústicas, el oyente sigue manteniendo condiciones de impresión espacial similares a las del estado actual.

Los resultados obtenidos para J_{LF} , con las dos propuestas de mejora, son muy similares. En ambos casos, para las configuraciones de iglesia vacía y ocupada, se reducen ligeramente los valores obtenidos con las simulaciones informáticas del estado actual, ya que la introducción de materiales absorbentes en la sala disminuye las reflexiones en el recinto (figuras 6.2.42 [a] y [b]). Para ambas propuestas, el rango de valores de J_{LF} corresponde a una adecuada amplitud de la fuente sonora.

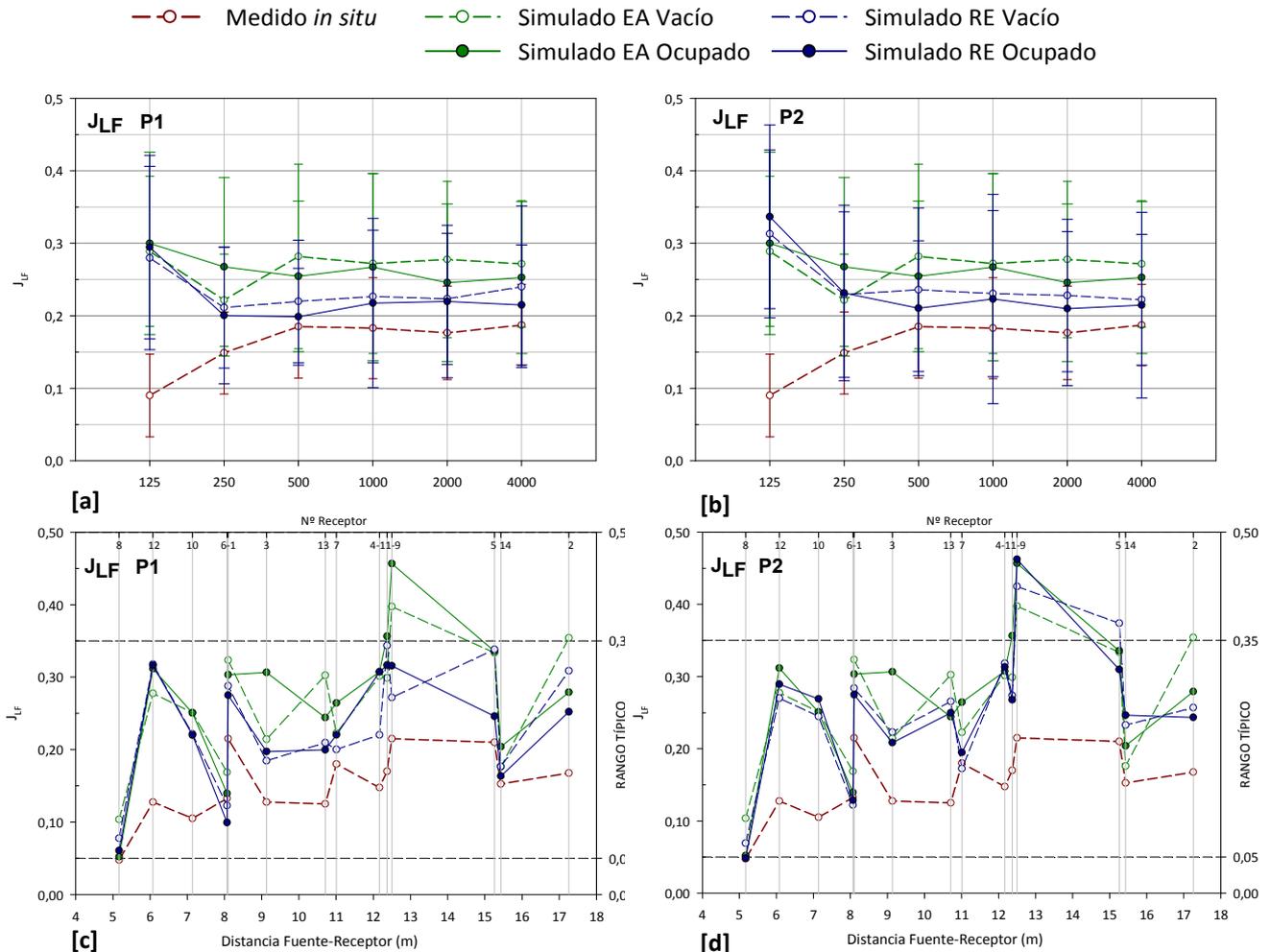


Figura 6.2.42. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

En el promediado espectral de la fracción de energía lateral precoz, representado en la figura 6.2.42 [c] para la propuesta 1 y en la figura 6.2.42 [d] para la propuesta 2, de nuevo vemos que las diferencias entre los resultados de los distintos puntos de recepción distribuidos por la zona de audiencia son muy elevadas. Los resultados más elevados corresponden a puntos cercanos a paramentos y los más bajos a los situados en el centro de la audiencia.

La distribución espacial de la fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) global sobre la superficie de la audiencia, muestra resultados muy similares tanto en el estado actual (figura 6.2.43 [a]) como con las dos propuestas de rehabilitación (figuras 6.2.43 [b] y [c]). La forma geométrica de la sala y la acusada disposición asamblearia, sin paredes laterales que generen reflexiones cortas, hace que los valores más bajos se registren en las zonas delanteras centrales de la audiencia y los valores más altos en las zonas traseras de la audiencia próxima a los *muros dispersivos*. A su vez, las franjas de audiencia situadas a la izquierda, cercanas al órgano, presentan resultados más altos que las franjas simétricas a las anteriores, situadas a la derecha del recinto.

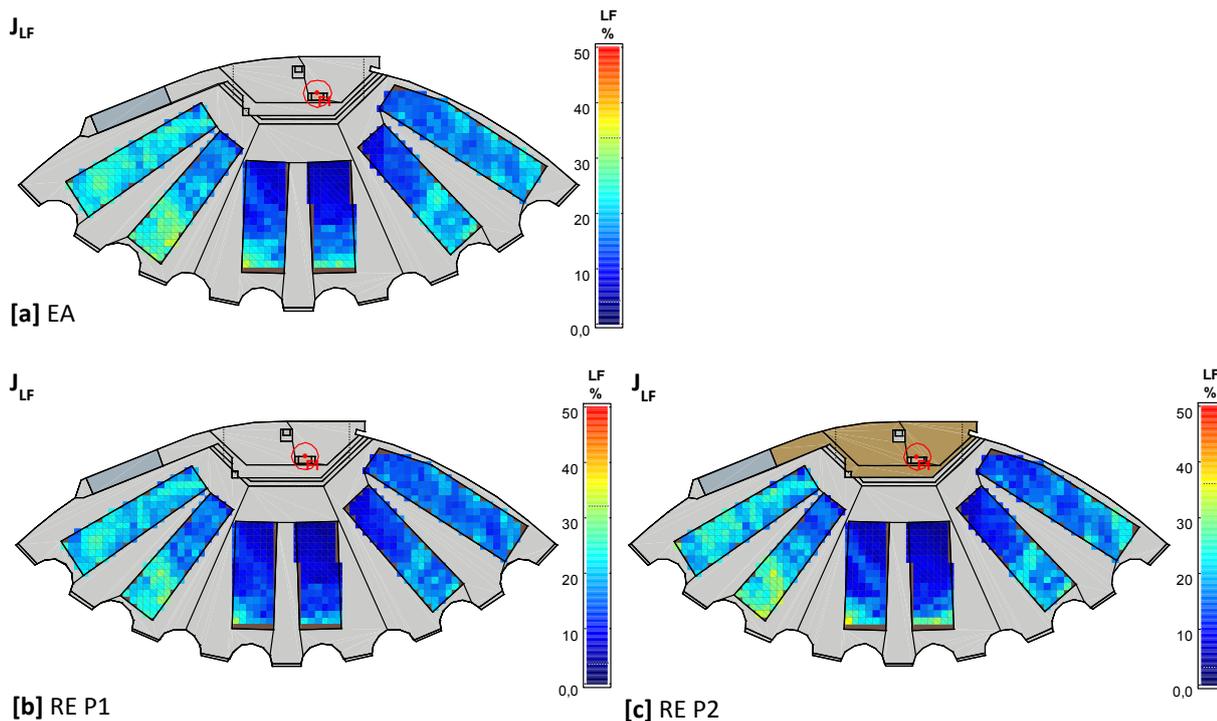


Figura 6.2.43. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} global (%). Simulaciones estado actual (EA) y propuestas de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2). Iglesia ocupada, fuente 1.

Al introducir las dos propuestas para la mejora acústica, los resultados de este parámetro siguen una distribución similar a la del estado actual sobre el área de audiencia, si bien, para la propuesta 1, los valores bajan ligeramente respecto a los simulados en el estado actual, mientras que, en la propuesta 2, los valores máximos aumentan ligeramente (figuras 6.2.44 [b] y [c]). En concreto, los valores medios registrados para el estado actual y las propuestas 1 y 2 son 17,43%, 15,48% y 16,16%, respectivamente.

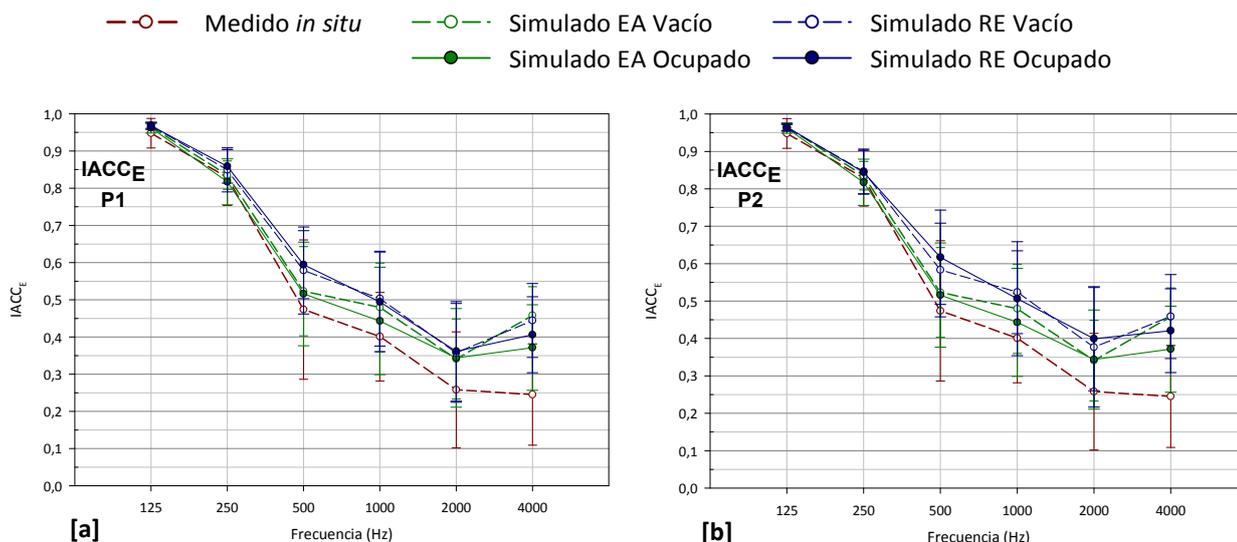


Figura 6.2.44. Coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACCE$. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

En cuanto al coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACCE$), representado en las figuras 6.2.44 [a] y [b]), los resultados obtenidos con las dos propuestas de mejora, son muy similares y, a su vez, en cada propuesta, los resultados entre iglesia vacía y ocupada son muy parecidos. Además, los

resultados son análogos a los del estado actual para casi todas las frecuencias, con diferencias inferiores a 1 JND.

Apoyándonos en los motivos expuestos en el análisis de los parámetros de impresión espacial de la iglesia de Santa Ana, y considerando la dificultad para simular informáticamente dichos parámetros, podemos admitir que tras las propuestas de rehabilitación, se mantienen en el recinto una sensación de sonido envolvente y una adecuada amplitud de la fuente sonora, similares a las medidas experimentalmente.

6.2.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)

Con el fin de evaluar los resultados de la inteligibilidad de la iglesia, en la tabla 6.2.27 y en las figuras 6.2.45 [a] y [b], se presentan los valores obtenidos del *Speech Transmission Index* (STI). Junto a las hipótesis estudiadas anteriormente para el resto de parámetros acústicos, se aportan, además, los resultados correspondientes a las simulaciones de las propuestas de rehabilitación acústica 1 (P1) y 2 (P2), con apoyo electroacústico (AE) vacío y ocupado, ofreciéndose los datos registrados en los catorce puntos de recepción, frente a la distancia fuente-receptor. En la representación gráfica, los valores se contrastan con la escala de inteligibilidad subjetiva.

CONFIGURACIÓN		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
STI	MEDIDO Vacío	0,19	0,20	0,25	0,22	0,21	0,26	0,27	0,36	0,25	0,22	0,21	0,21	0,21	0,23
	SIMULADO EA Vacío	0,43	0,42	0,38	0,37	0,40	0,38	0,37	0,43	0,37	0,38	0,38	0,45	0,41	0,40
	SIMULADO EA Ocupado	0,55	0,52	0,50	0,48	0,51	0,50	0,47	0,55	0,49	0,49	0,49	0,57	0,50	0,52
	SIMULADO RE Vacío P1	0,56	0,55	0,52	0,52	0,54	0,52	0,51	0,57	0,51	0,52	0,52	0,58	0,53	0,55
	SIMULADO RE Ocupado P1	0,63	0,60	0,59	0,58	0,60	0,58	0,56	0,63	0,57	0,58	0,59	0,64	0,58	0,60
	SIMULADO RE+AE Vacío P1	0,63	0,56	0,66	0,64	0,61	0,55	0,59	0,58	0,53	0,65	0,59	0,59	0,57	0,53
	SIMULADO RE+AE Ocupado P1	0,68	0,61	0,71	0,69	0,67	0,61	0,64	0,63	0,56	0,70	0,64	0,63	0,62	0,55
	SIMULADO RE Vacío P2	0,63	0,57	0,57	0,54	0,56	0,57	0,55	0,64	0,56	0,57	0,56	0,65	0,57	0,58
	SIMULADO RE Ocupado P2	0,67	0,60	0,62	0,57	0,59	0,61	0,58	0,68	0,58	0,61	0,60	0,69	0,61	0,61
	SIMULADO RE+AE Vacío P2	0,70	0,60	0,72	0,69	0,66	0,62	0,63	0,64	0,57	0,71	0,64	0,65	0,63	0,56
	SIMULADO RE+AE Ocupado P2	0,73	0,64	0,76	0,74	0,70	0,66	0,67	0,68	0,59	0,75	0,68	0,69	0,67	0,59

Tabla 6.2.27. Valores del índice de transmisión de la palabra STI en cada punto de recepción. Fuente 1.

Como puede observarse, en el estado actual, los valores del índice STI de la iglesia, tanto los medidos *in situ* como los simulados con la sala vacía, califican a ésta como pobre, en la zona de audiencia destinada a los fieles. En el caso de sala ocupada, los valores pasan a ser aceptables.

Con las dos propuestas de rehabilitación, y la incorporación de los nuevos revestimientos, se mejoran sensiblemente los resultados de la inteligibilidad. Para la primera opción, en el caso de la sala vacía, la inteligibilidad se califica como aceptable, mientras que con la sala ocupada se considera entre aceptable y buena. El aumento medio de este parámetro, en esta opción 1, es del 35% y 18%, respectivamente, para la sala vacía y ocupada. Con la segunda propuesta de rehabilitación, en los receptores más cercanos a la fuente sonora, tanto para la iglesia vacía como ocupada, la inteligibilidad se califica como buena. El aumento medio de este parámetro, en esta opción 2, es del 45% y 22%, respectivamente, para la sala vacía y ocupada.

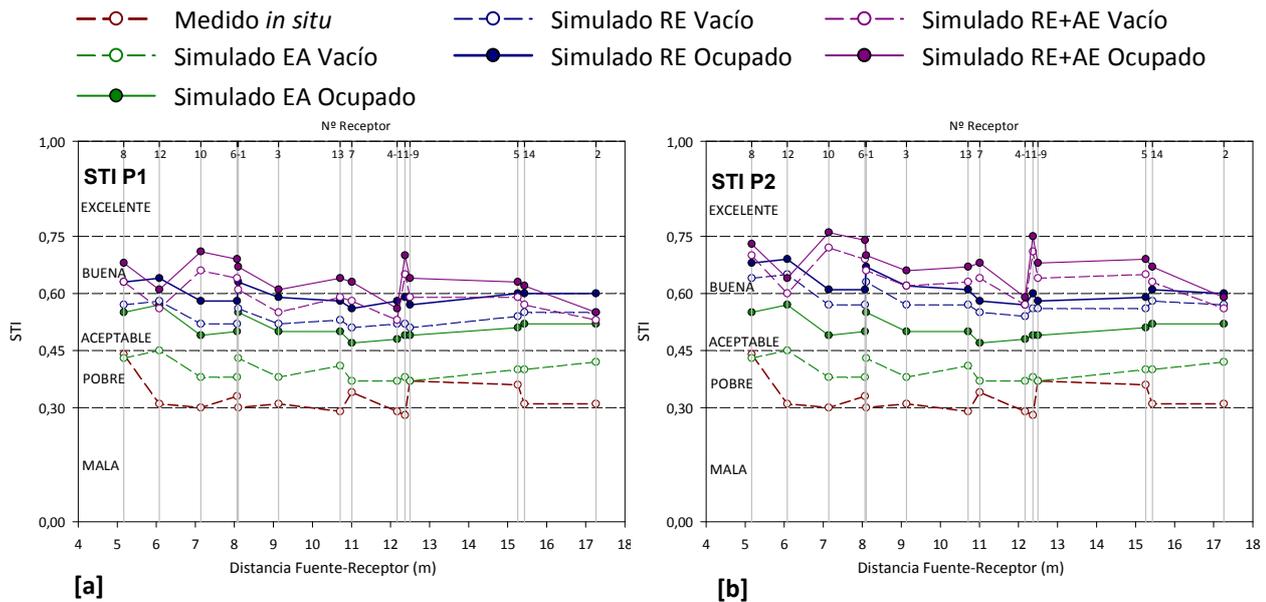


Figura 6.2.45. Índice de transmisión de la palabra STI frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual, propuestas de rehabilitación acústica y apoyo electroacústico 1 y 2. Fuente 1.

No obstante, y dado que uno de los objetivos más importantes de una iglesia, desde el punto de vista sonoro, es tener una buena inteligibilidad de la palabra, se ha estudiado el efecto que tendría la incorporación de un adecuado sistema de megafonía a cada una de las propuestas presentada, pues, en tipo de recinto es frecuente la utilización de sistemas de apoyo electroacústico.

El sistema propuesto y simulado es el mismo que el empleado y descrito en la iglesia de Santa Ana de Moratalaz. Consta de dos altavoces de columna (marca Duran Audio BV, modelo DC180 Axys Intellivox), dispuestos en el presbiterio a una altura de 1,60 m desde el suelo de la nave al centro del altavoz (figura 6.2.46).

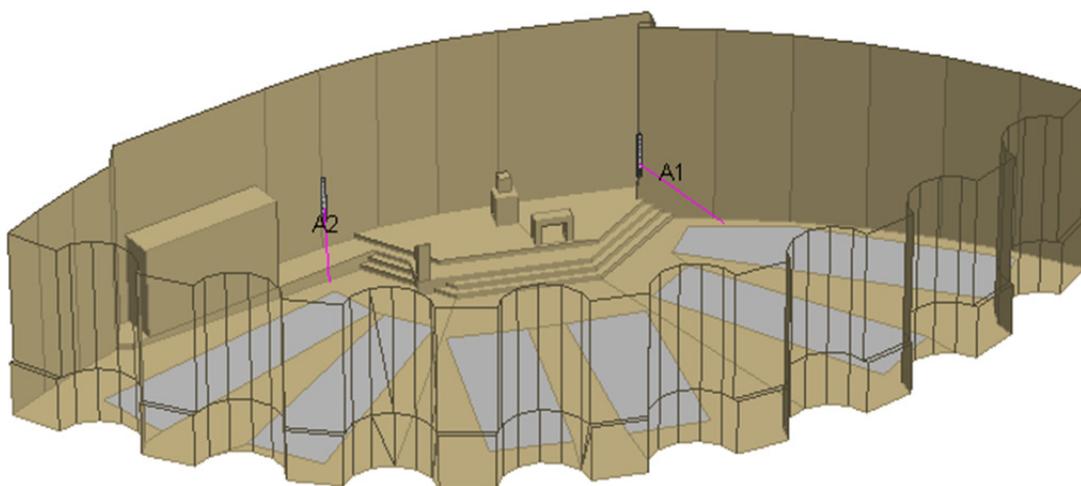


Figura 6.2.46. Modelo tridimensional: posición de altavoces.

Como puede observarse en la figura 6.2.45, el uso adicional del apoyo electroacústico en el recinto en cada propuesta de rehabilitación acústica, mejora los resultados del STI en las configuraciones de iglesia vacía y ocupada. Para la primera opción, en el caso de la sala vacía, la inteligibilidad se califica entre buena y aceptable, mientras que con la sala ocupada se considera buena. La introducción de este sistema de megafonía junto a los demás elementos constructivos, supone un aumento medio del STI del 9% y 7%, respectivamente, para el recinto vacío y ocupado. Para la segunda propuesta de rehabilitación, tanto para la iglesia vacía como ocupada, la inteligibilidad se califica como buena,

calificándose como excelente en algunos puntos de recepción cuando la iglesia se encuentra ocupada. En esta opción 2, el sistema de megafonía implica un aumento medio de este parámetro del 10%, tanto para la sala vacía como ocupada.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.2.47 se aportan los mapas de resultados del índice de transmisión de la palabra (STI), correspondientes a la simulación del estado actual (EA), tras la propuesta de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2) y tras dichas propuestas con la utilización del sistema de apoyo electroacústico 1 (RE+AE P1) y 2 (RE+AE P2), todos ellos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente en posición 1, coincidente con el altar.

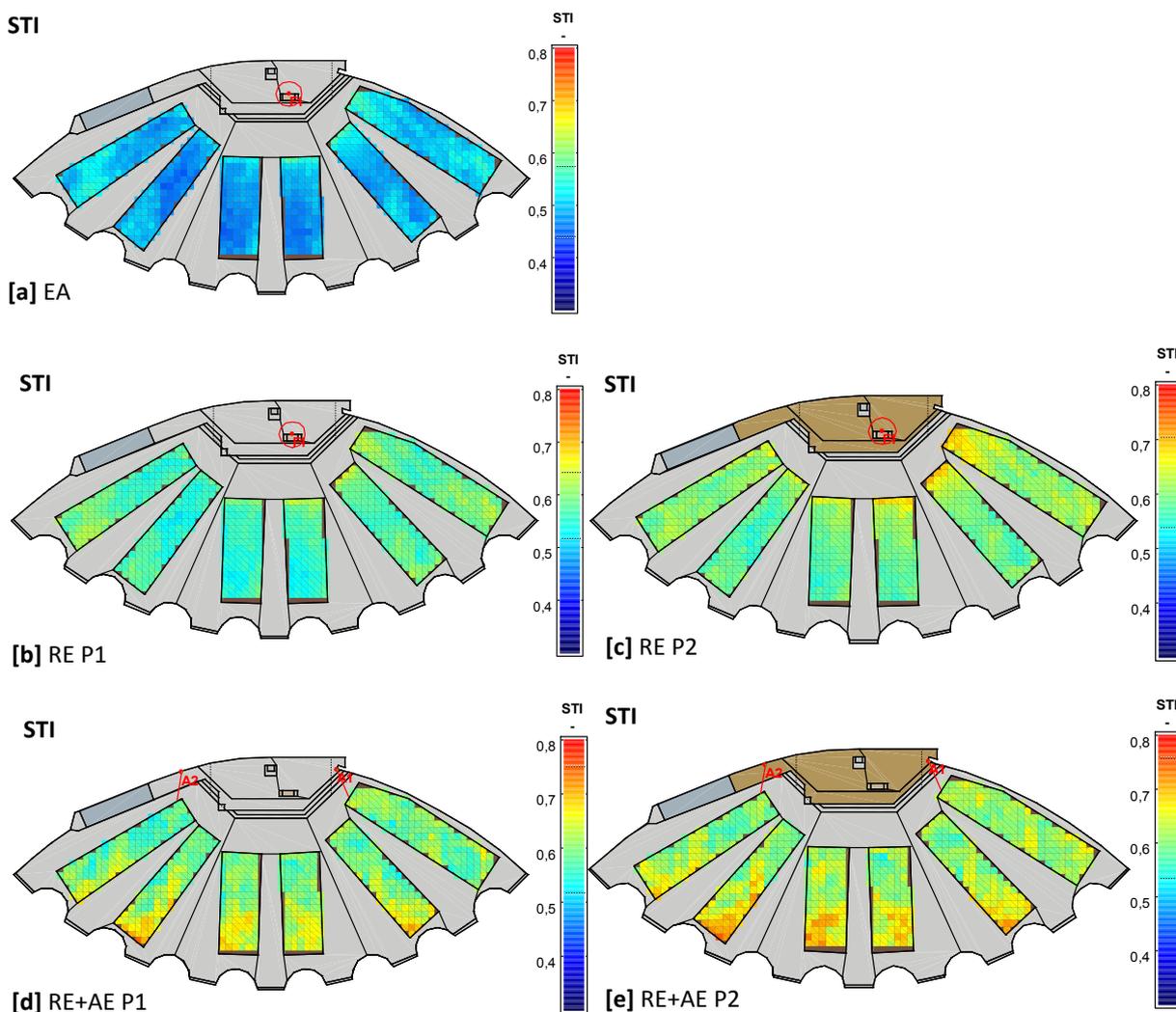


Figura 6.2.47. Índice de transmisión de la palabra STI. Simulaciones estado actual (EA), propuestas de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2) y propuestas de rehabilitación acústica con apoyo electroacústico 1 (RE+AE P1) y 2 (RE+AE P2). Iglesia ocupada, fuente 1 o altavoces 1 y 2.

En el mapa del STI del estado actual (figura 6.2.47 [a]), vemos que los resultados presentan una distribución bastante homogénea, siendo los valores ligeramente mejores en las zonas delanteras de la audiencia próximas a la fuente sonora, así como en parte posterior de las franjas laterales, aunque como hemos visto en la figura 6.2.45, para la configuración de iglesia ocupada, corresponde a una inteligibilidad aceptable.

En las figuras 6.2.47 [b] y [c], se observa la repercusión que las dos propuestas de rehabilitación acústica tienen sobre el STI en la totalidad de la zona de la audiencia. La distribución espacial es similar a la comentada para el estado actual, pero los valores del índice de transmisión de la palabra

mejoran sensiblemente con las dos propuestas, siendo los valores medios de STI de 0,57 y 0,60 para las opciones 1 y 2, respectivamente.

Si unimos a las medidas correctoras, el sistema de megafonía propuesto (figuras 6.2.47 [d] y [e]), el STI alcanza valores aún más favorables. En la zona de audiencia el valor medio pasa a ser 0,61 y 0,63, para las opciones 1 y 2, respectivamente, siendo más notable la mejora en las zonas de audiencia cercanas a los muros dispersivos, donde se alcanzan valores del STI superiores a 0,70. Al igual que vimos en la iglesia de Santa Ana, la disposición asamblearia, cuando los muros dispersivos cuentan con la suficiente absorción, contribuyen a mejorar la inteligibilidad de la palabra.

6.2.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO

En la tabla 6.2.28 y en las figuras 6.2.48 y 6.2.49 se presentan los valores de la absorción sonora de los revestimientos presentes en la iglesia de Cuestablanca y de los propuestos en las dos intervenciones planteadas.

PROPUESTA	REVESTIMIENTO	ABSORCIÓN SONORA (m ²)			
		EA VACÍO	EA OCUP	RE VACÍO	RE OCUP
P1	TECHO	53,11	53,11	53,11	53,11
	BANCOS	38,64	172,75	77,28	172,75
	MURO DE FONDO	12,00	12,00	129,09	129,09
	OTROS MATERIALES	17,16	17,16	17,16	17,16
	ABSORCIÓN TOTAL (A_t)	120,92	255,02	276,65	372,12
P2	TECHO	53,11	53,11	178,19	178,19
	BANCOS	38,64	172,75	77,28	172,75
	MURO DE FONDO	12,00	12,00	51,58	51,58
	SUELO PRESBITERIO	0,54	0,54	16,97	16,97
	OTROS MATERIALES	16,62	16,62	16,62	16,62
	ABSORCIÓN TOTAL (A_t)	120,92	255,02	340,65	436,12

Tabla 6.2.28. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²).

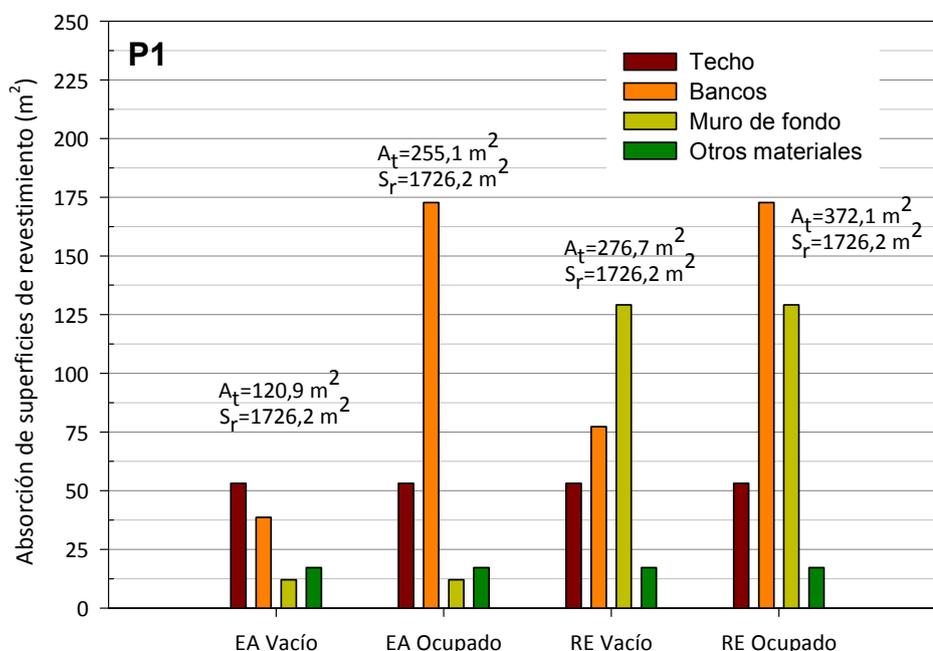


Figura 6.2.48. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promediados en frecuencia del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica 1 (RE).

Las gráficas de las figuras 6.2.48 y 6.2.49 reflejan que, para el estado actual y con la iglesia vacía, el techo es el elemento constructivo que aporta mayor absorción sonora (especialmente a frecuencias bajas, como puede verse en las figuras A2.2 y A2.3, correspondientes a esta iglesia, recogidas en el

anexo 2). Para la iglesia ocupada, absorción de los bancos ocupados es superior al cuádruple de la correspondiente a los bancos vacíos.

Con la propuesta de rehabilitación acústica 1 sólo se interviene en los bancos y el muro de fondo, aportando absorción sonora al respaldo de madera y a los muros dispersivos de hormigón visto, respectivamente. Como puede comprobarse, en esta propuesta de actuación los muros dispersivos son los que adquieren mayor protagonismo ya que su absorción se multiplica por diez.

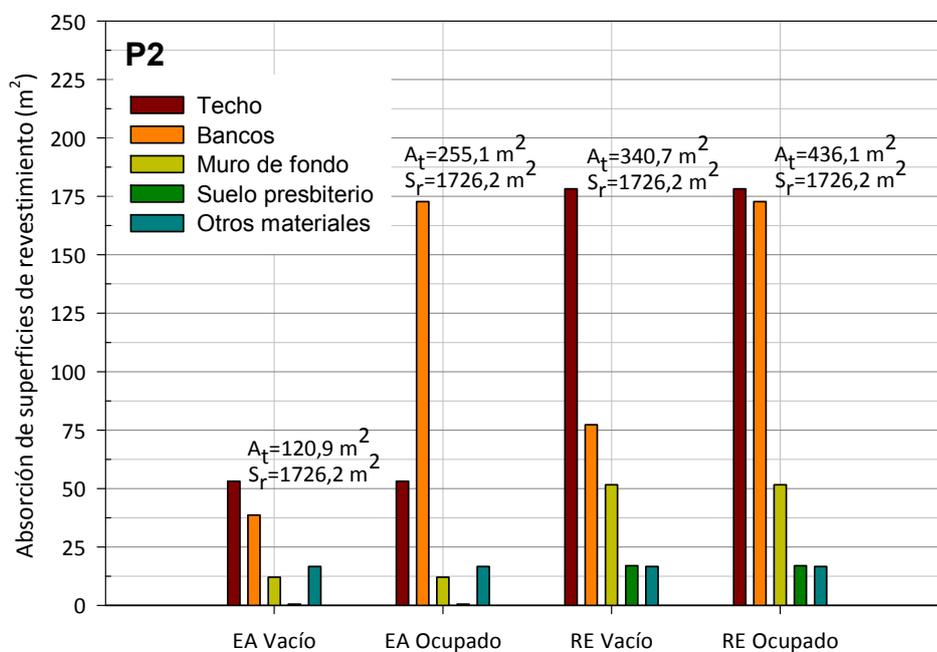


Figura 6.2.49. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m^2). Valores promediados en frecuencia del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica 2 (RE).

En la propuesta de rehabilitación acústica 2 (figura 6.2.49), se aprecia la repercusión que la intervención en el techo de la iglesia tiene sobre la absorción sonora total del recinto, superando incluso la de los bancos ocupados. La actuación sobre los demás elementos, como los bancos, el suelo del presbiterio o las puertas de acceso y las piezas de hormigón visto (ambos en el muro de fondo), incrementa sensiblemente la absorción sonora de dichas superficies respecto de la del estado actual.

En el capítulo 6, vimos que las dos propuestas de rehabilitación acústica de la iglesia de Cuestablanca conseguían corregir las deficiencias acústicas existentes. Ahora bien, al comparar los valores de la absorción sonora total de ambas propuestas, se aprecia que los resultados de la segunda propuesta son superiores a la primera (un 23% para la iglesia vacía y un 17% cuando está ocupada).

Estas gráficas de absorciones corroboran el papel fundamental del techo y del muro de fondo (tal y como Fisac intuía) sobre la acústica de este tipo de iglesias de tipo asambleario.

6.2.3.7. CONCLUSIONES

En esta iglesia escolar, Fisac vuelve a utilizar las formas geométricas y arquitectónicas para solucionar el problema acústico en el recinto. El marcado carácter asambleario, con paredes laterales muy abiertas, y los numerosos muros dispersivos, con menor radio de curvatura que en la iglesia de Santa Ana, dieron lugar a una sala difusa, con distribución sonora muy homogénea y buena impresión espacial, tal y como ponen de manifiesto los resultados de los parámetros medidos *in situ*.

Sin embargo, la falta de absorción sonora de los materiales de revestimientos empleados en el interior, dio lugar a elevados tiempos de reverberación y, como consecuencia, a una deficiente inteligibilidad de la palabra y claridad musical.

Las dos propuestas de rehabilitación acústica consiguen corregir estas deficiencias, realizando un conjunto de actuaciones totalmente reversibles, que no desvirtúan los aspectos espaciales, formales y materiales con que el arquitecto concibió el proyecto. En el análisis y valoración de las condiciones acústicas resultantes al implementar cada propuesta, se observa que, para la opción 2, el comportamiento acústico del recinto es algo mejor que para la opción 1, si bien, esta propuesta tiene la ventaja, que además de los bancos de madera, actúa en un solo elemento constructivo: los muros dispersivos. El estudio de esta propuesta revela que los fundamentos acústicos de Fisac, sobre dichos muros, eran correctos, pero el material empleado impidió, su correcta contribución a la buena acústica de la iglesia.

Caso especial merece la inteligibilidad de la palabra por el uso principal del edificio. Aunque la introducción de las medidas correctoras, en las dos opciones estudiadas, consiguen mejorar la inteligibilidad en la totalidad del área de la audiencia para los dos estados de ocupación, el empleo adicional del sistema de megafonía propuesto, para cada opción, aumenta de nuevo los valores del STI, siendo más notable dicho aumento en las zonas posteriores de la audiencia cercanas a los muros dispersivos.



6.3. IGLESIA PARROQUIAL SANTA MARÍA MAGDALENA, SANTAMARCA. MADRID

c/ Drácena, 23. 28016 Madrid

Fecha de construcción: 1966-1967

Edificio sin protección arquitectónica

6.3.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN

En el centro parroquial situado en el barrio Santamarca de Madrid, Fisac proyectó una variante de iglesia postconciliar, con algunas semejanzas a la iglesia de Nuestra Señora del Pilar que realizó en Canfrac (Huesca). Al disponer de un presupuesto muy ajustado, Fisac eligió muros de carga de ladrillo visto de pie y medio de espesor, tanto en el exterior como en interior, sobre los que apoya la cubierta, que se eleva en altura hacia el presbiterio. Dicha cubierta, totalmente vista desde el interior al igual que hiciera en la iglesia de Canfrac (Huesca), estaba formada por cuatro vigas metálicas en celosía, placas de *viroterm* (paneles acústicos de lana de roca), doble tablero de rasilla y uralita (figura 6.3.1).



Figura 6.3.1. Vista interior hacia el presbiterio.



Figura 6.3.2. Muros acústicos.

En las diferentes versiones que realizó para esta iglesia, se aprecia la idea proyectual y la solución espacial empleada en sus anteriores templos postconciliares realizados en hormigón, pero aquí el material empleado sugiere formas diferentes. La planta conserva la disposición litúrgica asamblearia con un marcado eje transversal, pero en vez de ser ovalada pasa a ser poligonal. Del mismo modo, con el fin de evitar las concentraciones acústicas, los anteriores *muros dispersivos* de hormigón *in situ* formados por superficies sinuosas y muros convexos, se convierten en muros quebrados con aristas vivas, constructivamente más adecuados a los paramentos de ladrillo (figura 6.3.2).



Figura 6.3.3. Presbiterio.

En los encuentros de los *muros dispersivos* dispone los accesos y los huecos para iluminación natural de la zona de fieles, consistentes en vidrieras de colores. Asimismo, la iluminación del presbiterio se resuelve bilateralmente con vidrieras de colores orientadas al este y oeste, disposición que recuerda a alguna de sus iglesias preconconciliares (figura 6.3.3).

La Capilla del Santísimo, accesible, visible y ligeramente elevada como el presbiterio al que tiene acceso, se adosa a uno de los muros laterales que conforma el espacio de reunión, y actualmente alberga también los confesionarios y la pila bautismal (figura 6.3.5).



Figura 6.3.4. Vista lateral hacia el baptisterio.



Figura 6.3.5. Baptisterio y capilla penitencial.

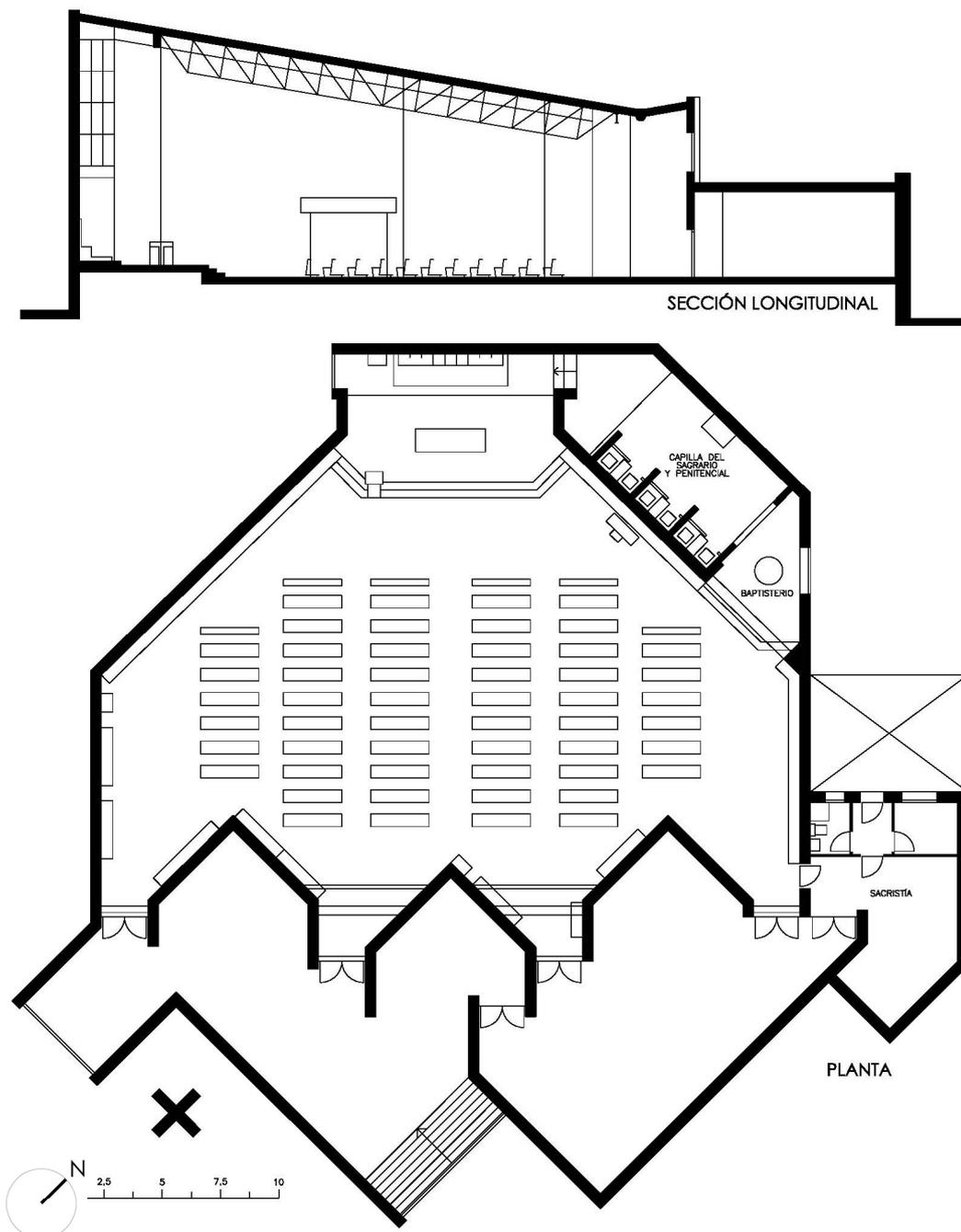


Figura 6.3.6. Plano de planta y sección longitudinal.

DATOS GEOMÉTRICOS Y DE AFORO	
VOLUMEN INTERIOR	
Iglesia y Capilla Sacramental (V):	4583 m ³
Iglesia:	4343,9 m ³
Capilla Sacramental:	239,10 m ³
SUPERFICIE ÚTIL	
Iglesia y Capilla Sacramental:	576,25 m ²
Iglesia:	513,7 m ²
Capilla Sacramental:	62,55 m ²
SUPERFICIE CONSTRUIDA	
Iglesia y Capilla Sacramental:	633,95 m ²
Superficie de revestimientos:	2398,2 m ²
Superficie del presbiterio:	57,76 m ²
Superficie de bancos:	164,71 m ²
Superficie acústica efectiva audiencia (S _A):	274,02 m ²
Superficie de pasillos:	316,5 m ²
DIMENSIONES	
Longitud media:	20,8 m
Anchura media:	22,9 m
Altura media:	9,6 m
AFORO (N)	348 personas
RELACIONES GEOMÉTRICAS	
V / N	13,17 m ³ /plaza
V / S _A	16,73 m ³ /m ²
S _A / N	0,79 m ² /plaza

Tabla 6.3.1. Datos geométricos y de aforo.

MATERIALES DE REVESTIMIENTO Y ACABADOS INTERIORES	
Suelo fieles:	Terrazo
Suelo presbiterio:	Mármol
Techo:	Cerchas metálicas y paneles absorbentes de lana de roca
Vigas:	Metálicas
Paredes:	Ladrillo visto
Puertas:	Chapa metálica
Ventanas:	Vidrieras
Altar:	Granito
Ambón:	Granito
Bancos:	Madera

Tabla 6.3.2. Materiales de revestimiento y acabados interiores.

6.3.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL

6.3.2.1. MEDICIÓN *IN SITU*. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

En el apartado 5.2.1 del capítulo 5, *Método de investigación*, indicábamos que la medida acústica *in situ* de esta iglesia se realizó el 16 de julio de 2010 a las 9:30 h, siendo su duración, aproximadamente, de tres horas. Se emplearon dos posiciones para la fuente sonora, según el uso habitual de la iglesia: la primera (F1), en el punto ocupado por el orador en el altar (figura 6.3.7) y, la segunda (F2), en el ambón, donde se leen las lecturas. Para cubrir las diferentes zonas de audiencia en esta iglesia, de planta prácticamente simétrica, se distribuyeron un total de nueve posiciones para el micrófono receptor, siete de ellas en la mitad izquierda de la zona de bancos y dos posiciones en la zona derecha junto al baptisterio, con objeto de verificar la simetría acústica de la iglesia (figura 6.3.8). Los valores medios de las variables ambientales interiores registradas durante las medidas fueron 28°C de temperatura y 20% de humedad relativa.

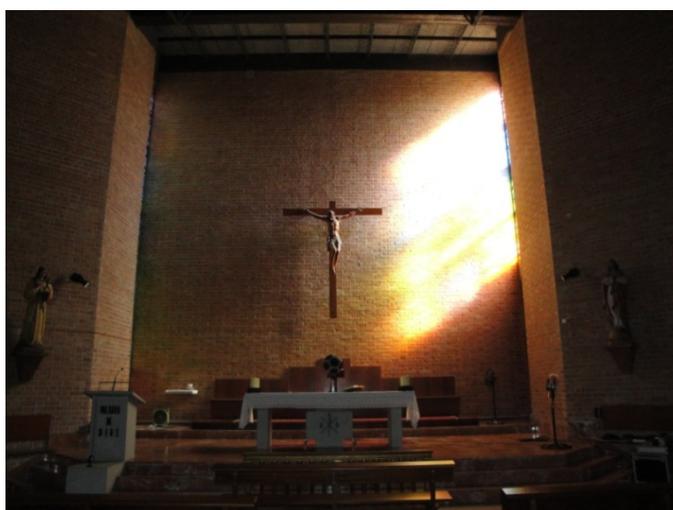


Figura 6.3.7. Posición de la fuente F1 en el altar durante la medición acústica *in situ*.

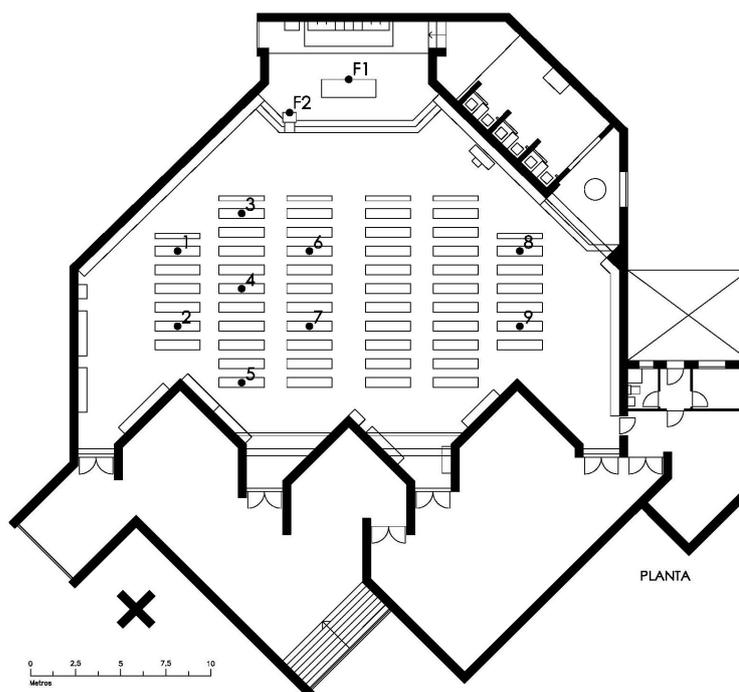


Figura 6.3.8. Posiciones de fuentes y receptores.

Reverberación

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_{30} (s)	F1	1,83	1,37	2,07	2,87	2,60	1,80
	σ F1	0,09	0,04	0,08	0,07	0,07	0,08
	F2	1,84	1,37	2,12	2,95	2,73	1,92
	σ F2	0,13	0,04	0,09	0,08	0,07	0,11
	Óptimo palabra	1,62	1,43	1,25	1,12	1,12	1,12
	Óptimo música	2,16	1,91	1,66	1,49	1,49	1,49
EDT (s)	F1	1,60	1,14	1,31	1,39	1,26	0,97
	σ F1	0,28	0,17	0,19	0,22	0,21	0,12
	F2	1,53	1,21	1,27	1,31	1,17	0,90
	σ F2	0,18	0,07	0,13	0,16	0,17	0,11

Tabla 6.3.3. Valores promediados espacialmente del tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s).
¹Desviación estándar.

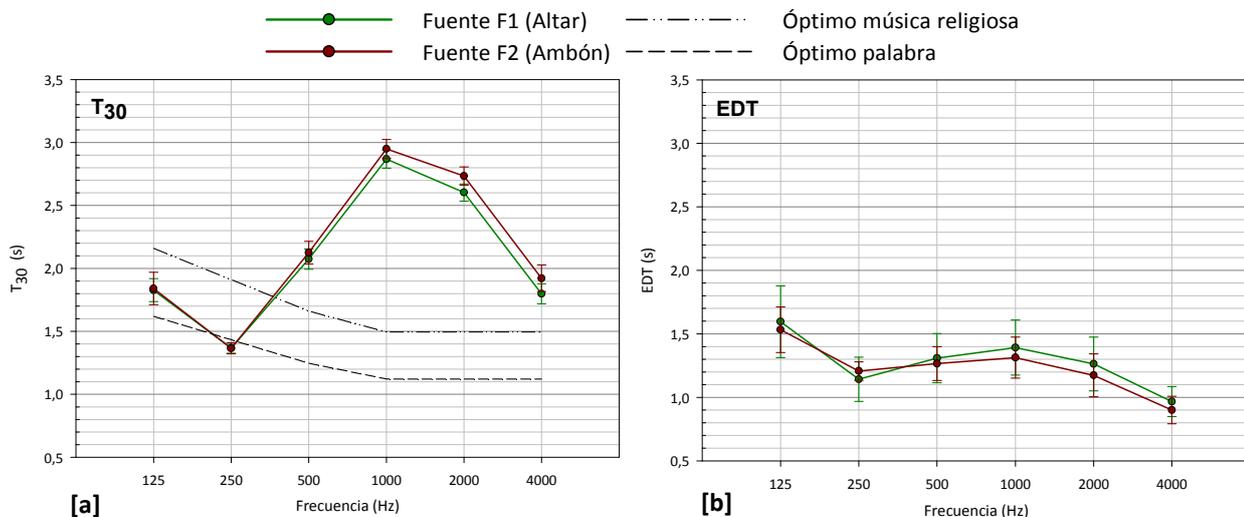


Figura 6.3.9. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

Los valores medidos del tiempo de reverberación (T_{30}), representados en la figura 6.3.9 [a], son muy similares para las dos posiciones de la fuente, con diferencias menores a 1 JND salvo a la frecuencia de 4000 Hz. La dispersión espacial, dada por la desviación estándar, es también similar y su valor pequeño (el máximo valor es 0,13 a la frecuencia de 125 Hz para la fuente 2). Los valores medidos a bajas frecuencias se ajustan a los óptimos recomendados para este volumen, mientras que para las restantes frecuencias los valores son superiores, registrándose los tiempos máximos a la frecuencia de 1000 Hz, para las dos posiciones de la fuente. Es de destacar el singular comportamiento del tiempo de reverberación en función de la frecuencia, con valores sensiblemente más altos a medias y altas frecuencias, especialmente a 1000 y 2000 Hz. Los valores más bajos registrados a sonidos graves podría achacarse a la capacidad de vibración del techo, ya que por su composición constructiva podría funcionar como un resonador de membrana.

En la figura 6.3.10 se presentan las curvas de Schroeder, filtradas en frecuencia, para la fuente 1 y el punto de recepción 6. En ella podemos apreciar el diferente comportamiento acústico de las bajas frecuencias frente al resto, con curvas de menores pendientes y menos limpias, registrando variaciones más acusadas de la energía acústica en el tiempo.

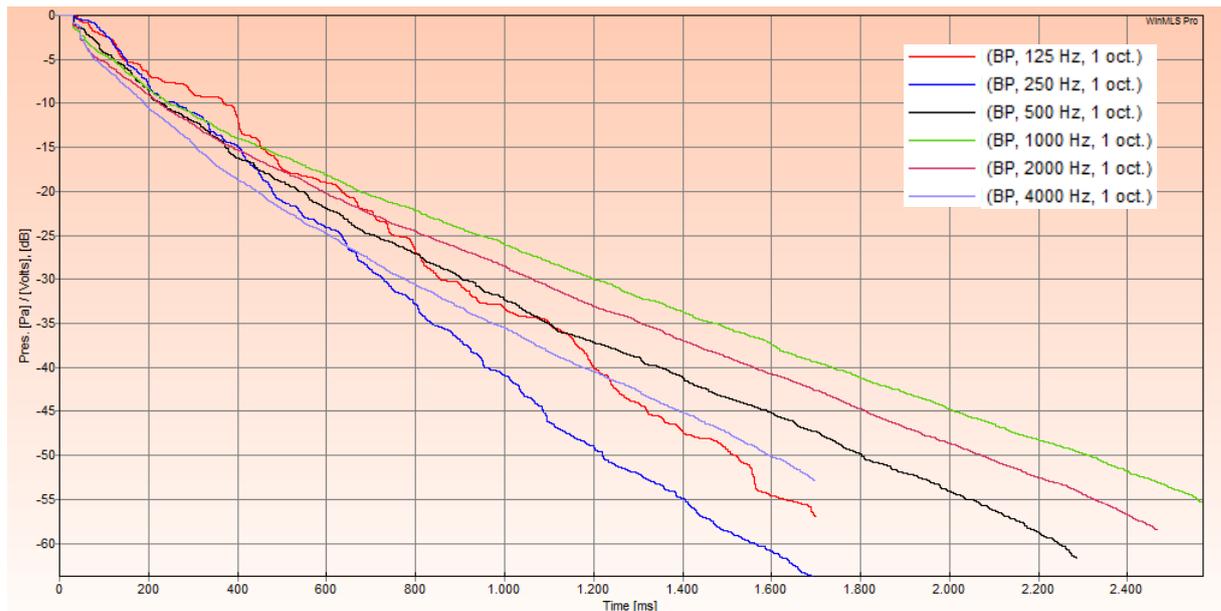


Figura 6.3.10. Curvas de Schroeder filtradas en frecuencia para la fuente 1 y el punto de recepción núm. 6.

En cuanto a los resultados del EDT (figura 6.3.9 [b]), los valores medidos vuelven a ser muy similares para ambas fuentes. Al comparar los resultados del EDT y T_{30} , vemos que para las bajas frecuencias, los valores son parecidos, mientras que para las medias y altas frecuencias, los valores del EDT son sensiblemente menores, lo que implicaría una menor percepción de reverberación. La dispersión espacial es ligeramente superior con la fuente situada en el altar (F1). Los resultados del EDT a las frecuencias de 500 y 1000 Hz se encuentran dentro del rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010, y que está entre 1,0 s y 3,0 s.

A pesar de los resultados favorables obtenidos en estos indicadores acústicos, debemos destacar que durante la realización de las medidas acústicas *in situ*, los propios integrantes del equipo tuvimos dificultad para entendernos oralmente a distancias medias de 3 ó 4 metros.

En el siguiente apartado veremos que los resultados obtenidos con la medición *in situ*, en relación a los comportamientos tan diferentes entre el T_{30} y el EDT, especialmente a medias y altas frecuencias, serán claves para el ajuste y simulación acústica del modelo informático de la iglesia.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

Como en el resto de iglesias, los parámetros representados en las gráficas de este apartado son el tiempo central (T_s), claridad para la palabra (C_{50}), definición (D_{50}) y claridad musical (C_{80}).

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_s (ms)	F1	119,78	92,22	90,78	86,33	74,00	59,00
	σ F1	6,65	15,85	16,49	13,28	11,63	9,14
	F2	108,89	87,78	77,56	75,33	73,67	60,78
	σ F2	21,81	8,91	22,08	17,23	17,83	13,54

Tabla 6.3.4. Valores promediados espacialmente del tiempo central T_s (ms). ¹Desviación estándar.

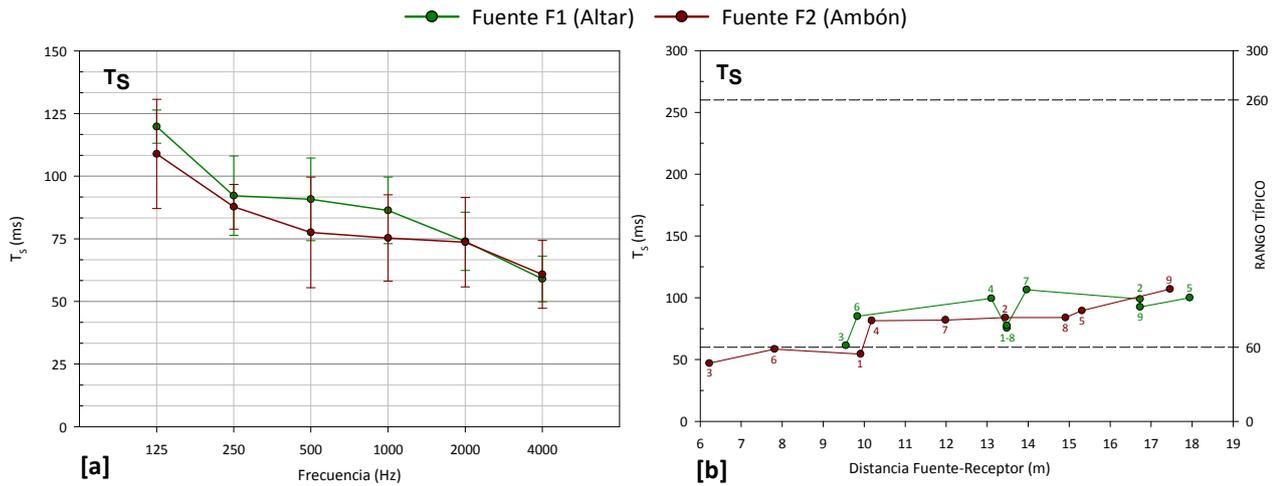


Figura 6.3.11. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

Para el tiempo central (figura 6.3.11 [a]), los valores registrados con la fuente situada en el altar (fuente 1) para frecuencias inferiores a 1000 Hz, se mantienen por encima de los de la fuente 2, ubicada en el ambón. Las diferencias entre resultados de ambas fuentes para las frecuencias de 125, 500 y 1000 Hz son algo superiores a 1 JND. Excepto para la frecuencia de 250 Hz, la dispersión espacial es mayor cuando la fuente se sitúa en el ambón (F2).

La gráfica que representa el promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor (figura 6.3.11 [b]), refleja un comportamiento similar para ambas posiciones de la fuente. Los resultados obtenidos en casi todos los puntos de recepción situados en la zona de audiencia, se encuentran dentro del rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. Asimismo, la gráfica refleja un leve aumento del T_s con la distancia, lo que implica una ligera atenuación de la nitidez del sonido. En los resultados de este indicador se aprecia la simetría acústica del recinto, aspecto que veremos reflejado igualmente en el resto de parámetros.

Ambas gráficas muestran resultados más bajos de T_s con la fuente situada en el ambón (F2), lo que indica que la emisión del sonido desde esta posición se percibe en el recinto con mayor nitidez que si se emite desde el altar (F1).

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D_{50}	F1	0,38	0,41	0,48	0,55	0,59	0,62
	σ F1	0,05	0,15	0,12	0,07	0,07	0,08
	F2	0,45	0,45	0,57	0,62	0,59	0,60
	σ F2	0,12	0,08	0,13	0,09	0,11	0,10

Tabla 6.3.5. Valores promediados espacialmente de definición D_{50} . ¹Desviación estándar.

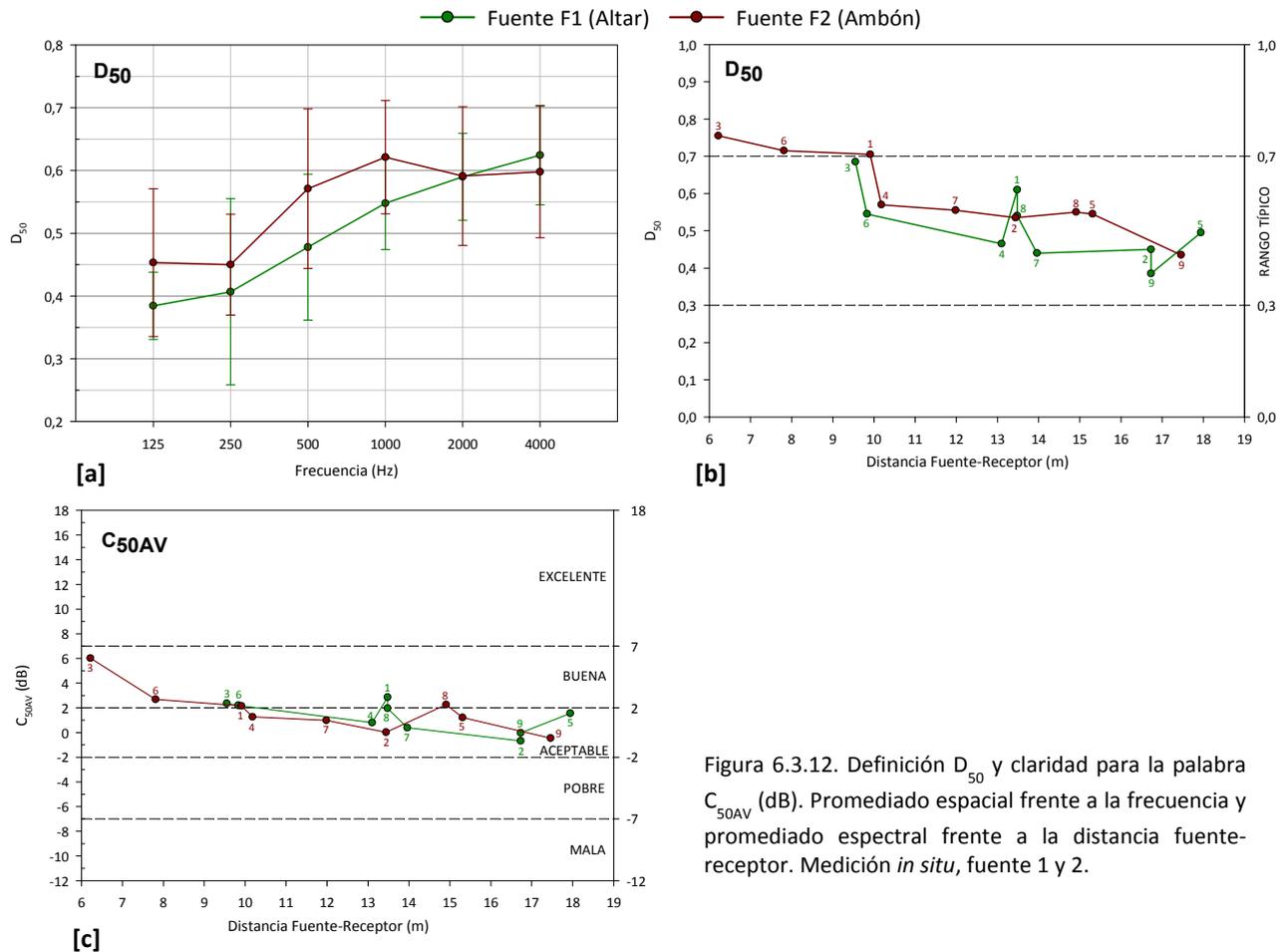


Figura 6.3.12. Definición D_{50} y claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

Como se aprecia en la figura 6.3.12 [a], globalmente se obtienen mejores resultados de la definición (D_{50}) cuando la fuente sonora se sitúa en el ambón. Para algunas frecuencias, las diferencias entre resultados de ambas fuentes son superiores a 1 JND.

Las gráficas que representan el promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor (figuras 6.3.12 [b] y [c]), reflejan resultados similares para ambas posiciones de la fuente. Los resultados obtenidos para el D_{50} , se encuentran dentro del rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. Igualmente, los resultados del C_{50AV} , según la escala de valoración de Marshall¹⁴, califica la claridad de la palabra entre aceptable y buena. Como ambos indicadores están influenciados por la distancia a la fuente, en los puntos más alejados de obtienen los peores resultados.

PARÁMETRO	FUENTE - σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C_{80} (dB)	F1	-0,07	1,80	2,22	3,30	4,13	5,28
	σ F1	1,03	2,16	1,53	0,92	1,08	0,71
	F2	1,13	1,81	3,36	4,38	4,38	4,91
	σ F2	2,08	1,70	2,03	1,45	1,89	1,69

Tabla 6.3.6. Valores promediados espacialmente de la claridad musical C_{80} (dB). ¹Desviación estándar.

PARÁMETRO	FUENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
STI	F1	0,43	0,44	0,51	0,48	0,5	0,54	0,49	0,44	0,43

Tabla 6.3.7. Valores del índice de transmisión de la palabra STI en cada punto de recepción.

¹⁴ Marshall, L.G. (1994). Opus cit.

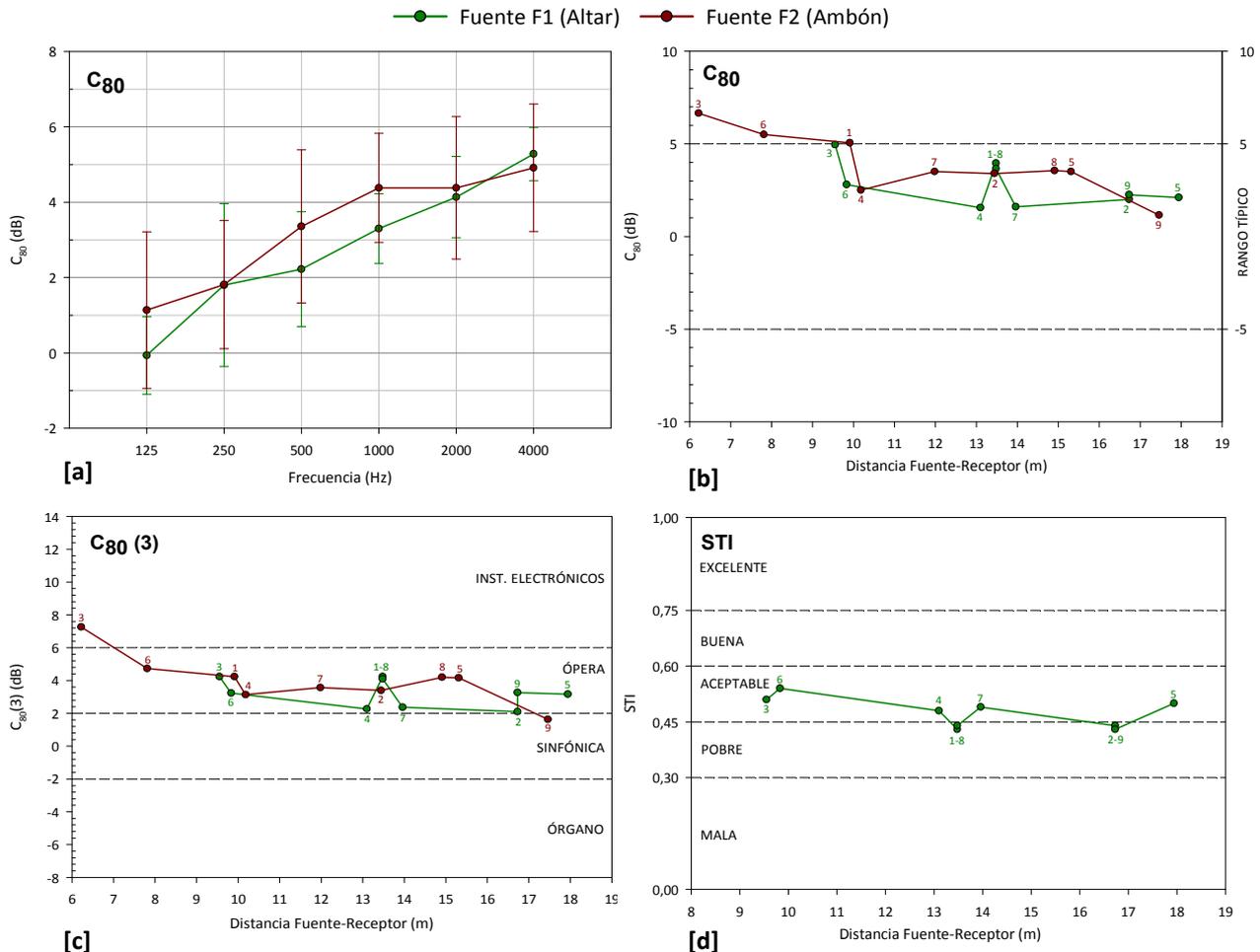


Figura 6.3.13. Claridad musical C_{80} (dB) e índice de transmisión de la palabra STI. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

En cuanto a la claridad musical (C_{80}), tanto los resultados promediados espacialmente frente a la frecuencia (figura 6.3.13 [a]) como los promediados espectralmente frente a la distancia fuente y receptor (figura 6.3.13 [b]), conllevan observaciones similares a las descritas para la claridad de la palabra (C_{50}) y la definición (D_{50}). Los resultados del $C_{80}(3)$, para casi todos los puntos de la audiencia, indican que la iglesia es adecuada para la música de ópera (figura 6.3.13 [c]).

De la comparación de los resultados obtenidos, para las dos fuentes sonoras en estos cuatro parámetros: T_s , C_{50} , D_{50} y C_{80} , podemos afirmar que, globalmente, la iglesia presenta mejores valores de la claridad del sonido percibida cuando la fuente se sitúa en el ambón (F2).

En cuanto a la inteligibilidad de la palabra, valorada por el índice STI, se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor, junto con la escala de interpretación subjetiva (figura 6.3.13 [d]). En este caso, para la fuente 1 sin apoyo electroacústico, la inteligibilidad se considera entre aceptable y pobre en los puntos de recepción de la zona de audiencia.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	F1	12,98	11,39	8,44	4,86	4,44	5,49
	σ F1	1,40	1,48	1,66	0,72	2,01	1,74
	F2	14,77	13,81	8,66	6,09	6,99	7,36
	σ F2	2,28	2,05	1,19	1,49	2,63	2,65

Tabla 6.3.8. Valores promediados espacialmente de la fuerza sonora G (dB). ¹Desviación estándar.

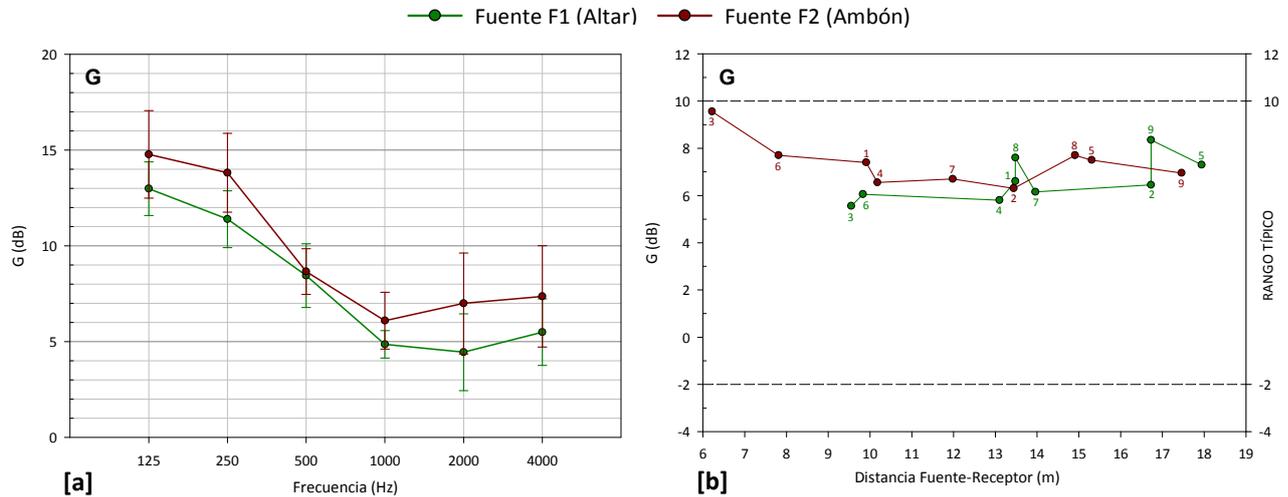


Figura 6.3.14. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

El nivel sonoro subjetivo, evaluado mediante los valores promediados espacialmente de la fuerza acústica (G), presenta tendencias similares para ambas fuentes aunque algo más altos cuando se emite desde el ambón (fuente 2). La dispersión espacial también es mayor para la fuente 2 (figura 6.3.14 [a]). Para casi todas las frecuencias, la diferencia entre resultados de las fuentes es superior a 1 JND.

En cuanto al promediado espectral de G (figura 6.3.14 [b]), apreciamos resultados homogéneos para ambas posiciones de la fuente, sin producirse atenuaciones significativas con la distancia. Los valores se sitúan dentro del rango típico recogido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

Impresión espacial

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
L_J (dB)	F1	1,41	0,86	-0,68	-4,64	-6,39	-5,48
	σ F1	1,77	2,21	2,33	0,52	2,34	2,20
	F2	3,09	3,66	-1,04	-3,59	-3,78	-3,29
	σ F2	2,58	1,85	1,94	1,04	3,01	2,89
J_{LF}	F1	0,10	0,11	0,14	0,15	0,11	0,18
	σ F1	0,04	0,05	0,07	0,05	0,04	0,06
	F2	0,08	0,12	0,14	0,16	0,12	0,16
	σ F2	0,04	0,07	0,08	0,10	0,07	0,08

Tabla 6.3.9. Valores promediados espacialmente del nivel sonoro lateral final L_J (dB) y fracción de energía lateral precoz J_{LF} . ¹Desviación estándar.

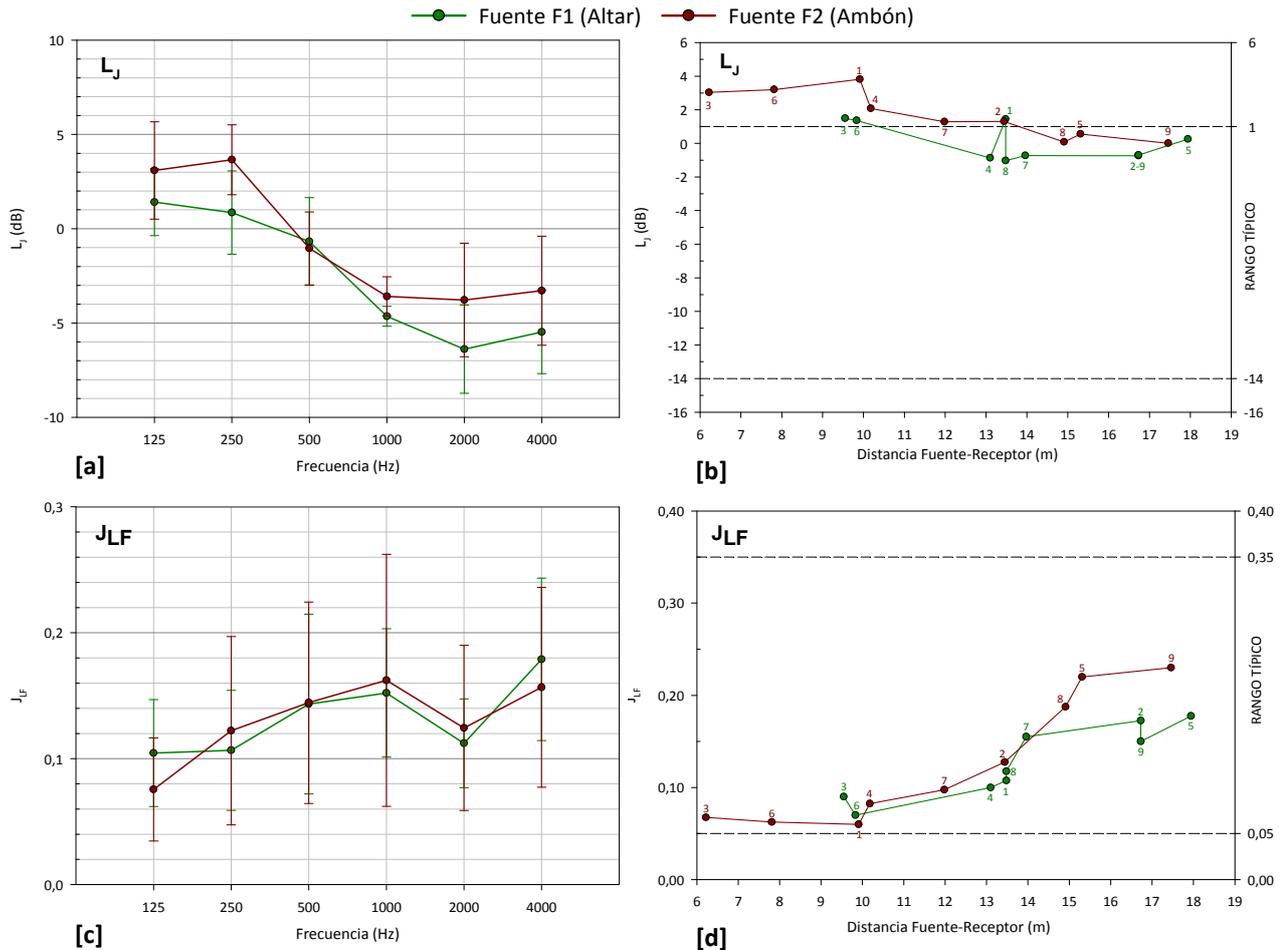


Figura 6.3.15. Nivel sonoro lateral final L_j (dB) y fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

La sensación espacial de sentirse envuelto por el sonido en un recinto está relacionada con los valores del nivel sonoro lateral final (L_j). En la figura 6.3.15 [a], se observan tendencias similares para las dos posiciones de la fuente, registrándose los valores más altos a bajas frecuencias y los más bajos a frecuencias altas. Salvo para la frecuencia de 500 Hz, donde los valores para ambas fuentes casi coinciden, los resultados con la fuente situada en el ambón (F2) son superiores a los obtenidos con la fuente en el altar (F1). Asimismo, los valores del promediado espectral se mantienen en torno al límite superior del rango típico que establece la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 (figura 6.3.15 [b]), presentando una ligera tendencia a decrecer con la distancia, hecho que no se apreciaba en los resultados de G. A la vista de todo lo anterior, los resultados de este indicador corresponden a una sensación sonora envolvente del oyente en todas las frecuencias.

En cuanto a la anchura aparente de la fuente, definida por la energía lateral precoz (J_{LF}), la figura 6.3.15 [c] muestra valores casi coincidentes (diferencias inferiores a 1 JND) para las dos posiciones de la fuente, si bien, la fuente F2 presenta resultados ligeramente superiores. Para todos los puntos de recepción, los valores del promediado espectral se sitúan dentro del rango típico establecido por la norma ISO (figura 6.3.15 [d]), aunque en los receptores situados a menos de 12 m de las fuentes sonoras se obtienen valores inferiores a 0,10, percibiéndose en ellos una menor anchura de fuente.

Los aspectos señalados sobre la espacialidad de la iglesia con los dos últimos parámetros, se corroboran con los coeficientes de correlación cruzada interaural ($IACC_L$, $IACC_E$ y $IACC_A$), que se indican en la tabla 6.3.10 y se representan en la figura 6.3.16.

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
IACC _L	F1	0,91	0,69	0,19	0,17	0,10	0,07
	σ F1	0,03	0,06	0,07	0,07	0,03	0,02
	F2	0,89	0,67	0,20	0,20	0,11	0,10
	σ F2	0,03	0,04	0,09	0,04	0,04	0,04
IACC _E	F1	0,93	0,84	0,58	0,46	0,42	0,39
	σ F1	0,04	0,10	0,21	0,14	0,16	0,16
	F2	0,94	0,83	0,58	0,53	0,35	0,27
	σ F2	0,04	0,08	0,19	0,20	0,15	0,12
IACC _A	F1	0,92	0,76	0,39	0,29	0,31	0,28
	σ F1	0,02	0,07	0,14	0,11	0,11	0,13
	F2	0,92	0,75	0,41	0,39	0,26	0,21
	σ F2	0,02	0,04	0,16	0,13	0,11	0,10

Tabla 6.3.10. Valores promediados espacialmente de los coeficientes de correlación cruzada interaural: IACC_L, IACC_E y IACC_A. ¹Desviación estándar.

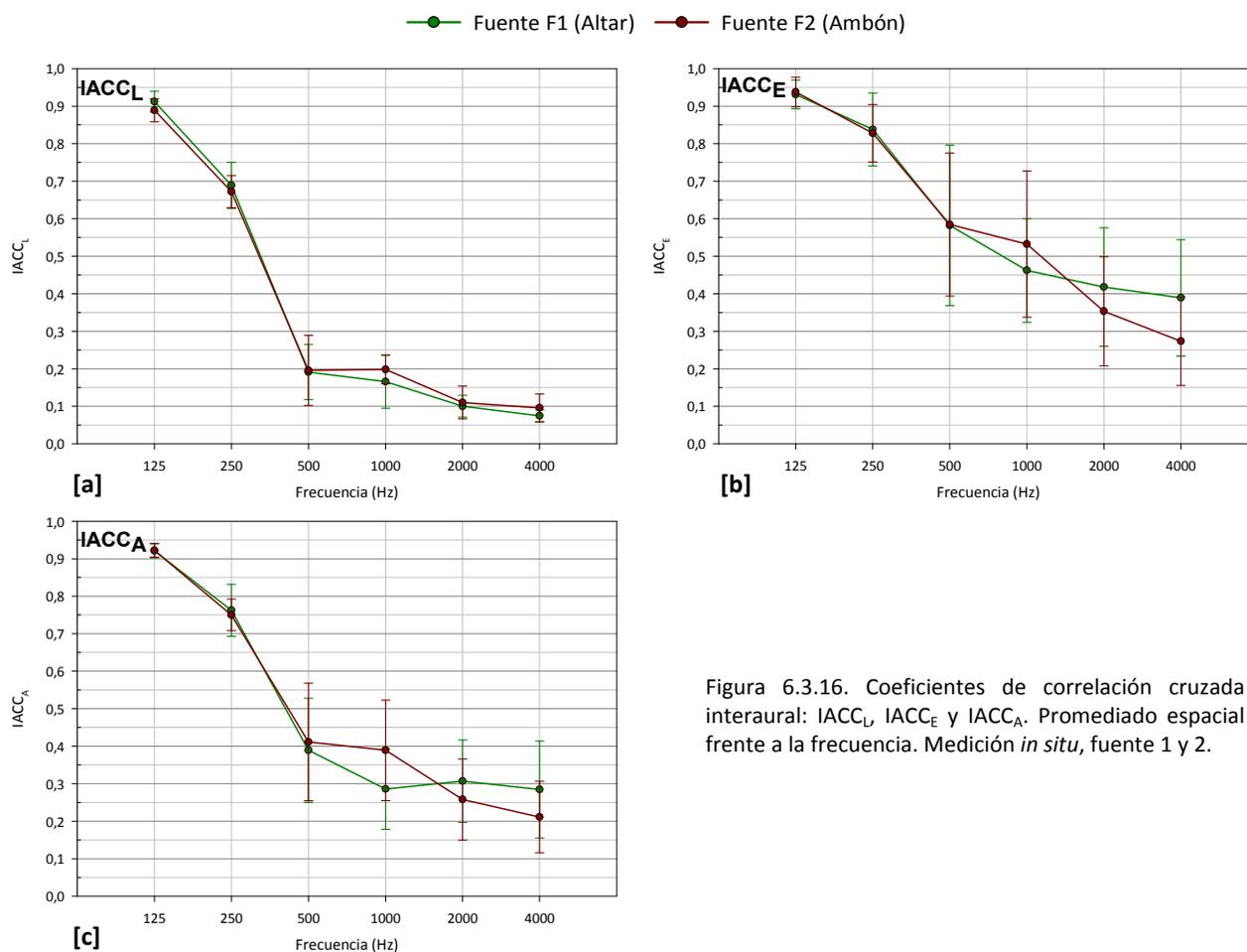


Figura 6.3.16. Coeficientes de correlación cruzada interaural: IACC_L, IACC_E e IACC_A. Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

Como se desprende del análisis de la figura 6.3.16 [a], la parte final de las respuestas al impulso, valoradas por el índice IACC_L, son casi idénticas para las dos posiciones de la fuente, así como su desviación estándar, que es similar para ambas fuentes. El resultado obtenido para el IACC_{L3} es de 0,15 y 0,17 para F1 y F2, respectivamente. La similitud de la primera parte de las respuestas al impulso, relacionada con las reflexiones tempranas y representada por el índice IACC_E (figura 6.3.16 [b]), muestra ligeras diferencias entre las posiciones de la fuente a partir de 500 Hz, aunque las curvas presentan la misma tendencia. La dispersión espacial es mayor que para el anterior coeficiente, y algo mayores para la fuente 1. El resultado de IACC_{E3} es 0,49, para ambas fuentes, valor de amplitud de la fuente sonora correspondiente a salas de concierto con acústica muy buena según Beranek¹⁵. Las respuestas completas, representadas mediante IACC_A en la figura 6.3.16 [c], son casi idénticas a bajas frecuencias para ambas posiciones de fuente, pero muestran diferencias para

¹⁵ Beranek, L. L. (1996). Opus cit. p. 468.

medias y altas. Salvo a frecuencias inferiores a 250 Hz, la dispersión espacial es mayor que para el IACC_L.

Ruido de fondo

PARÁMETRO	PUNTO	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
RF (dB)	6	37,8	33,6	29,8	27,5	23,2	20,0

Tabla 6.3.11. Espectro de ruido de fondo registrado (dB).

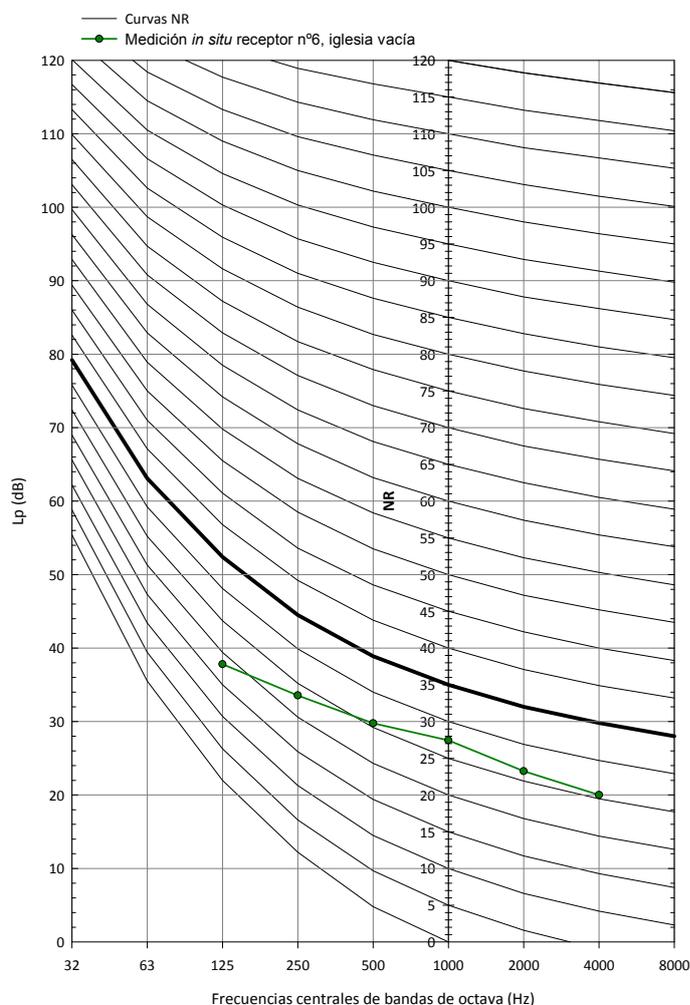


Figura 6.3.17. Curvas NR y espectro de ruido de fondo registrado (dB).

El espectro de ruido de fondo se registró promediando durante cuatro minutos en el punto 6. En la figura 6.3.17 se ha superpuesto dicho registro sobre las curvas NR, obteniéndose un índice NR de 28, valor inferior al máximo recomendado para los recintos de culto (NR 35). En este resultado favorable influyen tanto la ubicación de la iglesia como sus características constructivas. Se encuentra situada en un barrio residencial, al noreste de Madrid, y durante la realización de las medidas las calzadas adyacentes a la iglesia presentaron una densidad de tráfico entre baja y media. Asimismo, los gruesos muros de ladrillo visto, con pocos huecos al exterior, son favorables desde el punto de vista del aislamiento acústico.

Parámetros geométricos y de aforo

V/N (m ³ /plaza)	V/S _A (m ³ /m ²)	S _A /N (m ² /plaza)
13,17	16,73	0,79

Tabla 6.3.12. Valores de parámetros geométricos y de aforo.

En la iglesia de Santa María Magdalena, la relación geométrica V/N es bastante mayor que el valor

recomendado para las iglesias ($7,2 \text{ m}^3/\text{plaza}$) y también se encuentra, por exceso, fuera del rango establecido en la bibliografía citada ($5,1-9,1 \text{ m}^3/\text{plaza}$).

Para las relaciones geométricas V/S_A y S_A/N , los resultados obtenidos para ambas relaciones geométricas son superiores a los rangos recomendados para otros usos. Concretamente, para V/S_A , el valor máximo corresponde a salas de concierto (con valor recomendado $12,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ y rango específico $10,2-14,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$) y para S_A/N , los valores más altos propuestos corresponden a locales polifuncionales (con valor recomendado $0,66 \text{ m}^3/\text{m}^2$ y rango específico $0,63-0,75 \text{ m}^3/\text{m}^2$).

Por último, es de destacar que los altos resultados registrados en estas relaciones geométricas de esta iglesia es debido a su configuración volumétrica, su forma en planta y la relativa pequeña zona reservada para los fieles (sólo un 32% de la superficie útil de la iglesia).

6.3.2.2. AJUSTE DEL MODELO INFORMÁTICO

En la figura 6.3.18, se muestra el modelo informático tridimensional utilizado con el programa *CATT-Acoustic* v.8.0k, y que reproduce el interior del espacio principal de la iglesia.

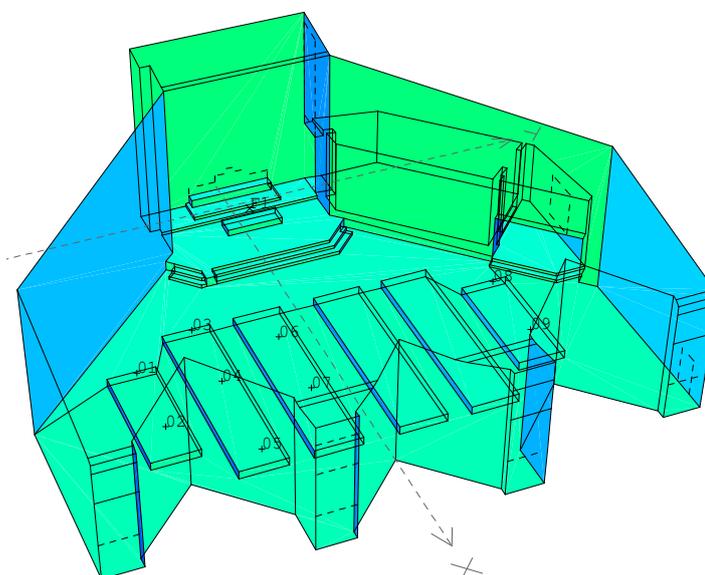


Figura 6.3.18. Modelo tridimensional realizado con el programa *CATT-Acoustic*.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.3.13.

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m^2)	Área (%)
Ladrillo visto	Paredes laterales y presbiterio	779,1	33,4
Panel acústico de lana de roca	Techo	577,0	24,7
Terrazo y mármol	Suelo	441,4	18,9
Ladrillo visto	Pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	225,4	9,7
Banco de madera	Zona de audiencia	203,2	8,7
Hormigón visto	Paños en pared de fondo (entre puertas de acceso y ventanas) y dinteles sacristía y baptisterio	34,2	1,5
Vidrio (en área grande)	Ventanas	27,1	1,2
Puerta metálica	Puertas de acceso	19,2	0,8
Puerta de madera	Puerta de despacho y sede (salvo respaldo)	12,9	0,6
Tela de algodón	Altar	8,8	0,4
Panel de madera	Respaldo sede	6,6	0,3
Granito	Ambón	0,6	0,0
TOTAL REVESTIMIENTOS		2335,4	100,0

Tabla 6.3.13. Áreas de revestimientos.

Siguiendo la metodología de investigación descrita en el capítulo 5, como en el resto de iglesias que componen la muestra de estudio, inicialmente el modelo informático fue sintonizado a partir del tiempo de reverberación T_{30} . Tras numerosos cálculos y ajustes, se logró que los valores simulados del T_{30} se diferenciaron menos del umbral perceptible *Just Noticeable Difference* (JND), es decir, menos del 5% de los valores medidos para cada frecuencia. Sin embargo, los resultados de los demás parámetros simulados (EDT, T_s , C_{50} , D_{50} , C_{80} , G, etc.) diferían sensiblemente de los obtenidos con la medición *in situ*, no reflejando, por tanto, el comportamiento real del espacio eclesial.

Dada esta circunstancia se procedió al ajuste del modelo informático a partir de los tiempos de reverberación T_{20} y T_{15} , pero los resultados obtenidos fueron similares a los antes descritos.

Finalmente, se optó por realizar la sintonización del modelo a partir del tiempo de reverberación inicial EDT. Al igual que con el T_{30} , el criterio de ajuste estimado como válido es aquel en el que los valores medidos y los simulados del EDT, difieren menos del umbral perceptible *Just Noticeable Difference* (JND), que corresponde a un 5% de los valores medidos. Una vez realizado dicho ajuste a partir del EDT se consiguió que los resultados simulados y medidos de todos los parámetros acústicos (a excepción del T_{30}) fuesen muy parecidos, por lo que se daba validez al proceso de sintonización del modelo.

Estos hechos revelan que esta iglesia presenta un comportamiento acústico singular, presumiblemente asociado a las características constructivas y sonoras del techo, de difícil caracterización e implementación en el software de simulación. Además, hay que tener en cuenta que todos los programas de simulación del campo sonoro realizan una simplificación del fenómeno de transferencia de ondas, aspecto que se solapa con limitaciones que pudieran suceder para reproducir situaciones singulares como la que nos ocupa.

Como en otros casos, para el ajuste del modelo informático a partir del tiempo de reverberación inicial EDT, se emplearon las condiciones de cálculo especificadas en la tabla 6.3.14, y los coeficientes de absorción y de dispersión sonora de los revestimientos del estado actual presentados en la tabla 6.3.15.

DATOS Y CONDICIONES DE CÁLCULO	
Algoritmo de cálculo	Nº2, cálculo completo, auralización detallada
Número de conos/rayos	25.000
Ecograma/respuesta al impulso	3 s
Densidad del aire	1,16 kg/m ³
Absorción del aire	Activada
Ruido de fondo	Según espectro medido <i>in situ</i>
Condiciones ambientales	28°C, 20%
Tiempo de cálculo	2 horas, 17 minutos (iglesia vacía)
Número de fuentes	2
Número de receptores	9
Número de planos	146

Tabla 6.3.14. Datos y condiciones de cálculo.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DEL ESTADO ACTUAL (%)

REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Ladrillo visto (paredes laterales y presbiterio)	α	4	7	3	4	5	5
	s	10	10	10	10	10	10
Panel acústico de lana de roca	α	75	98	96	85	80	75
	s	10	10	10	10	10	10
Terrazo y mármol	α	1	1	1	1	2	2
	s	10	10	10	10	10	10

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DEL ESTADO ACTUAL (%)							
REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Ladrillo visto (muros dispersivos)	α	4	7	3	4	5	5
	s	25	15	10	10	10	10
Banco de madera vacío	α	17	23	18	17	17	16
	s	30	40	50	60	70	80
Banco de madera ocupado	α	57	61	75	86	91	86
	s	30	40	50	60	70	80
Hormigón visto	α	1	1	2	2	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Vidrio (en área grande)	α	20	18	10	5	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Puerta metálica	α	14	10	6	8	10	10
	s	10	10	10	10	10	10
Puerta de madera	α	14	10	6	8	10	10
	s	10	10	10	10	10	10
Tela de algodón	α	3	4	11	17	24	35
	s	10	10	10	10	10	10
Panel de madera	α	4	4	3	3	3	2
	s	10	10	10	10	10	10
Granito	α	1	1	2	2	2	2
	s	10	10	10	10	10	10

Tabla 6.3.15. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos del estado actual. Los valores resaltados (en color rojo) son los ajustados en el proceso de sintonización.

En esta tabla se muestran los coeficientes de absorción y dispersión sonora de los materiales de revestimiento existentes en el recinto eclesial en el momento de la medición *in situ*, resaltándose aquellos con más incertidumbre y cuyos valores han sido ajustados para la sintonización del tiempo de reverberación (EDT). Los coeficientes de absorción correspondientes al ladrillo visto y al banco de madera han sido ajustados ligeramente a frecuencias bajas. Para las vidrieras, el ajuste de coeficientes se ha realizado aumentando los valores a bajas y medias frecuencias, si bien las frecuencias más alteradas corresponden a 250 y 500 Hz. En el caso del techo, los coeficientes de absorción han sido modificados a todas las frecuencias, aunque los mayores ajustes corresponden a las frecuencias bajas. Este ajuste del techo se justifica por su propio sistema constructivo: vigas metálicas en celosía, paneles acústicos de lana de roca, doble tablero de rasilla y uralita, conjunto que se comporta como un resonador de membrana aumentando la absorción a bajas frecuencias. Del mismo modo, las vidrieras constituyen grandes superficies con capacidad de vibración, hecho que justifica el incremento de absorción a bajas frecuencias.

Para los coeficientes de *scattering*, se ha admitido un valor por defecto del 10% en todas las bandas de octava analizadas, excepto en las correspondientes a los *muros dispersivos* y a los bancos de la iglesia. Para los *muros dispersivos* de ladrillo visto, los valores a bajas frecuencias se han estimado a partir del tamaño de las irregularidades, la profundidad media estructural y la longitud media estructural, para las correspondientes longitudes de onda implicadas. Sus coeficientes, recogidos en la tabla 6.3.15, contemplan implícitamente los fenómenos de dispersión de ondas sonoras que Fisac buscaba en su proyecto, aunque los muros de ladrillo quebrados con aristas vivas tienen menor efecto difusor que las superficies sinuosas convexas ejecutadas con hormigón visto en otras iglesias. Para los bancos de madera vacíos y los bancos ocupados, se han adoptado los coeficientes de bibliografía publicada¹⁶.

¹⁶ Cox, T.J. y D'Antonio, P. (2004). Opus cit.

Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2009). Opus cit.

6.3.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN *IN SITU* Y LA SIMULACIÓN

A partir del modelo ajustado del estado actual (EA) con la iglesia vacía, y utilizando las mismas condiciones de cálculo, se procedió a realizar la simulación acústica de la iglesia ocupada, tanto con la fuente situada en el altar (F1) como en el ambón (F2). Para la fuente F2 también se hizo la simulación sin presencia de público en las zonas de audiencia.

Los resultados de las simulaciones, para cada fuente, se comparan con los obtenidos en las medidas experimentales. Para facilitar el análisis de resultados en este apartado, las gráficas situadas en la columna izquierda muestran los valores correspondientes a la fuente 1, y las gráficas de la columna derecha, los de la fuente 2.

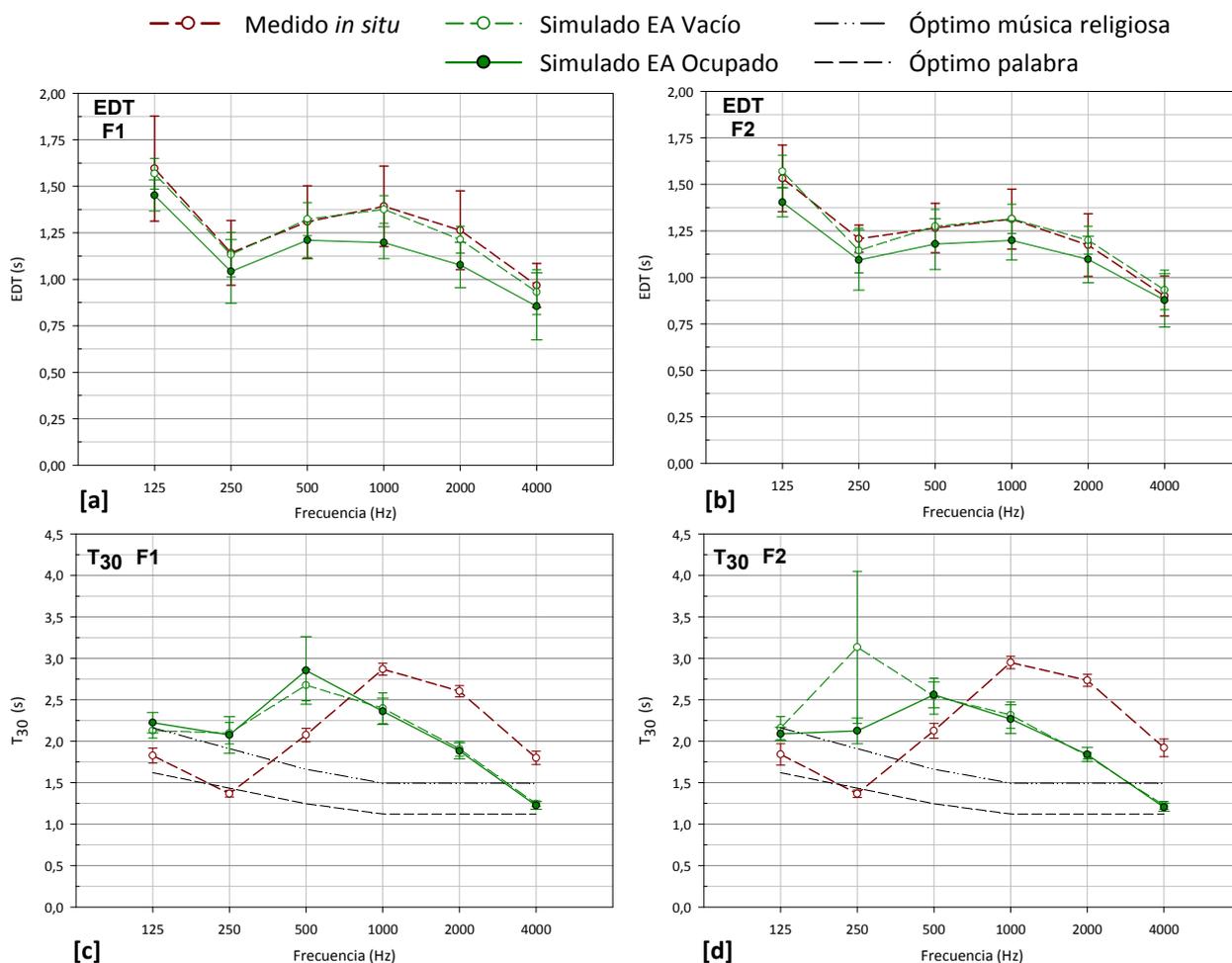
Reverberación

Figura 6.3.19. Tiempo de caída inicial EDT (s) y tiempo de reverberación T_{30} (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

En la figura 6.3.19 [a] puede observarse que los valores simulados del tiempo de reverberación inicial (EDT), en la hipótesis vacía de fieles y con la fuente situada en el altar (F1), presentan un buen ajuste con los valores medidos, difiriendo menos del umbral perceptible *Just Noticeable Difference* (JND), que corresponde a un 5% para las distintas bandas de octava.

Aunque la sintonización del modelo se ha realizado con la fuente en posición 1 (altar), con la fuente en la posición 2 (ambón) también se ha logrado un buen ajuste, con diferencias menores a un JND en todas las bandas de octava (figura 6.3.19 [b]).

Como era de esperar, al realizar la simulación acústica del recinto en condiciones de ocupación al 100%, los valores del tiempo de reverberación inicial disminuyen sensiblemente para ambas fuentes.

Las discrepancias encontradas al realizar el ajuste del modelo con el T_{30} y el haber realizado el ajuste con el EDT, justifican las diferencias entre los resultados calculados y medidos del T_{30} . No obstante, en las figuras 6.3.19 [c] y [d], se observa que, para las dos posiciones de la fuente, las curvas entre valores medidos y simulados del T_{30} presentan la misma tendencia y distribución frecuencial. Excepto a la frecuencia de 250 Hz para la fuente 2, los resultados obtenidos son muy parecidos para la configuración vacía y ocupada.

En cuanto a la dispersión espacial de ambos parámetros, se destaca que para ambas fuentes los valores obtenidos son similares y de valor pequeño, excepto para el T_{30} a las frecuencias de 500 Hz y 250 Hz para las fuentes 1 y 2, respectivamente.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

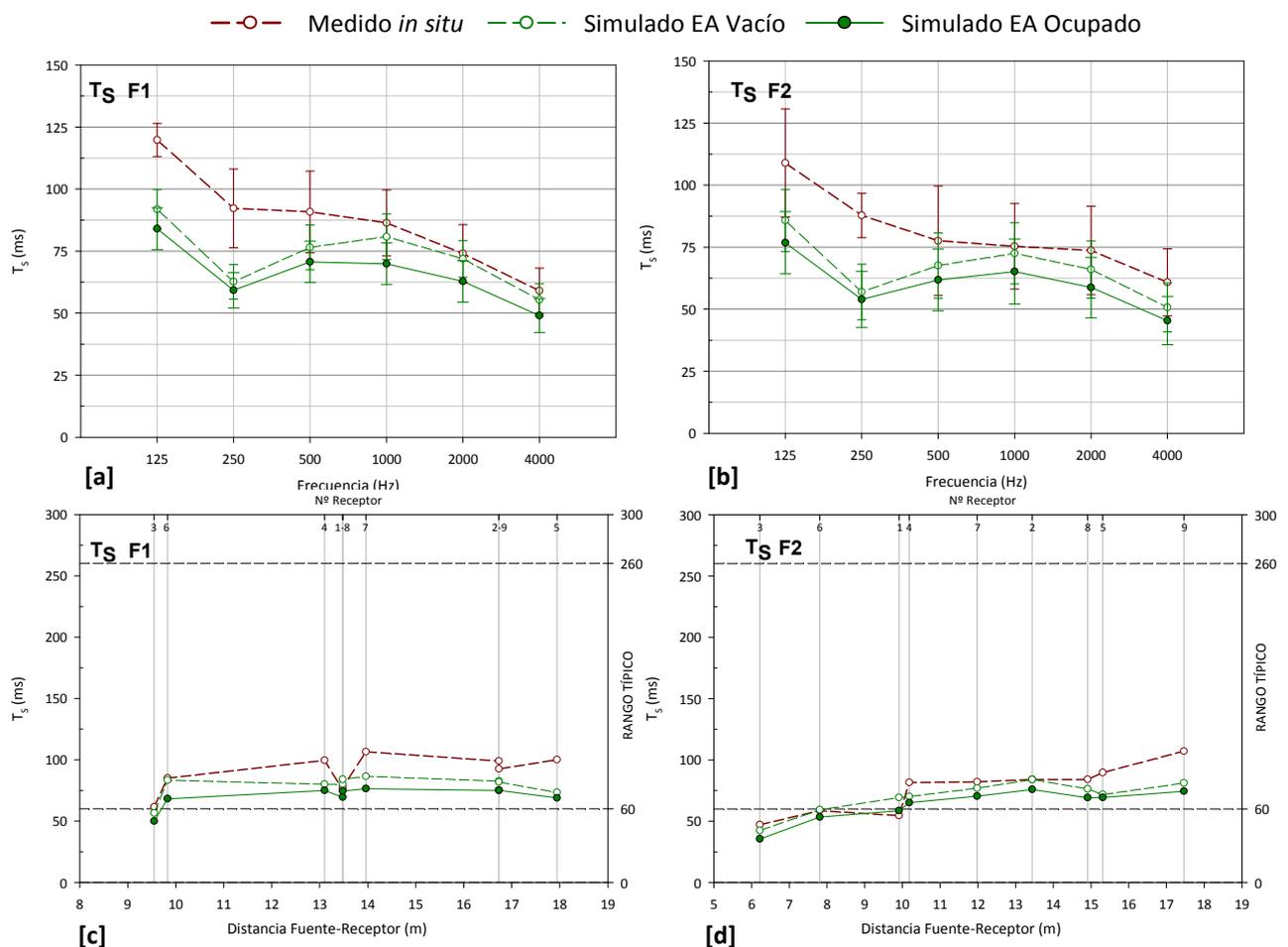


Figura 6.3.20. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Con puede comprobarse en las gráficas de la figura 6.3.20 [a] y [b], correspondientes al tiempo central T_s , para ambas posiciones de fuente se obtienen buenas aproximaciones entre los valores medidos y simulados para frecuencias superiores a 500 Hz, donde las diferencias son inferiores a 2 JND. A frecuencias bajas el ajuste refleja discrepancias mayores. La dispersión espacial presenta valores inferiores en los resultados de la simulación acústica frente a los obtenidos en la medición *in situ* y es menor con la fuente sonora en posición 1.

La representación de los resultados del T_s en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figuras 6.3.20 [c] y [d]), muestran que los valores medidos y simulados presentan tendencias y rangos similares.

Al igual que ocurría con los parámetros relacionados con la reverberación, la presencia de los fieles en la iglesia reduce ligeramente los valores del T_s , mejorando la nitidez del sonido en todos los puntos de recepción y para ambas posiciones de la fuente. Salvo para los puntos más cercanos a las fuentes sonoras, el T_s se encuentra dentro del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

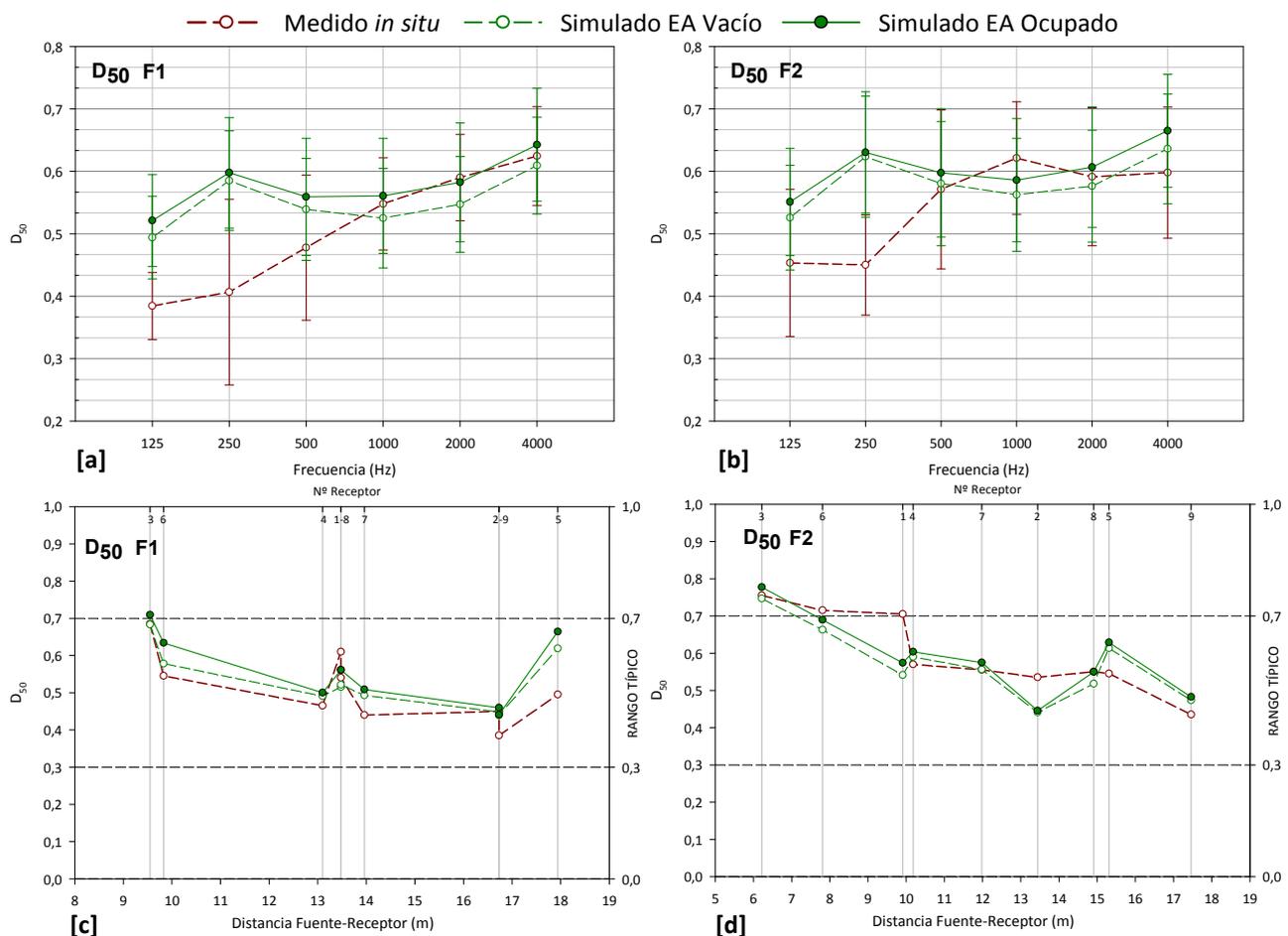


Figura 6.3.21. Definición D_{50} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Como ocurría con el T_s , para la definición D_{50} se obtienen buenas aproximaciones entre valores simulados informáticamente y medidos *in situ* para frecuencias superiores a 500 Hz, donde las diferencias obtenidas son inferiores a 2 JND, tanto para la fuente situada en el altar (F1) como en el ámbón (figuras 6.3.21 [a] y [b]).

De nuevo, la dispersión espacial es menor en la simulación que en la medición *in situ*, y mayor cuando la fuente se sitúa en el ámbón (F2), tanto en la configuración vacía como ocupada.

Para ambas fuentes y estados de ocupación de la iglesia, los resultados en la mayoría de los puntos de recepción de la zona de audiencia se encuentran dentro del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. En las dos posiciones de fuente, las diferencias superiores a 2 JND entre los valores medios medidos y simulados con la iglesia vacía, corresponden a los puntos de recepción 1, 2 y 5 (figuras 6.3.21 [c] y [d]).

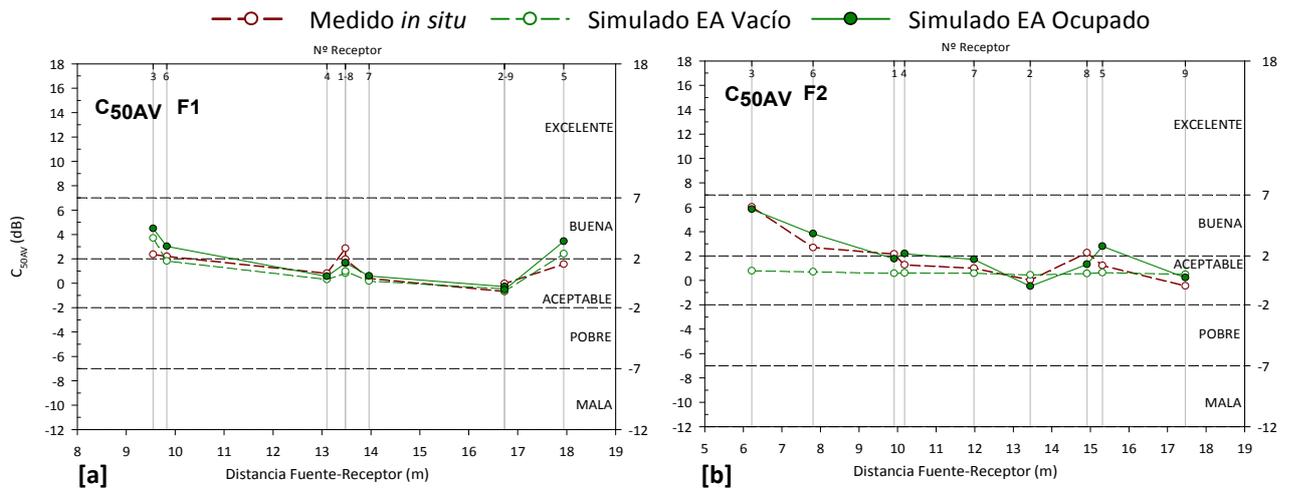


Figura 6.3.22. Claridad para la palabra C_{50} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Como en las magnitudes acústicas analizadas anteriormente, los resultados de la claridad para la palabra mejoran ligeramente cuando la iglesia está ocupada por los fieles, siendo más acusada esta mejora con la fuente en posición 2. En todos los puntos de recepción y para las dos fuentes, la claridad puede calificarse entre aceptable y buena, según la escala de interpretación de Marshall (figuras 6.3.22 [a] y [b]). En los puntos más próximos a la fuente F2, los valores medios medidos y simulados con la iglesia vacía difieren más de 2 JND.

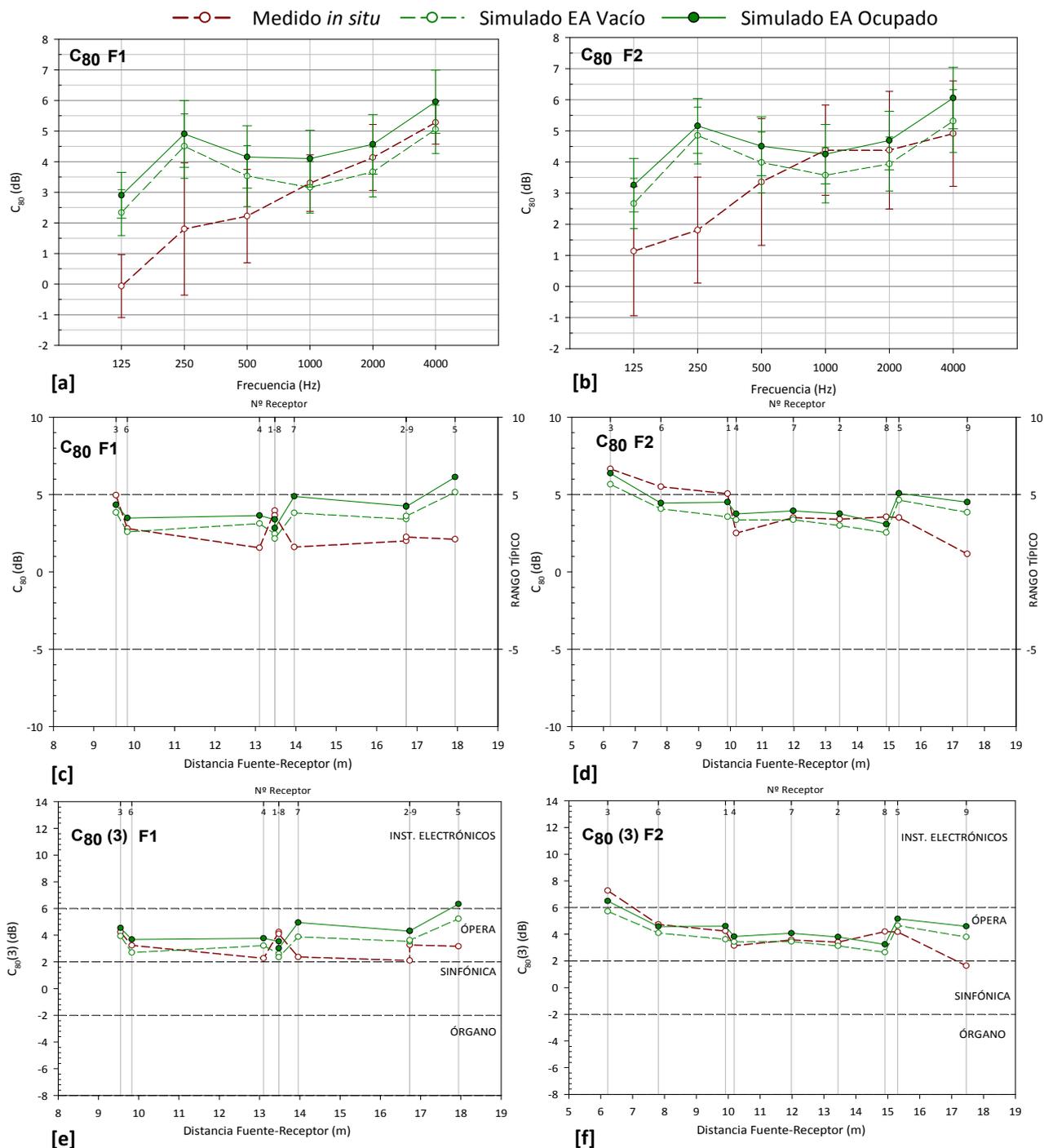


Figura 6.3.23. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Para la claridad musical (C_{80}), cuyos datos promediados espacialmente frente a la frecuencia se representan en las figuras 6.3.23 [a] y [b], se obtienen buenas aproximaciones para frecuencias superiores a 500 Hz, donde las diferencias son inferiores a 2 JND. Para ambas fuentes, la dispersión espacial sigue siendo inferior en los valores simulados frente a los medidos.

En los resultados promediados espectralmente en función de la distancia fuente-receptor, tanto para el C_{80} (figuras 6.3.23 [c] y [d]) como para el $C_{80}(3)$ (figuras 6.3.23 [e] y [f]) se observa que las mayores aproximaciones, en la hipótesis de iglesia vacía, se obtienen en los puntos más cercanos a la fuente 1, y en los situados a media distancia de la fuente 2. Cuando la iglesia se simula ocupada mejora ligeramente la claridad musical para ambas posiciones de fuente y para todos los puntos de recepción. Finalmente, casi todos los resultados del C_{80} se encuentran dentro del rango típico

establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, mientras que el $C_{80}(3)$ califica el recinto como adecuado para la audición de música de ópera.

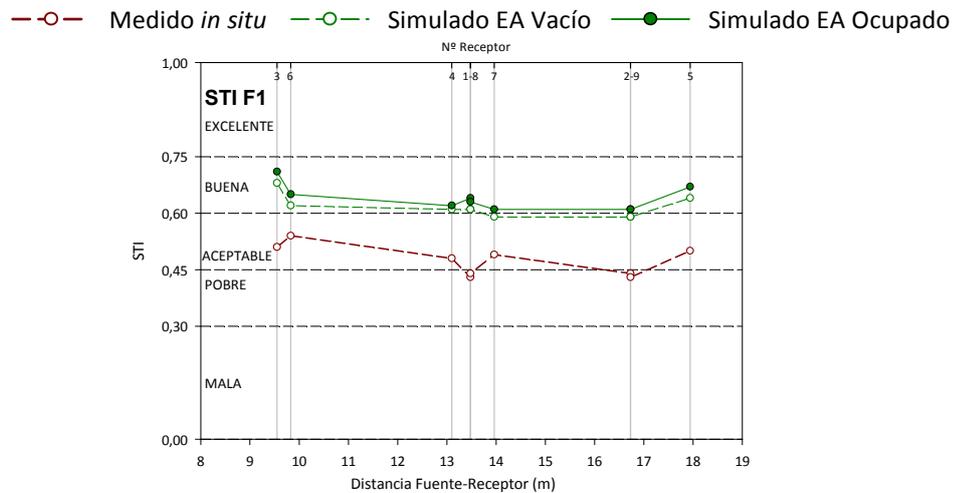


Figura 6.3.24. Índice de transmisión de la palabra STI, frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1.

Respecto al índice de transmisión de la palabra (STI), en la figura 6.3.24 se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor con la fuente sonora situada en el altar (F1), junto con la escala de inteligibilidad subjetiva. Para la iglesia vacía, los resultados de la simulación acústica son mejores que en la medida experimental, permitiendo calificar la inteligibilidad de la sala como buena, en el primer caso, y como aceptable, en el segundo. La presencia de los fieles supone una leve mejora de la inteligibilidad, que pasa a calificarse como buena en todos los puntos de recepción.

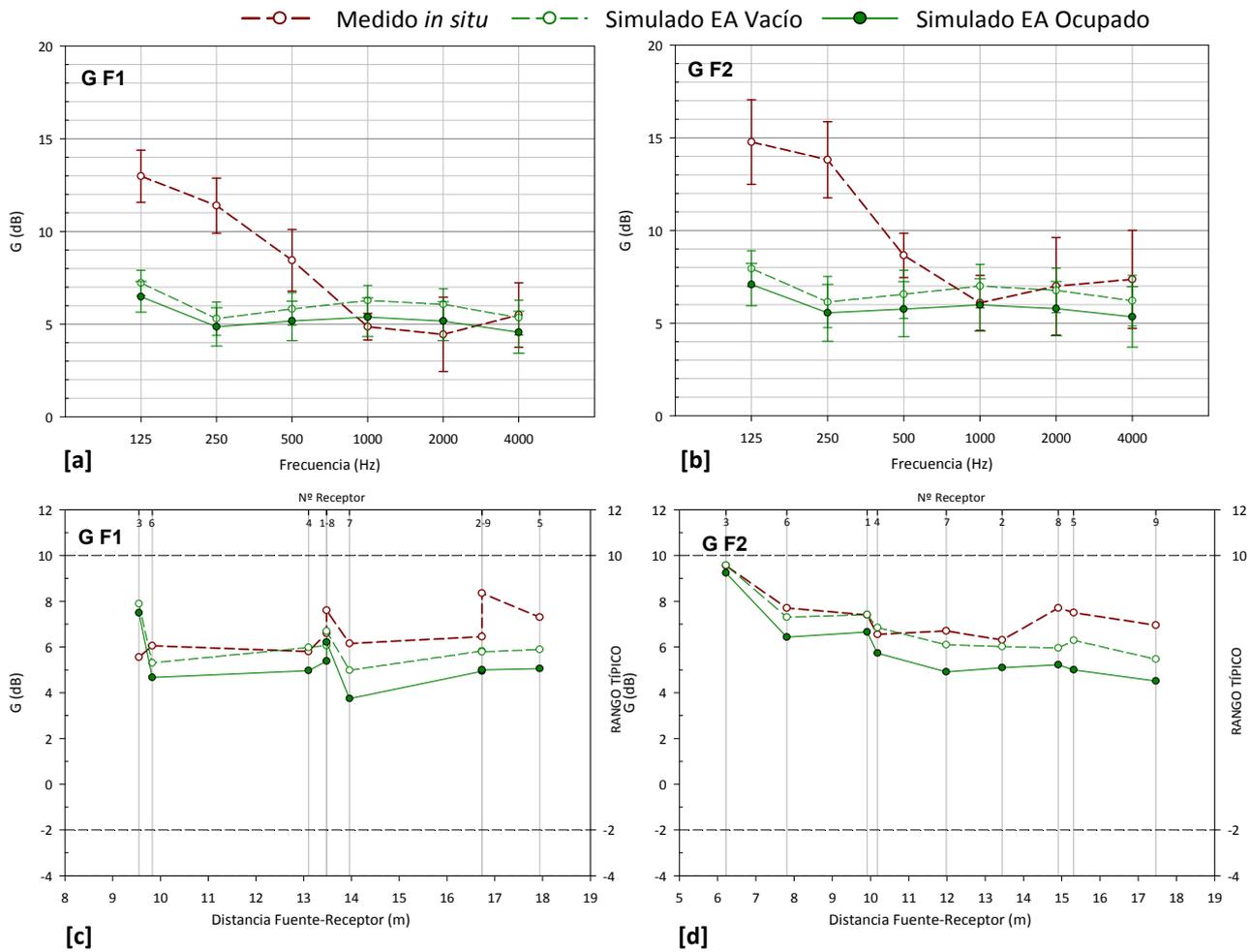
Nivel sonoro subjetivo

Figura 6.3.25. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

En el caso de la fuerza sonora (G), para ambas posiciones de fuente (figuras 6.3.25 [a] y [b]), se obtienen buenas aproximaciones entre los resultados simulados y medidos a partir de los 1000 Hz. Para frecuencias inferiores a 1000 Hz los resultados difieren más de 2 JND. A la justificación general de este hecho explicado en el apartado 6.1.2.3 (correspondiente al análisis de la iglesia de Santa Ana) debemos añadir el comportamiento singular de esta iglesia aludido en los apartados 6.3.2.1 y 6.3.2.2.

En cuanto a los resultados de G , promediados espectralmente en función de la distancia fuente-receptor (figuras 6.3.25 [c] y [d]), se observa que, en general, para ambas posiciones de la fuente los resultados entre valores medidos y simulados se aproximan para distancias inferiores a 13,5 m.

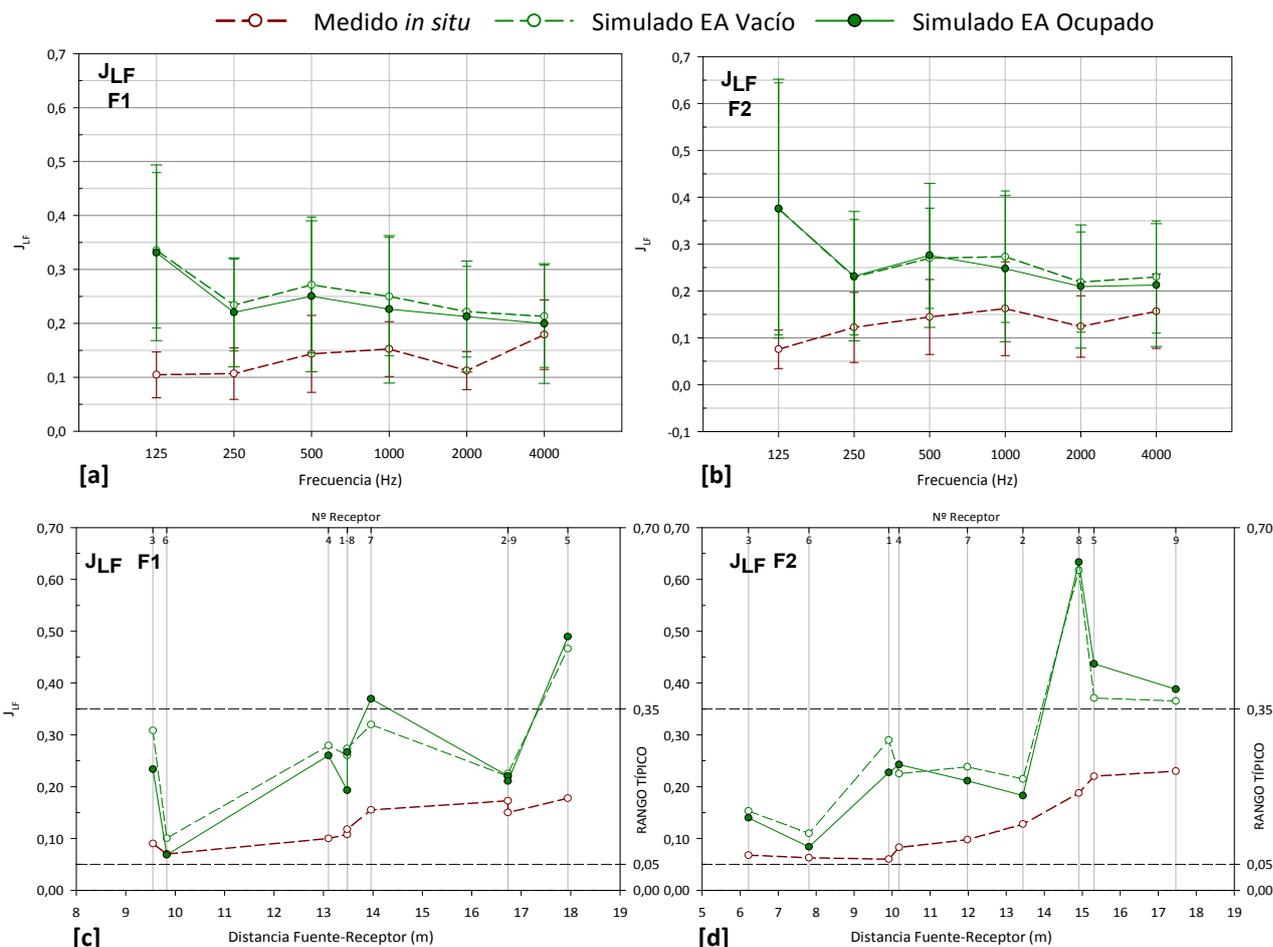
Impresión espacial

Figura 6.3.26. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Como en otras ocasiones, los resultados simulados que menos se ajustan a los medidos *in situ* los encontramos en los parámetros relacionados con el ancho aparente de la fuente, la envolvente y la audición binaural, representados por J_{LF} y $IACC_E$. Las diferencias superan ligeramente 2 JND en la mayoría de bandas de octava analizadas.

Para la fracción de energía lateral precoz (figura 6.3.26), las simulaciones proporcionan resultados similares en las configuraciones vacío y ocupado, distanciándose sensiblemente ambas de los resultados obtenidos en las medidas, quedando patente que se trata de uno de los parámetros acústicos más difícil de simular. Además, a diferencia de los parámetros analizados anteriormente, la desviación estándar para ambas fuentes es mayor en las simulaciones que en las mediciones *in situ*.

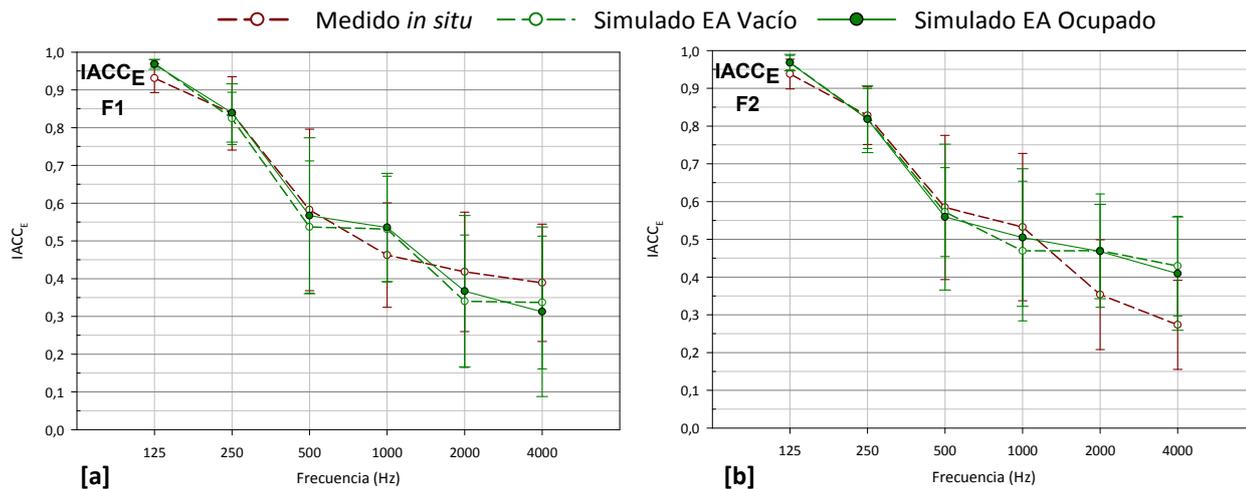


Figura 6.3.27. Coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Por último, los datos obtenidos para el coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACC_E$) presentados en la figura 6.3.27, indican que la información espacial está asociada a las medias y altas frecuencias. Al igual que ocurría con el J_{LF} , los valores simulados se distancian de los obtenidos en las medidas a estas frecuencias, siendo a su vez parecidos los obtenidos con las simulaciones del recinto vacío y ocupado.

6.3.2.4. VALORACIÓN GLOBAL

Como conclusión de este análisis comparativo entre la medición *in situ* y las simulaciones, podemos afirmar que, a pesar del comportamiento singular de la iglesia y la limitación que conlleva su simulación del campo sonoro, el modelo acústico ajustado a partir del tiempo de reverberación inicial (EDT) es representativo del comportamiento que posee el recinto en su estado original, sobre todo para frecuencias superiores a 500 Hz.

En general, la posición de la fuente en el altar o en el ambón no conlleva diferencias significativas en los parámetros acústicos analizados. Los indicadores acústicos sobre reverberación son prácticamente indiferentes a su posición; los referentes a la inteligibilidad de la palabra, la claridad del sonido percibida y nivel sonoro subjetivo denotan resultados ligeramente más favorables con la fuente situada en el ambón; y, por último, los correspondientes a la impresión espacial, son los más sensibles a la posición de aquella.

Apoyándonos en lo anterior, al incorporar al modelo ajustado la propuesta de rehabilitación acústica, únicamente se presentarán los resultados para una sola posición de fuente, ya que las conclusiones que se obtendrían para ambas posiciones de la fuente serían similares. En el caso de la iglesia que nos ocupa, el estudio se realizará para la fuente situada en el altar (F1), que además es la más representativa y habitual en el uso cotidiano del recinto.

Por otro lado, según se explicó en el apartado 5.5 del capítulo anterior, para plantear la propuesta de rehabilitación acústica, resulta fundamental el estudio previo del comportamiento de las ondas sonoras en el recinto, con objeto de evaluar la importancia relativa de las superficies implicadas al recibir los impactos de los rayos sonoros (figura 6.3.28). En esta iglesia, para la fuente situada en el altar (F1), cuando el frente de onda comienza a avanzar hacia la audiencia, se generan entre los paramentos que conforman el presbiterio bastantes reflexiones tardías. Los paramentos oblicuos de transición entre el presbiterio y la zona de audiencia favorecen la disposición asamblearia de la iglesia pero hacen que apenas se produzcan reflexiones en las paredes laterales, las cuales serían beneficiosas para la audiencia. La superficie con mayor incidencia de impactos sonoros es el techo, pero su acusada inclinación hacia el presbiterio y la alta absorción, ocasiona que la audiencia reciba

pocas reflexiones tempranas. Los impactos de rayos sonoros que reciben las superficies oblicuas formadas por los muros dispersivos no se aprecian vinculantes para la acústica del recinto, aunque se concentran bastantes reflexiones entre ellos y las zonas de acceso a la iglesia.

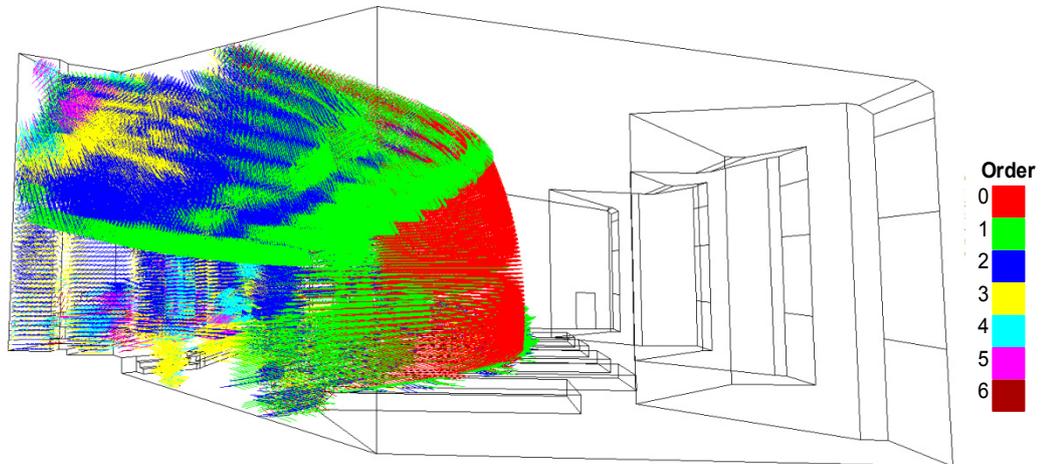


Figura 6.3.28. Visualización de la trayectoria de los rayos sonoros en el modelo informático del recinto. Trascorridos primeros 40 ms, frecuencia de 1000 Hz, fuente 1. Colores según orden de reflexión.

Finalmente, indicar que aunque los resultados de los distintos parámetros acústicos (excepto los relativos a reverberación), tanto los obtenidos con la medición acústica *in situ* como los calculados con el modelo informático tridimensional, no reflejan, a priori, deficiencias sonoras relevantes en el recinto, lo cierto es que la impresión subjetiva de los integrantes del equipo técnico que realizamos las medidas experimentales fue peor de lo que posteriormente han reflejados las medidas y simulaciones.

6.3.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA

6.3.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

La propuesta de intervención acústica, además de intentar alcanzar los objetivos generales descritos en el apartado 5.6 del capítulo *Método de investigación* y corregir las deficiencias acústicas detectadas en el análisis de las condiciones del estado actual, se plantea los siguientes objetivos específicos:

- Ajustar el tiempo de reverberación actual a los considerados como óptimos para los usos de palabra y música religiosa.
- Mantener la buena distribución sonora existente en el recinto.
- Lograr que la iglesia tenga un buen comportamiento sonoro, independientemente del grado de ocupación de la misma, de tal forma que su acústica no esté condicionada por el número de personas que la ocupen.
- Por la importancia que tiene la inteligibilidad de la palabra en estos recintos, proponer una adecuada instalación de apoyo electroacústico que la mejore.

Para conseguir lo anterior, la propuesta de rehabilitación acústica se apoya en un conjunto de actuaciones, orientadas en su mayoría a la implementación en el recinto de elementos absorbentes y reflectores, dispuestos estratégicamente desde el punto de vista acústico y arquitectónico. El conjunto de revestimientos, cuya localización se representa en la figura 6.3.29, se describen a continuación:

- Reflector acústico sobre el presbiterio. Se trata de una lámina transparente (de vidrio o material sintético) suspendida del techo del presbiterio e inclinada de la misma forma que una concha acústica. Con esta operación, se pretenden evitar las reflexiones perjudiciales que se generan sobre el presbiterio y mejorar las que llegan a la superficie de la audiencia.
- Panel absorbente de madera ranurado por la cara vista y perforado por la cara interior, con manta de fibra mineral de 50 mm de espesor (marca: Decustik, modelo D+003). Este revestimiento se dispone en los paramentos laterales, a izquierda y derecha del presbiterio. Presenta un ranurado horizontal, con textura y color similar a la fábrica de ladrillo visto. Se pretende que aporte absorción sonora al presbiterio y reduzca las reflexiones tardías que se generan en esa zona.
- Revestimiento de las puertas de acceso con el panel de madera de tipo ranurado descrito anteriormente.
- Panel acústico de lana de roca, de 30 mm de espesor, adosado a las piezas de hormigón visto situadas entre las puertas de acceso y los huecos de iluminación natural (marca: Rockfon, modelo: Mono Acoustic TE 1200x1200x30 mm).
Con la introducción de estos dos últimos revestimientos se aporta absorción a la pared de fondo, con la intención de atenuar y disminuir las reflexiones tardías.
- Incorporación de absorción sonora en el respaldo de los bancos de madera, mediante el mismo panel de madera empleado para los paramentos laterales del presbiterio y las puertas de acceso. En la parte posterior del respaldo, tras la lana mineral, se dispone un panel de madera liso de 16 mm de espesor (figura 6.3.30). Aunque el comportamiento de esta iglesia vacía no difiere mucho del ocupado, con esta operación se dota de absorción sonora al propio banco, consiguiéndose que las condiciones acústicas no dependan del estado de ocupación de la iglesia.

6.3.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LA PROPUESTA

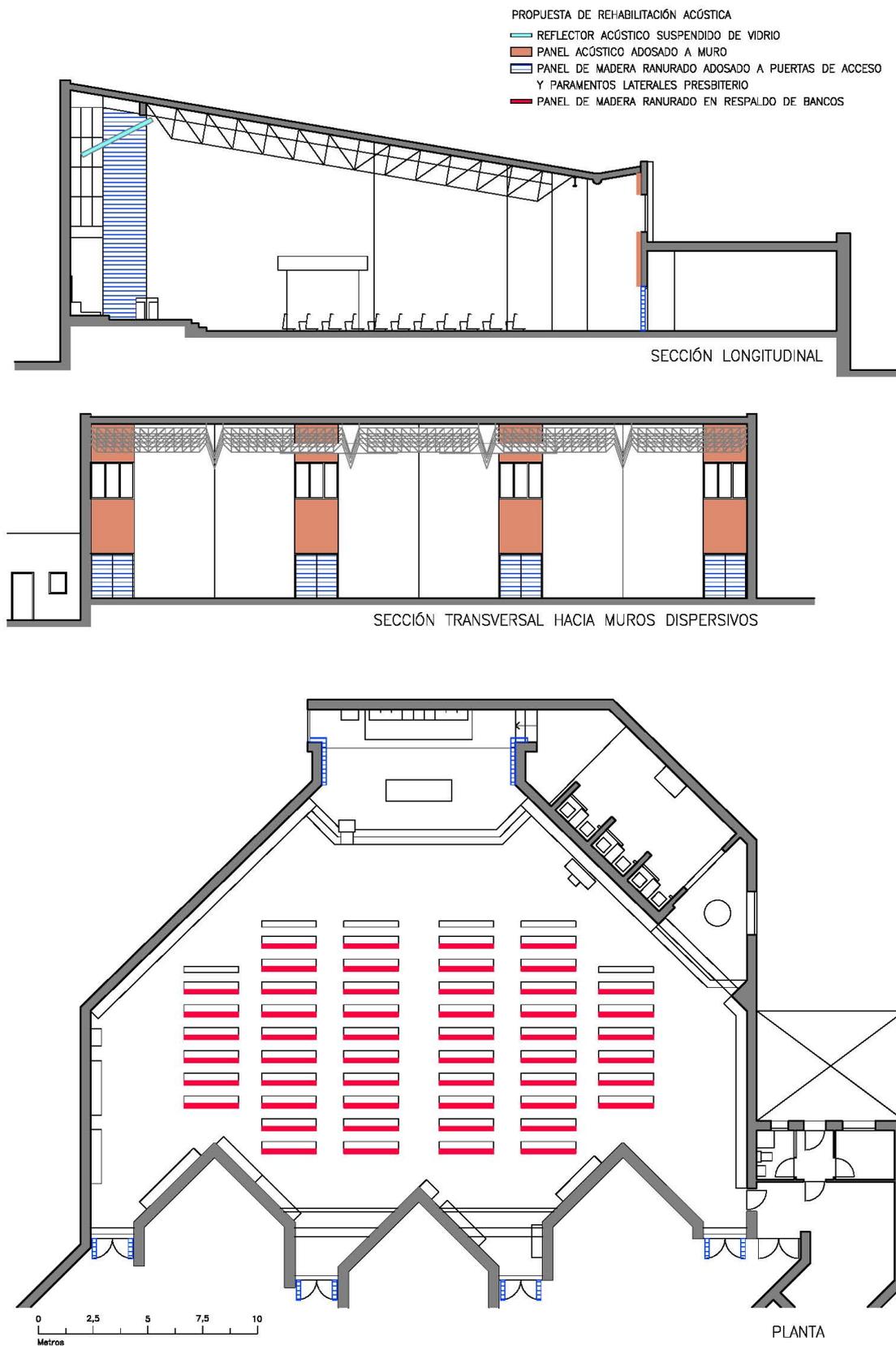


Figura 6.3.29. Planta y sección. Situación de materiales de revestimiento propuestos.

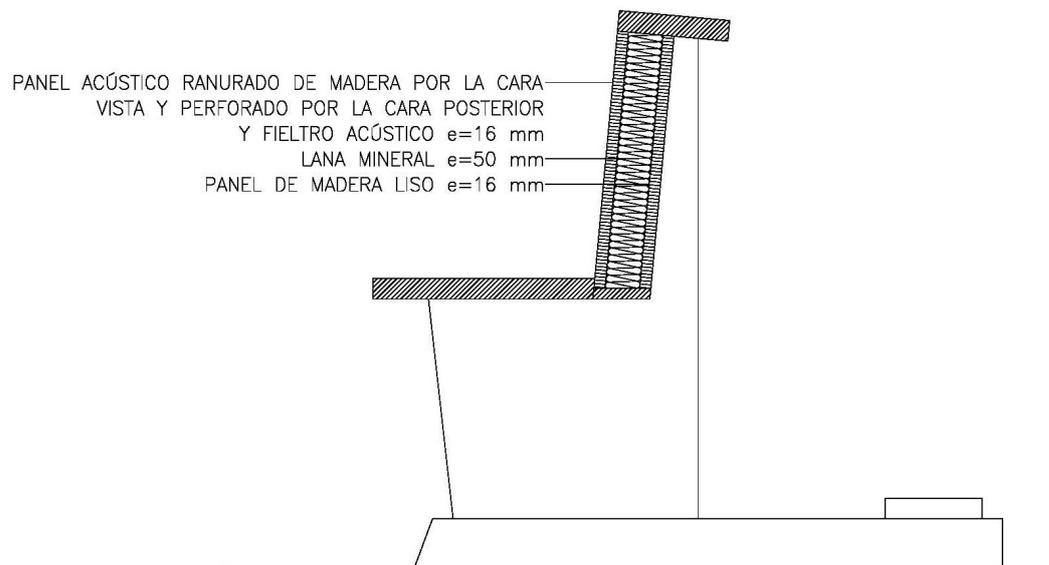


Figura 6.3.30. Sección del banco propuesto.

6.3.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO

En la figura 6.3.31, se muestran dos axonometrías del modelo de simulación tridimensional del espacio interior de la iglesia, realizado con el programa *CATT-Acoustic* v.8.0k, en el que se han incorporado los elementos propuestos para la rehabilitación acústica de la misma.

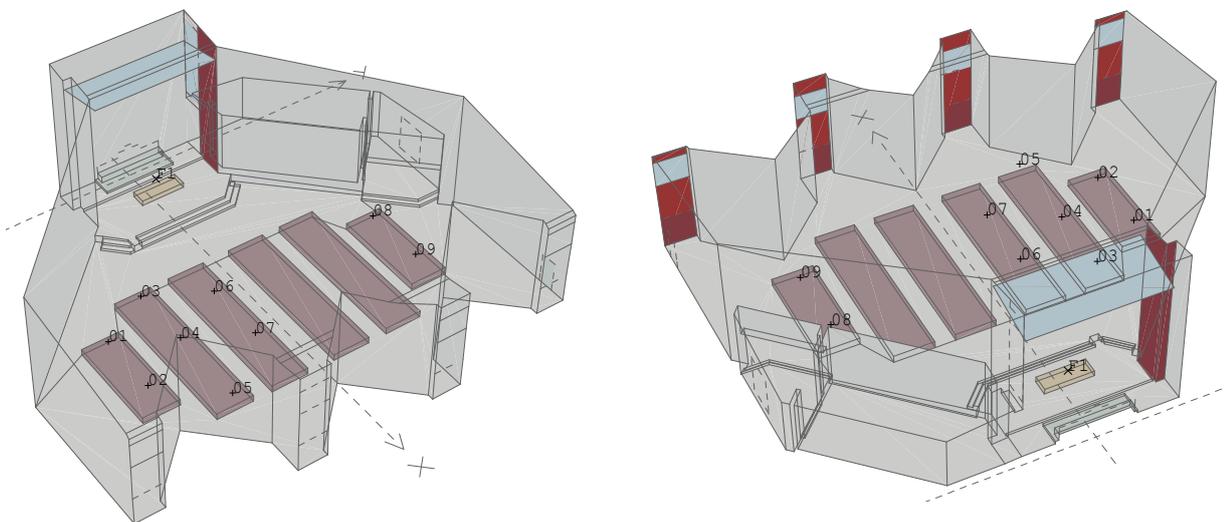


Figura 6.3.31. Modelo tridimensional de la iglesia con la propuesta de rehabilitación acústica.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.3.16.

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
Ladrillo visto	Paredes laterales y presbiterio	772,6	30,6
Panel acústico de lana de roca	Techo	577,0	24,1
Terrazo y mármol	Suelo	441,4	18,4
Ladrillo visto	Pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	225,4	9,4
Banco de madera con respaldo ranurado	Zona de audiencia	203,2	8,5
Vidrio (en área grande)	Ventanas y reflector acústico	87,8	3,7
Panel ranurado de madera	Puertas de acceso y laterales presbiterio	62,1	2,6
Panel de lana mineral adosado	Piezas de hormigón visto (entre puertas de acceso y ventanas)	26	1,1
Puerta de madera	Puerta de despacho y sede (salvo respaldo)	12,9	0,5
Hormigón visto	Dinteles sacristía y baptisterio y canalones cubierta	9,0	0,4
Tela de algodón	Altar	8,8	0,4
Panel de madera	Respaldo sede	6,6	0,3
Metal	Viga	0,7	0,1
Granito	Ambón	0,6	0,0
TOTAL REVESTIMIENTOS		2396,1	100

Tabla 6.3.16. Áreas de revestimientos.

Para la simulación del nuevo modelo informático, en las hipótesis de iglesia vacía y ocupada, se emplearon las condiciones de cálculo especificadas en la tabla 6.3.17, y los coeficientes de absorción y de dispersión sonora de los nuevos revestimientos son los presentados en la tabla 6.3.18.

DATOS Y CONDICIONES DE CÁLCULO	
Algoritmo de cálculo	Nº2, cálculo completo, auralización detallada
Número de conos/rayos	25.000
Ecograma/respuesta al impulso	3 s
Densidad del aire	1,16 kg/m ³
Absorción del aire	Activada
Ruido de fondo	Según espectro medido <i>in situ</i>
Condiciones ambientales	28°C, 20%
Tiempo de cálculo	30 minutos (iglesia vacía)
Número de fuentes	2
Número de receptores	9
Número de planos	148

Tabla 6.3.17. Datos y condiciones de cálculo.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DE LA PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA (%)							
REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Vidrio en área grande (reflector acústico)	α	20	18	10	5	2	2
	s	20	15	10	10	10	10
Panel ranurado de madera (puertas y laterales presbiterio)	α	30	70	95	95	90	90
	s	10	10	10	10	10	10
Panel de lana mineral adosado (piezas de hormigón)	α	20	50	99	99	99	99
	s	10	10	10	10	10	10
Banco de madera con respaldo ranurado (vacío)	α	22	40	45	45	43	42
	s	30	40	50	60	70	80

Tabla 6.3.18. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos introducidos en el recinto eclesial con la propuesta de rehabilitación acústica.

En la tabla 6.3.18 se muestran los coeficientes de absorción y *scattering* de los revestimientos utilizados para la simulación de las condiciones acústicas con la propuesta de rehabilitación. Los valores de los mismos han sido obtenidos de fuentes reconocidas y publicadas internacionalmente, así como de los propios fabricantes de los productos seleccionados (en el anexo 3 se muestra un

listado completo de todos los coeficientes de los materiales utilizados en esta investigación, así como la fuente de donde se han obtenido). Los valores de los coeficientes de absorción correspondientes a revestimientos heterogéneos, como los bancos de madera con respaldo absorbente, han sido obtenidos analíticamente, a partir de las proporciones geométricas de los elementos que integran el conjunto. Los coeficientes de dispersión sonora de estas superficies son los mismos que los empleados para el ajuste del modelo informático (tabla 6.3.15)

6.3.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

En este apartado se analizan los resultados de los principales parámetros acústicos. Sistemáticamente, las tablas y gráficas de cada parámetro muestran los resultados de la medición realizada *in situ*, las simulaciones del estado actual (EA), en sus configuraciones de vacío y ocupado, así como los valores de las simulaciones de la propuesta de rehabilitación acústica (RE), con la sala vacía y ocupada al 100%, correspondiendo todos estos resultados a la fuente en posición 1.

Reverberación

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T ₃₀ (s)	MEDIDO Vacío	1,83 0,09	1,37 0,04	2,07 0,08	2,87 0,07	2,60 0,07	1,80 0,08
	SIMULADO EA Vacío	2,13 0,09	2,10 0,13	2,68 0,19	2,40 0,19	1,91 0,09	1,25 0,03
	SIMULADO EA Ocupado	2,22 0,12	2,07 0,22	2,85 0,41	2,36 0,16	1,88 0,10	1,22 0,05
	SIMULADO RE Vacío	1,82 0,05	1,46 0,12	1,57 0,12	1,56 0,17	1,38 0,06	0,99 0,02
	SIMULADO RE Ocupado	1,76 0,12	1,52 0,12	1,57 0,13	1,55 0,17	1,41 0,18	0,95 0,04
	Óptimo palabra Óptimo música	1,62 2,16	1,43 1,91	1,25 1,66	1,12 1,49	1,12 1,49	1,12 1,49
EDT (s)	MEDIDO Vacío	1,60 0,28	1,14 0,17	1,31 0,19	1,39 0,22	1,26 0,21	0,97 0,12
	SIMULADO EA Vacío	1,57 0,08	1,13 0,12	1,32 0,09	1,38 0,07	1,21 0,07	0,93 0,12
	SIMULADO EA Ocupado	1,45 0,08	1,04 0,17	1,21 0,10	1,20 0,09	1,08 0,12	0,85 0,18
	SIMULADO RE Vacío	1,28 0,10	0,82 0,16	0,83 0,17	0,87 0,14	0,84 0,13	0,71 0,12
	SIMULADO RE Ocupado	1,17 0,11	0,80 0,16	0,82 0,16	0,84 0,14	0,80 0,15	0,68 0,14

Tabla 6.3.19. Valores del tiempo de reverberación T₃₀ (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

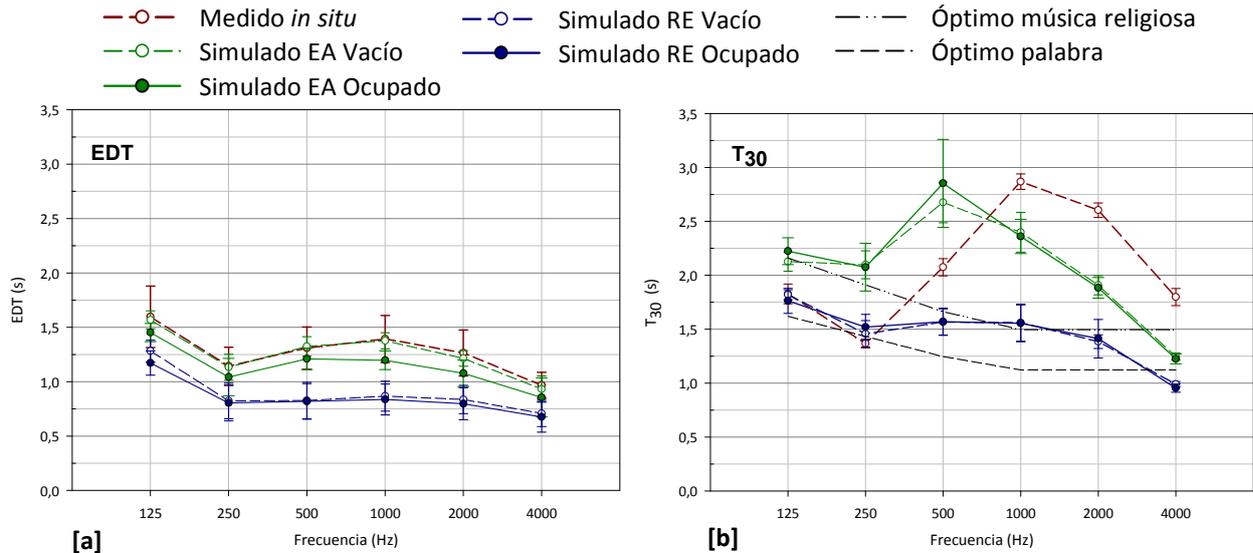


Figura 6.3.32. Tiempo de caída inicial EDT (s) y tiempo de reverberación T_{30} (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Como puede comprobarse en las gráficas de la figura 6.3.32, con la propuesta de rehabilitación se reducen los tiempos de reverberación del recinto, tanto EDT como T_{30} . Para ambos parámetros, los resultados para las configuraciones de sala vacía y ocupada son prácticamente coincidentes para todas las frecuencias. En cuanto al EDT (figura 6.3.32 [a]), los valores a las frecuencias medias son inferiores a 1,0 s, con lo que los resultados correspondientes al promediado en frecuencia de número único se encuentran por debajo del límite inferior del rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010 (entre 1,0 s y 3,0 s).

Los resultados obtenidos para el T_{30} con la propuesta de rehabilitación son bastante homogéneos, comparados con los obtenidos con la simulación del estado actual y la medición *in situ*. Para ambos estados de ocupación, y para casi todas las frecuencias, los tiempos de reverberación obtenidos se ajustan a los valores óptimos para la música religiosa y la palabra (figura 6.3.32 [b]).

Como en el estado actual, al incorporar la propuesta de rehabilitación acústica la dispersión espacial en estos parámetros relacionados con la reverberación sigue siendo muy pequeña, tanto para la iglesia vacía como ocupada.

Otras opciones para la rehabilitación acústica de la iglesia fueron estudiadas, como incorporar absorción sonora al suelo del presbiterio, aumentar la superficie de audiencia o reducir el volumen de la iglesia segregando el baptisterio y la capilla penitencial del espacio eclesial, pero dichas actuaciones no resultaron efectivas para mejorar tanto el tiempo de reverberación como el resto de parámetros acústicos.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_s (ms)	MEDIDO Vacío	119,78	92,22	90,78	86,33	74,00	59,00
		6,65	15,85	16,49	13,28	11,63	9,14
	SIMULADO EA Vacío	91,82	62,63	76,50	80,80	71,87	55,33
		7,96	7,00	9,05	9,24	7,37	6,48
	SIMULADO EA Ocupado	84,04	59,20	70,64	69,88	62,79	49,00
		8,42	7,10	8,31	8,38	8,35	6,81
	SIMULADO RE Vacío	77,47	47,23	47,32	52,01	50,59	42,03
		6,82	5,08	5,44	6,20	6,19	5,60
	SIMULADO RE Ocupado	70,79	45,42	45,51	48,26	46,10	38,34
		7,22	5,23	5,97	6,78	6,32	5,72

Tabla 6.3.20. Valores del tiempo central T_s (ms). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

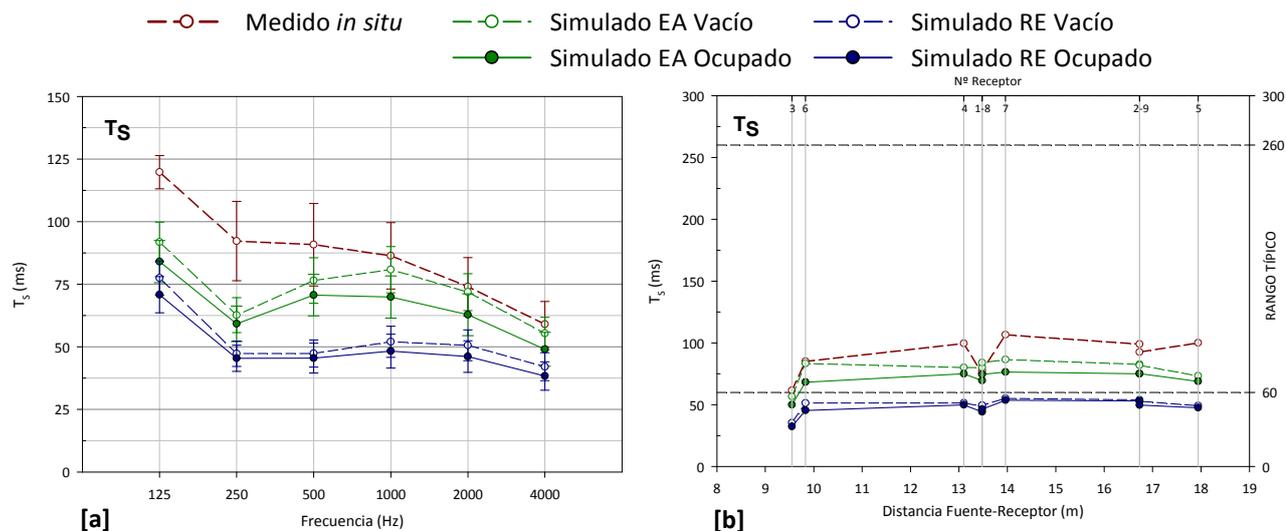


Figura 6.3.33. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

En la gráfica 6.3.33 [a] puede observarse como las medidas correctoras disminuyen sensiblemente los valores del tiempo central (T_s), provocando una mayor nitidez en el sonido percibido.

Al representar los valores del tiempo central en cada punto de recepción (figura 6.3.33 [b]), se aprecia que, para las configuraciones de iglesia vacía y ocupada, todos los resultados se encuentran muy próximos al límite inferior de rango típico establecido por la norma de referencia ya citada.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D_{50}	MEDIDO Vacío	0,38	0,41	0,48	0,55	0,59	0,62
		0,05	0,15	0,12	0,07	0,07	0,08
	SIMULADO EA Vacío	0,49	0,58	0,54	0,52	0,55	0,61
		0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
	SIMULADO EA Ocupado	0,52	0,60	0,56	0,56	0,58	0,64
		0,07	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09
	SIMULADO RE Vacío	0,54	0,67	0,68	0,66	0,66	0,71
		0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	SIMULADO RE Ocupado	0,57	0,68	0,69	0,68	0,69	0,73
		0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08

Tabla 6.3.21. Valores de la definición D_{50} . Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo) Fuente 1.

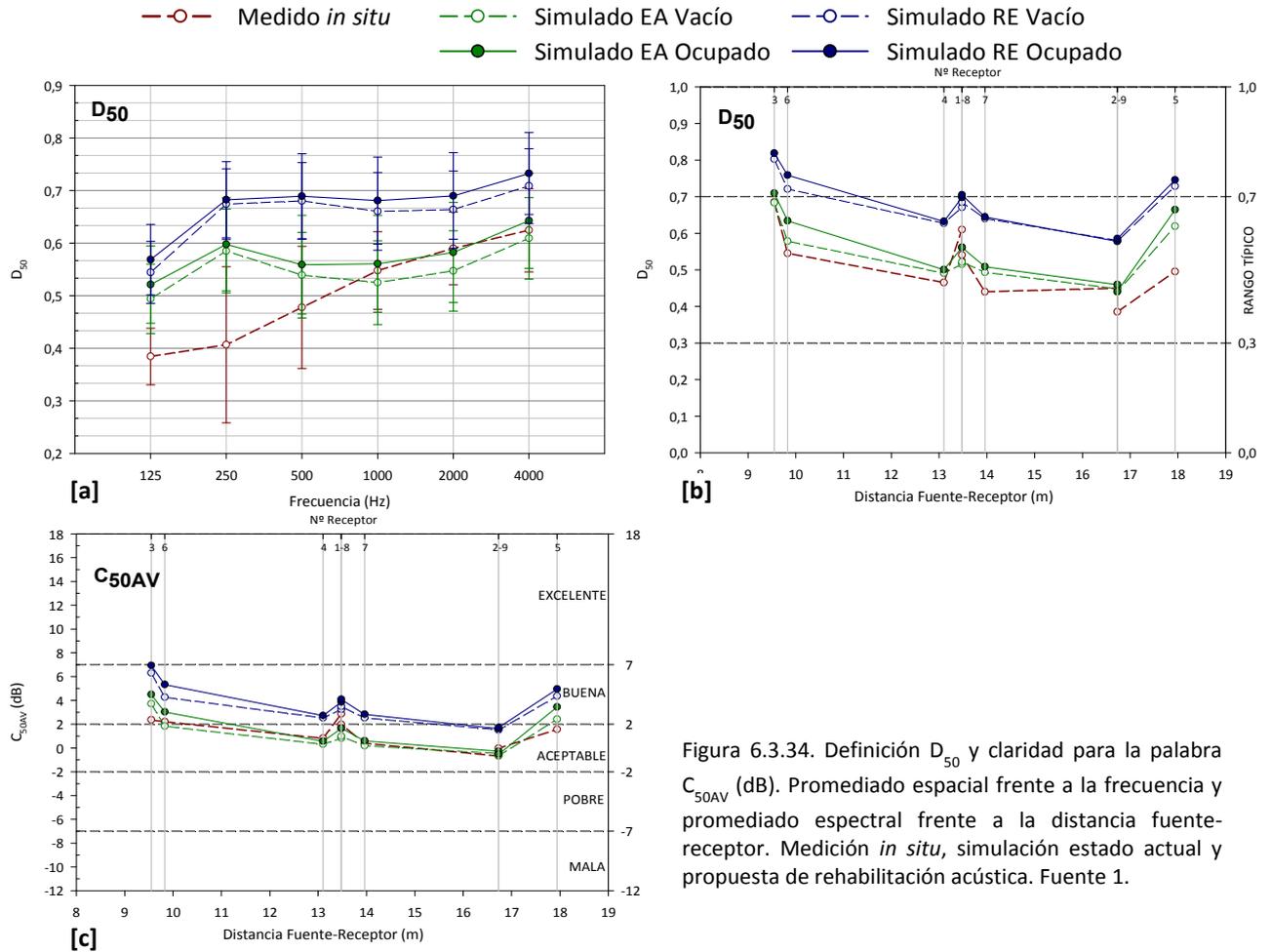


Figura 6.3.34. Definición D_{50} y claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Como se aprecia en la figura 6.3.34 [a], tras la propuesta de mejora, la definición (D_{50}) mejora sensiblemente a todas las frecuencias, especialmente en las bandas con más repercusión en la inteligibilidad de la palabra. En el caso del promediado espectral (figura 6.3.34 [b]), vemos que los resultados de la definición mejoran en todos los puntos de recepción, para ambas hipótesis de ocupación.

La valoración de la claridad para la palabra (C_{50AV}), según la escala de interpretación de Marshall, pasa a calificarse como buena, tanto para la iglesia vacía como ocupada, en casi todos los puntos de recepción (figura 6.3.34 [c]).

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C_{80} (dB)	MEDIDO Vacío	-0,07	1,80	2,22	3,30	4,13	5,28
		1,03	2,16	1,53	0,92	1,08	0,71
	SIMULADO EA Vacío	2,33	4,51	3,53	3,16	3,67	5,06
		0,75	1,05	1,00	0,84	0,82	0,79
	SIMULADO EA Ocupado	2,90	4,90	4,15	4,10	4,57	5,96
		0,75	1,09	1,02	0,93	0,97	1,03
	SIMULADO RE Vacío	3,41	6,45	6,48	5,91	6,03	7,21
		0,71	0,94	0,92	0,83	0,86	0,83
	SIMULADO RE Ocupado	3,94	6,68	6,71	6,39	6,65	7,86
		0,78	0,92	0,90	0,81	0,92	0,94

Tabla 6.3.22. Valores de la claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo).Fuente 1.

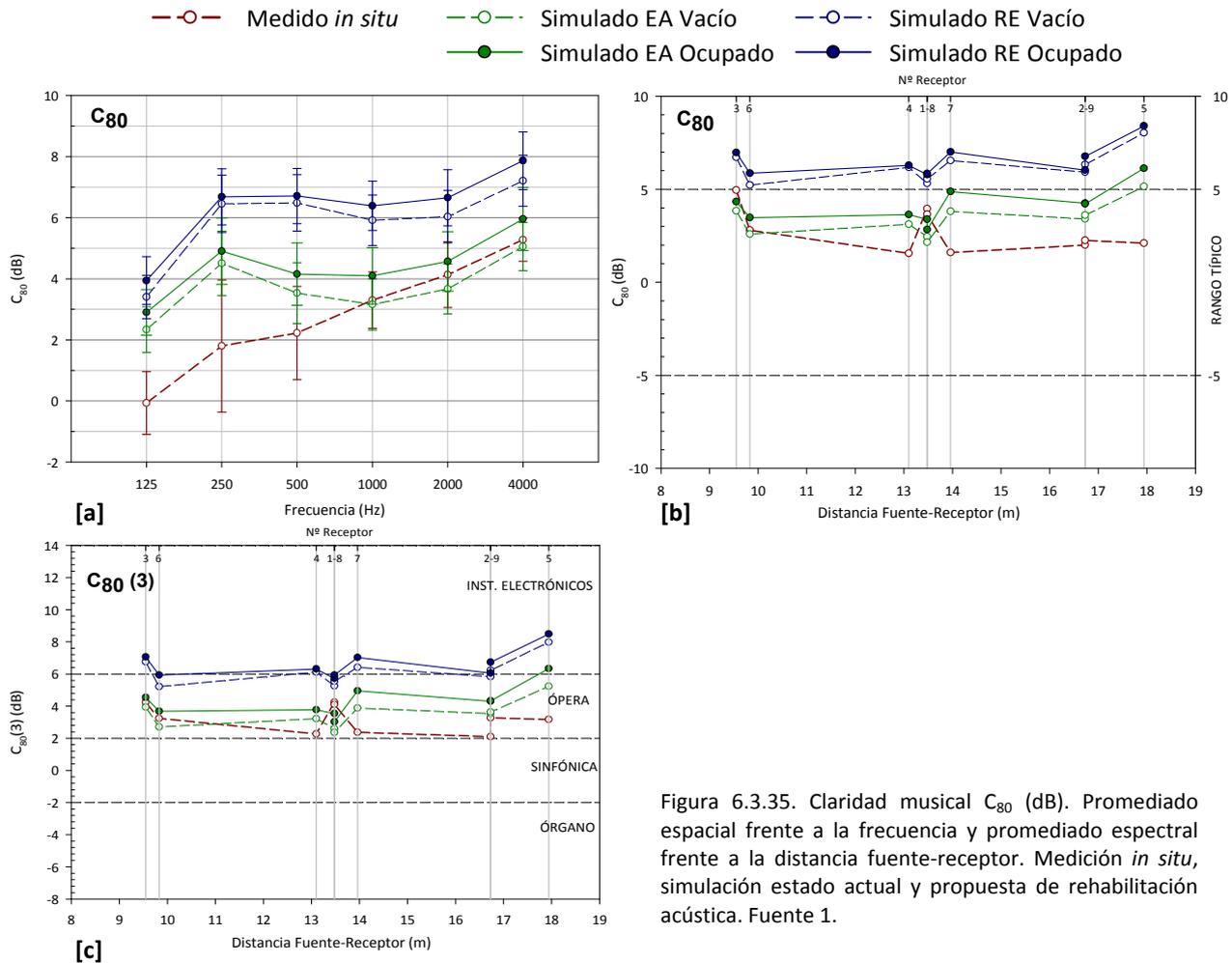


Figura 6.3.35. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

En correspondencia con los resultados comentados anteriormente, la claridad musical C_{80} experimenta una significativa mejora a todas las frecuencias, sobre todo en las bandas centrales (figura 6.3.35). De igual forma, el promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor de este parámetro (figura 6.3.35 [b]), tanto con la iglesia vacía como ocupada, se encuentra por encima del rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

Los resultados obtenidos para el $C_{80}(3)$ (figura 6.3.35 [c]), en los distintos puntos de recepción para la iglesia vacía, se encuentran en torno al límite que diferencia el uso equivalente a música de ópera e instrumentos electrónicos. Cuando la zona de audiencia está ocupada al 100%, este índice aumenta por lo que la adecuación pasa a ser óptima para un uso equivalente a música de instrumentos electrónicos.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.3.36, se aportan los mapas de resultados de la claridad musical (C_{80}) global en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA) y tras la propuesta de rehabilitación acústica (RE), ambos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente en posición 1 (altar).

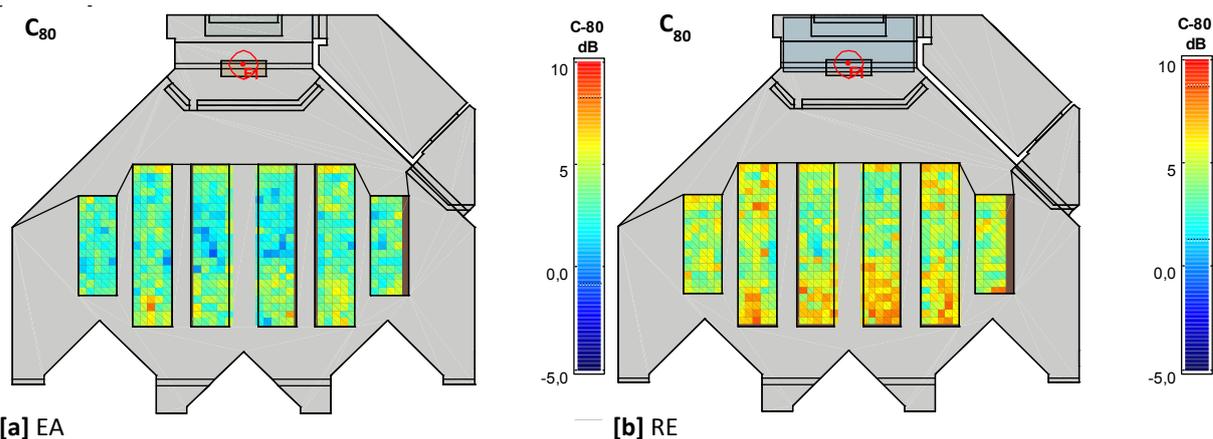


Figura 6.3.36. Claridad musical C_{80} global (dB). Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

El mapa de resultados mostrado en la figura 6.3.36 [b] refleja que la incorporación de las medidas correctoras supone un aumento generalizado de la claridad musical en la totalidad de la zona de audiencia. Los valores más elevados se observan en los laterales de la parte delantera de la audiencia, y en la zona posterior de la misma, influenciada por las reflexiones de la pared de fondo. Para la propuesta de rehabilitación, el valor medio de C_{80} es de 5,05 dB, frente a 3,28 dB, obtenido para el estado actual.

En general, podemos afirmar que los resultados de las magnitudes acústicas relacionadas con el aspecto subjetivo del oyente sobre claridad del sonido percibida, mejoran notablemente con la propuesta de rehabilitación acústica. Además, con la intervención se consiguen resultados similares entre las configuraciones de iglesia vacía y ocupada, en comparación con las inicialmente obtenidas para el estado actual.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	MEDIDO Vacío	12,98	11,39	8,44	4,86	4,44	5,49
		1,40	1,48	1,66	0,72	2,01	1,74
	SIMULADO EA Vacío	7,22	5,29	5,82	6,27	6,06	5,35
		0,68	0,90	0,87	0,81	0,84	0,94
	SIMULADO EA Ocupado	6,48	4,86	5,17	5,38	5,16	4,56
		0,83	1,03	1,06	1,04	1,05	1,14
	SIMULADO RE Vacío	7,09	4,80	4,79	5,22	5,23	4,66
		0,73	1,02	1,07	1,03	1,02	1,13
	SIMULADO RE Ocupado	6,41	4,53	4,42	4,65	4,57	4,11
		0,80	1,07	1,15	1,14	1,15	1,25

Tabla 6.3.23. Valores de la fuerza sonora G (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

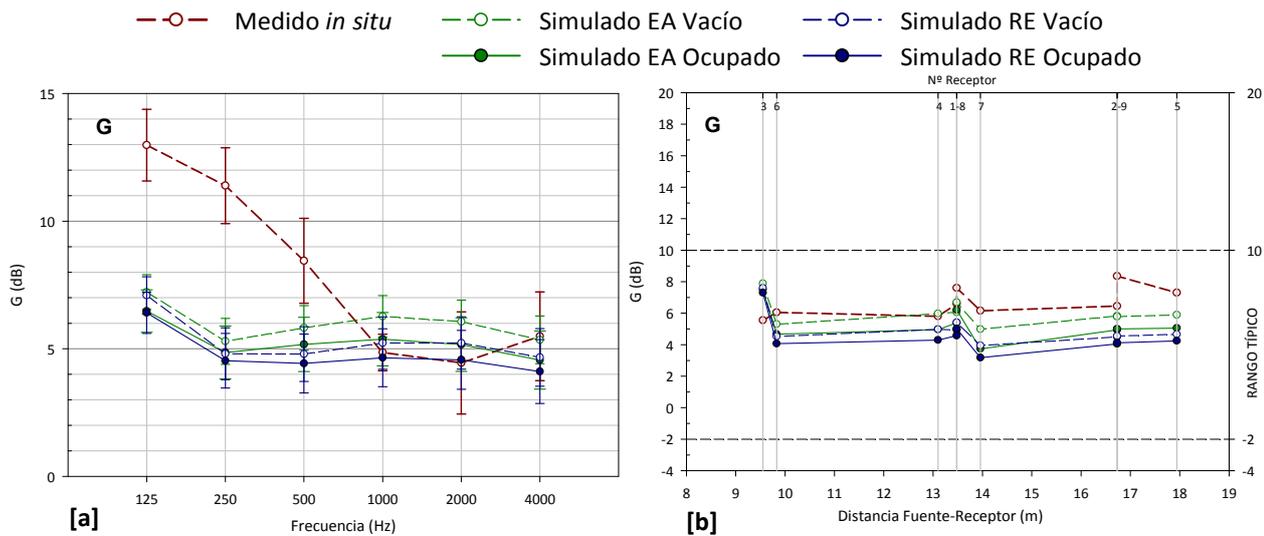


Figura 6.3.37. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Como era esperable por el aumento de la absorción, los valores simulados de la fuerza acústica (G) disminuyen ligeramente respecto a los resultados del estado actual (figura 6.3.37 [a]), en todas las bandas de octava. Esta disminución también se aprecia al representar los valores promediados espectralmente (figura 6.3.37 [b]), donde los nuevos valores de G se sitúan en la zona central del rango típico establecido en la norma UNE de referencia.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.3.38 se aportan los mapas de la fuerza sonora G global en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA) y a la propuesta de rehabilitación acústica (RE), para la configuración de iglesia ocupada con la fuente en la posición 1, coincidente con el altar.

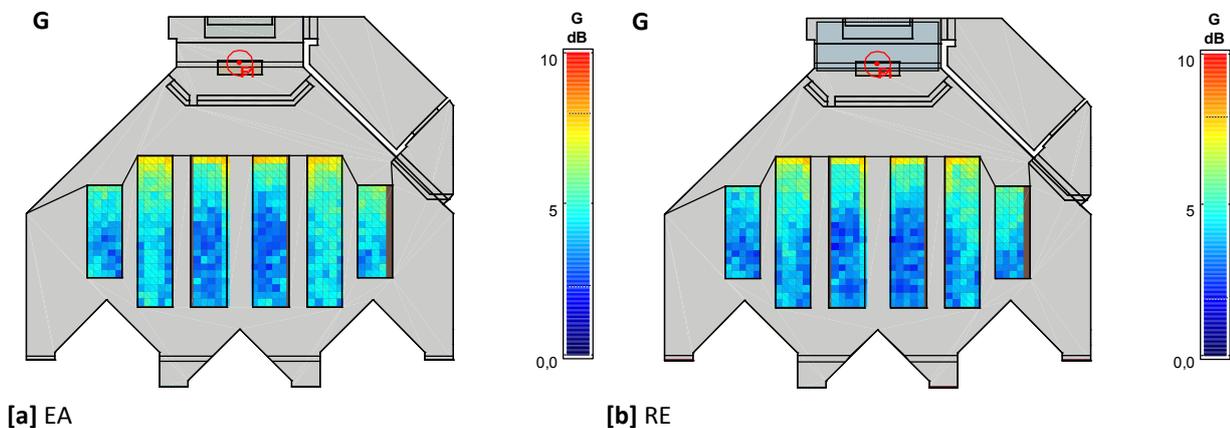


Figura 6.3.38. Fuerza sonora G global en dB. Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

Ambos mapas muestran una distribución de niveles similar, donde los valores más elevados se registran en las zonas más cercanas a la fuente sonora y los valores más bajos en las zonas centrales de la audiencia. La simulación del estado actual (figura 6.3.38 [a]), presenta un valor medio de 4,45 dB, mientras que con la propuesta de rehabilitación acústica (figura 6.3.38 [b]), el valor medio de la fuerza sonora es 4,22 dB. En ambas configuraciones, la desviación estándar es 1,12 dB.

Impresión espacial

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
J_{LF}	MEDIDO Vacío	0,10 0,04	0,11 0,05	0,14 0,07	0,15 0,05	0,11 0,04	0,18 0,06
	SIMULADO EA Vacío	0,34 0,14	0,23 0,09	0,27 0,13	0,25 0,11	0,22 0,08	0,21 0,09
	SIMULADO EA Ocupado	0,33 0,16	0,22 0,10	0,25 0,14	0,23 0,14	0,21 0,10	0,20 0,11
	SIMULADO RE Vacío	0,31 0,13	0,23 0,10	0,24 0,10	0,24 0,12	0,21 0,09	0,21 0,10
	SIMULADO RE Ocupado	0,31 0,13	0,20 0,07	0,21 0,10	0,22 0,12	0,20 0,11	0,19 0,12
	MEDIDO Vacío	0,93 0,04	0,84 0,10	0,58 0,21	0,46 0,14	0,42 0,16	0,39 0,16
$IACC_E$	SIMULADO EA Vacío	0,97 0,01	0,82 0,07	0,54 0,18	0,53 0,14	0,34 0,18	0,34 0,18
	SIMULADO EA Ocupado	0,97 0,01	0,84 0,08	0,57 0,21	0,54 0,14	0,37 0,20	0,31 0,22
	SIMULADO RE Vacío	0,97 0,01	0,83 0,08	0,56 0,19	0,56 0,16	0,39 0,18	0,33 0,21
	SIMULADO RE Ocupado	0,97 0,01	0,85 0,06	0,59 0,20	0,56 0,18	0,43 0,19	0,32 0,25

Tabla 6.3.24. Valores de la fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

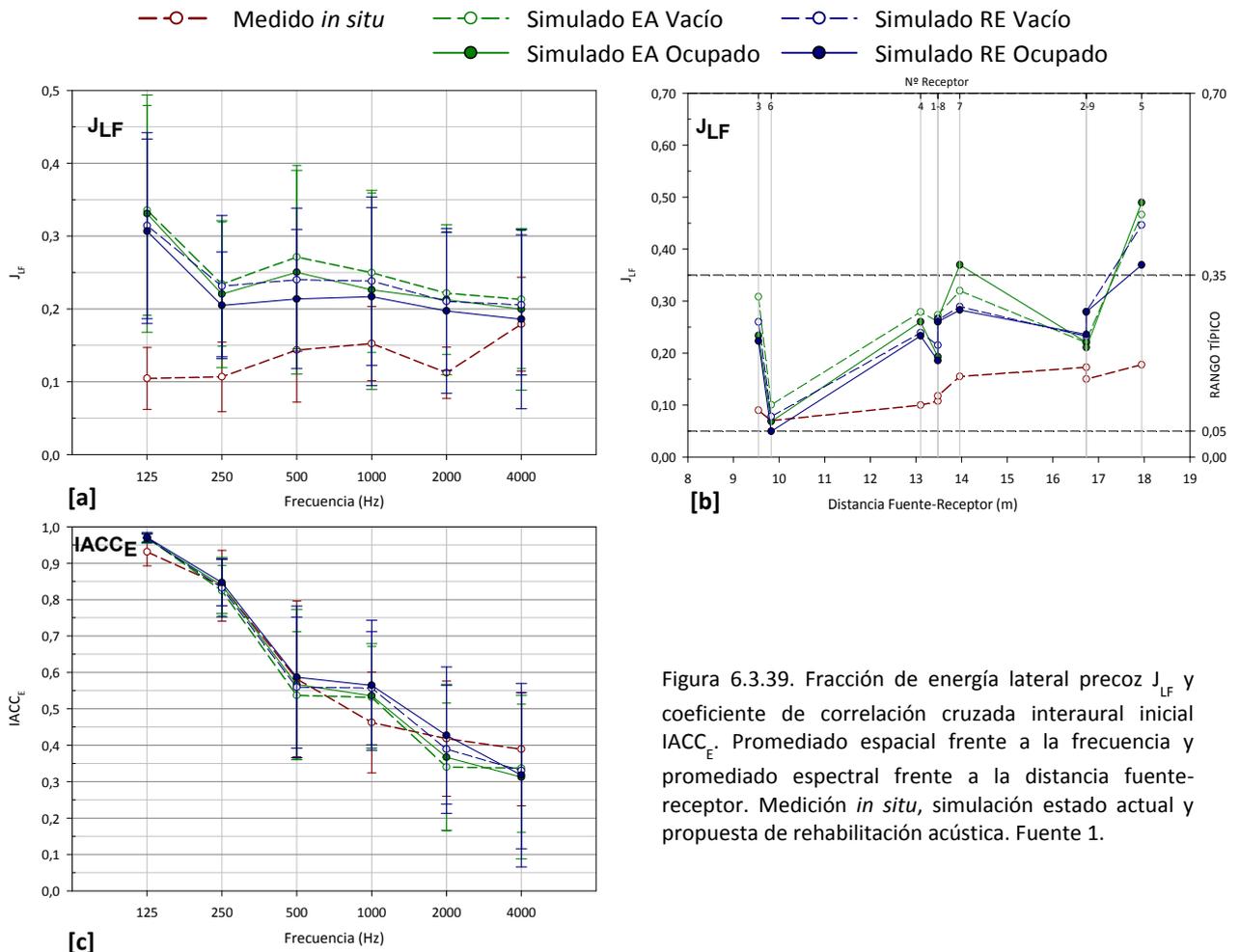


Figura 6.3.39. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Los resultados de los parámetros relacionados con la impresión espacial, fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACC_E$) indican que tras la intervención acústica, el oyente sigue manteniendo similares condiciones de impresión espacial a las obtenidas en las simulaciones informáticas del estado actual. Las diferencias obtenidas entre las simulaciones del estado actual y de la propuesta, para ambos estados de ocupación, es inferior a 1 JND. Además, los resultados de los dos parámetros son muy similares en las configuraciones de recinto vacío y ocupado.

Tras la intervención, los valores de J_{LF} promediados espacialmente disminuyen ligeramente a todas las frecuencias (figura 6.3.39 [a]) y el $IACC_E$ aumenta algo (figura 6.3.39 [c]), con respecto a la simulación del estado actual. Los nuevos resultados del $IACC_{E3}$ son 0,50 y 0,53, para la iglesia vacía y ocupada, respectivamente, valores que corresponderían a auditorios y salas de concierto de muy buena calidad acústica según Beranek.

En el promediado espectral de la fracción de energía lateral precoz (J_{LF}), representado en la figura 6.3.39 [b], de nuevo vemos que las diferencias entre los resultados de los distintos puntos de recepción son claramente apreciables.

Los resultados correspondientes a la propuesta de rehabilitación para J_{LF} e $IACC_E$ corresponden a una aceptable amplitud de la fuente sonora.

La distribución espacial de la fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) global sobre la superficie de la audiencia presenta resultados muy similares, tanto en el estado actual (figura 6.3.40 [a]) como con la propuesta de rehabilitación (figura 6.3.40 [b]). La forma geométrica de la sala y la disposición asamblearia, donde las paredes laterales no generan reflexiones cortas, hace que este indicador tenga relevancia únicamente en las zonas centrales posteriores de la audiencia. En ambos mapas se aprecia que la distribución de resultados no es simétrica, por la influencia del hueco de entrada al baptisterio en la pared derecha.

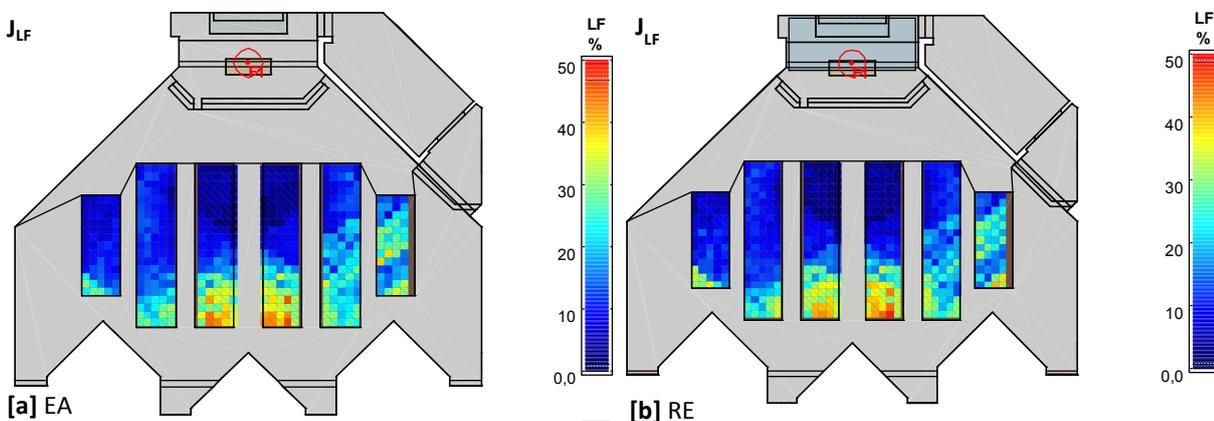


Figura 6.3.40. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} global (%). Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

En las escalas laterales de valoración del J_{LF} , se aprecia que los resultados de este parámetro en algunos puntos aumentan ligeramente con la propuesta de rehabilitación, pero el valor medio sobre la superficie de la audiencia es 15,07%, resultado inferior a 15,55% obtenido para el estado actual.

6.3.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)

Con el fin de evaluar los resultados de la inteligibilidad de la iglesia, en la tabla 6.3.25 y en figura 6.3.41, se presentan los valores obtenidos del *Speech Transmission Index* (STI). Junto a las hipótesis estudiadas anteriormente para el resto de parámetros acústicos, se aportan adicionalmente los resultados correspondientes a la simulación de la propuesta de rehabilitación acústica con apoyo electroacústico (AE), vacío y ocupado, ofreciéndose los datos registrados en los nueve puntos de recepción, frente a la distancia fuente-receptor. En la representación gráfica, los valores se contrastan con la escala de inteligibilidad subjetiva.

	CONFIGURACIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9
STI	MEDIDO Vacío	0,43	0,44	0,51	0,48	0,5	0,54	0,49	0,44	0,43
	SIMULADO EA Vacío	0,61	0,59	0,68	0,61	0,64	0,62	0,59	0,61	0,59
	SIMULADO EA Ocupado	0,64	0,61	0,71	0,62	0,67	0,65	0,61	0,63	0,61
	SIMULADO RE Vacío	0,67	0,65	0,73	0,66	0,70	0,67	0,65	0,67	0,65
	SIMULADO RE Ocupado	0,69	0,66	0,75	0,67	0,71	0,69	0,66	0,69	0,66
	SIMULADO RE+AE Vacío	0,76	0,68	0,80	0,76	0,70	0,75	0,69	0,76	0,68
	SIMULADO RE+AE Ocupado	0,69	0,66	0,75	0,67	0,71	0,69	0,66	0,69	0,66

Tabla 6.3.25. Valores del índice de transmisión de la palabra STI en cada punto de recepción. Fuente 1.

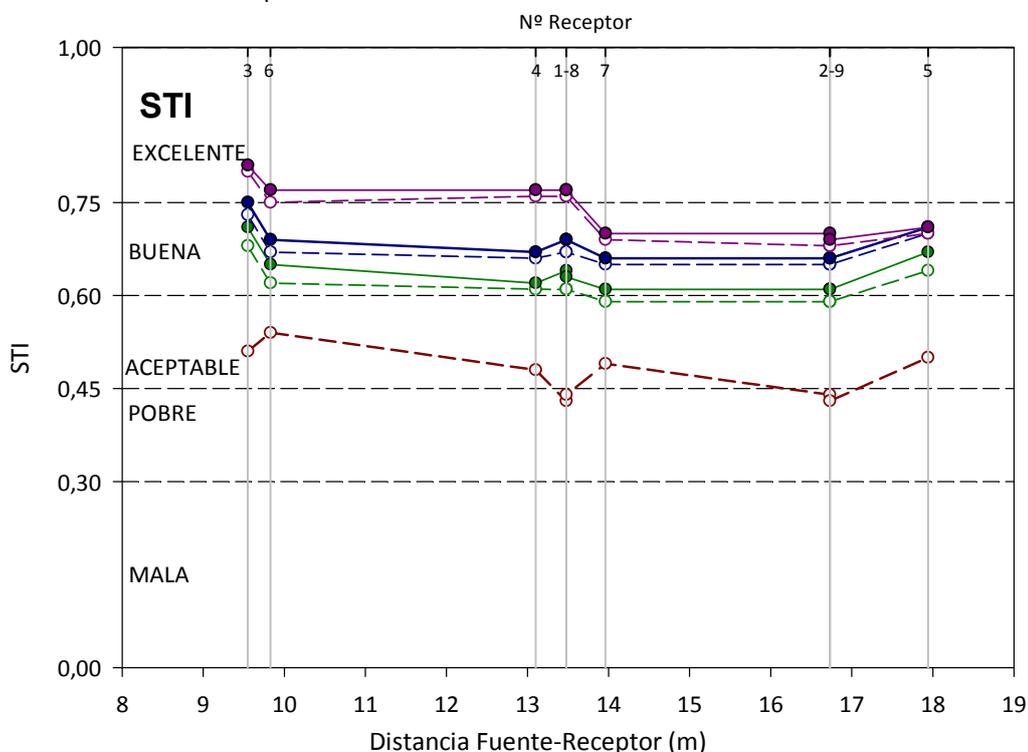
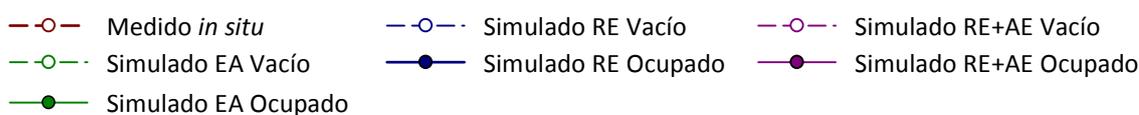


Figura 6.3.41. Índice de transmisión de la palabra STI frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual, propuesta de rehabilitación acústica y apoyo electroacústico. Fuente 1.

Como puede observarse, los valores iniciales del índice STI de la iglesia medidos *in situ*, se califican entre aceptables y pobres, en toda la zona de audiencia. Con la simulación se obtuvieron mejores resultados del STI, pasando a considerarse la inteligibilidad como buena tanto para la iglesia vacía como ocupada, en casi todos los puntos de recepción.

Con la propuesta de rehabilitación, y la incorporación de los nuevos revestimientos, se mejoran ligeramente los resultados de la inteligibilidad. Para ambas hipótesis de ocupación, la inteligibilidad también se califica como buena, siendo el aumento medio de este parámetro del 8% (sobre el estado actual simulado), en ambas configuraciones de ocupación.

No obstante, y dado que uno de los objetivos más importantes de una iglesia, desde el punto de vista sonoro, es tener una buena inteligibilidad de la palabra, se ha estudiado el efecto que tendría la incorporación de un adecuado sistema de megafonía. Además, en casi todos estos recintos es frecuente la utilización de sistemas de apoyo electroacústico.

Tras sucesivas pruebas de tipo de altavoces, posición, altura y orientación de los mismos, el sistema propuesto y simulado consta de dos altavoces de columna (marca Duran Audio BV, modelo DC180 Axyx Intellivox), dispuestos en el presbiterio a una altura de 1,90 m desde el suelo al centro del altavoz (figura 6.3.42). Estos altavoces incorporan la tecnología *Digital Directivity Control* (DDC) que permite controlar el patrón de directividad vertical del producto *intellivox* y dirigir el sonido hacia el oyente, manteniendo una cobertura uniforme en el plano de audiencia y evitando que el haz de rayos incida en superficies que pueden causar reflexiones no deseadas. El sistema permite obtener relaciones entre sonido directo y reverberante muy elevadas, situación que favorece la adecuada inteligibilidad de la palabra.

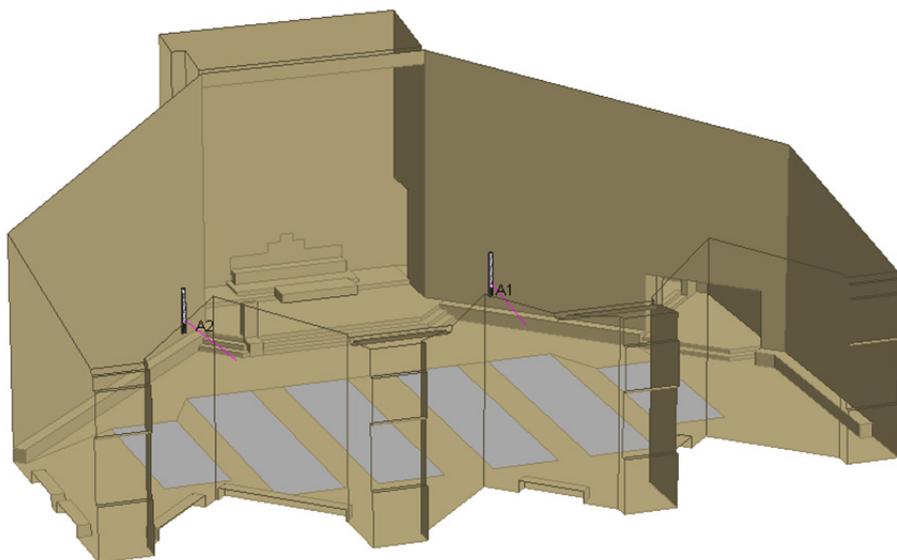


Figura 6.3.42. Modelo tridimensional: posición de altavoces.

Como puede observarse en la figura 6.3.41, el uso del apoyo electroacústico en el recinto mejora los resultados del STI en todos los puntos de recepción. Dicha mejora es más notable en los puntos situados a menos de 13,8 m de distancia de la fuente sonora, donde la inteligibilidad resulta ser excelente, tanto para la iglesia vacía como ocupada. En los puntos de recepción situados a más distancia, la inteligibilidad se califica como buena para ambas configuraciones de ocupación. El aumento medio de este parámetro es del 9% y 7% para la iglesia vacía y ocupada, respectivamente, y referido a la propuesta de rehabilitación simulada. Si nos referenciamos con respecto al estado actual simulado, las mejoras son del 18% y 16%.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.3.43 se aportan los mapas de resultados del índice de transmisión de la palabra (STI), correspondientes a

la simulación del estado actual (EA), a la propuesta de rehabilitación acústica (RE) y tras incorporación del sistema de apoyo electroacústico (AE), todos ellos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente en posición 1, coincidente con el altar, o con los altavoces a ambos lados del presbiterio.

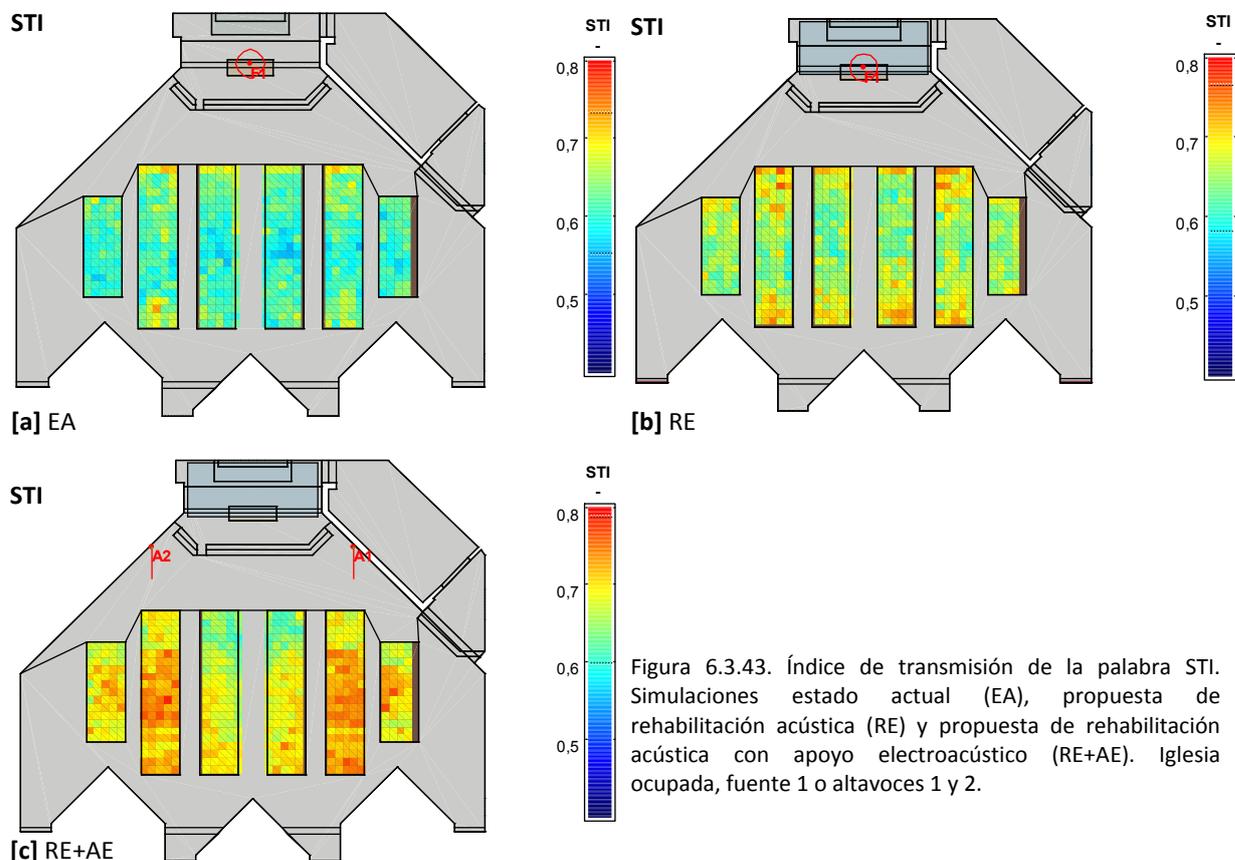


Figura 6.3.43. Índice de transmisión de la palabra STI. Simulaciones estado actual (EA), propuesta de rehabilitación acústica (RE) y propuesta de rehabilitación acústica con apoyo electroacústico (RE+AE). Iglesia ocupada, fuente 1 o altavoces 1 y 2.

En el mapa del STI del estado actual (figura 6.3.43 [a]), los resultados reflejan una distribución bastante homogénea, siendo los valores ligeramente mejores en las franjas delanteras y posteriores de la audiencia. En la figura 6.3.43 [b] se observa la repercusión que la propuesta de rehabilitación acústica tiene sobre el STI en la totalidad de la zona de la audiencia. En esta situación el valor medio obtenido es de 0,67, con lo que la inteligibilidad se califica globalmente como buena (0,60). Como en el estado actual, los mejores resultados se obtienen en las franjas delanteras y posteriores de la audiencia.

Si unimos a las medidas correctoras el sistema de megafonía propuesto (figura 6.3.43 [c]), el STI alcanza valores aún más favorables. En la zona de audiencia el valor medio pasa a ser 0,75, registrándose los valores más altos en las franjas centrales, donde antes se obtenían los valores más desfavorables. En este mapa de distribución se observa que en las filas delanteras centrales de la audiencia se registran los valores más bajos del STI. No obstante, hay que tener en cuenta que estas zonas, al estar más cercanas a la fuente sonora, contarán con el sonido directo que proviene directamente del orador, además del propio del sistema electroacústico.

6.3.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO

La iglesia de Santa María Magdalena es un caso muy singular dentro de la muestra de estudio, ya que es de las pocas iglesias que se proyectaron y construyeron con elementos absorbentes. Los datos de absorción sonora que se muestran en la tabla 6.3.26 y en la figura 6.3.44, indican que la zona con mayor protagonismo sobre la absorción sonora total del recinto, tanto en el estado actual como rehabilitado, es el techo. Recordemos que Fisac propuso un panel de lana de roca cubriendo toda la superficie del mismo.

REVESTIMIENTO	ABSORCIÓN SONORA (m ²)			
	EA VACÍO	EA OCUP	RE VACÍO	RE OCUP
TECHO	489,49	489,49	489,49	489,49
BANCOS	36,58	154,43	80,26	154,43
MURO DE FONDO	16,33	16,33	47,16	47,16
LATERALES PRESBITERIO	2,20	2,20	35,72	35,72
OTROS MATERIALES	42,08	42,08	48,15	48,15
ABSORCIÓN TOTAL (A_t)	586,67	704,53	700,78	774,95

Tabla 6.3.26. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²).

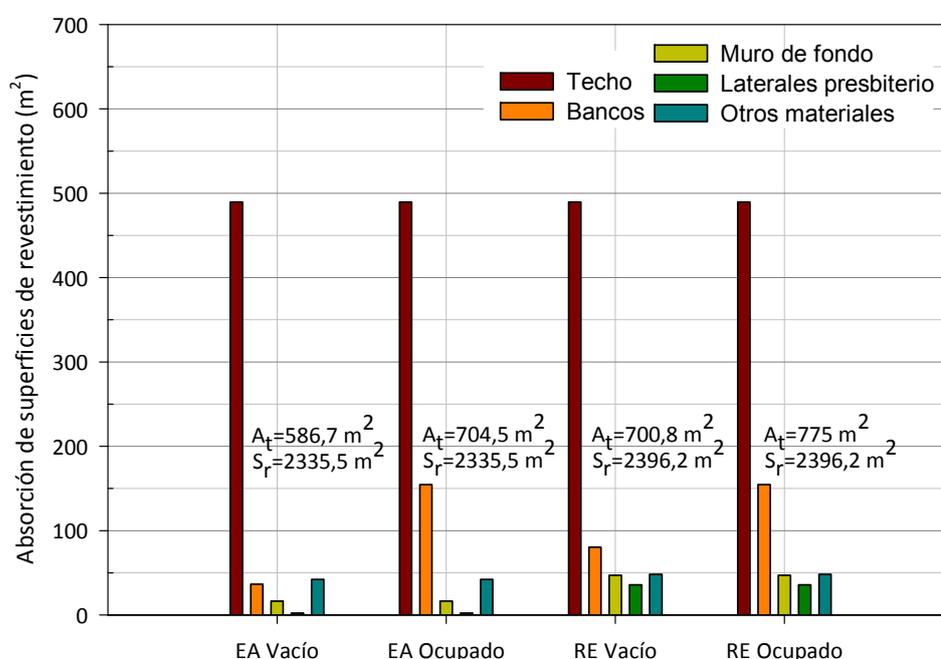


Figura 6.3.44. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promediados en frecuencia del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica (RE).

Como puede comprobarse, con la propuesta de rehabilitación acústica se mantiene la absorción global del techo y se aumenta la de los bancos de madera, muro de fondo y paramentos laterales del presbiterio. El incremento de la absorción total del recinto para la iglesia vacía y ocupada es del 20% y del 10%, respectivamente.

6.3.3.7. CONCLUSIONES

Se trata de la primera iglesia en la que Fisac utiliza elementos de absorción sonora, aunque la bibliografía publicada no hace referencia a este aspecto acústico del panel del techo. Por el contrario, sí está documentada la adaptación de los fundamentos acústicos postconciliares de Fisac, debido al material constructivo que configura el espacio: el ladrillo visto. De ahí que la disposición asamblearia de la planta se consiga con líneas poligonales y un marcado eje transversal (en lugar de la forma de óvalo) y los *muros dispersivos* no sean curvos, sino muros quebrados con aristas vivas, constructivamente más adecuados a los paramentos de ladrillo.

La simulación informática del campo sonoro de esta iglesia muestra que la pronunciada inclinación del techo hacia el presbiterio (a pesar de las características absorbentes del panel de lana de roca), el ámbito del presbiterio y la abertura de las paredes laterales para favorecer la disposición asamblearia, generan un volumen y unas formas geométricas que no contribuyen a la calidad acústica del recinto. Además, sus *muros dispersivos*, quebrados y con aristas vivas, no son tan efectivos para dispersar las ondas sonoras, como los de traza curva realizados en hormigón visto en las iglesias anteriores.

Los resultados de los parámetros medidos *in situ* y simulados reflejan que Fisac proyectó una iglesia difusa, con inteligibilidad de la palabra y claridad musical aceptables, distribución sonora homogénea y aceptable impresión espacial. Sin embargo, aparecen grandes diferencias entre los parámetros objetivos y subjetivos relativos a la reverberación. Además, debemos recordar que la impresión subjetiva sobre la calidad acústica de la sala, por parte de los integrantes del equipo técnico que realizamos las medidas experimentales, fue negativa.

A partir del análisis de la distribución y de la trayectoria de las ondas sonoras en el interior, la propuesta de rehabilitación acústica propone un conjunto de actuaciones arquitectónicas y acústicas, que homogeneizan los resultados de los parámetros relativos a la reverberación, mejoran los resultados de las magnitudes acústicas que definen la claridad del sonido y el nivel sonoro y, por último, mantiene las condiciones de impresión espacial.

A pesar de que las medidas correctoras introducidas en la iglesia mejoran la inteligibilidad de la palabra en el recinto, la implementación adicional del sistema de apoyo electroacústico permite calificar la inteligibilidad, en gran parte de la superficie de audiencia para las configuraciones de iglesia vacía y ocupada, como excelente.



6.4. IGLESIA PARROQUIAL DE SANTA CRUZ DE OLEIROS. LA CORUÑA

c/ Daniel Castelao, s/n. Santa Cruz de Oleiros. 15179 Oleiros (La Coruña)

Fecha de construcción: 1967

Edificio con grado de protección no integral

6.4.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN

En esta iglesia de Santa Cruz de Oleiros, Fisac empleó una solución que había ensayado un año antes en la Iglesia para la misión dominicana de Formosa (Taiwán, 1966). Con planta en forma de vieira y un marcado eje transversal, consigue un espacio asambleario, garantizando una buena visibilidad del altar desde cualquier punto de la nave (figura 6.4.1). En el muro posterior de la iglesia dispuso los ya conocidos *muros acústicos*, formados por cuatro semicilindros convexos (figura 6.4.2). A la izquierda de éstos añade un cuerpo lateral que conforma el atrio cubierto de acceso. Sobre el eje principal, un cilindro, casi completo, forma la sacristía, facilitando la entrada procesional del sacerdote hasta el altar; mientras, a su derecha, un último cuerpo de trazos curvos recoge el baptisterio y la capilla penitencial.



Figura 6.4.1. Vista interior hacia el presbiterio.

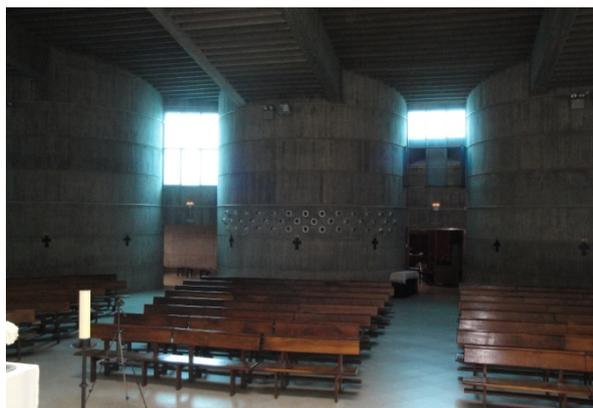


Figura 6.4.2. Muros dispersivos.

De forma similar a Santa María Magdalena, la capilla del Santísimo está proyectada como un desdoblamiento lateral del ala derecha de la nave, siendo accesible desde ésta y desde el presbiterio (figuras 6.4.3 y 6.4.4).

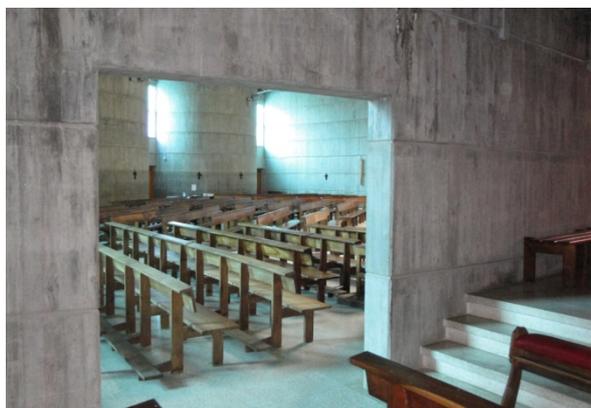


Figura 6.4.3. Vista del interior desde la capilla del Santísimo Sacramento.

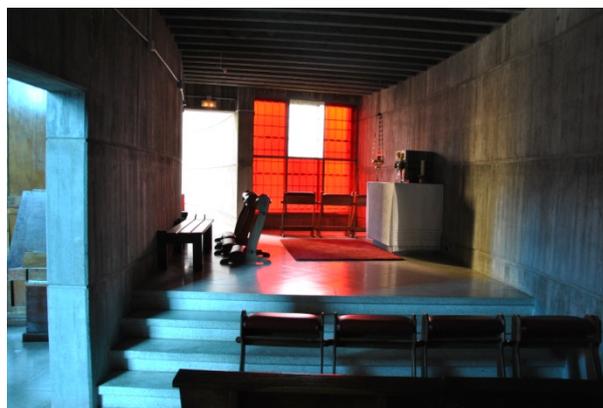


Figura 6.4.4. Capilla del Santísimo Sacramento.

La totalidad del complejo parroquial fue realizado en hormigón armado ejecutado *in situ*, a excepción de la cubierta que se resolvió con piezas prefabricadas de hormigón, a base de grandes vigas longitudinales y nervios transversales (figura 6.4.6).



Figura 6.4.5. Vista lateral desde el presbiterio.



Figura 6.4.6. Muros dispersivos y estructura de cubierta.

En el interior, el color de la luz define los distintos ámbitos de la iglesia: la iluminación del presbiterio se realiza, por un lado, horadando el entrevigado de la cubierta que introduce una luz blanca sobre el altar, y por otro lado, disponiendo ventanales de vidrio amarillo a ambos lados del presbiterio, que resuelven la unión de las alas laterales con el muro que conforma el presbiterio (figura 6.4.7). Asimismo, sobre las aberturas de los muros dispersivos se abren huecos para iluminación de la zona de fieles, formados por vidrios simples de color azul. En la capilla del Santísimo Sacramento, una intensa luz roja ilumina el recinto e invita al recogimiento.

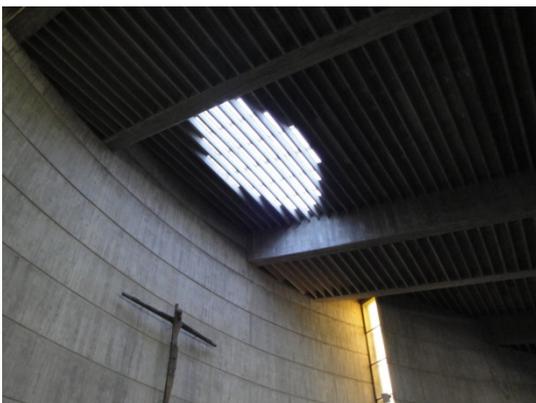


Figura 6.4.7. Iluminación cenital sobre el presbiterio.



Figura 6.4.8. Capilla de bautismal y penitencial.

El gran crucifijo de bronce que preside el templo es obra del escultor Pablo Serrano y la imagen de la Virgen con el Niño fue realizada por José Luis Sánchez.

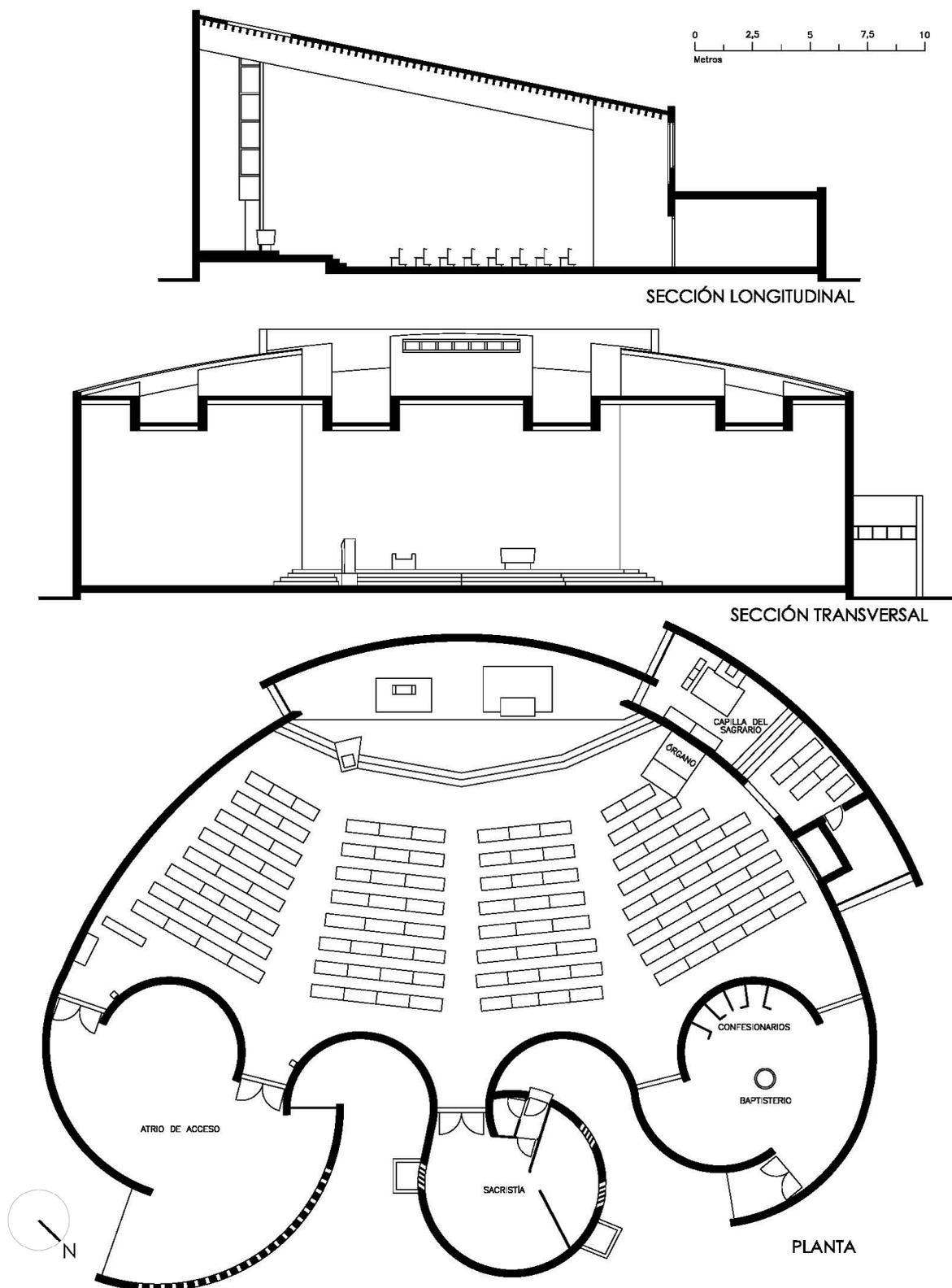


Figura 6.4.9. Plano de planta, sección transversal y sección longitudinal.

DATOS GEOMÉTRICOS Y DE AFORO	
VOLUMEN INTERIOR	
Iglesia y Capillas (V):	3812 m ³
Iglesia:	3519,3 m ³
Capilla Sacramental:	110,7 m ³
Capilla Bautismal:	182 m ³
SUPERFICIE ÚTIL	
Iglesia y Capillas:	470,5 m ²
Iglesia:	374,6 m ²
Capilla Sacramental:	35,2 m ²
Capilla Bautismal:	60,66 m ²
SUPERFICIE CONSTRUIDA	
Iglesia y Capillas Sacramental y Bautismal:	503,7 m ²
Superficie de revestimientos:	2335 m ²
Superficie del presbiterio:	77 m ²
Superficie de bancos:	163,7 m ²
Superficie acústica efectiva audiencia (S _A):	217,21 m ²
Superficie de pasillos:	194,6 m ²
DIMENSIONES	
Longitud media:	17,6 m
Anchura media:	21,1 m
Altura media:	10,3 m
AFORO (N)	329 personas
RELACIONES GEOMÉTRICAS	
V / N	11,59 m ³ /plaza
V / S _A	17,55 m ³ /m ²
S _A / N	0,66 m ² /plaza

Tabla 6.4.1. Datos geométricos y de aforo.

MATERIALES DE REVESTIMIENTO Y ACABADOS INTERIORES	
Suelo fieles:	Terrazo
Suelo presbiterio:	Terrazo
Techo:	Nervios y entrevigado de hormigón visto
Lucernario:	Vidrio en entrevigado
Vigas:	Hormigón visto
Paredes:	Hormigón visto
Puertas:	Madera
Ventanas:	Vidrio simple
Altar:	Granito
Ambón:	Granito
Órgano:	Madera y metal
Bancos:	Madera

Tabla 6.4.2. Materiales de revestimiento y acabados interiores.

6.4.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL

6.4.2.1. MEDICIÓN *IN SITU*. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

La medición acústica *in situ* de esta iglesia se realizó el 13 de septiembre de 2010 a las 10:00 h, con una duración aproximada de seis horas. Se emplearon tres posiciones para la fuente sonora, según el uso habitual de la iglesia: la primera (F1), en el centro del presbiterio, la segunda (F2), en el ámbón y, la tercera (F3), junto al órgano, separada 1 m de distancia de éste (figura 6.4.10). Se distribuyeron doce posiciones para el micrófono receptor, cubriendo las diferentes zonas de audiencia, de forma que sus posiciones fueran representativas de la totalidad del espacio (figura 6.4.11). Los valores medios de las variables ambientales registradas durante las medidas fueron 20,8°C de temperatura y 67% de humedad relativa.

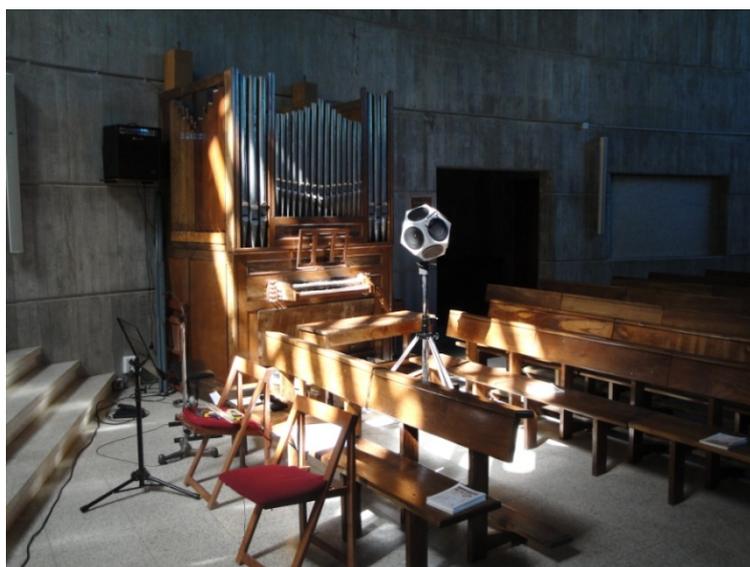


Figura 6.4.10. Fuente omnidireccional situada junto al órgano (F3) durante la medición acústica *in situ*.

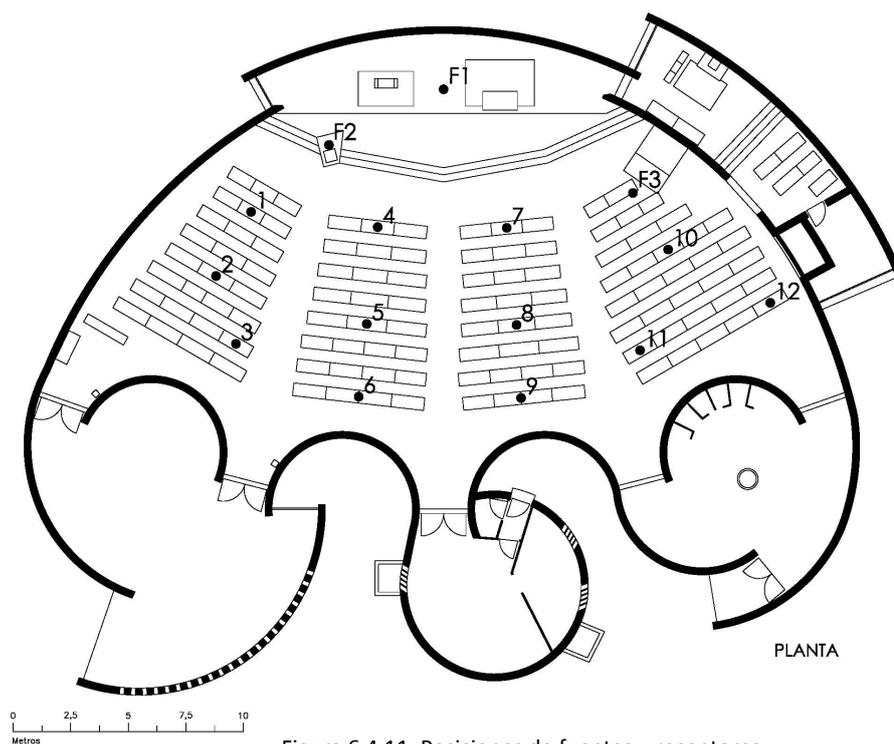


Figura 6.4.11. Posiciones de fuentes y receptores.

Reverberación

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_{30} (s)	F1	7,16	7,14	7,40	6,17	4,85	3,58
	σ F1	0,15	0,11	0,07	0,04	0,04	0,03
	F2	7,18	7,11	7,36	6,15	4,86	3,57
	σ F2	0,12	0,11	0,08	0,05	0,04	0,02
	F3	7,20	7,14	7,44	6,18	4,86	3,58
	σ F3	0,21	0,08	0,06	0,04	0,04	0,03
	Óptimo palabra	1,52	1,35	1,17	1,05	1,05	1,05
	Óptimo música	2,03	1,80	1,56	1,41	1,41	1,41
EDT (s)	F1	6,94	7,15	7,42	6,03	4,79	3,33
	σ F1	0,51	0,27	0,22	0,20	0,11	0,09
	F2	7,07	7,10	7,41	5,95	4,67	3,26
	σ F2	0,35	0,34	0,25	0,17	0,11	0,11
	F3	6,65	6,70	7,31	5,97	4,72	3,24
	σ F3	0,58	0,24	0,29	0,19	0,15	0,16
	Óptimo palabra	1,52	1,35	1,17	1,05	1,05	1,05
	Óptimo música	2,03	1,80	1,56	1,41	1,41	1,41

Tabla 6.4.3. Valores promediados espacialmente del tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s).
¹Desviación estándar.

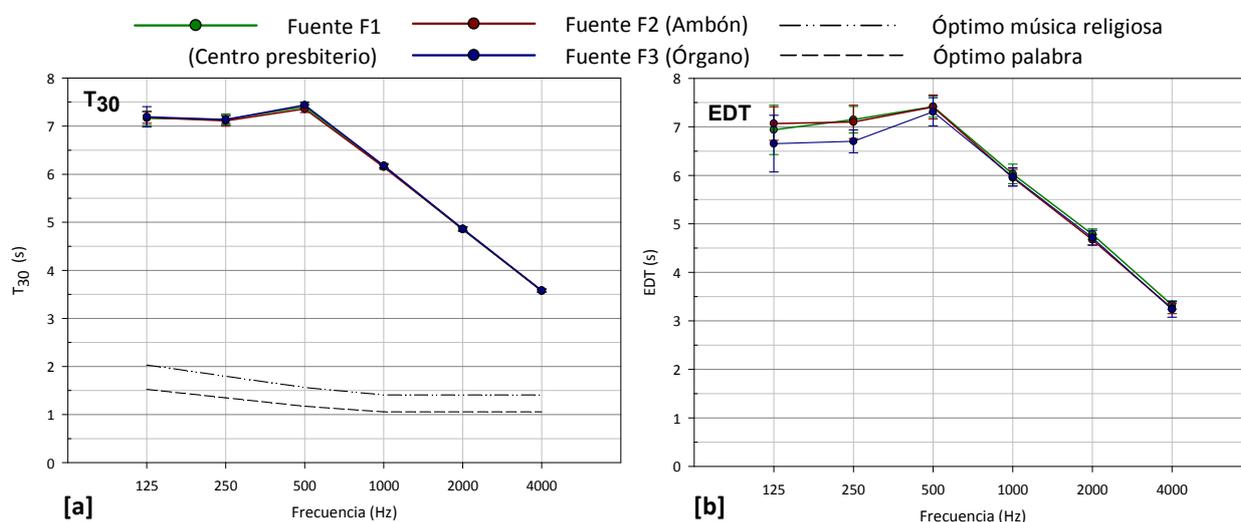


Figura 6.4.12. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1, 2 y 3.

En la figura 6.4.12 [a] se aprecia que los valores medidos del tiempo de reverberación (T_{30}) están muy por encima de los recomendados como óptimos para ese volumen, con diferencias de más de 5 s a las frecuencias comprendidas entre 125 Hz y 500 Hz. Este exceso de energía reverberante en el recinto hace que los resultados obtenidos para las tres posiciones de la fuente sean prácticamente coincidentes, con dispersiones espaciales (dada por la desviación estándar) de valor pequeño (el valor más alto es de 0,21 a la frecuencia de 125 Hz para la fuente 3).

Con el EDT podemos hacer observaciones parecidas al T_{30} , si bien sus resultados (figura 6.4.12 [b]) son ligeramente inferiores y la dispersión espacial algo mayor. Los valores medidos a medias y altas frecuencias son muy similares para las tres fuentes, mientras que a frecuencias bajas, los resultados obtenidos con la fuente junto al órgano (F3) son algo inferiores a las otras dos, siendo dichas diferencias menores a 1 JND. Como era esperable, en la gráfica del EDT se aprecia que los valores medidos, correspondientes al promediado en frecuencia de número único (para 500 y 1000 Hz), son muy superiores al rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010, y que está entre 1,0 s y 3,0 s.

En cualquier caso nos encontramos con un espacio excesivamente reverberante debido a su falta absorción sonora. Los tiempos de reverberación medidos, tan alejados de los recomendados, dan

lugar a deficiencias acústicas en el recinto, que como veremos más adelante, tendrá su reflejo en los demás parámetros acústicos.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

En este apartado se analizan los resultados de los parámetros acústicos relativos al aspecto subjetivo de la claridad del sonido percibida, es decir, tiempo central (T_s), claridad para la palabra (C_{50}), definición (D_{50}) y claridad musical (C_{80}).

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_s (ms)	F1	465,17	521,83	555,58	447,67	345,67	237,75
	σ F1	48,56	18,15	28,54	25,06	26,19	25,69
	F2	498,75	498,08	538,33	425,17	325,33	224,67
	σ F2	25,02	31,22	34,76	39,70	32,28	27,74
	F3	444,67	470,08	517,92	418,08	327,50	219,33
	σ F3	49,32	46,24	57,88	51,08	38,77	38,10

Tabla 6.4.4. Valores promediados espacialmente del tiempo central T_s (ms). ¹Desviación estándar.

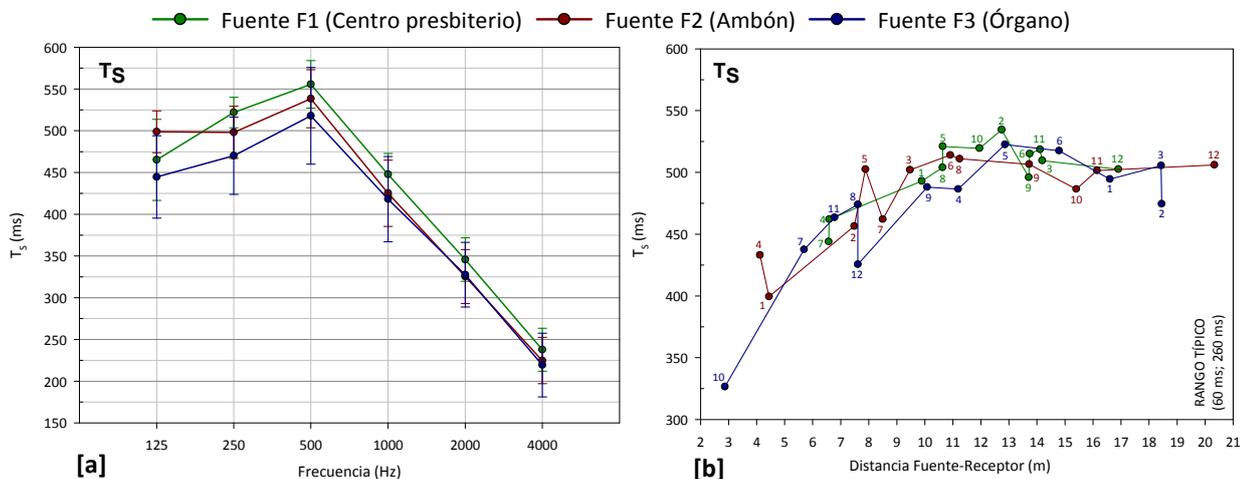


Figura 6.4.13. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1, 2 y 3.

Los resultados del tiempo central, para las tres posiciones de la fuente, presentan valores muy altos a todas las frecuencias, con un máximo a 500 Hz y un descenso progresivo conforme subimos de frecuencia (figura 6.4.13 [a]). En general, cuando la posición de la fuente es descentrada (F3, ubicada junto al órgano), los valores registrados son ligeramente inferiores y su dispersión espacial mayor.

En la gráfica que representa el promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor (figura 6.4.13 [b]), podemos apreciar que los resultados obtenidos en todos puntos de recepción son similares para las tres posiciones de la fuente, aunque superiores al rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D_{50}	F1	0,15	0,09	0,09	0,11	0,16	0,21
	σ F1	0,07	0,02	0,03	0,03	0,06	0,09
	F2	0,12	0,11	0,10	0,14	0,18	0,24
	σ F2	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08	0,09
	F3	0,15	0,11	0,12	0,15	0,18	0,26
	σ F3	0,07	0,06	0,10	0,10	0,09	0,12

Tabla 6.4.5. Valores promediados espacialmente de la definición D_{50} . ¹Desviación estándar.

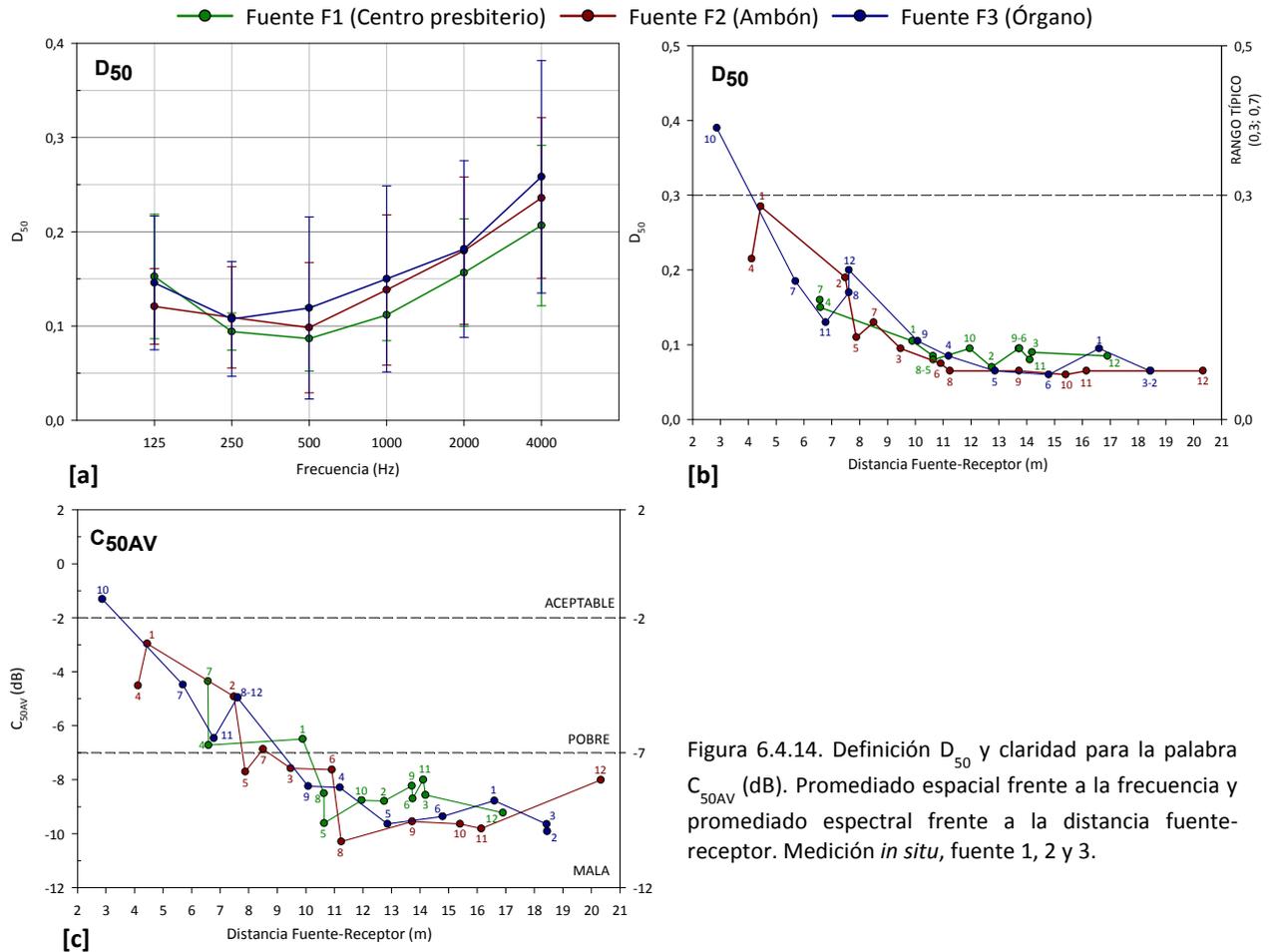


Figura 6.4.14. Definición D_{50} y claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1, 2 y 3.

Como era esperable por el exceso de reverberación del recinto, la definición (D_{50}) presenta valores muy bajos (figura 6.4.14 [a]), por debajo de 0,20 (excepto para 4000 Hz). De nuevo, los resultados son parecidos en cada una de las tres posiciones de fuente, si bien en el órgano (fuente F3) vuelve a ser algo más favorable que las otras dos. Salvo a la frecuencia de 4000 Hz, los resultados de este parámetro, para las distintas fuentes, difieren menos de 1 JND.

Las gráficas que representan el promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor (figuras 6.4.14 [b] y [c]), reflejan resultados similares para todas las posiciones de la fuente, apreciándose claramente la atenuación de ambos indicadores cuando nos alejamos de la fuente.

Para el D_{50} , los resultados obtenidos son sensiblemente más bajos que el límite inferior del rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, excepto para el punto 10 situado a 2,87 m del órgano (F3).

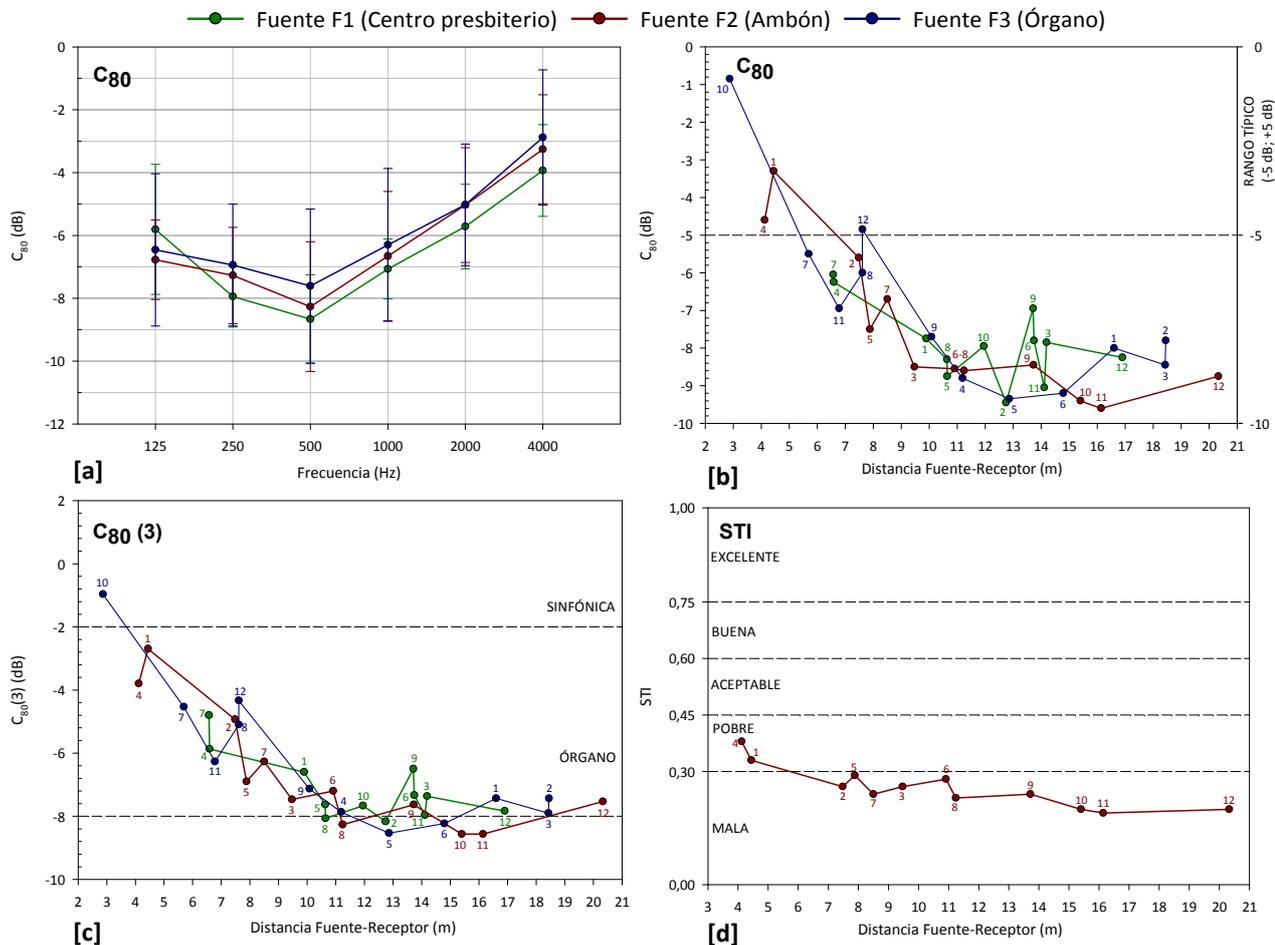
En el caso del C_{50AV} , la escala de valoración de Marshall indica que en los puntos situados a una distancia entre 3 y 9 m de las distintas fuentes sonoras, la claridad es pobre, mientras que en los puntos situados a más de 9 m es mala.

PARÁMETRO	FUENTE - σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C_{80} (dB)	F1	-5,81	-7,94	-8,67	-7,07	-5,72	-3,93
	σ F1	2,07	0,97	1,41	0,95	1,34	1,46
	F2	-6,78	-7,28	-8,27	-6,66	-5,03	-3,26
	σ F2	1,27	1,53	2,07	2,06	1,83	1,74
	F3	-6,46	-6,94	-7,61	-6,30	-5,03	-2,88
	σ F3	2,42	1,94	2,45	2,43	1,93	2,15

Tabla 6.4.6. Valores promediados espacialmente de la claridad musical (C_{80}). ¹Desviación estándar.

PARÁMETRO	FUENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
STI	F2	0,33	0,26	0,26	0,38	0,29	0,28	0,24	0,23	0,24	0,20	0,19	0,20

Tabla 6.4.7. Valores del índice de transmisión de la palabra STI en cada punto de recepción.

Figura 6.4.15. Claridad musical C_{80} (dB) e índice de transmisión de la palabra STI. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1, 2 y 3.

En cuanto a la claridad musical (C_{80}), los resultados promediados espacialmente frente a la frecuencia (figura 6.4.15 [a]) como los promediados espectralmente frente a la distancia fuente y receptor (figura 6.4.15 [b]), conllevan observaciones similares a las descritas para la claridad de la palabra (C_{50}) y la definición (D_{50}). Cabe destacar el comportamiento de la iglesia para la música de órgano, el cual resulta apropiado para todas las posiciones de fuente según la valoración de Marshall.

Como resumen de estos cuatro parámetros (T_s , C_{50} , D_{50} y C_{80}) podemos concluir que todos ellos reflejan deficiencias acústicas en el recinto, si bien en la posición descentrada respecto al eje longitudinal de la iglesia (F3, órgano), los resultados son ligeramente mejores aunque muy por debajo de los recomendados para los usos a los que se destina la iglesia.

En cuanto a la inteligibilidad de la palabra, valorada por el índice STI, se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor, junto con la escala de interpretación subjetiva (figura 6.4.15 [d]). En esta iglesia, para la fuente 2, la inteligibilidad, sin apoyo electroacústico, está considerada como pobre, en casi todos los puntos de la zona de audiencia.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	F1	21,12	22,83	19,33	14,76	14,52	13,83
	σ F1	1,48	1,69	1,23	1,81	2,86	2,82
	F2	21,39	21,95	19,47	15,85	15,65	14,61
	σ F2	2,60	3,03	1,58	1,71	1,72	1,50
	F3	20,40	20,68	20,06	16,48	15,18	13,87
	σ F3	2,75	3,11	2,56	1,29	2,32	2,39

Tabla 6.4.8. Valores promediados espacialmente de la fuerza sonora G (dB). ¹Desviación estándar.

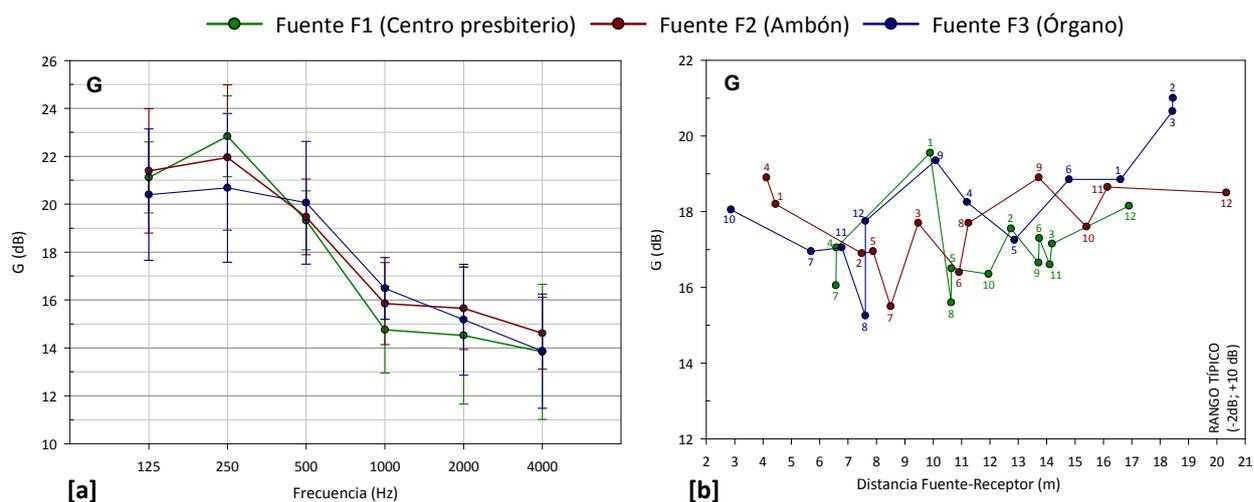


Figura 6.4.16. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

El nivel sonoro subjetivo, evaluado mediante la fuerza acústica (G), presenta, para las tres posiciones de la fuente, resultados muy altos acordes con los elevados tiempos de reverberación registrados y la poca absorción sonora de la sala, proporcionando un nivel del campo reverberado muy elevado. Para la mayoría de las frecuencias, la dispersión espacial es mayor para la fuente 3 situada junto al órgano (figura 6.4.16 [a]).

Al representar los valores obtenidos de G en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.4.16 [b]), puede comprobarse que en todos los casos los valores están muy por encima del nivel superior del rango típico.

Impresión espacial

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
L_j (dB)	F1	12,87	17,04	14,85	10,20	8,71	7,23
	σ F1	1,30	1,68	1,30	1,78	2,87	3,20
	F2	12,93	16,03	14,94	11,13	9,63	7,96
	σ F2	2,87	2,99	1,84	1,47	1,84	1,55
	F3	11,17	14,53	15,38	11,78	9,17	6,99
	σ F3	2,67	2,79	2,78	1,38	2,19	2,18
J_{LF}	F1	0,12	0,20	0,18	0,25	0,19	0,17
	σ F1	0,09	0,07	0,06	0,07	0,06	0,05
	F2	0,14	0,21	0,24	0,28	0,21	0,20
	σ F2	0,04	0,10	0,10	0,10	0,06	0,07
	F3	0,12	0,21	0,23	0,28	0,24	0,21
	σ F3	0,05	0,09	0,07	0,09	0,07	0,06

Tabla 6.4.9. Valores promediados espacialmente del nivel sonoro lateral final L_j (dB) y la fracción de energía lateral precoz J_{LF} . ¹Desviación estándar.

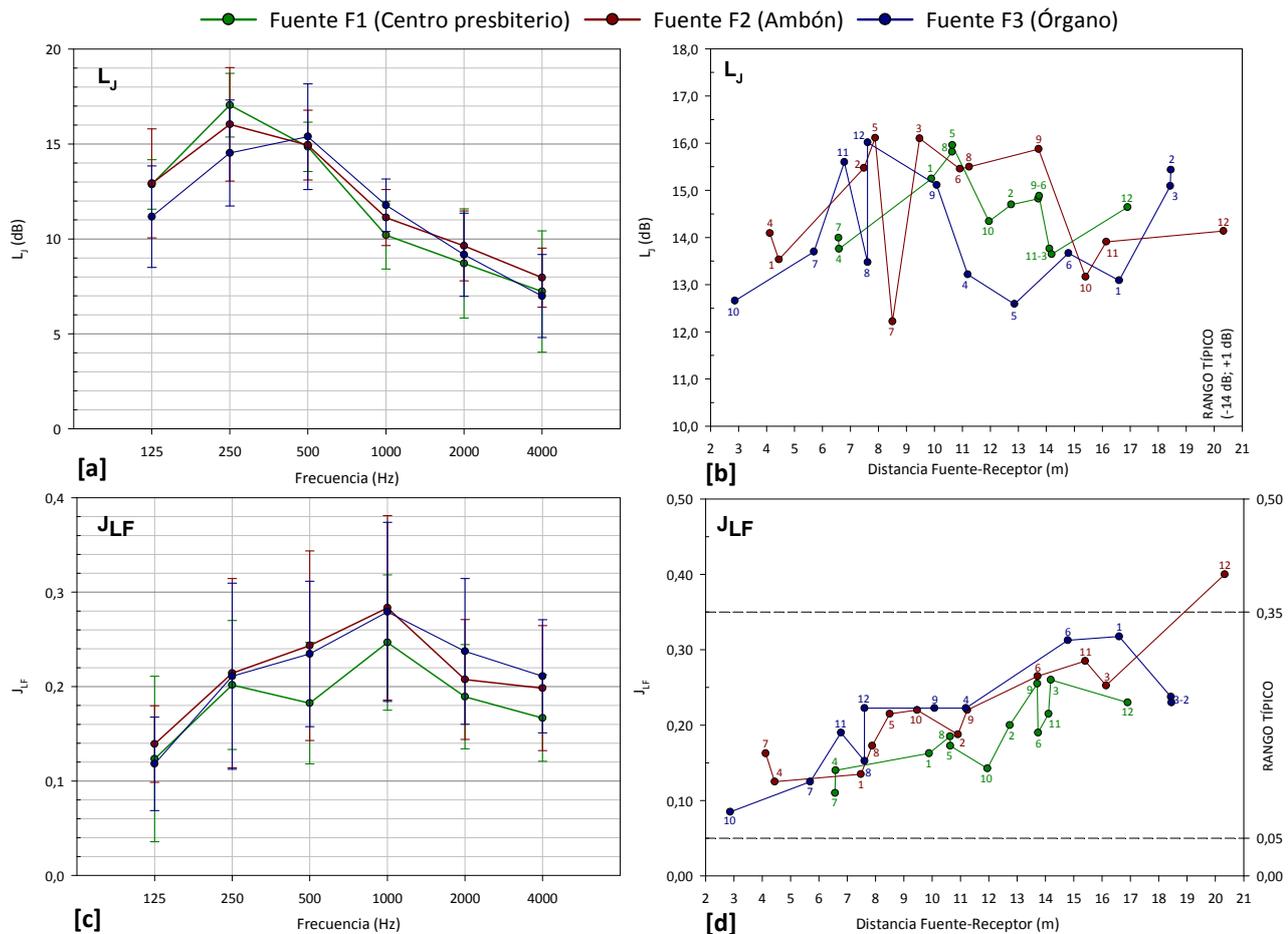


Figura 6.4.17. Nivel sonoro lateral final L_j (dB) y fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1, 2 y 3.

En cuanto a la sensación espacial de sentirse envuelto por el sonido en el recinto, definida por el nivel sonoro lateral final (L_j), la figura 6.4.17 [a] refleja que los resultados obtenidos para todas las posiciones de la fuente son muy altos en todas las frecuencias, como era previsible por los excesivos tiempos de reverberación obtenidos. Asimismo, los valores del promediado espectral se alejan del rango típico que establece la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 (figura 6.4.17 [b]). De lo anterior, se deduce que en este recinto existe una alta sensación sonora envolvente del oyente en todas las frecuencias.

Para la anchura aparente de la fuente, valorada por la energía lateral precoz (J_{LF}), destacar que, aunque se trata de un parámetro muy sensible a la posición de fuente y receptor, los resultados representados en las figuras 6.4.17 [c] y [d] no reflejan grandes diferencias. Los valores en las fuentes situadas en el ambón (F2) y junto al órgano (F3) difieren menos de 1 JND, mientras que en la fuente en el centro del presbiterio (F1), los valores difieren más de dicho umbral respecto a los resultados de las otras fuentes. Para casi todos los puntos de recepción, y las tres posiciones de la fuente, los valores del promediado espectral se sitúan dentro del rango típico establecido por la norma ISO. Los niveles de J_{LF} registrados corresponden, por tanto, a una adecuada amplitud de la fuente sonora.

Los resultados de estos dos últimos parámetros indican que el oyente está inmerso dentro del discurso oral o musical con una localización adecuada de la fuente sonora. Este hecho se corrobora con los coeficientes de correlación cruzada interaural ($IACC_L$, $IACC_E$ y $IACC_A$) que se indican en la tabla 6.4.10.

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
IACC _L	F1	0,89	0,64	0,18	0,09	0,05	0,04
	σ F1	0,02	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01
	F2	0,88	0,65	0,18	0,08	0,04	0,05
	σ F2	0,03	0,03	0,02	0,03	0,01	0,01
	F3	0,89	0,64	0,16	0,08	0,04	0,04
	σ F3	0,03	0,06	0,04	0,02	0,01	0,01
IACC _E	F1	0,93	0,80	0,56	0,39	0,32	0,24
	σ F1	0,05	0,08	0,12	0,11	0,10	0,09
	F2	0,93	0,81	0,54	0,37	0,29	0,23
	σ F2	0,04	0,09	0,22	0,11	0,10	0,09
	F3	0,92	0,74	0,61	0,28	0,18	0,16
	σ F3	0,05	0,10	0,14	0,11	0,08	0,06
IACC _A	F1	0,90	0,66	0,21	0,10	0,08	0,08
	σ F1	0,02	0,05	0,05	0,02	0,03	0,03
	F2	0,89	0,67	0,21	0,10	0,08	0,07
	σ F2	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,02
	F3	0,89	0,65	0,21	0,10	0,05	0,06
	σ F3	0,03	0,06	0,07	0,04	0,03	0,03

Tabla 6.4.10. Valores promediados espacialmente de los coeficientes de correlación cruzada interaural: IACC_L, IACC_E y IACC_A. ¹Desviación estándar.

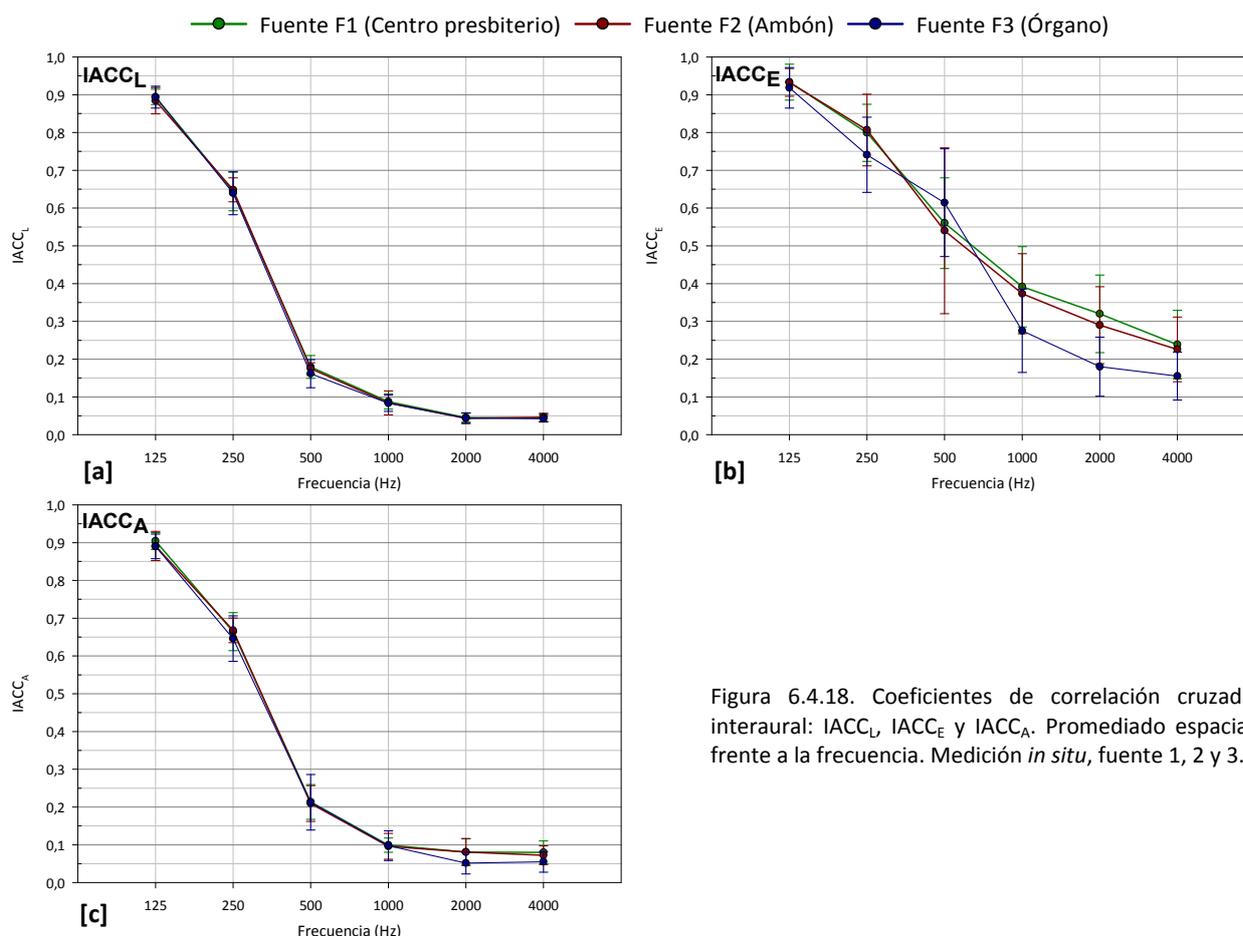


Figura 6.4.18. Coeficientes de correlación cruzada interaural: IACC_L, IACC_E y IACC_A. Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1, 2 y 3.

La figura 6.4.18 [a] indica que la parte tardía de las respuestas al impulso, valoradas por el índice IACC_L, son casi idénticas para las tres posiciones de la fuente y su desviación estándar muy pequeña, presentando valores muy bajos a medias y altas frecuencias, resultados que reflejan sensación sonora envolvente (IACC_{L3} ≈ 0,1 para las tres fuentes). La primera parte de las respuestas al impulso, relacionada con las reflexiones tempranas y representada por el índice IACC_E (figura 6.4.18 [b]), muestra ligeras diferencias entre las posiciones de la fuente, aunque las curvas presentan la misma

tendencia. La dispersión espacial en este caso es mayor que para el $IACC_L$, y similar para las tres posiciones de la fuente. Los resultados de $IACC_{E3}$ (en torno a 0,40 para F1 y F2, y 0,36 para F3), corresponderían a salas de conciertos con calidad acústica muy buena (con F1 y F2) y excelente (con F3) según la clasificación propuesta por Beranek y que se aporta que el anexo 1. Las respuestas completas, representadas mediante $IACC_A$ en la figura 6.4.18 [c], son muy parecidas para todas las posiciones de fuente, siendo la dispersión espacial menor que para el parámetro anterior y algo mayor que para el $IACC_L$.

Ruido de fondo

PARÁMETRO	PUNTO	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
RF (dB)	5	38,91	39,59	36,00	32,16	28,77	25,20

Tabla 6.4.11. Espectro de ruido de fondo registrado (dB).

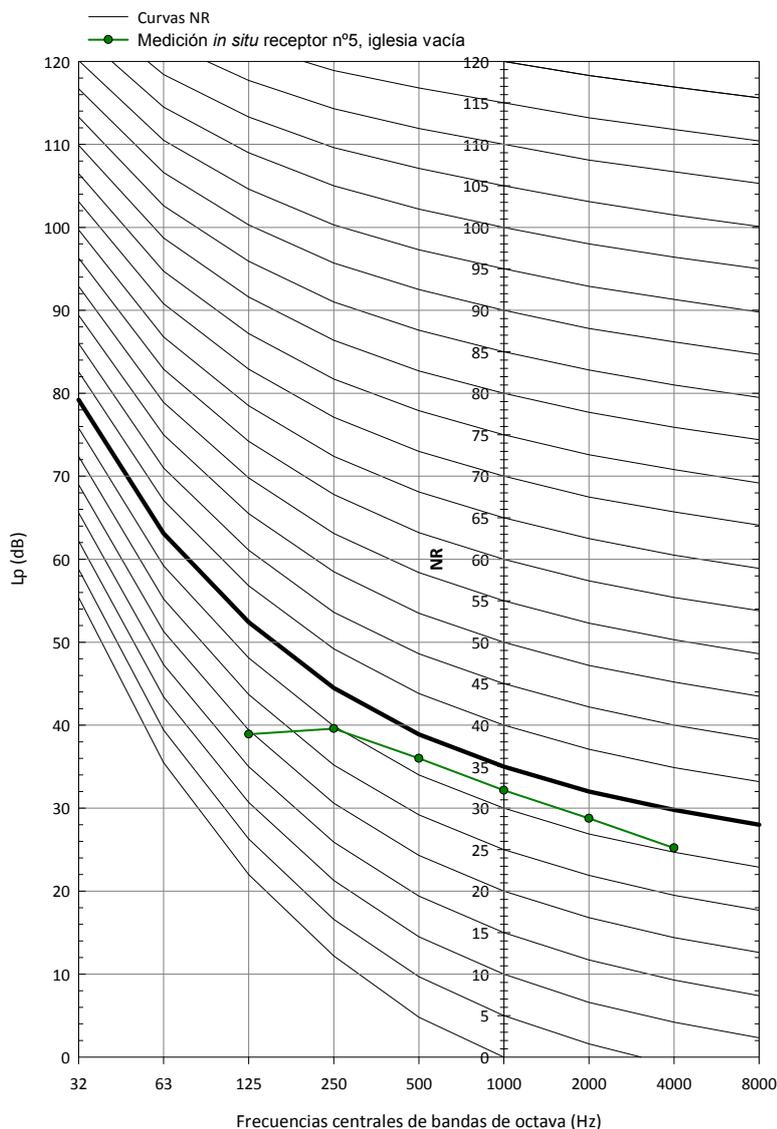


Figura 6.4.19. Curvas NR y espectro de ruido de fondo registrado (dB).

El espectro de ruido de fondo se registró promediando durante cuatro minutos en el punto 5. En la figura 6.4.19, dicho registro se ha superpuesto sobre las curvas NR, el cual corresponde a un índice de NR 32, valor inferior al máximo recomendado para los recintos de culto (NR 35).

En este buen comportamiento influye tanto la ubicación y el entorno del espacio eclesial como sus características constructivas. Se sitúa en un barrio residencial abierto con muchas zonas verdes, y el conjunto parroquial se alza sobre una colina con vistas a la bahía de La Coruña, donde los espacios

ajardinados que rodean la iglesia, la separan de las calzadas adyacentes. Al igual que en las anteriores iglesias analizadas, los gruesos muros de hormigón, con pocos huecos al exterior, son favorables desde el punto de vista del aislamiento acústico.

Parámetros geométricos y de aforo

V/N (m^3/plaza)	V/S_A (m^3/m^2)	S_A/N (m^2/plaza)
11,59	17,55	0,66

Tabla 6.4.12. Valores de parámetros geométricos y de aforo.

En esta iglesia, la relación geométrica V/N se encuentra fuera del rango establecido para las iglesias (5,1-9,1 m^3/plaza). El valor obtenido está muy lejos del óptimo recomendado para las iglesias (7,2 m^3/plaza).

Para las relaciones geométricas V/S_A y S_A/N , los autores Haan y Fricke no aportan valores recomendados ni rango específico para iglesias. En este caso, el resultado de V/S_A es superior a los rangos que los autores establecen para los distintos usos, mientras que el valor de S_A/N coincide en el valor recomendado para locales polifuncionales (0,66 m^2/plaza).

6.4.2.2. AJUSTE DEL MODELO INFORMÁTICO

En la figura 6.4.20, se muestra el modelo informático tridimensional realizado con el programa informático, que reproduce el interior de la iglesia, donde los elementos curvos y la zona de audiencia han sido simplificados según se explicó en el apartado 5.3 del capítulo anterior.

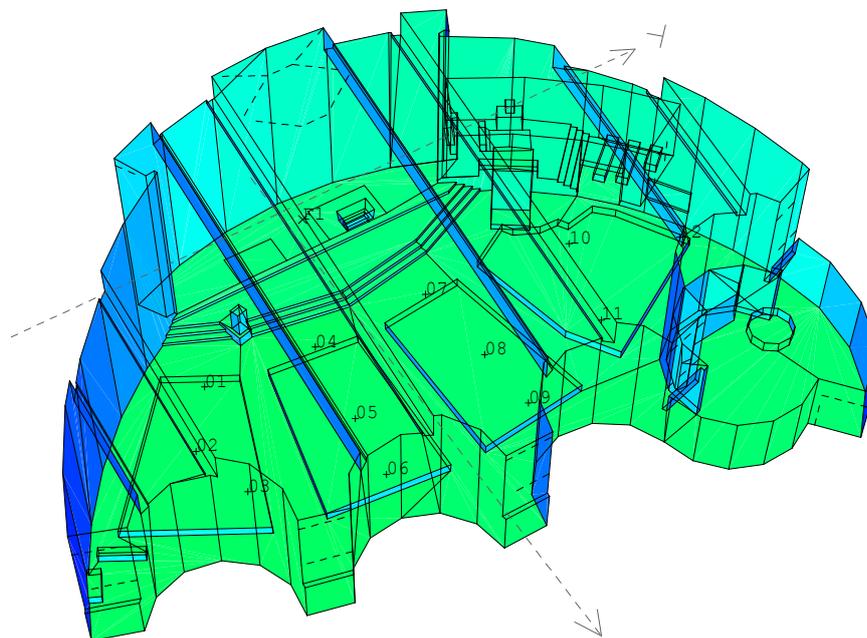


Figura 6.4.20. Modelo tridimensional realizado con el programa *CATT-Acoustic*.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.4.13.

IGLESIA PARROQUIAL DE SANTA CRUZ DE OLEIROS. LA CORUÑA

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
Hormigón visto	Paredes laterales y del presbiterio	845,0	36,2
Hormigón visto (nervios y entrevigado)	Techo	484,6	20,8
Terrazo	Suelo	353,9	15,2
Hormigón visto	Pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	262,6	11,2
Banco de madera	Zona de audiencia	229,2	9,8
Puerta de madera	Puertas de acceso y confesionarios	66,1	2,8
Vidrio (en área grande)	Ventanas y lucernario baptisterio	57,3	2,5
Moqueta (delgada)	Presbiterio y capilla del Sagrario	12,5	0,5
Vidrio en entrevigado	Lucernario presbiterio	9,1	0,4
Granito	Altar, ambón, sede	9,0	0,4
Tela de algodón	Altar	5,0	0,2
Metal	Paredes Sagrario	0,7	0,0
TOTAL REVESTIMIENTOS		2335,0	100

Tabla 6.4.13. Áreas de revestimientos.

Para la sintonización del modelo informático se utilizó como parámetro de ajuste el tiempo de reverberación T_{30} . Las condiciones de cálculo son las especificadas en la tabla 6.4.14, y los coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos se presentan en la tabla 6.4.15.

DATOS Y CONDICIONES DE CÁLCULO	
Algoritmo de cálculo	Nº2, cálculo completo, auralización detallada
Número de conos/rayos	35.000
Ecograma/respuesta al impulso	7,6 s
Densidad del aire	1,18 kg/m ³
Absorción del aire	Activada
Ruido de fondo	Según espectro medido <i>in situ</i>
Condiciones ambientales	20,8°C, 67%
Tiempo de cálculo	48 horas (iglesia vacía)
Número de fuentes	3
Número de receptores	12
Número de planos	323

Tabla 6.4.14. Datos y condiciones de cálculo.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DEL ESTADO ACTUAL							
REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Hormigón visto y granito	α	1	1	2	2	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Hormigón visto (nervios y entrevigado)	α	2	3	4	5	5	5
	s	15	15	20	20	25	25
Terrazo	α	1	1	1	1	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Hormigón visto (<i>muros dispersivos</i>)	α	1	1	2	2	2	2
	s	65	40	30	20	10	10
Banco de madera vacío	α	16	18	10	12	16	15
	s	30	40	50	60	70	80
Banco de madera ocupado	α	57	61	75	86	91	86
	s	30	40	50	60	70	80
Puerta de madera	α	14	10	6	8	10	10
	s	10	10	10	10	10	10
Vidrio (en área grande)	α	18	6	4	3	2	2
	s	10	10	10	10	10	10

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DEL ESTADO ACTUAL

REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Alfombra (delgada)	α	2	4	8	20	35	40
	s	10	10	10	10	10	10
Vidrio en entrevigado (lucernario)	α	8	4	5	4	4	4
	s	15	15	20	20	25	25
Tela de algodón	α	3	4	11	17	24	35
	s	10	10	10	10	10	10
Metal	α	14	10	6	8	10	10
	s	10	10	10	10	10	10

Tabla 6.4.15. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos del estado actual. Los valores resaltados (color rojo) son los ajustados en el proceso de sintonización.

Como en los casos anteriores, en esta tabla se muestran los coeficientes de absorción y dispersión sonora de los materiales de revestimiento existentes en el recinto eclesial, destacándose (en color rojo) aquellos con más incertidumbre y cuyos valores han sido ajustados para la sintonización del tiempo de reverberación (T_{30}).

El ajuste de los coeficientes de absorción del techo (hormigón visto en nervios y entrevigado) comenzó con una primera estimación del coeficiente de absorción atendiendo a la superficie real desarrollada de este elemento. A continuación, los valores de las frecuencias 250 y 500 Hz fueron levemente modificados (1%). En el caso del lucernario (vidrio en entrevigado), los coeficientes de absorción han sido obtenidos analíticamente, a partir de las proporciones geométricas de los elementos que integran el conjunto. Los coeficientes de absorción de los bancos de madera corresponden a fuentes publicadas¹⁷, aunque para el ajuste con el T_{30} , los valores a medias frecuencias se han disminuido sensiblemente (8 % y 5% a 500 y 1000Hz, respectivamente) y a altas frecuencias se han reducido ligeramente (1% a 2000 y 4000 Hz).

Para los coeficientes de *scattering*, se ha admitido un valor por defecto del 10% en todas las bandas de octava analizadas, excepto en los siguientes casos: para los bancos de madera vacíos y los bancos ocupados, se han adoptado los coeficientes de bibliografía publicada y especificada en el análisis de la iglesia de Santa Ana; para el lucernario, el techo de piezas prefabricadas de hormigón visto y los muros dispersivos, los valores se han estimado a partir del tamaño de las irregularidades, la profundidad media estructural y la longitud media estructural, para las correspondientes longitudes de onda implicadas. Con los valores de los coeficientes de *scattering* de los *muros dispersivos* presentados en la tabla 6.4.15, se incluyen, implícitamente, los fenómenos de dispersión de ondas sonoras que Fisac consideró al proyectar la iglesia, y que justifican la forma de los citados muros.

6.4.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN *IN SITU* Y LA SIMULACIÓN

A partir del modelo ajustado del estado actual (EA) de la iglesia vacía, se procedió, con las mismas condiciones de cálculo, a la simulación acústica de la iglesia ocupada con la fuente situada en el centro del presbiterio (F1) y, posteriormente, a las simulaciones para las configuraciones vacía y ocupada, con las fuentes situadas en el ambón (F2) y junto al órgano, separado 1 m de distancia (F3).

Los resultados de los parámetros acústicos, relativos a cada aspecto subjetivo del oyente y calculados con las simulaciones para cada fuente, se comparan con los obtenidos en las medidas experimentales.

¹⁷ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2009). Opus cit.

Reverberación

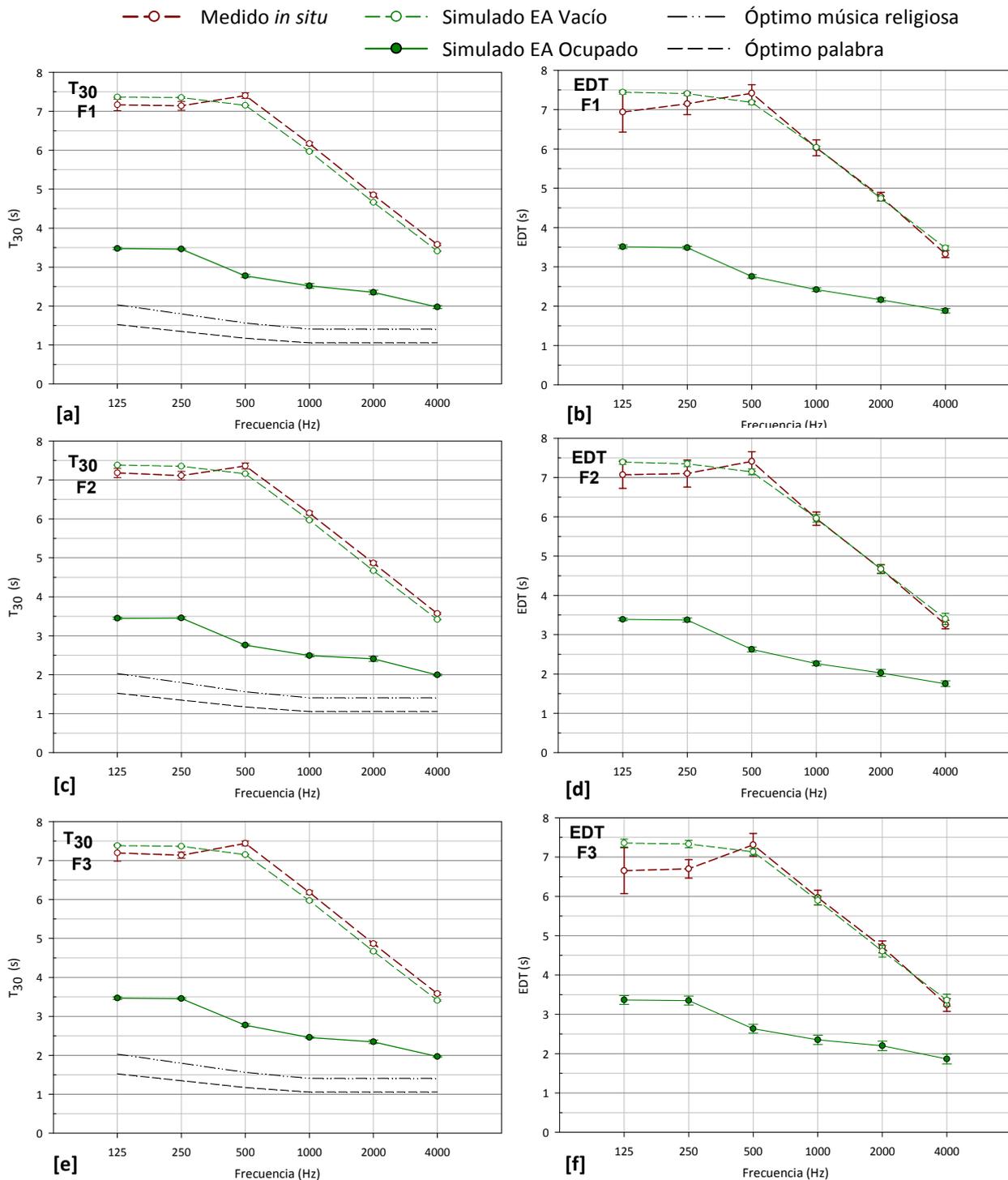


Figura 6.4.21. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1, 2 y 3.

En la figura 6.4.21 [a], observamos que los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) ajustados en la simulación acústica del campo sonoro de la iglesia, en la hipótesis vacía de fieles y con la fuente situada en el centro del presbiterio (F1), difieren menos del umbral perceptible *Just Noticeable Difference* (JND), que corresponde a un 5% de los valores medidos *in situ* para las distintas bandas de octava, lo que demuestra la idoneidad del modelo informático, pues presenta un comportamiento sonoro similar al estado real del recinto.

Aunque el ajuste del modelo tridimensional de iglesia se ha realizado con la fuente en posición 1 (en el centro del presbiterio), en las figuras 6.4.21 [c] y [e] vemos que, con la fuente en posición 2 (situada en el ambón) y en posición 3 (junto al órgano), la diferencia entre valores medidos y simulados del T_{30} , también son inferiores a 1 JND en todas las frecuencias estudiadas.

Al realizar la simulación acústica del recinto ocupado, los valores del tiempo de reverberación disminuyen considerablemente, para las tres fuentes, aunque son superiores a los óptimos recomendados.

En las figuras 6.4.21 [b], [d] y [f], se puede apreciar que los resultados calculados del EDT para las tres posiciones de la fuente, son similares a los obtenidos en las medidas experimentales, a partir de la respuesta al impulso. Para todas las bandas de octava estudiadas, excepto para la frecuencia de 125 Hz con la fuente en posición 3, las diferencias son inferiores a 2 JND, valores aceptables para simulaciones, según se indicó en el apartado 5.5 del capítulo de *Método de investigación*.

En cuanto a la dispersión espacial de ambos parámetros, para todas las fuentes, vemos que, es menor en las simulaciones que en las medidas experimentales.

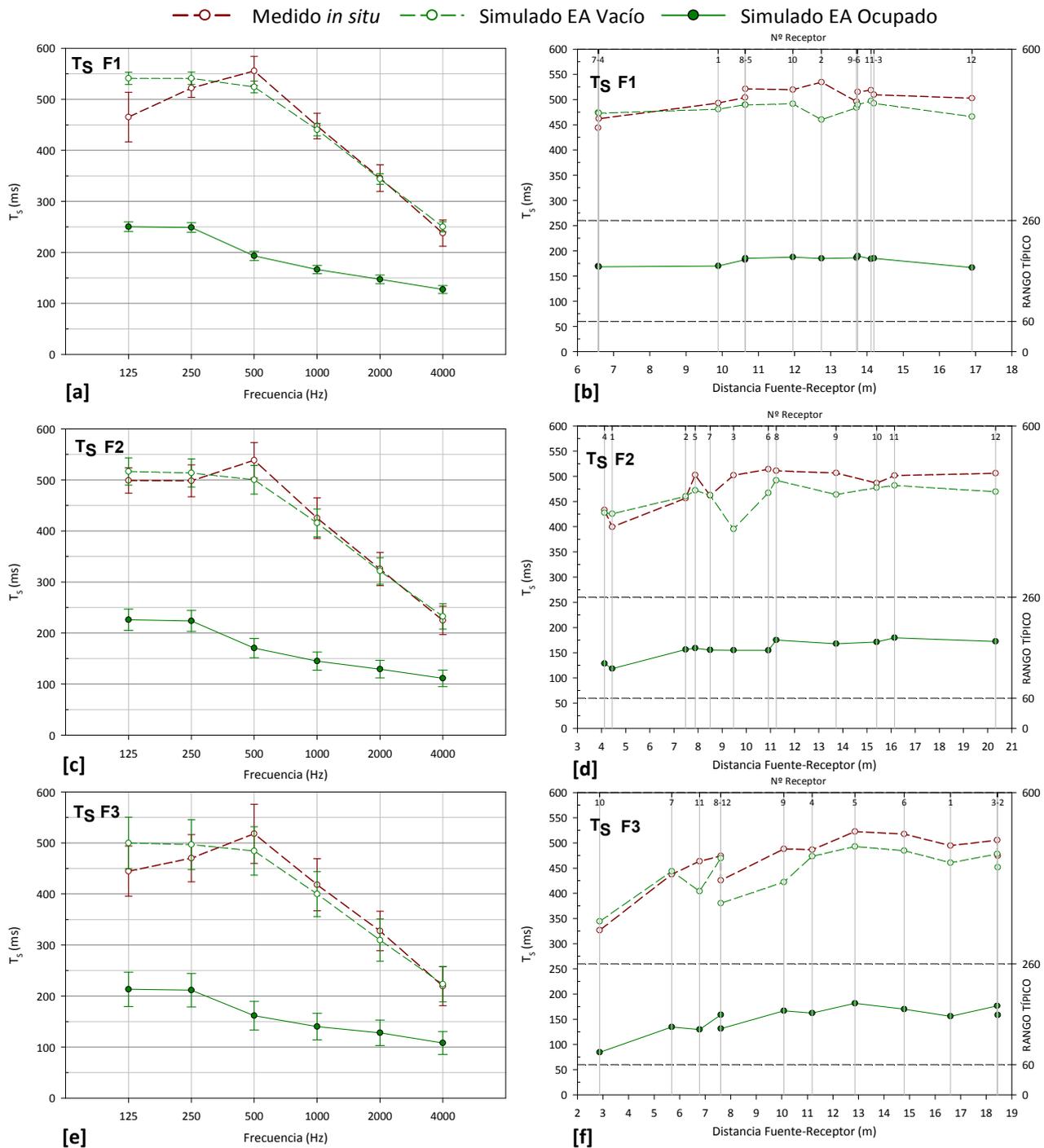
Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

Figura 6.4.22. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1, 2 y 3.

Como se observa en las gráficas de las figuras 6.4.22 [a], [c] y [e], para las tres posiciones de la fuente, los resultados del tiempo central T_s simulados presentan un buen ajuste con respecto a los obtenidos en las medidas experimentales para todas las bandas de octava superiores a 1000 Hz, siendo las diferencias inferiores a 2 JND. Para frecuencias inferiores a 1000 Hz se alcanzan diferencias ligeramente por encima de 2 JND. En cuanto a la dispersión espacial vemos que, en general, es inferior en la simulación, sobre todo en la fuente situada en el centro del presbiterio (F1) que en las otras posiciones descentradas (F2 y F3).

La representación de los resultados del T_s en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figuras 6.4.22 [b], [d] y [f]), muestran que los parámetros medidos y simulados presentan tendencias y valores del mismo orden de magnitud, si bien, en muchos puntos de recepción, las diferencias son superiores a 2 JND.

Al igual que ocurría con los parámetros relacionados con la reverberación, la presencia de fieles en la iglesia reduce considerablemente los valores del T_s , mejorando la nitidez del sonido para todos los puntos de recepción y posiciones de la fuente. En esta situación de total ocupación de la zona de audiencia, todos los resultados de este indicador se encuentran dentro del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, hecho que revela el efecto positivo de la absorción proporcionada por la audiencia para la mejora de las condiciones acústicas de esta iglesia.

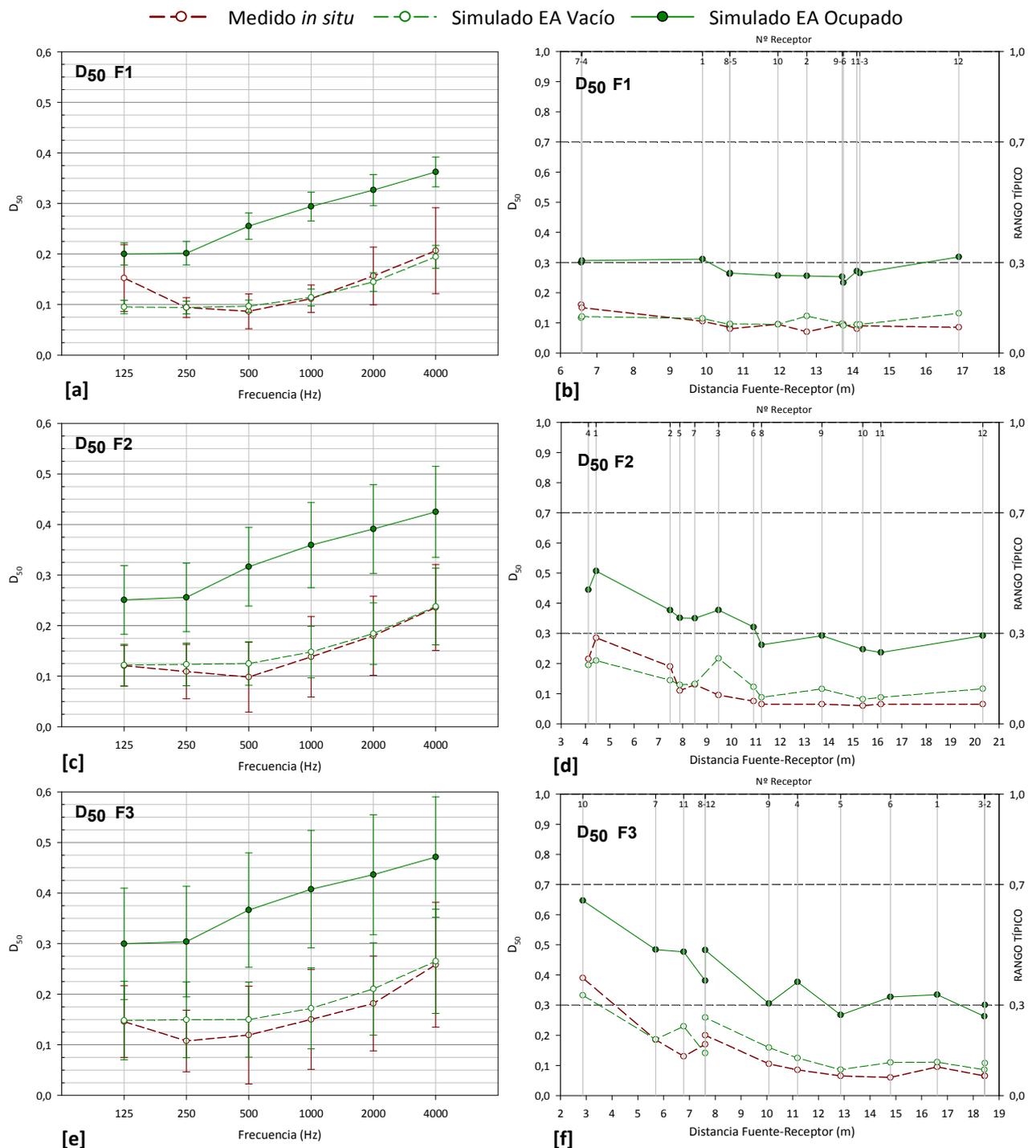


Figura 6.4.23. Definición D_{50} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1, 2 y 3.

En cuanto a la definición (D_{50}), en la gráfica correspondiente al promediado espacial frente a la frecuencia, con la fuente situada en el centro del presbiterio (figura 6.4.23 [a]), vemos que excepto para la frecuencia de 125 Hz, los resultados calculados, con la iglesia vacía, son muy parecidos a los obtenidos en las medidas experimentales. Sin embargo, al situar la fuente sonora en el ámbón y junto al órgano, las mayores aproximaciones se obtienen para las frecuencias de 125 Hz y 4000 Hz (figuras 6.4.23 [c] y [e]). Para las tres fuentes, las diferencias obtenidas son inferiores a 2 JND. De nuevo, la dispersión espacial, es menor en los resultados de la simulación que en la medición *in situ*, y sensiblemente menor cuando la fuente se sitúa en el centro del presbiterio (F1), tanto en la configuración vacía como ocupada.

Para la iglesia ocupada, los resultados en la mayoría de los puntos de recepción de la zona de audiencia están en torno al límite inferior del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 (figuras [b], [d] y [f]). Concretamente, para la fuente 1, sólo algunos puntos están dentro de dicho rango; para la fuente 2, se incluyen todos los puntos situados a menos de 11 m; y para la fuente 3, casi todos los valores registrados en los puntos de recepción se encuentran dentro de la franja recomendada por la citada norma.

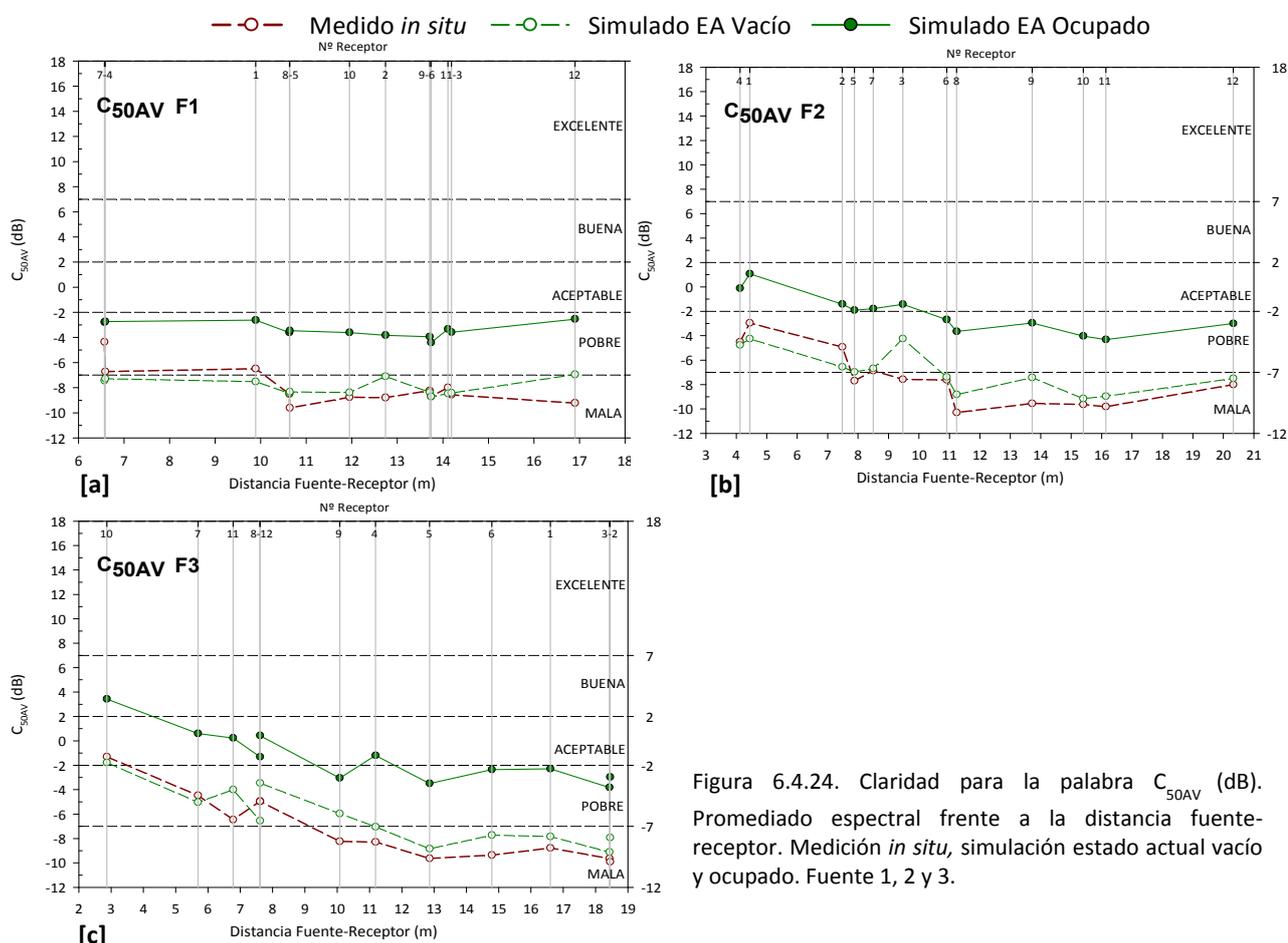


Figura 6.4.24. Claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1, 2 y 3.

Como en las magnitudes acústicas simuladas y analizadas anteriormente, los resultados de la claridad para la palabra (C_{50AV}) mejoran cuando la iglesia está ocupada por los fieles. Según la escala de interpretación de Marshall, los resultados obtenidos del C_{50AV} , para la posición 1 de la fuente (figura 6.4.24 [a]), indican que la claridad para la palabra mejora su calificación de mala a pobre. Para las fuentes 2 y 3 (ámbón y órgano, respectivamente), la claridad para la palabra, que para la iglesia vacía se calificaba entre pobre y mala, mejora sus resultados en presencia de los fieles, pasando a estar entre aceptable y pobre (figuras 6.4.24 [b] y [c]).

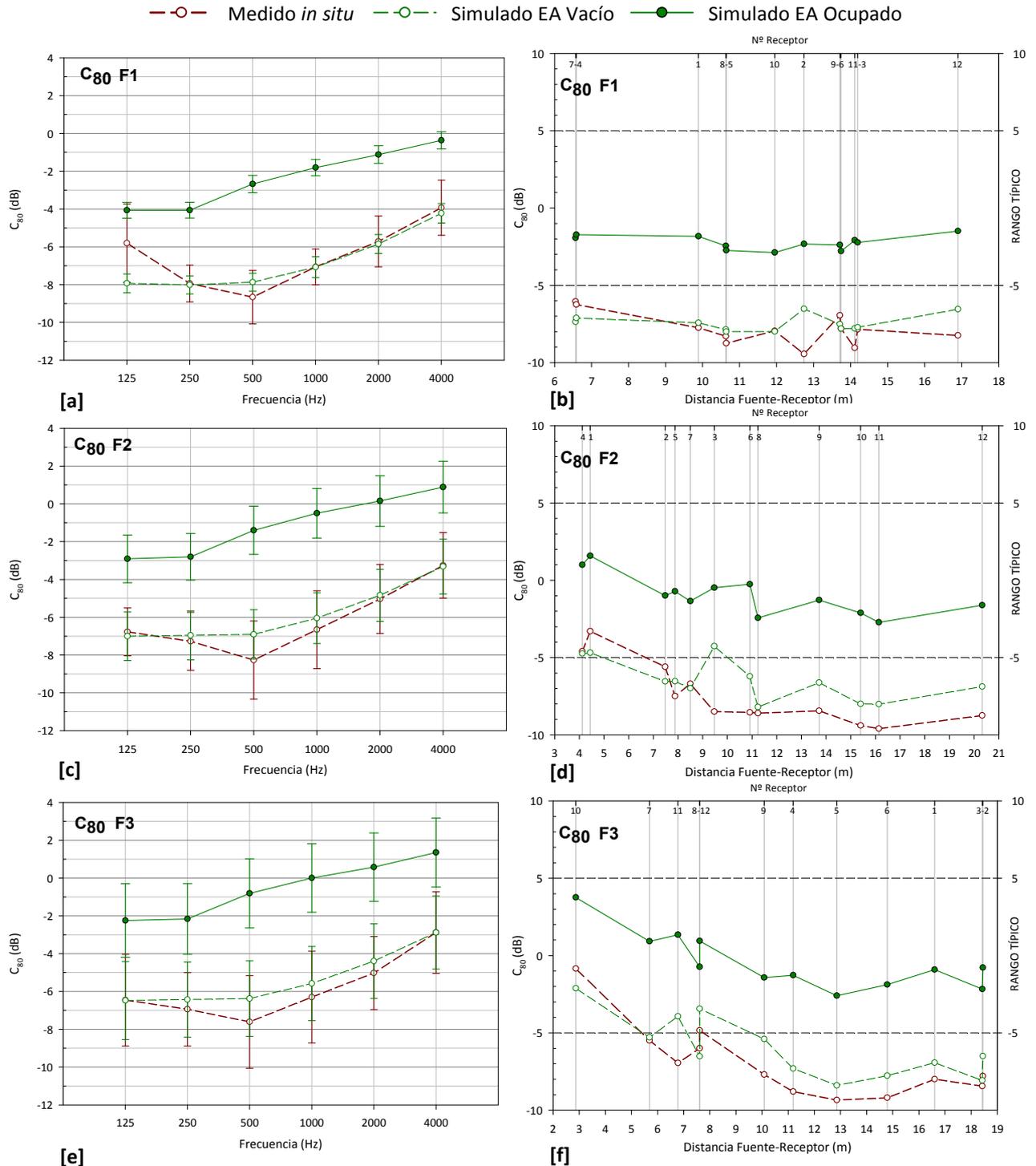


Figura 6.4.25. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1, 2 y 3.

Para la claridad musical (C_{80}), cuyos resultados promediados espacialmente frente a la frecuencia están representados en las figuras 6.4.25 [a], [c] y [e], se obtienen buenas aproximaciones, para la mayoría de las frecuencias estudiadas. Al igual que con el C_{50} , para la fuente situada en el centro del presbiterio (F1), las mayores diferencias se aprecian a la frecuencia de 125 Hz, y al situar la fuente en el ambón (F2) y junto al órgano (F3), es a la frecuencia de 500 Hz, donde las diferencias son más acusadas. Salvo en estas frecuencias mencionadas, en general, los resultados entre las simulaciones informáticas y las medidas son inferiores a 2 JND. En cuanto a la dispersión espacial, vuelve a ser menor en la simulación, especialmente en la fuente 1.

En las figuras 6.4.25 [b], [d] y [f], correspondientes a los resultados del C_{80} promediados espectralmente en función de la distancia fuente-receptor, se aprecia que, para las tres posiciones de la fuente, los valores simulados y medidos con la iglesia vacía son parecidos (algunas diferencias son superiores a 2 JND) y siguen una tendencia similar en cada posición de fuente. Como era de esperar, cuando la iglesia está ocupada mejora la claridad musical, y para las tres posiciones de fuente y para todos los puntos de recepción, los resultados del C_{80} se encuentran dentro del rango típico establecido por la norma de referencia citada.

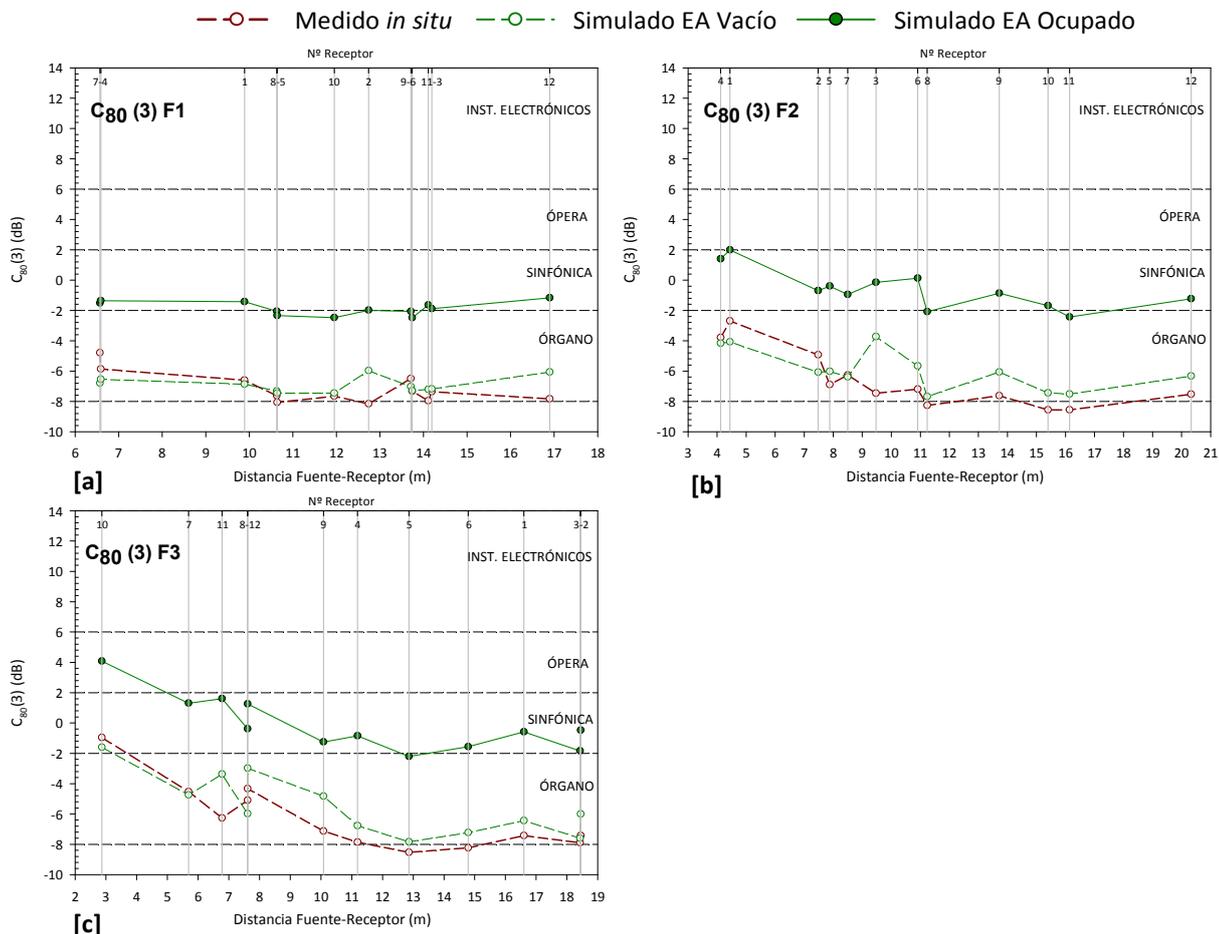


Figura 6.4.26. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1, 2 y 3.

En cuanto a los resultados del $C_{80}(3)$ (figuras 6.4.26 [a], [b] y [c]), los cálculos informáticos realizados para las tres posiciones de la fuente, al igual que las mediciones acústicas, califican la iglesia vacía como adecuada para la música de órgano. La presencia de los fieles aumenta la claridad musical, haciendo que la iglesia sea algo más apropiada para la audición de música sinfónica.

—○— Medido *in situ* —○— Simulado EA Vacío —●— Simulado EA Ocupado

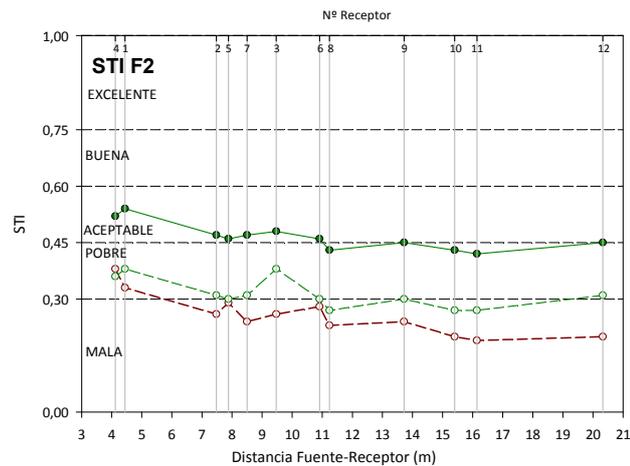


Figura 6.4.27. Índice de transmisión de la palabra STI, frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 2.

Respecto al índice de transmisión de la palabra (STI), en la figura 6.4.27, se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente (F2) y receptor, junto con la escala de inteligibilidad subjetiva. Los resultados de la simulación en la configuración desocupada son 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 de audiencia. Los resultados son comparables a los obtenidos a partir de la evaluación de D_{50} . La presencia de la totalidad de los fieles supone una mejora en la inteligibilidad, pasando a calificarse entre aceptable y pobre.

Nivel sonoro subjetivo

—○— Medido *in situ* -○- Simulado EA Vacío ● Simulado EA Ocupado

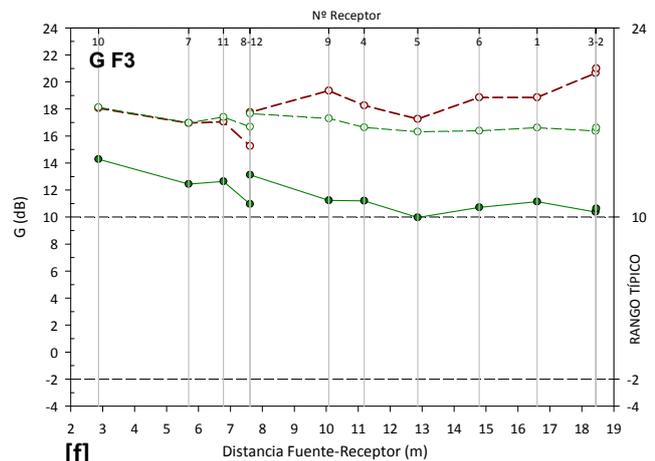
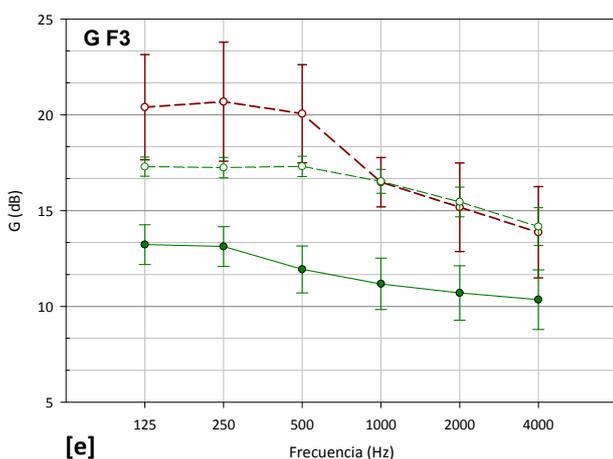
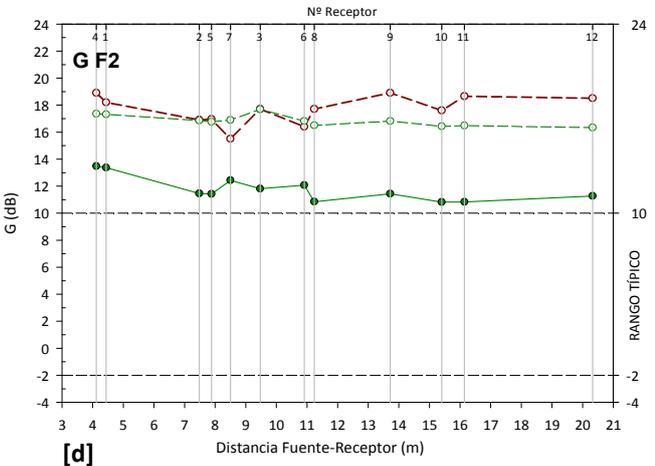
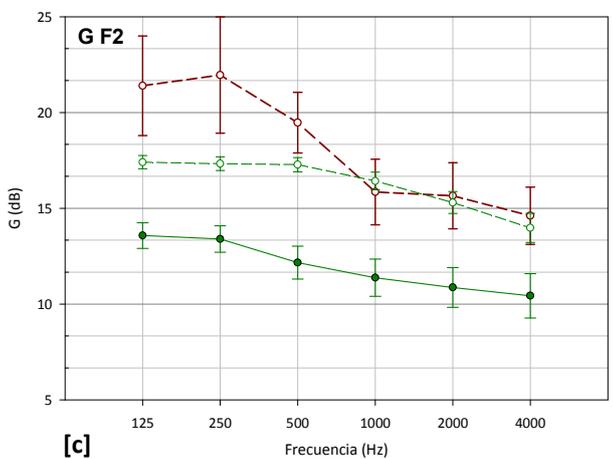
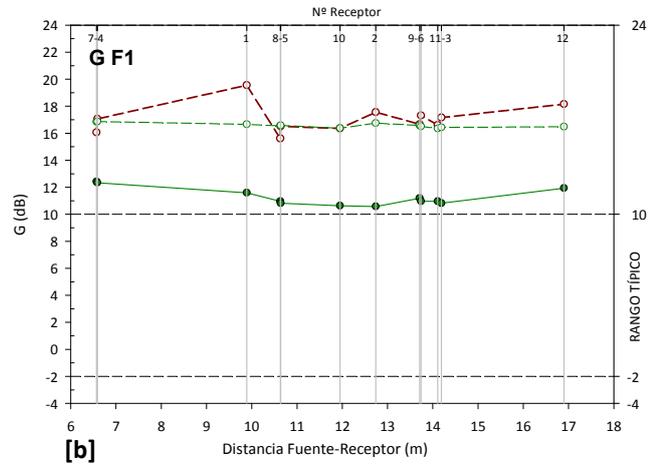
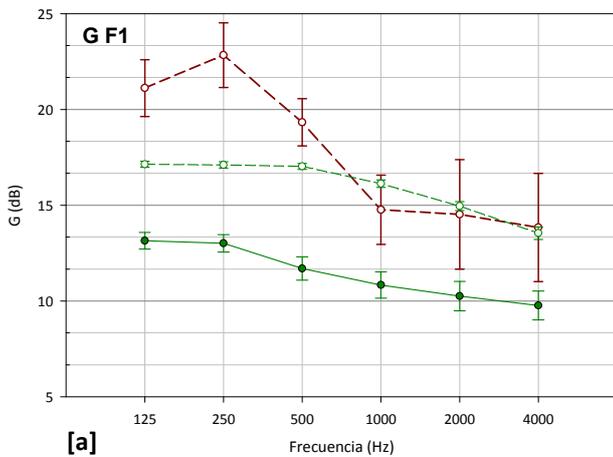


Figura 6.4.28. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1, 2 y 3.

Al igual que ocurría en las anteriores iglesias, para la fuerza sonora (G) se obtienen buenas aproximaciones entre los resultados simulados y medidos a partir de los 500 Hz, para las tres posiciones de fuente (figuras 6.4.28 [a], [c] y [d]).

En cuanto a los resultados de G, promediados espectralmente en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.4.28 [b], [d] y [f]), destacar que se obtienen buenas aproximaciones entre valores simulados y medidos. Como en los anteriores parámetros acústicos, los

valores de la fuerza sonora disminuyen para la iglesia ocupada, aunque, para las tres posiciones de la fuente, siguen estando por encima de los recomendados por la norma UNE.

Impresión espacial

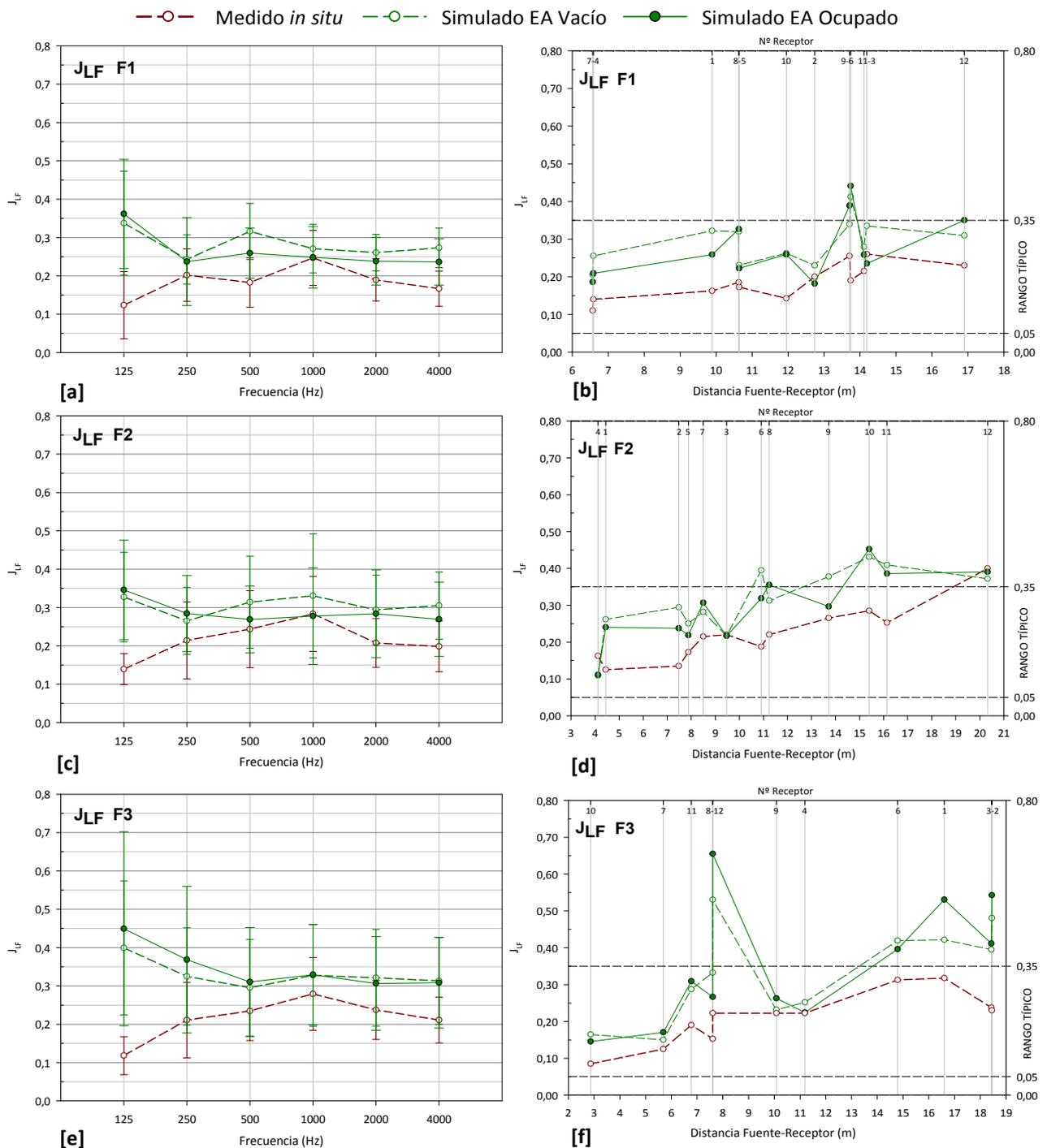


Figura 6.4.29. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1, 2 y 3.

Como suele ocurrir en la simulación de estos indicadores, los resultados que menos se ajustan a los medidos *in situ*, los encontramos en los parámetros relacionados con el ancho aparente de la fuente, la envolvente y la audición binaural, representados aquí por J_{LF} e $IACC_E$, con diferencias que superan ligeramente 2 JND en la mayoría de bandas de octava analizadas.

De nuevo, para la fracción de energía lateral precoz (figura 6.4.29), las simulaciones informáticas proporcionan resultados similares en las configuraciones vacío y ocupado, distanciándose, sensiblemente, la primera configuración de los resultados obtenidos en las medidas para la sala vacía. Estas diferencias también se hacen patentes en las desviaciones estándar que son mayores para las tres fuentes con respecto a las mediciones *in situ*.

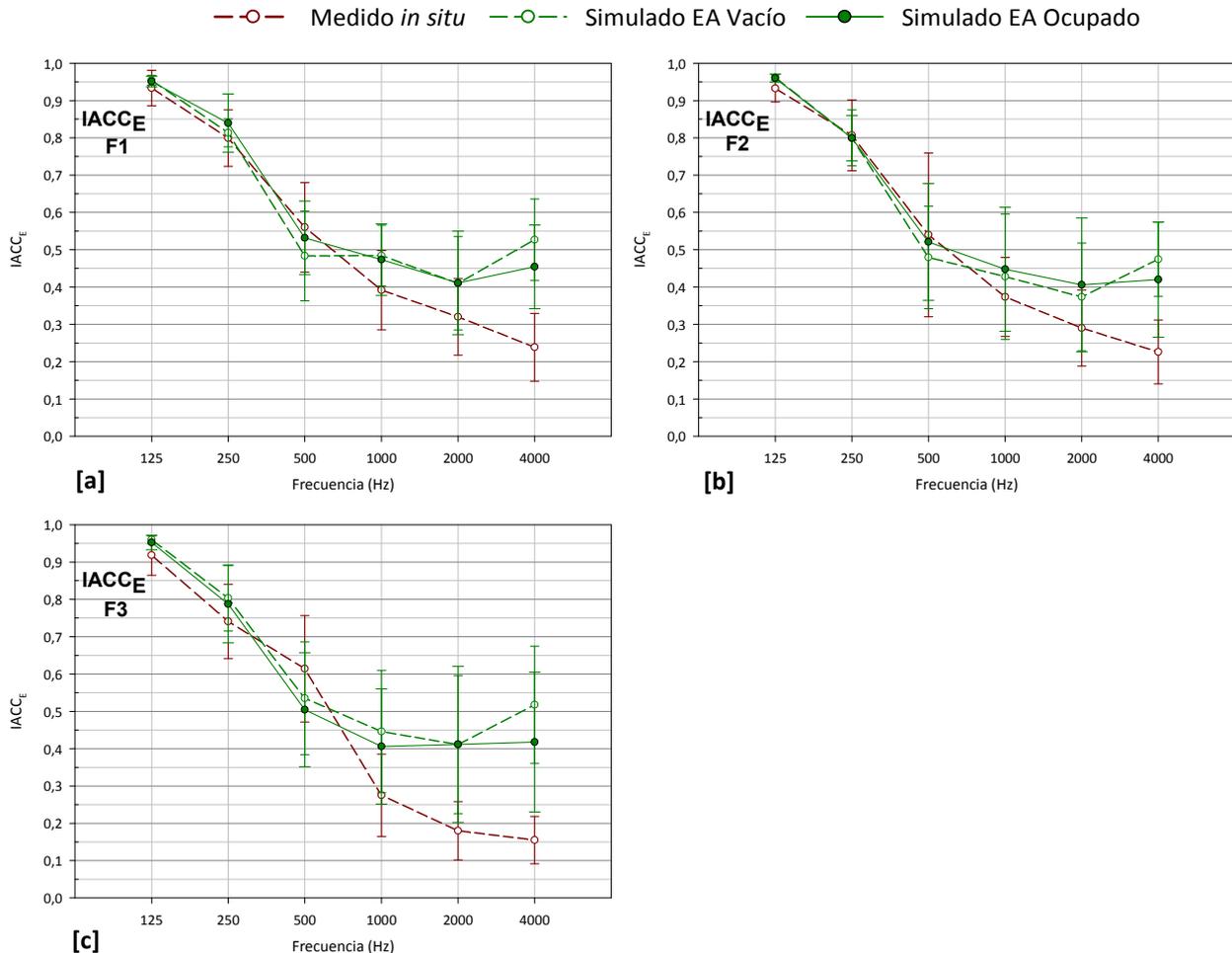


Figura 6.4.30. Coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACCE$. Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1, 2 y 3.

De nuevo, el análisis de las gráficas del coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACCE$), representadas en la figura 6.4.30, indican que la información espacial está asociada a las medias y altas frecuencias, y al igual que ocurría con J_{LF} , los valores simulados se distancian de los obtenidos en las medidas a estas frecuencias, siendo a su vez parecidos los obtenidos con las simulaciones del recinto vacío y ocupado.

En cuanto a la dispersión espacial de este parámetro, destacar que para las tres fuentes, la desviación estándar es mayor en las medidas experimentales que en las simulaciones informáticas para frecuencias inferiores a 500 Hz, y, al contrario, para frecuencias superiores a 500 Hz.

6.4.2.4. VALORACIÓN GLOBAL

Como conclusión de este análisis comparativo entre la medición *in situ* y las simulaciones informáticas, podemos decir que modelo informático tridimensional, ajustado con el tiempo de reverberación (T_{30}) y con la fuente en posición centrada en el presbiterio, posee un comportamiento acústico muy similar al que tiene realmente el recinto en su estado original.

En general, la posición de la fuente en el centro del presbiterio, el ambón o junto al órgano no presenta diferencias significativas en los parámetros acústicos analizados. Los resultados de magnitudes acústicas relacionadas con la reverberación son indiferentes a la posición de la fuente; sin embargo, parámetros relacionados con la inteligibilidad de la palabra y la claridad del sonido percibida, presentan resultados algo mejores para la fuente situada junto al órgano (F3). Aunque los parámetros más sensibles a la posición de la fuente son los correspondientes a la impresión espacial, el análisis de resultados realizado para cada de ellas arroja conclusiones similares sobre la espacialidad del sonido en el recinto.

Según lo anterior, al incorporar al modelo ajustado la propuesta de rehabilitación acústica, únicamente se presentarán los resultados para una sola posición de fuente, ya que las conclusiones que se obtendrían para el resto serían similares. En el caso de la iglesia que nos ocupa, el estudio se realizará para la fuente situada en el centro del presbiterio (F1), por ser la más representativa en el recinto.

Como estudio previo al planteamiento de la propuesta de rehabilitación acústica, se ha analizado el comportamiento de las ondas sonoras en el recinto, con el fin de evaluar la importancia relativa de las superficies implicadas al recibir los impactos de los rayos sonoros. Es de destacar que en esta iglesia, con acusada disposición asamblearia, cuando emite la fuente situada en el altar (F1), las superficies que más impactos de ondas sonoras reciben son el techo y la pared de fondo, esta última formada por los *muros dispersivos*. La gran abertura de las paredes laterales, hace que en ellas se produzcan pocas reflexiones de primer orden para el oyente.

En general, la capacidad de dispersión de rayos de dichos muros se aprecia beneficiosa para la audiencia de las últimas filas de bancos. Además, como veremos más adelante, la disposición asamblearia hace que la distribución espacial sobre la superficie de audiencia sea bastante homogénea y sin zonas de concentración de reflexiones.

6.4.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA

6.4.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

Para intentar solventar las deficiencias acústicas detectadas en el análisis de las condiciones del estado actual de la iglesia, se presenta una propuesta con los siguientes objetivos específicos:

- Disminuir los elevados tiempos de reverberación actuales, para ajustarlos a los considerados como óptimos para los usos de palabra y música religiosa, consiguiendo, a su vez, mejorar otros parámetros acústicos como la inteligibilidad de la palabra y la claridad musical, reduciendo la energía de las reflexiones largas en los distintos puntos de recepción.
- Mantener la buena distribución sonora existente en el recinto.
- Lograr que la iglesia tenga un buen comportamiento sonoro, independientemente del grado de ocupación de la misma, de tal forma que su acústica no esté tan condicionada por el número de personas que la ocupen.
- Por la importancia de la inteligibilidad de la palabra en el recinto, proponer una instalación de megafonía, que mejore la inteligibilidad en el recinto.

Para conseguir estos objetivos específicos y los generales descritos en el apartado 5.6 del capítulo *Método de investigación*, en esta iglesia, se han realizado dos propuestas de rehabilitación acústica distintas, ambas consistentes en la introducción de una serie de revestimientos absorbentes, en

zonas estratégicas desde el punto de vista acústico y arquitectónico, que permitirán comparar la influencia de determinados elementos constructivos en el comportamiento acústico del recinto.

A continuación se realiza la descripción y justificación de las dos propuestas, cuya planimetría explicativa se incluye en el apartado 6.4.3.2.

Propuesta 1

Como primera opción, se propone intervenir sobre el techo de hormigón, los muros dispersivos situados en la pared de fondo de la iglesia y el respaldo de los bancos para los fieles. Las características de dichas actuaciones se describen a continuación:

- Techo: panel absorbente sistema Sonacoustic, de espesor 25 mm, suspendido 60 mm del entrevigado del techo de hormigón visto. Con esta operación, se aporta absorción sonora a una de las superficies que recibe más impactos de ondas sonoras.
- Pared de fondo: panel absorbente de madera, curvo, ranurado por la cara vista y perforado por la cara interior, con manta de lana mineral de 50 mm de espesor, dispuesto en toda la superficie de los muros dispersivos (Marca: Decustik, Modelo D+001). La actuación sobre el fondo de la iglesia se debe también a la importante incidencia que, sobre ellos, tienen los impactos de ondas y reflexiones tardías.
- Zona de audiencia: incorporación de absorción sonora en el respaldo de los bancos de madera, utilizando el mismo panel de madera empleado para los muros dispersivos pero con la superficie plana. En la parte posterior del respaldo, tras la lana mineral, se dispone un panel de madera liso de 16 mm de espesor (figura 6.4.33). Como el comportamiento de la iglesia vacía difiere mucho del ocupado, con esta operación se dota de absorción sonora al propio banco, consiguiéndose que las condiciones acústicas no dependan tanto del estado de ocupación de la iglesia.

Propuesta 2

La segunda opción consiste en introducir revestimientos absorbentes en las mismas zonas que la propuesta 1 (a excepción de los muros dispersivos que no se tratan en toda su altura) y, adicionalmente, en el presbiterio y en las superficies planas de la pared de fondo de la iglesia.

Las características de dichas actuaciones se describen a continuación:

- Presbiterio: moqueta de lana 2,3 kg/m² en el suelo.
- Techo: panel absorbente suspendido 60 mm del entrevigado de hormigón visto como en la propuesta 1.
- Pared de fondo (cilindros): panel acústico curvo, ranurado por la cara vista y perforado por la cara interior, con manta de lana mineral de 50 mm de espesor, dispuesto como zócalo en los muros dispersivos hasta una altura de 2,25 m (Marca: Decustik, Modelo D+003).
- Puertas pared de fondo: revestimiento con el mismo panel de madera empleado para el zócalo de los muros dispersivos pero con la superficie plana.
- Pared de fondo (superficies planas): panel absorbente de lana mineral, sistema Sonacoustic, de espesor 25 mm, adosado a piezas de hormigón visto situadas entre las puertas de acceso y los huecos de iluminación superiores.
Con la introducción de estos tres últimos revestimientos se aporta absorción a la pared de fondo, con la intención de disminuir las reflexiones tardías provocadas con la gran cantidad de impactos de ondas.
- Zona de audiencia: nuevo respaldo en los bancos de madera, descrito en la propuesta 1 (figura 6.4.33).

6.4.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LAS PROPUESTAS

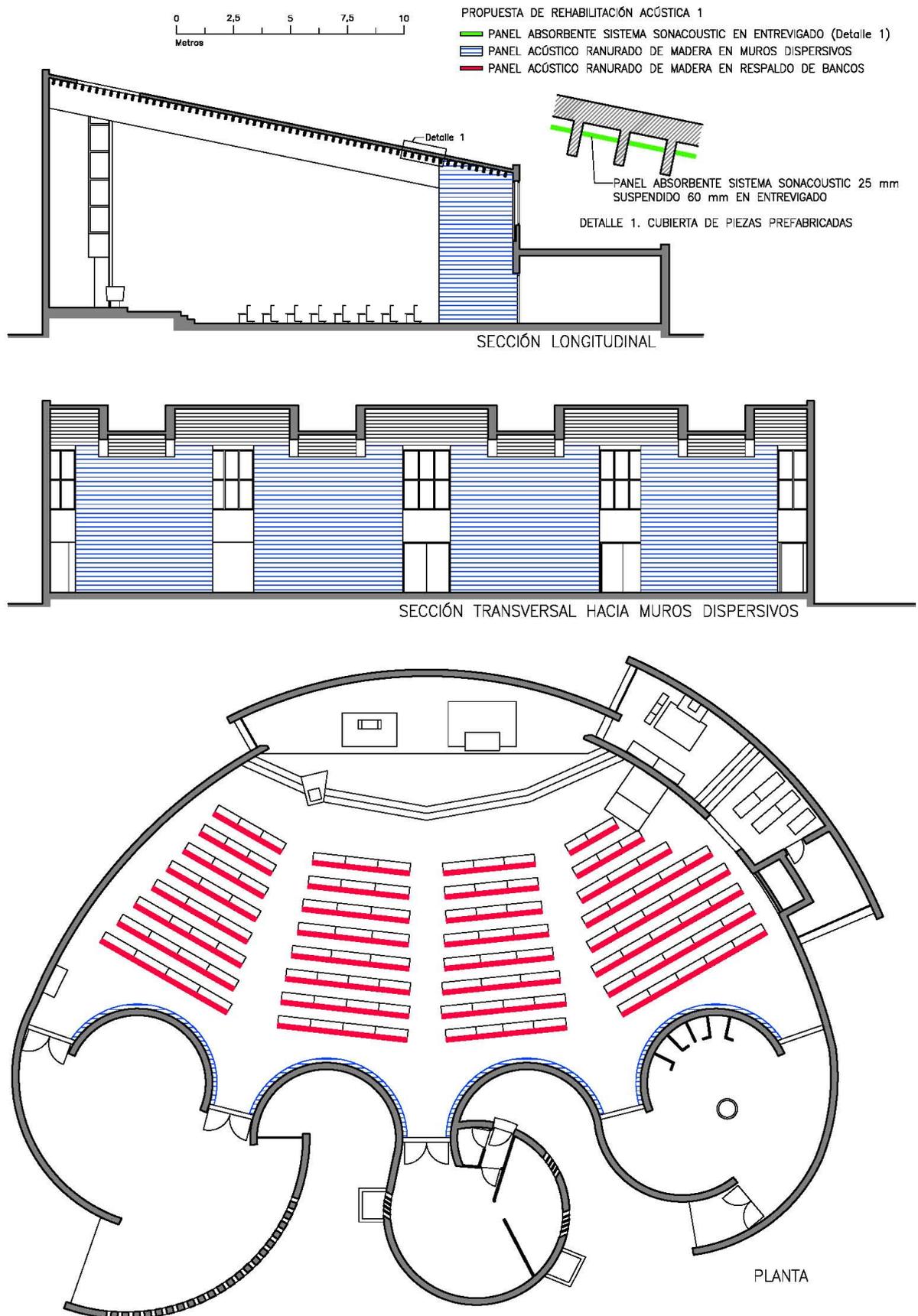
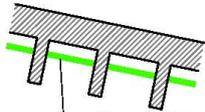
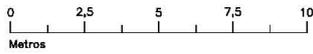


Figura 6.4.31. Planta y sección. Situación de materiales propuestos. Propuesta 1.

IGLESIA PARROQUIAL DE SANTA CRUZ DE OLEIROS. LA CORUÑA



DETALLE 1. CUBIERTA DE PIEZAS PREFABRICADAS

PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA 2

- ALFOMBRA DE LANA EN PRESBITERIO
- PANEL ABSORBENTE SISTEMA SONACOUSTIC EN ENTREVIGADO (Detalle 1)
- PANEL ABSORBENTE SISTEMA SONACOUSTIC 25 mm ADOSADO A MURO
- PANEL ACÚSTICO RANURADO DE MADERA EN MUROS DISPERSIVOS (zócalo altura 2.23 m) Y PUERTAS DE ACCESO
- PANEL ACÚSTICO RANURADO DE MADERA EN RESPALDO DE BANCOS

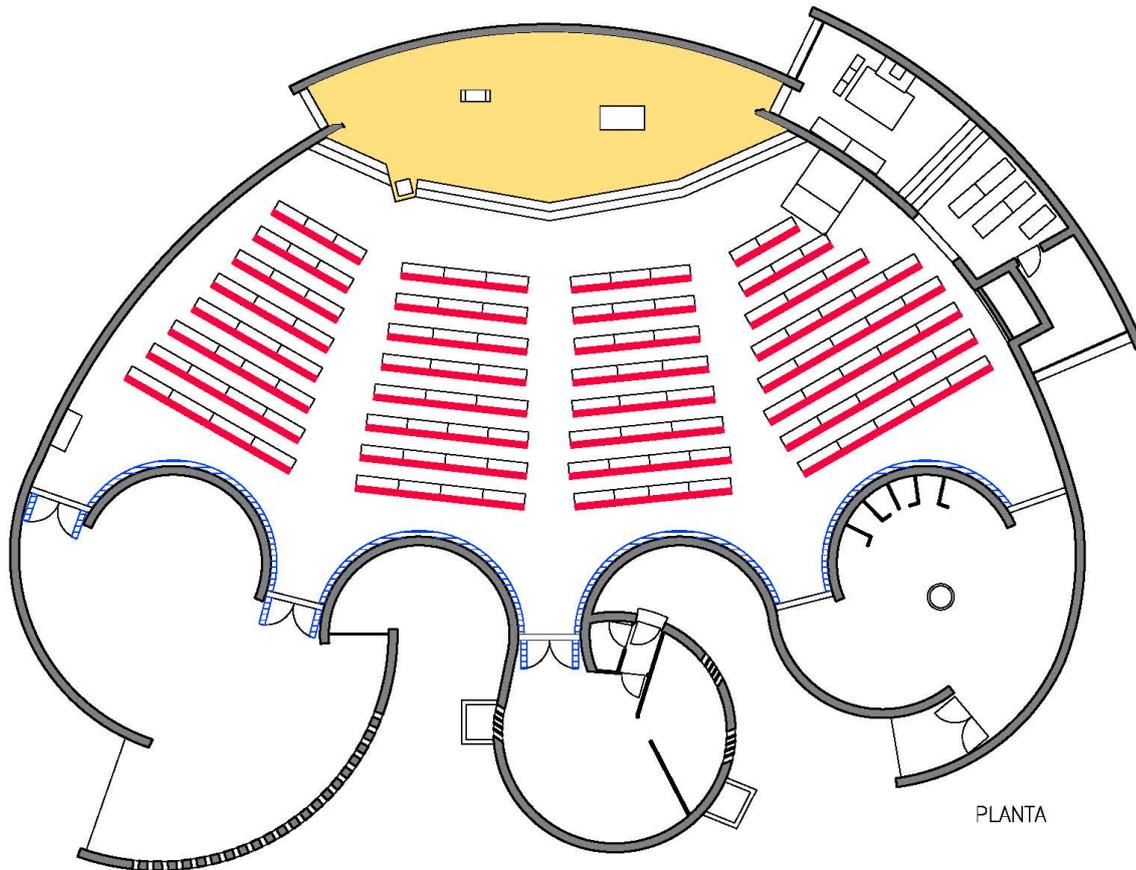
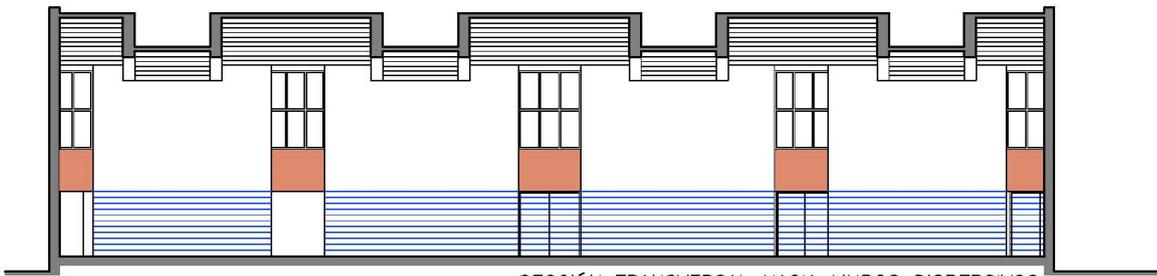


Figura 6.4.32. Planta y sección. Situación de materiales propuestos. Propuesta 2.

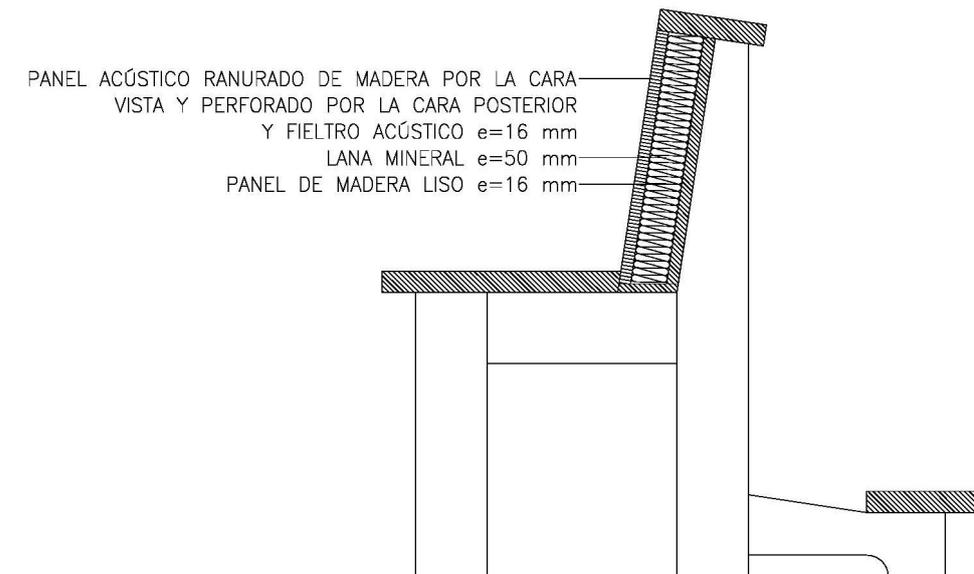


Figura 6.4.33. Sección del banco propuesto para las propuestas 1 y 2.

6.4.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO

En la figura 6.4.34, se muestra el modelo informático tridimensional del volumen interior de la iglesia, realizado con el programa *CATT-Acoustic v.8.0k*, en el que se han incorporado los elementos de la propuesta 1 de rehabilitación acústica.

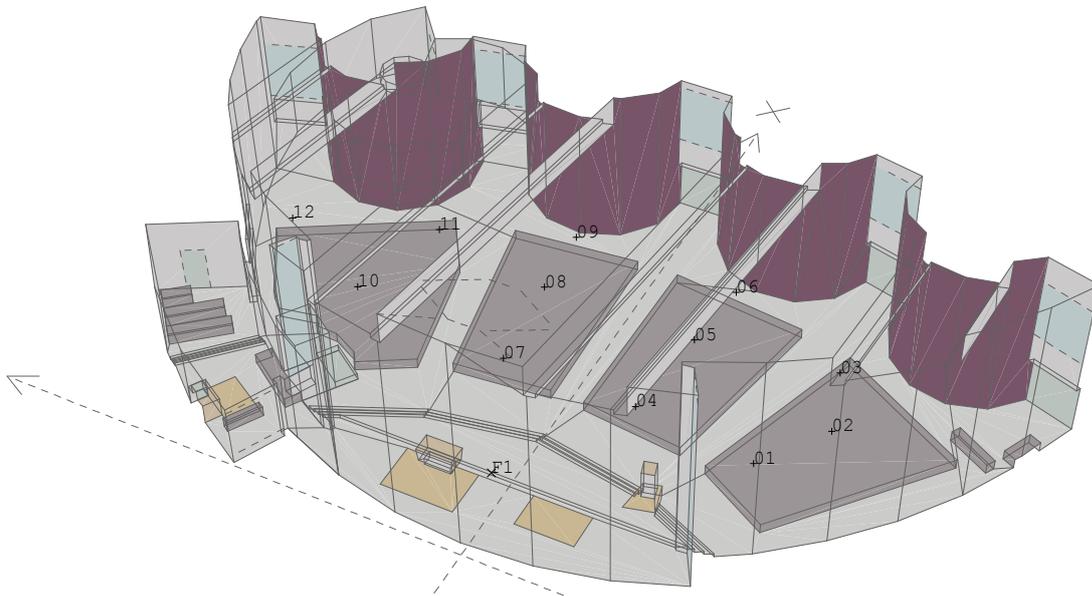


Figura 6.4.34. Modelo tridimensional de la iglesia con la propuesta de rehabilitación acústica 1.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores de la propuesta 1, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.4.16. Se resaltan en color verde los revestimientos que han sido modificados en la propuesta de rehabilitación acústica con respecto al estado actual.

IGLESIA PARROQUIAL DE SANTA CRUZ DE OLEIROS. LA CORUÑA

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
Hormigón visto	Paredes laterales y del presbiterio	845,0	36,2
Panel de lana mineral suspendido	Entrevigado techo	484,6	20,8
Terrazo	Suelo	353,9	15,2
Panel de madera ranurado	Pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	262,6	11,2
Banco de madera con respaldo de madera ranurado	Zona de audiencia	229,2	9,8
Puerta de madera	Puertas de acceso y confesionarios	66,1	2,8
Vidrio (en área grande)	Ventanas y lucernario baptisterio	57,3	2,5
Moqueta (delgada)	Presbiterio y capilla del Sagrario	12,5	0,5
Vidrio en entrevigado	Lucernario presbiterio	9,1	0,4
Granito	Altar, ambón, sede	9,0	0,4
Tela de algodón	Altar	5,0	0,2
Metal	Paredes Sagrario	0,7	0,0
TOTAL REVESTIMIENTOS		2335,0	100

Tabla 6.4.16. Áreas de revestimientos. Las filas resaltadas corresponden a los materiales propuestos para la rehabilitación. Propuesta 1.

De la misma forma que con la propuesta 1 de rehabilitación acústica, en la figura 6.4.35 siguiente se muestra el modelo informático y los revestimientos de la propuesta 2.

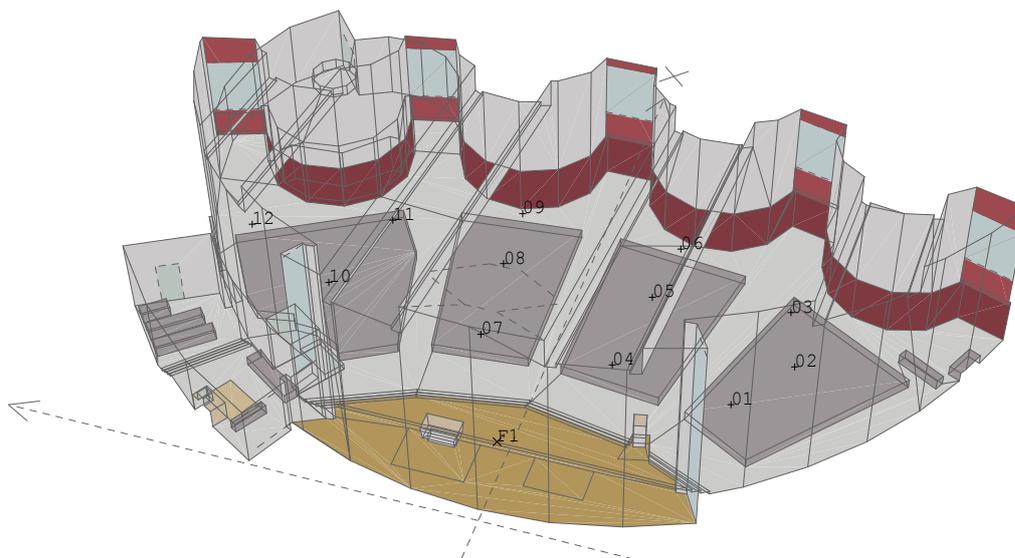


Figura 6.4.35. Modelo tridimensional de la iglesia con la propuesta de rehabilitación acústica 2.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores de esta segunda propuesta se indican en la tabla 6.4.17.

IGLESIA PARROQUIAL DE SANTA CRUZ DE OLEIROS. LA CORUÑA

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
Hormigón visto	Paredes laterales y del presbiterio	822,7	35,2
Panel de lana mineral suspendido	Entrevigado techo	484,6	20,8
Terrazo	Suelo	297,5	12,8
Banco de madera con respaldo de madera ranurado	Zona de audiencia	229,2	9,8
Hormigón visto	Pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	173,9	7,5
Panel de madera ranurado	Zócalo pared de fondo (<i>muros dispersivos</i>)	86,4	3,7
Moqueta de lana	Presbiterio	66,4	2,8
Vidrio (en área grande)	Ventanas y lucernario baptisterio	57,3	2,5
Puerta de madera	Puertas de acceso y confesionarios	52,0	2,2
Panel de lana mineral adosado	Piezas de hormigón visto (entre puertas de acceso y ventanas)	24,5	1,1
Panel de madera ranurado	Puertas de acceso	14,0	0,6
Vidrio en entrevigado	Lucernario presbiterio	9,1	0,4
Granito	Altar, ambón, sede	9,0	0,4
Tela de algodón	Altar	5,0	0,2
Moqueta (delgada)	Capilla del Sagrario	2,5	0,1
Metal	Paredes Sagrario	0,7	0,0
TOTAL REVESTIMIENTOS		2335,0	100

Tabla 6.4.17. Áreas de revestimientos. Las filas resaltadas corresponden a los materiales propuestos para la rehabilitación. Propuesta 2.

Para la simulación de los modelos informáticos de ambas propuestas de rehabilitación, en las hipótesis de iglesia vacía y ocupada, se emplearon las condiciones de cálculo especificadas en la tabla 6.4.18.

DATOS Y CONDICIONES DE CÁLCULO	
Algoritmo de cálculo	Nº2, cálculo completo, auralización detallada
Número de conos/rayos	35.000
Ecograma/respuesta al impulso	5 s
Densidad del aire	1,18 kg/m ³
Absorción del aire	Activada
Ruido de fondo	Según espectro medido <i>in situ</i>
Condiciones ambientales	20,8°C, 67%
Tiempo de cálculo	4 horas, 43 minutos (iglesia vacía, opción 1)
Número de fuentes	1
Número de receptores	12
Número de planos	324

Tabla 6.4.18. Datos y condiciones de cálculo.

Los coeficientes de absorción y de dispersión sonora de los nuevos revestimientos que se incorporan en las propuestas 1 y 2 se muestran en las tablas 6.4.19 y 6.4.20, respectivamente.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DE LA PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA 1 (%)							
REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Panel de madera ranurado (<i>muros dispersivos</i>)	α	40	70	80	75	65	65
	s	65	40	30	20	10	10
Panel de lana mineral suspendido (entrevig. techo)	α	27	40	37	35	40	42
	s	15	15	20	20	25	25
Banco de madera con respaldo ranurado (vacío)	α	25	37	36	35	34	34
	s	30	40	50	60	70	80

Tabla 6.4.19. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos introducidos en el recinto eclesial con la propuesta de rehabilitación acústica 1.

**COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS
DE LA PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA 2 (%)**

REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Panel de madera ranurado (zócalo muros dispersivos)	α	30	70	95	95	90	90
	s	65	40	30	20	10	10
Panel de lana mineral suspendido (entrevig. techo)	α	27	40	37	35	40	42
	s	15	15	20	20	25	25
Moqueta de lana	α	17	18	21	50	63	83
	s	10	10	10	10	10	10
Panel de madera ranurado (puertas de acceso)	α	30	70	95	95	90	90
	s	10	10	10	10	10	10
Panel de lana mineral adosado (piezas de hormigón)	α	10	50	85	85	80	80
	s	10	10	10	10	10	10
Banco de madera con respaldo ranurado (vacío)	α	25	37	36	35	34	34
	s	30	40	50	60	70	80

Tabla 6.4.20. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos introducidos en el recinto eclesial con la propuesta de rehabilitación acústica 2.

Como en las propuestas de otras iglesias de la muestra, los valores de los coeficientes de absorción y *scattering* de los revestimientos han sido obtenidos de distintas fuentes publicadas, así como de los propios fabricantes de los productos. De igual forma, los valores de los coeficientes de absorción correspondientes a revestimientos heterogéneos, como el techo de hormigón visto con el panel absorbente o los bancos de madera con respaldo absorbente, han sido obtenidos analíticamente a partir de las proporciones geométricas de los elementos que los integran. Los coeficientes de dispersión sonora de estas superficies son los mismos que los empleados para el ajuste del modelo informático (tabla 6.4.15)

6.4.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

En este apartado se analiza el comportamiento acústico de la iglesia con las dos propuestas de rehabilitación acústica planteadas. Para facilitar la comparación de los resultados, las gráficas situadas en la columna izquierda muestran los valores correspondientes a la propuesta 1 (P1), y las gráficas de la columna derecha, los relativos a la 2 (P2). Sistemáticamente, las tablas y las gráficas de cada parámetro muestran los resultados de la medición realizada *in situ*, las simulaciones del estado actual (EA), en sus configuraciones de vacío y ocupado, así como los valores de las simulaciones de cada propuesta de rehabilitación acústica (RE), con la sala vacía y ocupada al 100%, correspondiendo todos estos resultados a la fuente en la posición 1 (centro presbiterio).

Reverberación

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_{30} (s)	MEDIDO Vacío	7,16 0,15	7,14 0,11	7,40 0,07	6,17 0,04	4,85 0,04	3,58 0,03
	SIMULADO EA Vacío	7,36 0,02	7,35 0,02	7,15 0,01	5,97 0,01	4,66 0,01	3,41 0,01
	SIMULADO EA Ocupado	3,48 0,03	3,46 0,02	2,77 0,04	2,52 0,06	2,35 0,05	1,97 0,04
	SIMULADO RE Vacío P1	1,84 0,01	1,30 0,02	1,25 0,02	1,27 0,02	1,26 0,03	1,10 0,02
	SIMULADO RE Ocupado P1	1,56 0,02	1,25 0,04	1,15 0,04	1,14 0,04	1,11 0,05	1,00 0,03
	SIMULADO RE Vacío P2	2,39 0,01	1,68 0,04	1,54 0,04	1,53 0,04	1,53 0,02	1,33 0,04
	SIMULADO RE Ocupado P2	1,92 0,01	1,56 0,04	1,40 0,05	1,47 0,07	1,50 0,08	1,29 0,07
	Óptimo palabra	1,52	1,35	1,17	1,05	1,05	1,05
	Óptimo música	2,03	1,80	1,56	1,41	1,41	1,41

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
EDT (s)	MEDIDO Vacío	6,94	7,15	7,42	6,03	4,79	3,33
		0,51	0,27	0,22	0,20	0,11	0,09
	SIMULADO EA Vacío	7,44	7,41	7,18	6,04	4,74	3,48
		0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05
	SIMULADO EA Ocupado	3,51	3,49	2,76	2,42	2,16	1,88
		0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06
	SIMULADO RE Vacío P1	1,88	1,27	1,21	1,25	1,21	1,08
		0,06	0,07	0,08	0,09	0,09	0,08
SIMULADO RE Ocupado P1	1,57	1,16	1,06	1,05	1,01	0,93	
	0,05	0,06	0,07	0,07	0,06	0,05	
SIMULADO RE Vacío P2	2,41	1,65	1,51	1,47	1,40	1,23	
	0,06	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	
SIMULADO RE Ocupado P2	1,92	1,49	1,30	1,24	1,17	1,05	
	0,06	0,09	0,09	0,11	0,12	0,11	

Tabla 6.4.21. Valores del tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

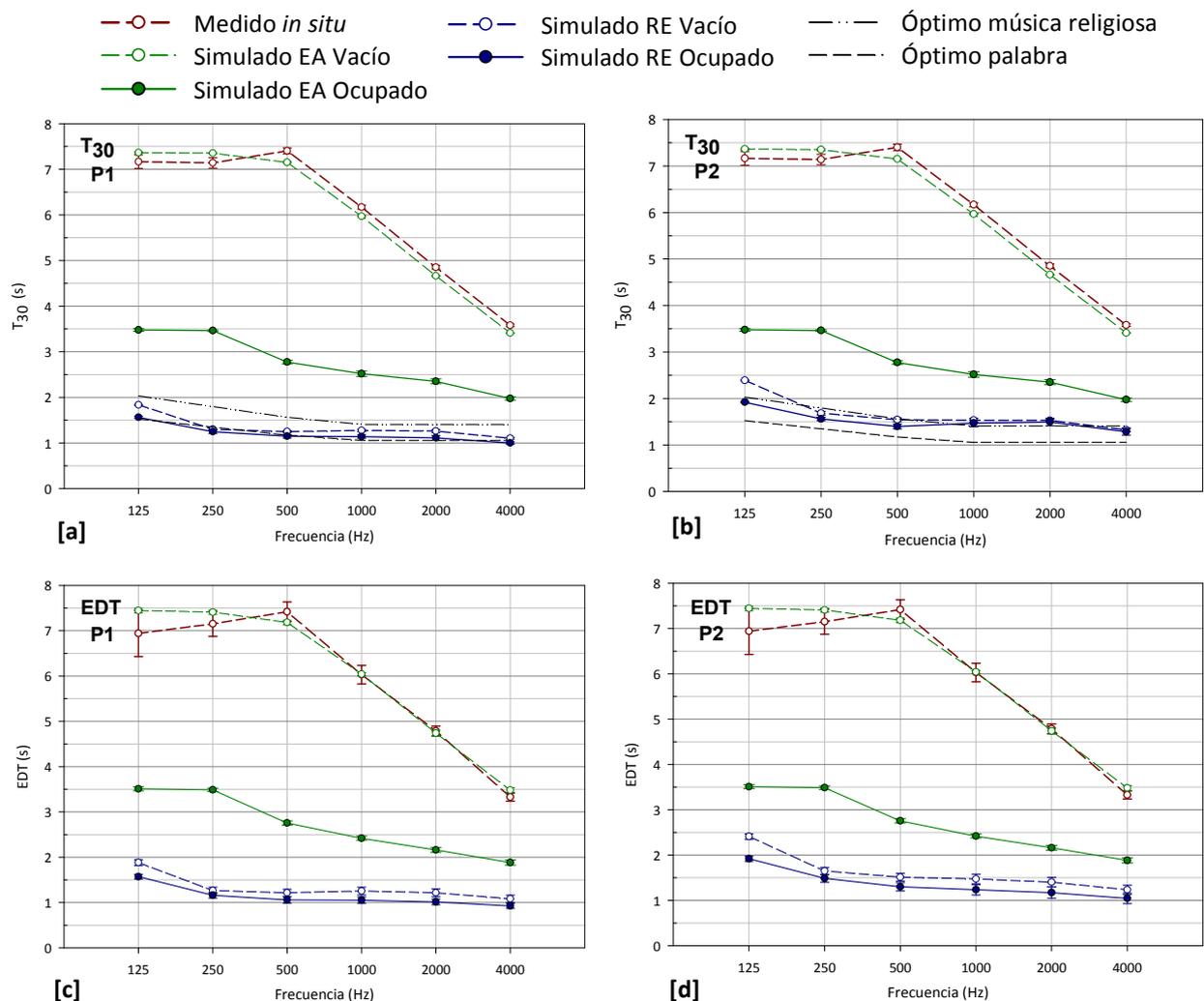


Figura 6.4.36. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

Como puede comprobarse en las gráficas de las figuras 6.4.36 [a] y [b], con las dos propuestas de rehabilitación se reducen notablemente los tiempos de reverberación del recinto, valorados con el T_{30} , tanto con la sala vacía como ocupada. Para la propuesta 1, tanto en la configuración de iglesia vacía como ocupada, los tiempos de reverberación obtenidos, se encuentran dentro de la banda óptima delimitada por los valores recomendados para la palabra y música religiosa (figura 6.4.36 [a]). En la segunda propuesta (figura 6.4.36 [b]), para frecuencias inferiores a 500Hz, casi todos los valores

del T_{30} se sitúan en dicha franja óptima y, para frecuencias superiores a 1000 Hz, los resultados, para la iglesia vacía y ocupada, se ajustan a los óptimos recomendados para la música religiosa.

En ambas propuestas puede observarse que el comportamiento de la sala, en cuanto al tiempo de reverberación, difiere muy poco en relación a su grado de ocupación, gracias a la absorción sonora implementada en los bancos de la zona de audiencia.

En cuanto al EDT (figuras 6.4.36 [c] y [d]), destacar que en ambas propuestas y para las configuraciones de sala vacía y ocupada, los valores a las frecuencias medias son inferiores a 2,0 s, con lo que los resultados correspondientes al promediado en frecuencia de número único, en ambas opciones, se encuentran dentro del rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010 (entre 1,0 s y 3,0 s).

Como en el estado actual, al incorporar cada propuesta de rehabilitación acústica, la dispersión espacial en estos parámetros relacionados con la reverberación, es muy pequeña, tanto para la iglesia vacía como ocupada.

Para concluir con este apartado nos gustaría indicar que, además de las dos propuestas de rehabilitación presentadas, en los análisis iniciales de esta iglesia se han estudiado otras opciones. Una de ellas fue la reducción del volumen de la iglesia, segregando el baptisterio y la capilla del Santísimo del espacio eclesial, observándose que no contribuía a mejorar los resultados del tiempo de reverberación, dado que la existencia de estos espacios acoplados es más favorable que la reducción del volumen que suponen.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_s (ms)	MEDIDO Vacío	465,17 48,56	521,83 18,15	555,58 28,54	447,67 25,06	345,67 26,19	237,75 25,69
	SIMULADO EA Vacío	541,16 12,19	541,13 12,25	524,08 11,48	440,56 12,04	343,79 10,52	250,24 10,05
	SIMULADO EA Ocupado	250,20 9,46	248,79 9,50	193,19 9,04	166,37 8,27	147,16 8,59	127,28 7,68
	SIMULADO RE Vacío P1	126,27 7,19	78,18 4,79	74,89 4,87	78,21 5,28	75,72 5,28	66,32 4,78
	SIMULADO RE Ocupado P1	101,88 5,39	69,83 4,35	62,23 3,90	61,39 3,63	58,51 3,66	53,06 3,50
	SIMULADO RE Vacío P2	163,63 8,84	104,46 7,47	94,60 7,52	89,23 8,13	81,77 7,85	67,41 7,47
	SIMULADO RE Ocupado P2	126,14 6,82	90,92 6,69	75,91 5,98	67,54 6,51	61,03 6,63	51,71 6,78

Tabla 6.4.22. Valores del tiempo central T_s (ms). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

En las gráficas 6.4.37 [a] y [b], puede observarse que al introducir las medidas correctoras de revestimientos en el recinto eclesial para las dos propuestas presentadas y en los dos estados de ocupación, los valores del tiempo central (T_s) disminuyen considerablemente, lo que refleja mayor nitidez en el sonido percibido.

IGLESIA PARROQUIAL DE SANTA CRUZ DE OLEIROS. LA CORUÑA

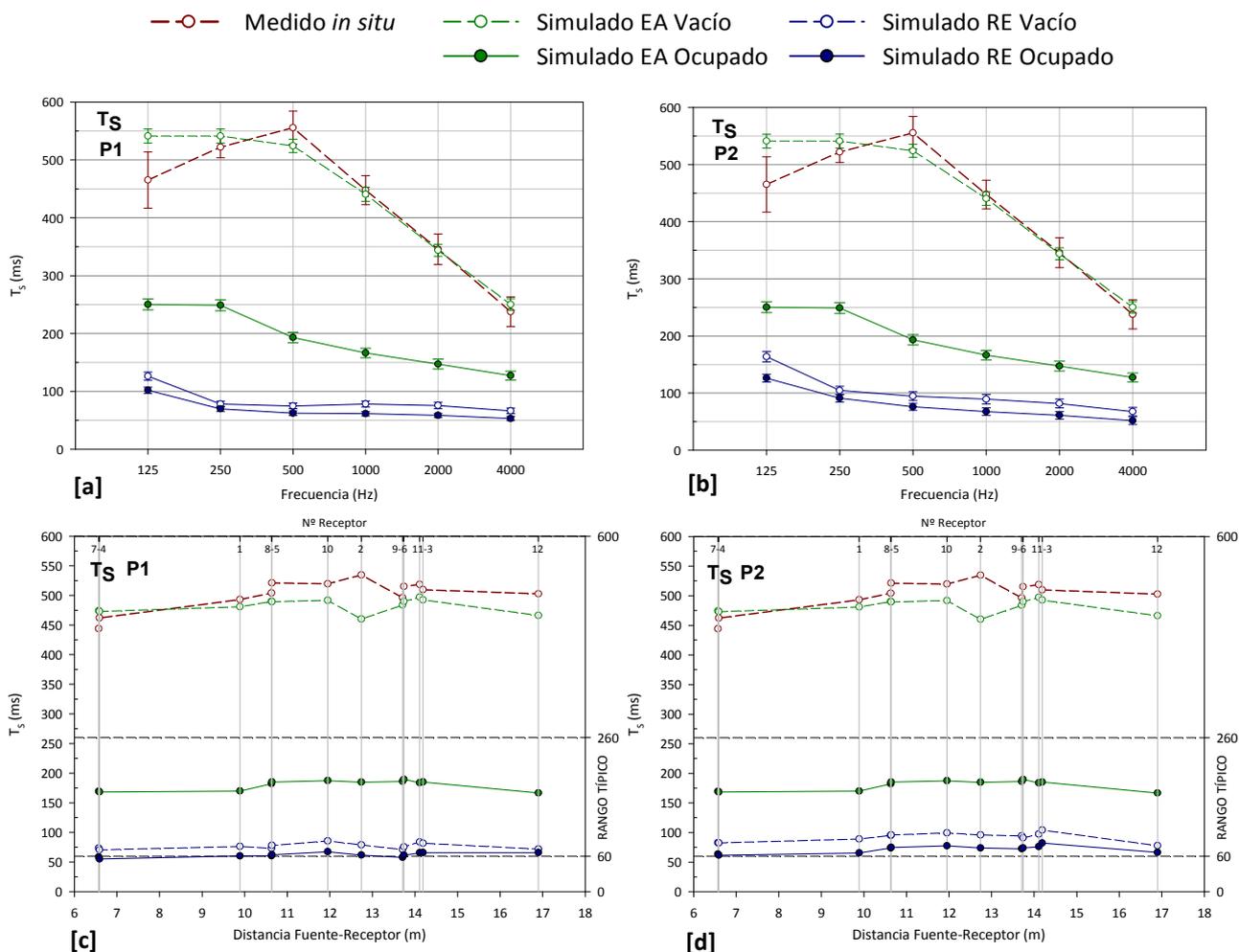


Figura 6.4.37. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

Al representar los valores del tiempo central en cada punto de recepción (figuras 6.4.37 [c] y [d]), se aprecia que, para las configuraciones de iglesia vacía y ocupada, en ambas propuestas, prácticamente todos los resultados se encuentran dentro del intervalo establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D_{50}	MEDIDO Vacío	0,15 0,07	0,09 0,02	0,09 0,03	0,11 0,03	0,16 0,06	0,21 0,09
	SIMULADO EA Vacío	0,10 0,01	0,09 0,01	0,10 0,01	0,11 0,02	0,14 0,02	0,19 0,02
	SIMULADO EA Ocupado	0,20 0,02	0,20 0,02	0,26 0,03	0,29 0,03	0,33 0,03	0,36 0,03
	SIMULADO RE Vacío P1	0,36 0,03	0,51 0,03	0,53 0,03	0,51 0,03	0,52 0,03	0,56 0,03
	SIMULADO RE Ocupado P1	0,43 0,03	0,55 0,03	0,59 0,03	0,59 0,02	0,61 0,02	0,64 0,02
	SIMULADO RE Vacío P2	0,30 0,03	0,43 0,03	0,46 0,04	0,49 0,04	0,52 0,04	0,59 0,05
	SIMULADO RE Ocupado P2	0,37 0,03	0,48 0,03	0,54 0,03	0,59 0,04	0,63 0,04	0,68 0,04

Tabla 6.4.23. Valores de la definición D_{50} . Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo) Fuente 1.

IGLESIA PARROQUIAL DE SANTA CRUZ DE OLEIROS. LA CORUÑA

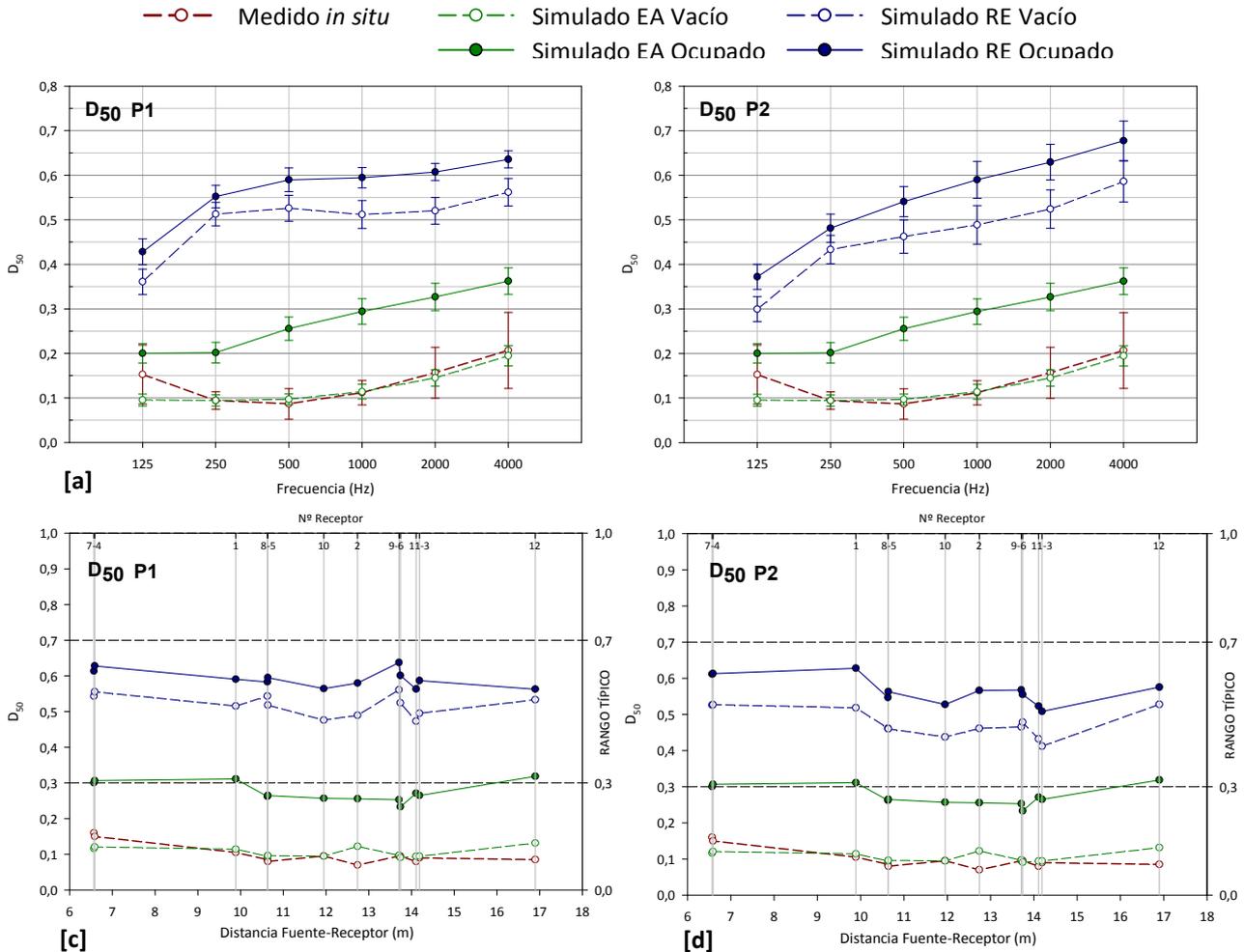


Figura 6.4.38. Definición D_{50} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

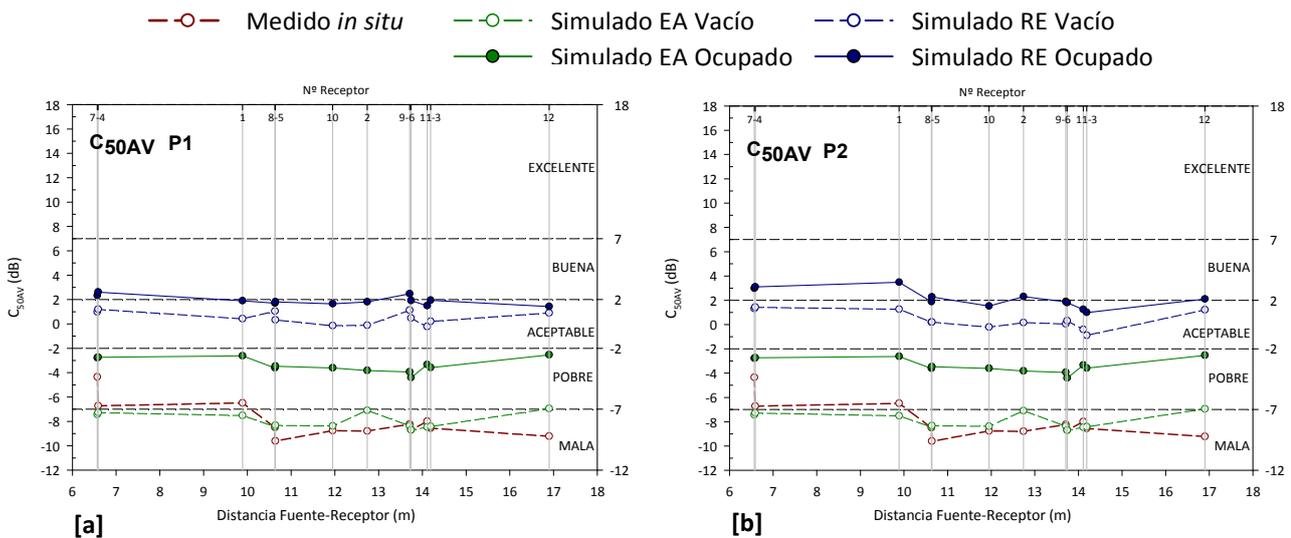


Figura 6.4.39. Claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

El comportamiento espacial por banda de octava de la definición (D_{50}), (figuras 6.4.38 [a] y [b]) muestra que con ambas propuestas de rehabilitación se mejoran considerablemente los resultados iniciales. En la propuesta 1, las curvas de comportamiento son bastante planas (excepto a 125 Hz) mientras que con la propuesta 2, se observa un claro crecimiento lineal conforme aumenta la

frecuencia del sonido. Si nos centramos en los resultados del estado actual (EA) y propuesta (RE) para la sala ocupada, la mejora del D_{50} prácticamente duplica su valor. La dispersión espacial es algo mayor en los resultados de la propuesta 2.

En cuanto a la representación de resultados en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor, en el caso del D_{50} (figuras 6.4.38 [c] y [d]), para ambas hipótesis de ocupación, todos los valores se encuentran dentro del rango típico que recoge la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, a diferencia del estado actual donde prácticamente todos los resultados se encontraban fuera de dicho rango.

La calificación de la claridad (C_{50AV}) para ambas propuestas, según Marshall, pasa a ser aceptable con la iglesia vacía y, entre buena y aceptable, cuando la iglesia está ocupada (figuras 6.4.39 [a] y [b]).

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C_{80} (dB)	MEDIDO Vacío	-5,81	-7,94	-8,67	-7,07	-5,72	-3,93
		2,07	0,97	1,41	0,95	1,34	1,46
	SIMULADO EA Vacío	-7,93	-8,02	-7,88	-7,08	-5,86	-4,23
		0,50	0,47	0,48	0,56	0,50	0,51
	SIMULADO EA Ocupado	-4,07	-4,06	-2,68	-1,81	-1,12	-0,37
		0,42	0,42	0,46	0,43	0,47	0,45
	SIMULADO RE Vacío P1	-0,31	2,61	2,86	2,58	2,73	3,57
		0,48	0,47	0,53	0,51	0,51	0,49
	SIMULADO RE Ocupado P1	0,99	3,35	4,09	4,16	4,40	5,05
		0,42	0,50	0,57	0,54	0,48	0,48
	SIMULADO RE Vacío P2	-1,64	0,95	1,50	1,93	2,51	3,66
		0,46	0,46	0,54	0,61	0,62	0,69
	SIMULADO RE Ocupado P2	-0,17	1,82	2,93	3,76	4,45	5,43
		0,37	0,41	0,42	0,52	0,61	0,73

Tabla 6.4.24. Valores de la claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

Al igual que con los parámetros anteriores, las gráficas de la figura 6.4.40 indican que, con ambas propuestas de rehabilitación, se mejoran notablemente los resultados de la claridad musical (C_{80}). Las observaciones sobre su comportamiento son prácticamente coincidentes con las del C_{50} comentado con anterioridad, por lo que nos remitimos a ellas.

Los resultados del C_{80} , promediados espectralmente, para ambas propuestas (figuras 6.4.40 [c] y [d]), tanto para la iglesia vacía como ocupada, se encuentran dentro del rango típico establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

En cuanto al valor medio de la claridad musical $C_{80}(3)$, con la primera propuesta (figura 6.4.40 [e]), tanto para la iglesia vacía como ocupada, el recinto es adecuado para representaciones musicales de gran claridad (ópera). Con la segunda propuesta de rehabilitación (figura 6.4.40 [f]), los resultados del $C_{80}(3)$ para la iglesia vacía, reflejan que el recinto está en el límite entre música sinfónica y de ópera, mientras que la presencia de los fieles hacen la iglesia pase a ser apropiada para el uso de ópera.

IGLESIA PARROQUIAL DE SANTA CRUZ DE OLEIROS. LA CORUÑA

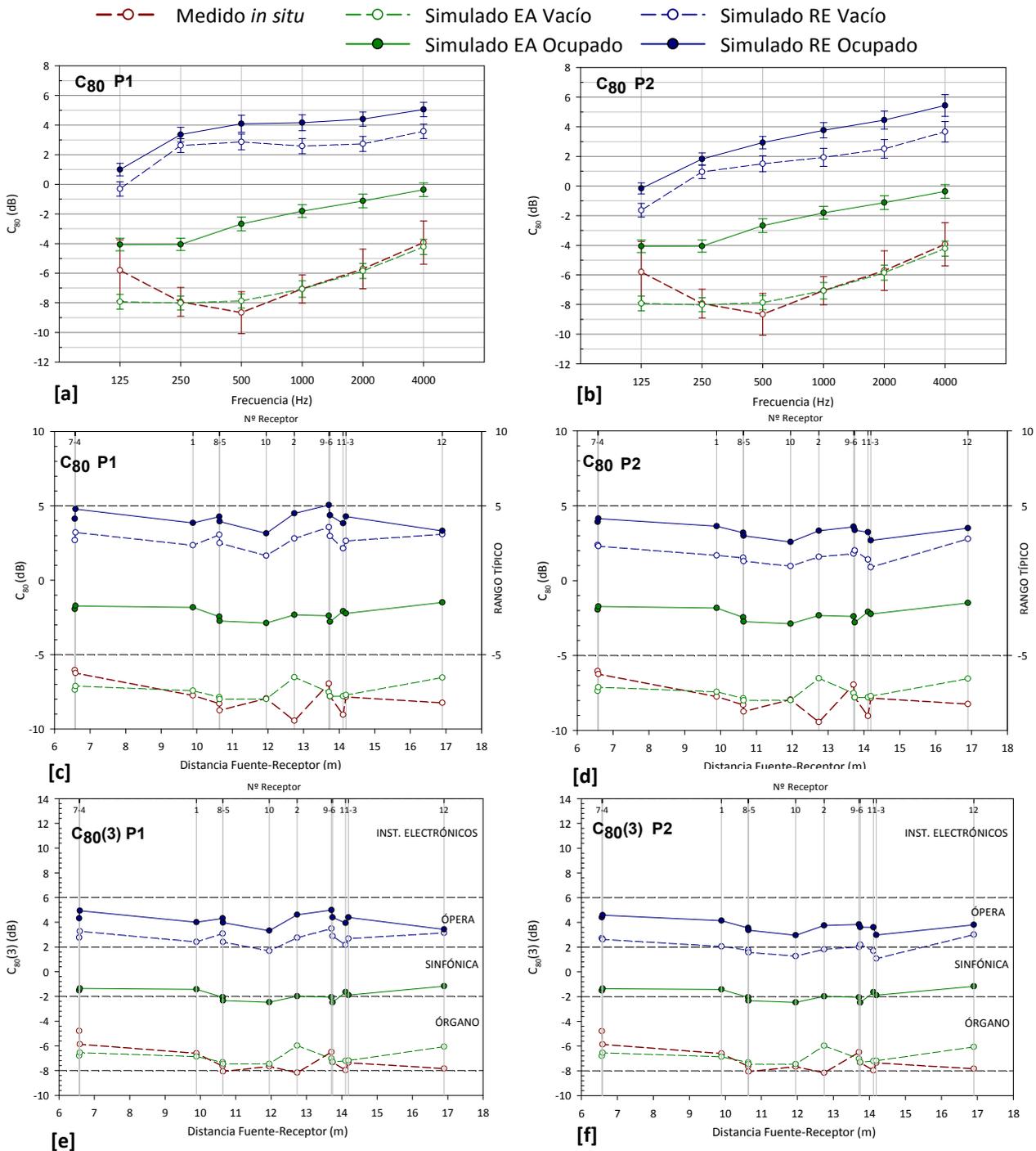


Figura 6.4.40. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.4.41, se aportan los mapas de resultados de la claridad musical (C_{80}) global en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA) y tras las propuestas de rehabilitación acústica, opción 1 (RE P1) y opción 2 (RE P2), todos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente en posición 1, centrada en el presbiterio.

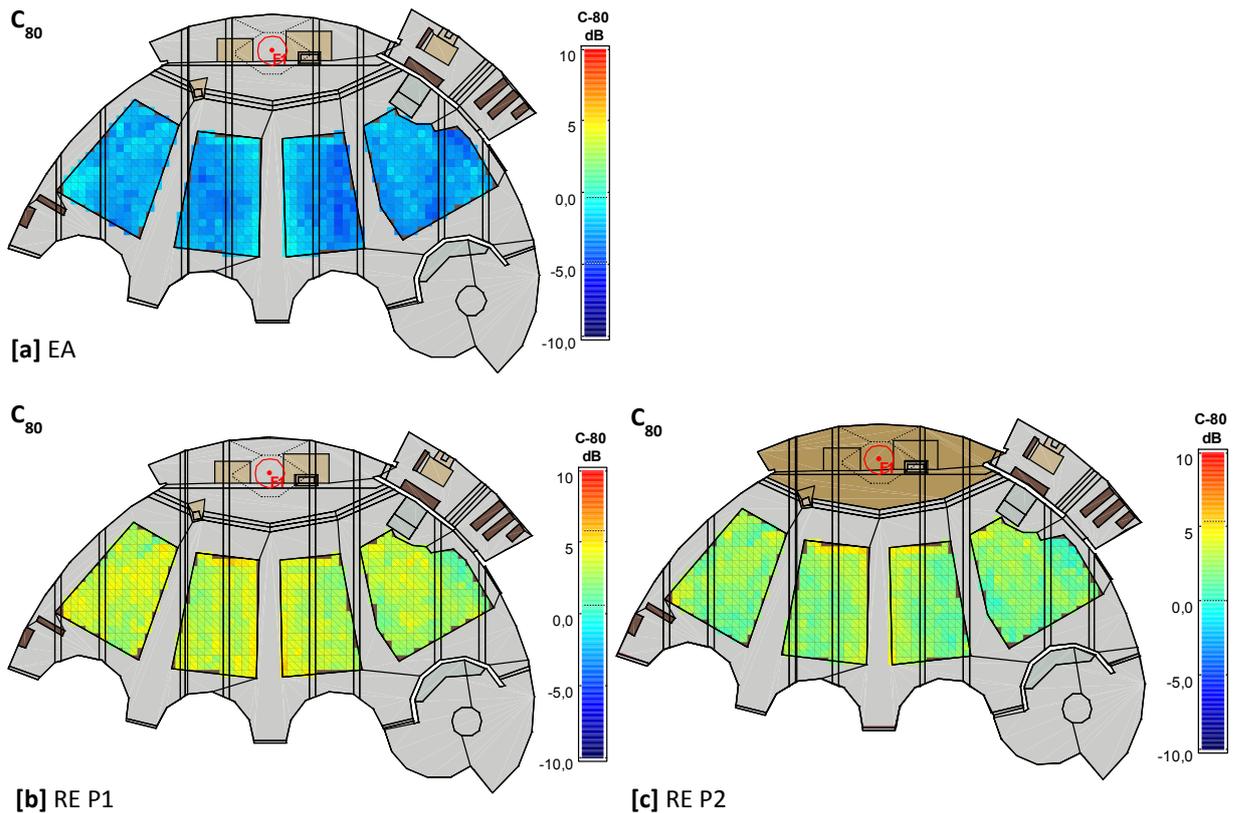


Figura 6.4.41. Claridad musical C_{80} global (dB). Simulaciones estado actual (EA) y propuestas de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2). Iglesia ocupada, fuente 1.

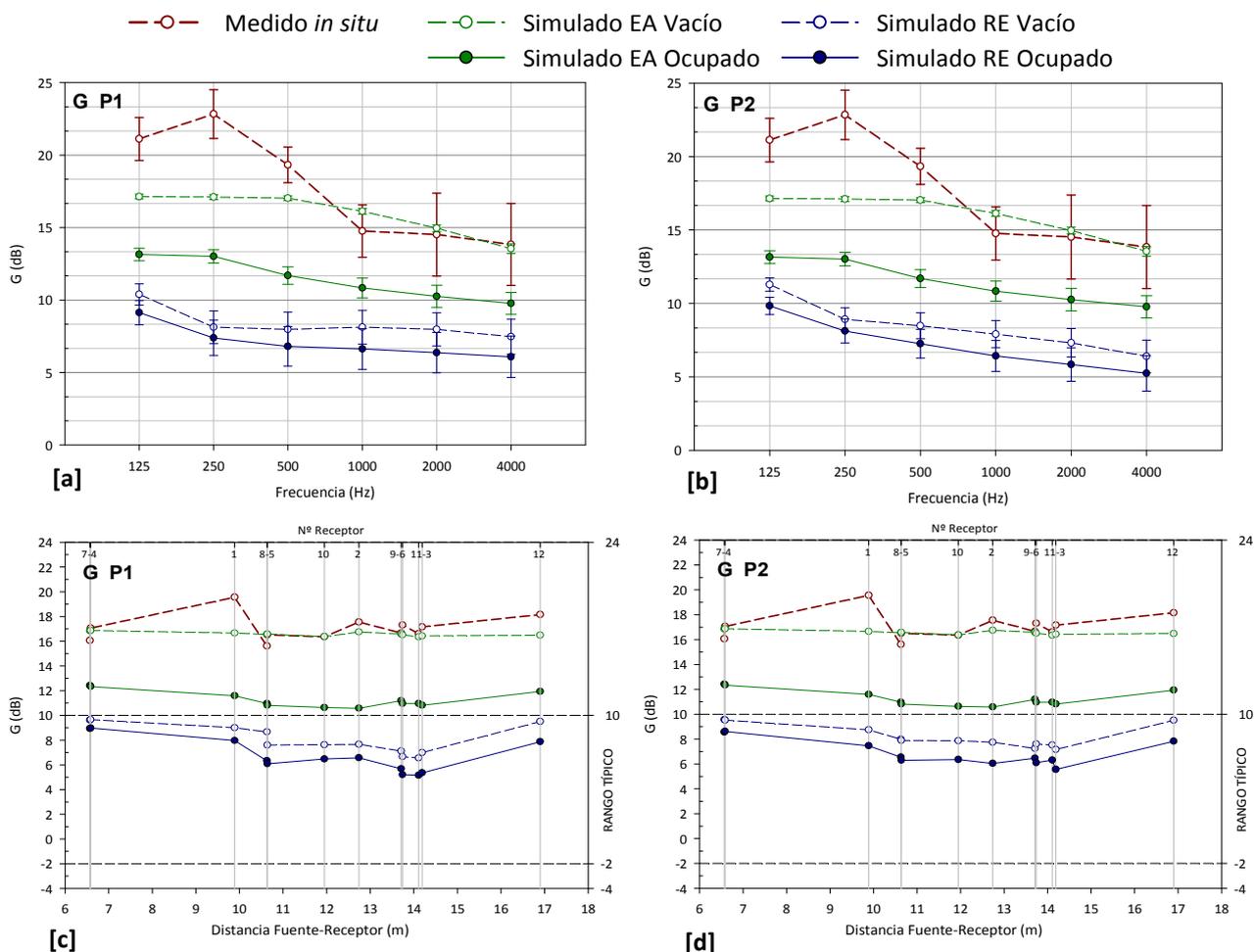
En el mapa de distribución espacial de la claridad musical (C_{80}), correspondiente a la simulación del estado actual (figura 6.4.41 [a]), se aprecia una distribución uniforme en el área de la audiencia, si bien los valores son todos negativos (valor medio -2,56 dB). En las figuras 6.4.41 [b] y [c], vemos que al incorporar las medidas correctoras en las dos propuestas, los valores de la claridad musical aumentan sensiblemente, manteniendo una buena distribución espacial sobre la zona de audiencia. Como puede observarse, los valores más altos de la claridad musical se obtienen con la propuesta de rehabilitación 1, donde el valor medio es 3,23 dB, frente a 2,24 dB obtenido para propuesta 2.

En general, podemos afirmar que los resultados de las magnitudes acústicas relacionadas con el aspecto subjetivo del oyente sobre claridad del sonido percibida, mejoran notablemente con las dos propuestas de rehabilitación acústica. Es de destacar, la sensible mejora de los parámetros analizados cuando la iglesia está vacía, en comparación con los resultados tan desfavorables del estado actual, existiendo muy poca diferencia entre los resultados de las hipótesis de iglesia vacía y ocupada.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	MEDIDO Vacío	21,12	22,83	19,33	14,76	14,52	13,83
	SIMULADO EA Vacío	17,13	17,10	17,03	16,12	14,95	13,54
	SIMULADO EA Ocupado	13,15	13,01	11,69	10,83	10,25	9,77
	SIMULADO RE Vacío P1	10,39	8,12	7,98	8,12	7,98	7,47
	SIMULADO RE Ocupado P1	9,13	7,39	6,81	6,62	6,37	6,08
	SIMULADO RE Vacío P2	11,28	8,91	8,48	7,91	7,31	6,40
	SIMULADO RE Ocupado P2	9,83	8,12	7,26	6,43	5,84	5,24
			0,59	0,82	0,98	1,06	1,14

Tabla 6.4.25. Valores de la fuerza sonora G (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

Figura 6.4.42. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

Las dos propuestas de rehabilitación acústica, tanto para la iglesia vacía como ocupada, disminuyen los valores de G medidos a todas las frecuencias, siendo esta disminución más acusada, a medias y altas frecuencias, para la opción 2 (figuras 6.4.42 [a] y [b]).

Las gráficas correspondientes al promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor (figuras 6.4.42 [c] y [d]), reflejan que, para ambas propuestas de rehabilitación en la hipótesis de iglesia vacía y ocupada, los resultados obtenidos en todos los puntos de recepción distribuidos en la zona de

audiencia, sitúan los valores de G dentro del rango típico establecido en la citada norma UNE de referencia.

Los resultados favorables de la fuerza acústica (G), para las dos propuestas, están relacionados con la disminución del tiempo de reverberación y, en consecuencia, con la reducción del nivel del campo reverberante.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.4.43 se muestran los mapas de resultados de la fuerza sonora (G) global en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA) y tras las propuestas de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2), para la hipótesis de iglesia ocupada al 100% y con la fuente en posición 1, centrada en el presbiterio.

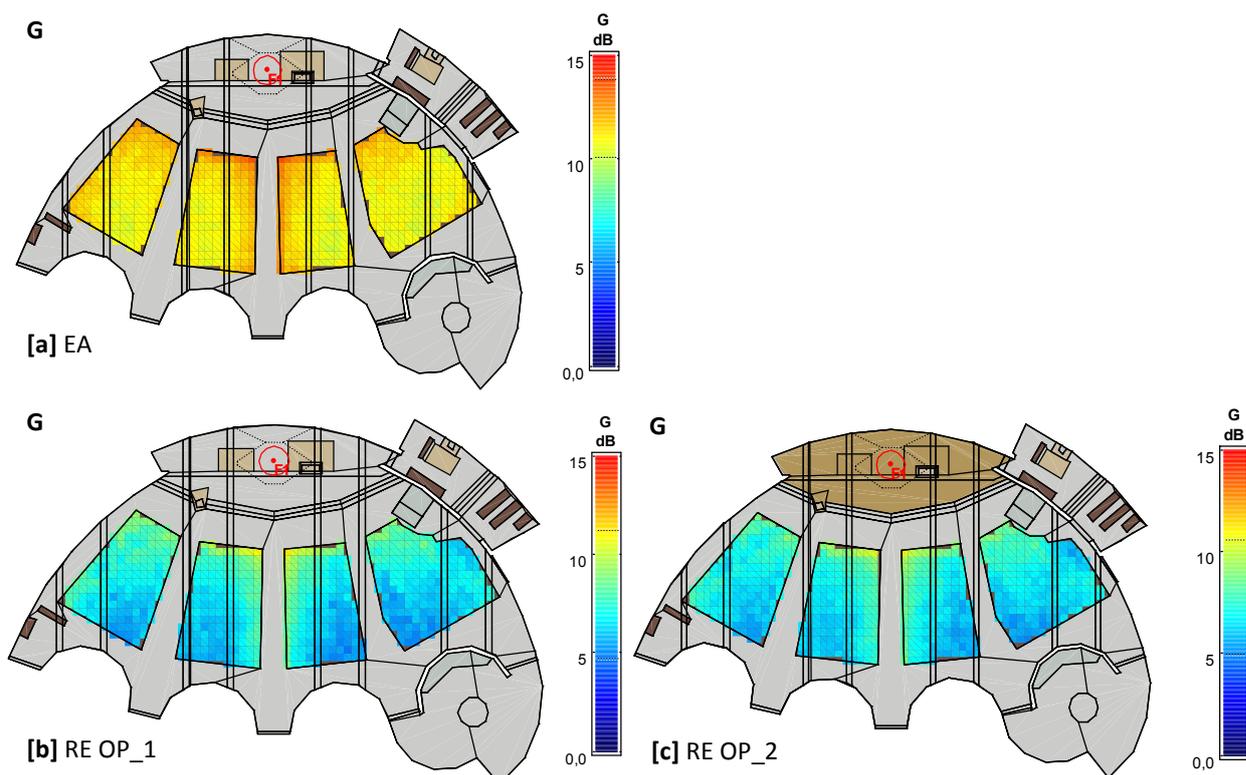


Figura 6.4.43. Fuerza sonora G global en dB. Simulaciones estado actual (EA) y propuestas de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2). Iglesia ocupada, fuente 1.

El mapa de distribución espacial de la fuerza sonora (G), correspondiente a la simulación del estado actual (figura 6.4.43 [a]), muestra que el nivel sonoro es homogéneo sobre la superficie de audiencia, presentando un valor medio de 11,23 dB y una desviación estándar de 0,6 dB. Los valores más elevados se registran en las zonas delanteras centradas de la audiencia y junto al pasillo central.

En las figuras 6.4.43 [b] y [c], vemos que al incorporar los materiales absorbentes en el recinto eclesial, al no tener tanta influencia el campo reverberado como en el caso anterior, los valores de la fuerza acústica disminuyen 4,3 dB, con las dos intervenciones. El valor medio de la fuerza sonora es muy similar para las dos propuestas de rehabilitación acústica: 6,91 dB para la primera, y 6,92 dB para la segunda, con desviaciones estándar en torno a 1 dB, en ambos casos.

En ninguno de los estados analizados se observan zonas de concentración sonora o con deficiencia de nivel, lo que corrobora la idoneidad de las formas propuestas por Fisac así como el funcionamiento de sus *muros dispersivos*.

Impresión espacial

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
J_{LF}	MEDIDO Vacío	0,12 0,09	0,20 0,07	0,18 0,06	0,25 0,07	0,19 0,06	0,17 0,05
	SIMULADO EA Vacío	0,34 0,14	0,24 0,06	0,32 0,07	0,27 0,06	0,26 0,05	0,27 0,05
	SIMULADO EA Ocupado	0,36 0,14	0,24 0,11	0,26 0,07	0,25 0,08	0,24 0,06	0,24 0,06
	SIMULADO RE Vacío P1	0,29 0,12	0,18 0,05	0,20 0,04	0,21 0,05	0,20 0,04	0,19 0,04
	SIMULADO RE Ocupado P1	0,33 0,18	0,18 0,06	0,22 0,09	0,17 0,04	0,18 0,04	0,18 0,04
	SIMULADO RE Vacío P2	0,32 0,15	0,19 0,05	0,21 0,06	0,23 0,09	0,20 0,05	0,20 0,05
	SIMULADO RE Ocupado P2	0,29 0,14	0,19 0,07	0,22 0,09	0,19 0,08	0,18 0,05	0,17 0,05
	$IACC_E$	MEDIDO Vacío	0,93 0,05	0,80 0,08	0,56 0,12	0,39 0,11	0,32 0,10
SIMULADO EA Vacío		0,95 0,01	0,81 0,04	0,48 0,12	0,48 0,08	0,41 0,13	0,53 0,11
SIMULADO EA Ocupado		0,95 0,01	0,84 0,08	0,53 0,10	0,47 0,10	0,41 0,14	0,45 0,11
SIMULADO RE Vacío P1		0,97 0,01	0,89 0,03	0,63 0,07	0,55 0,08	0,48 0,13	0,53 0,11
SIMULADO RE Ocupado P1		0,96 0,01	0,88 0,04	0,56 0,15	0,58 0,07	0,49 0,14	0,46 0,14
SIMULADO RE Vacío P2		0,97 0,01	0,87 0,04	0,61 0,09	0,57 0,09	0,50 0,14	0,51 0,15
SIMULADO RE Ocupado P2		0,97 0,01	0,88 0,05	0,56 0,16	0,60 0,10	0,52 0,15	0,47 0,17

Tabla 6.4.26. Valores de la fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

Los resultados de los parámetros relacionados con la impresión espacial (J_{LF} , $IACC_E$) indican que tras ambas intervenciones acústicas, el oyente sigue manteniendo adecuadas condiciones de impresión espacial, con una adecuada amplitud de la fuente sonora.

Los resultados obtenidos para J_{LF} , con ambas propuestas de rehabilitación, arrojan resultados parecidos. En ambos casos, para las hipótesis de iglesia vacía y ocupada, se reducen ligeramente los valores obtenidos con las simulaciones informáticas del estado actual, ya que la introducción de materiales absorbentes en la sala disminuye el número y nivel de las reflexiones en el recinto (figuras 6.4.44 [a] y [b]). Salvo a la frecuencia de 125 Hz, los resultados para las dos propuestas se aproximan a los obtenidos en las medidas experimentales realizadas en la iglesia.

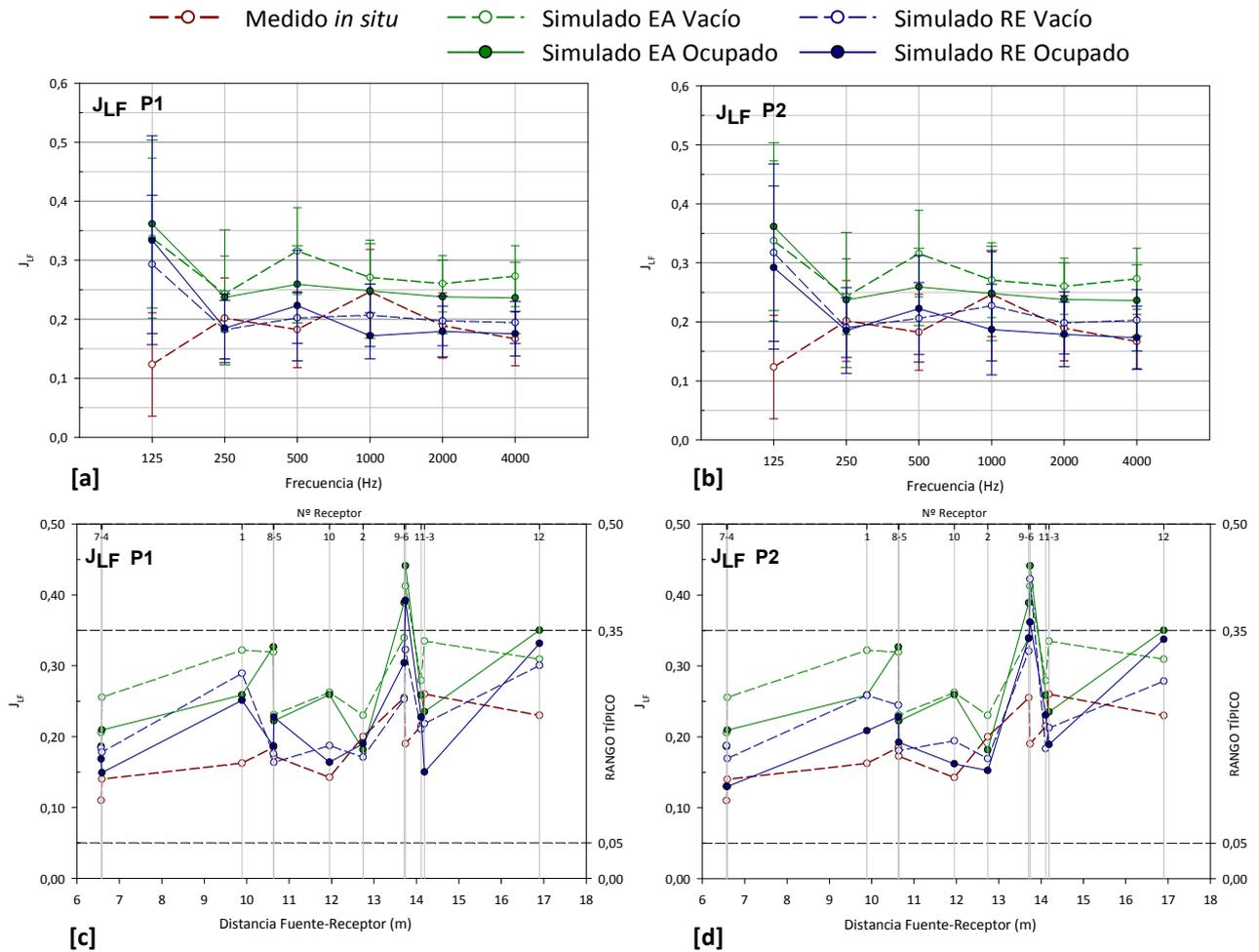


Figura 6.4.44. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

En el promediado espectral de la fracción de energía lateral precoz, representado en la figura 6.4.44 [c] para la propuesta 1, y en la figura 6.4.44 [d] para la 2, de nuevo vemos que existe mucha dispersión en los resultados.

La distribución espacial de la fracción de energía lateral precoz global (J_{LF}) sobre la superficie de la audiencia, muestra resultados muy similares tanto en el estado actual (figura 6.4.45 [a]) como con las dos propuestas de rehabilitación (figuras 6.4.45 [b] y [c]). La forma geométrica de la sala y la acusada disposición asamblearia, sin paredes laterales que generen reflexiones cortas, hace que los valores más bajos se registren en las zonas delanteras centrales de la audiencia y los valores más altos en las zonas traseras de la audiencia próxima a los *muros dispersivos*.

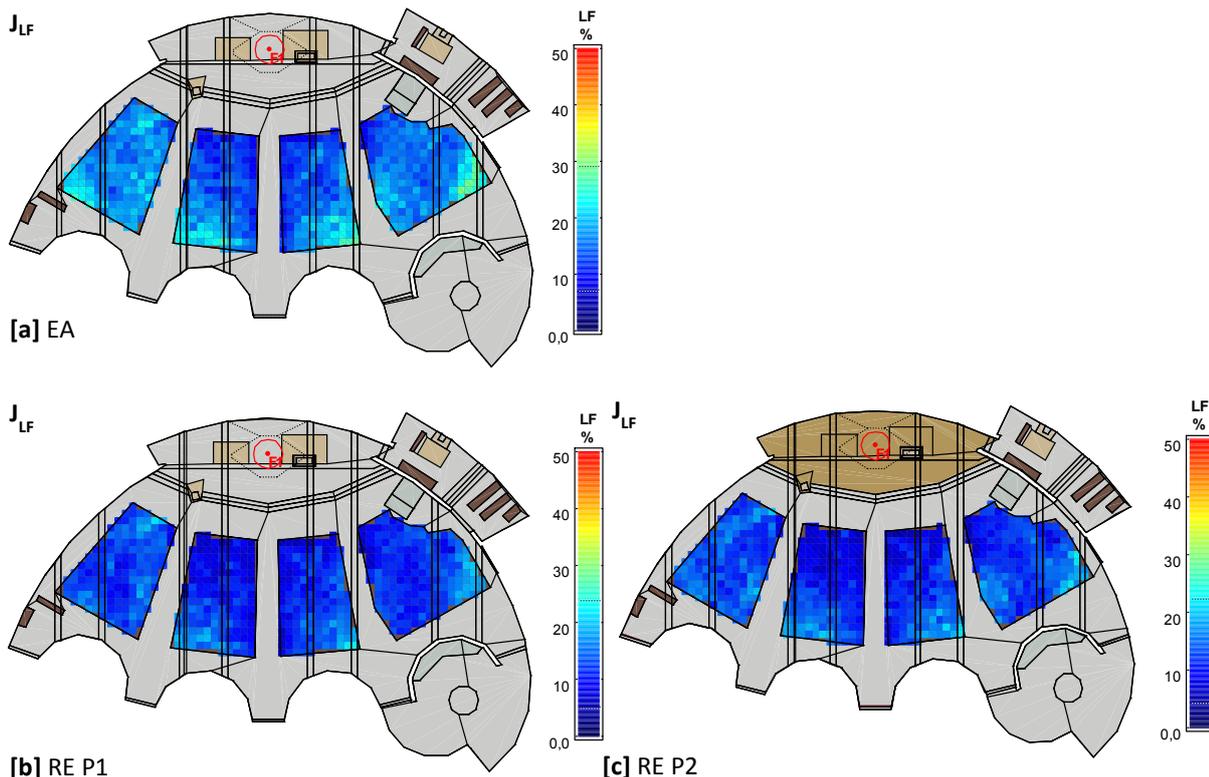


Figura 6.4.45. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} global (%). Simulaciones estado actual (EA) y propuestas de rehabilitación acústica (RE P1) y 2 (RE P2). Iglesia ocupada, fuente 1.

Con las dos propuestas de rehabilitación, los valores máximos de este parámetro disminuyen, pero se obtiene una distribución más uniforme en la superficie de la audiencia. Los resultados obtenidos para ambas opciones son similares, con valores medios de 12,1% y 12,4% para la propuesta 1 y 2, respectivamente.

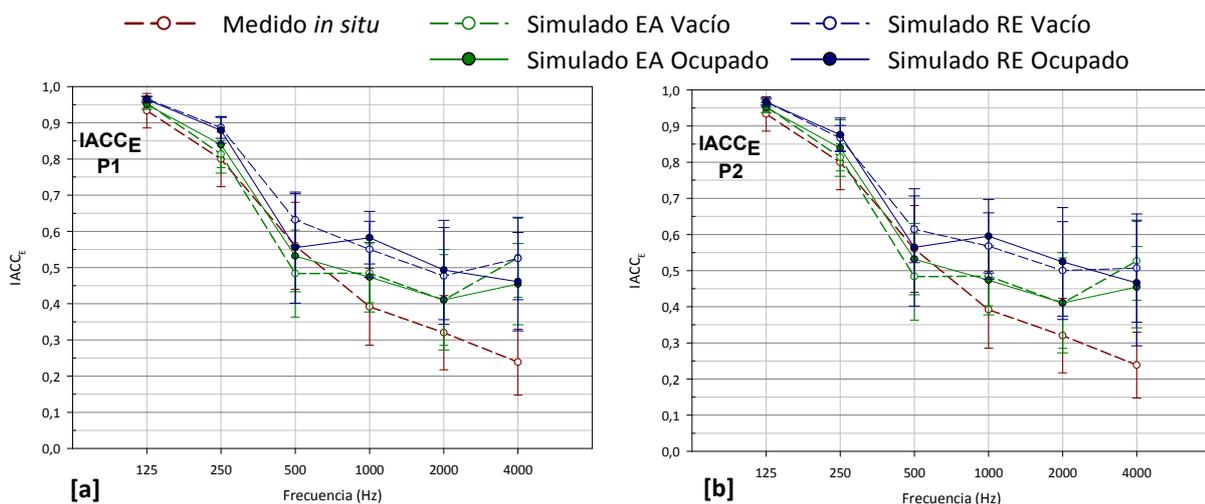


Figura 6.4.46. Coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuestas de rehabilitación acústica 1 y 2. Fuente 1.

En cuanto al coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACC_E$), representado en las figuras 6.4.46 [a] y [b], los resultados obtenidos en ambas propuestas son parecidos y algo mayores que en el estado actual. Los nuevos valores de $IACC_{E3}$ oscilan entre 0,54 y 0,56, para las dos propuestas y ambos estados de ocupación, correspondiendo a una aceptable amplitud aparente de la fuente sonora, en concordancia con los resultados obtenidos para el J_{LF} .

6.4.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)

Con el fin de evaluar los resultados de la inteligibilidad de la iglesia, en la tabla 6.4.27 y en las figuras 6.4.47 [a] y [b], se presentan los valores obtenidos del *Speech Transmission Index* (STI). Junto a las hipótesis estudiadas anteriormente para el resto de parámetros acústicos, se aportan, además, los resultados correspondientes a las simulaciones de las propuestas de rehabilitación acústica 1 (P1) y 2 (P2) con apoyo electroacústico (AE), vacío y ocupado, ofreciéndose los datos registrados en los doce puntos de recepción, frente a la distancia fuente-receptor. En la representación gráfica, los valores se contrastan con la escala de inteligibilidad subjetiva.

CONFIGURACIÓN		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
STI	MEDIDO Vacío	0,33	0,26	0,26	0,38	0,29	0,28	0,24	0,23	0,24	0,20	0,19	0,20
	SIMULADO EA Vacío	0,38	0,31	0,38	0,36	0,30	0,30	0,31	0,27	0,30	0,27	0,27	0,31
	SIMULADO EA Ocupado	0,54	0,47	0,48	0,52	0,46	0,46	0,47	0,43	0,45	0,43	0,42	0,45
	SIMULADO RE Vacío P1	0,68	0,64	0,62	0,65	0,61	0,60	0,61	0,57	0,59	0,57	0,56	0,59
	SIMULADO RE Ocupado P1	0,74	0,67	0,66	0,70	0,66	0,67	0,66	0,63	0,64	0,62	0,61	0,63
	SIMULADO RE+AE Vacío P1	0,69	0,65	0,71	0,61	0,70	0,74	0,65	0,71	0,73	0,67	0,73	0,61
	SIMULADO RE+AE Ocupado P1	0,73	0,69	0,74	0,64	0,74	0,77	0,70	0,75	0,77	0,70	0,76	0,63
	SIMULADO RE Vacío P2	0,66	0,61	0,58	0,63	0,57	0,57	0,59	0,52	0,58	0,53	0,53	0,56
	SIMULADO RE Ocupado P2	0,72	0,64	0,62	0,68	0,62	0,62	0,65	0,58	0,60	0,59	0,58	0,61
	SIMULADO RE+AE Vacío P2	0,68	0,64	0,70	0,59	0,70	0,73	0,64	0,69	0,72	0,68	0,71	0,61
	SIMULADO RE+AE Ocupado P2	0,74	0,70	0,74	0,64	0,75	0,78	0,70	0,74	0,77	0,72	0,75	0,64

Tabla 6.4.27. Valores del índice de transmisión de la palabra STI en cada punto de recepción. Fuente 2.

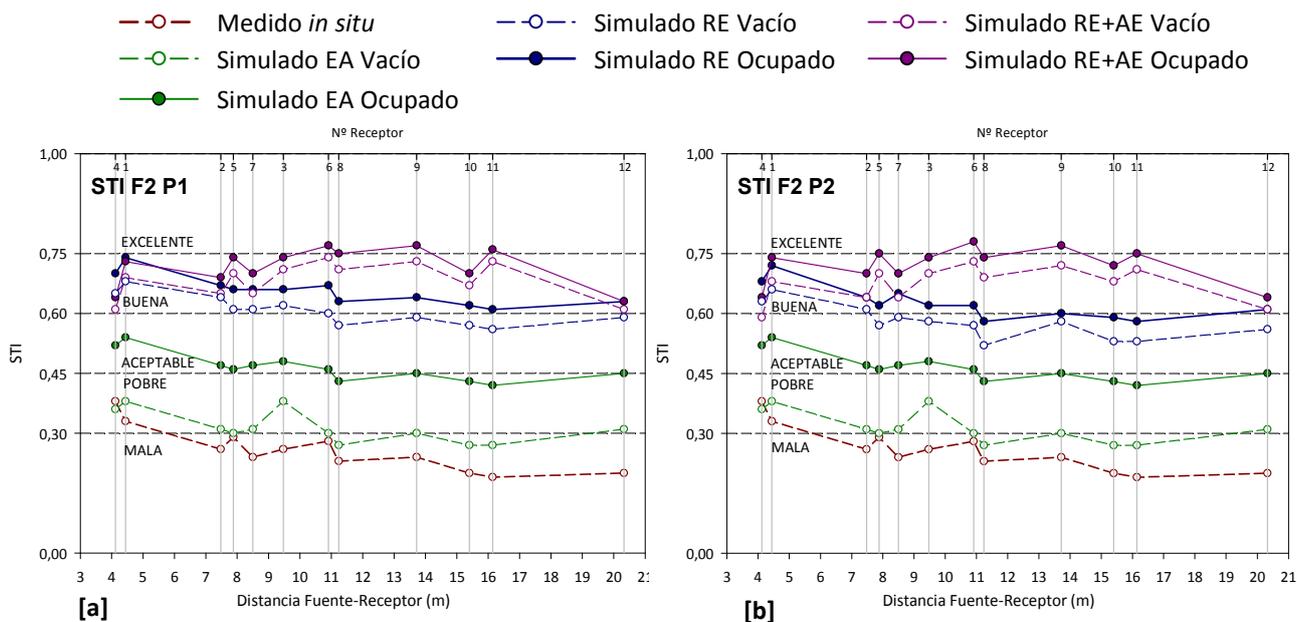


Figura 6.4.47. Índice de transmisión de la palabra STI frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual, propuestas de rehabilitación acústica y apoyo electroacústico 1 y 2. Fuente 2.

Como puede observarse, en el estado actual, los valores del índice STI de la iglesia, tanto los medidos *in situ* como los simulados con la sala vacía, califican la inteligibilidad entre pobre y mala, en toda la zona de audiencia. Para una ocupación del 100%, los valores mejoran pasando a estar en el límite entre pobre y aceptable.

Con las dos propuestas de rehabilitación, y la incorporación de los nuevos revestimientos, se mejoran sensiblemente los resultados de la inteligibilidad. Para la primera opción, en el caso de la sala vacía, la inteligibilidad se califica entre aceptable y buena, mientras que con la sala ocupada se considera como buena en todos los puntos de recepción. El aumento medio del STI para la propuesta 1, para la sala vacía y ocupada, es del 96% y 40%, respectivamente.

Con la segunda propuesta de rehabilitación, los resultados obtenidos son similares a los de la propuesta 1, con la salvedad que, para la iglesia ocupada, en los receptores más alejados de la fuente sonora, la inteligibilidad es algo peor ya que se califica como aceptable. El aumento medio de este parámetro es del 87% y 34%, respectivamente, para la sala vacía y ocupada.

No obstante, y dado que uno de los objetivos más importantes de una iglesia, desde el punto de vista sonoro, es tener una buena inteligibilidad de la palabra, se ha estudiado el efecto que tendría la incorporación de un adecuado sistema de megafonía a cada una de las propuestas presentadas. Además, en casi todos estos recintos es frecuente la utilización de sistemas de apoyo electroacústico.

Tras sucesivas pruebas de tipo de altavoces, posición, altura y orientación de los mismos, el sistema propuesto consta de dos altavoces de columna dispuestos en los laterales de la nave a una altura de 1,9 m desde el suelo al centro del altavoz (figura 6.4.48). Los altavoces empleados en las simulaciones son de la marca Duran Audio BV, modelo DC180 Axys Intellivox¹⁸.

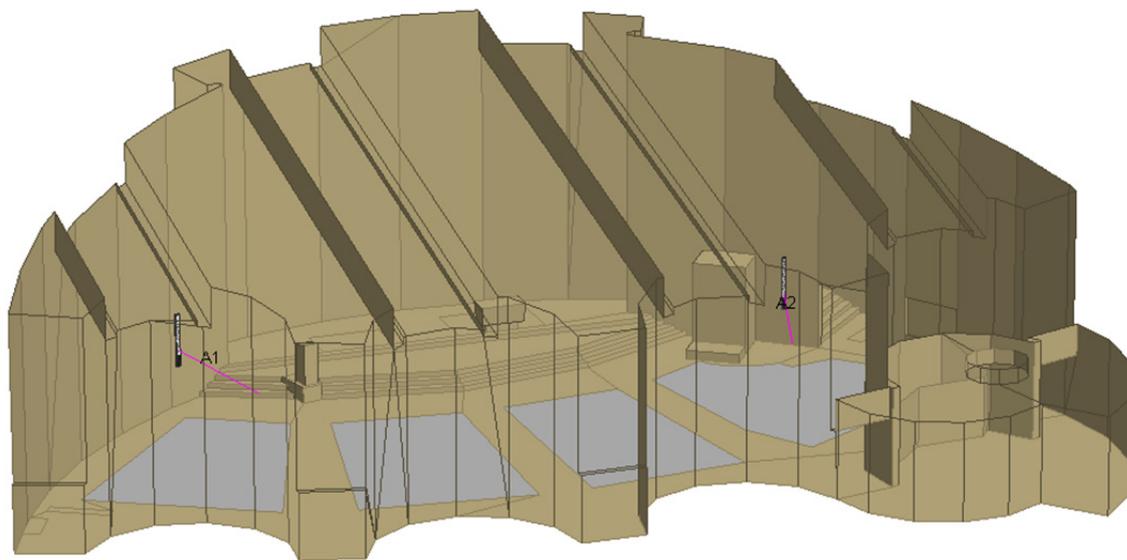


Figura 6.4.48. Modelo tridimensional: posición de altavoces.

Como puede observarse en la figura 6.4.47, el uso del apoyo electroacústico mejora aún más los resultados del STI para ambas propuestas de rehabilitación, siendo, en general, dichas mejoras más notable en las zonas más alejadas del área de la audiencia. En ambas opciones, para la iglesia vacía, la inteligibilidad se califica como buena. Con la iglesia ocupada, los resultados registrados en algunos receptores incluso permiten alcanzar una inteligibilidad excelente. Para la propuesta 1 con apoyo electroacústico, la mejora del índice STI es del 11%, con la iglesia vacía, y del 9% con la iglesia

¹⁸ Los datos técnicos de estos equipos fueron descritos al realizar el análisis de inteligibilidad con apoyo electroacústico de la iglesia de Santa Ana de Moratalaz.

ocupada, con respecto a la propuesta sin apoyo. En el caso de la propuesta 2, el incremento es más significativo, siendo del 16%, para la iglesia vacía, y del 14%, para la iglesia ocupada.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.4.49 se aportan los mapas de resultados del índice de transmisión de la palabra (STI), correspondientes a la simulación del estado actual (EA), tras las propuestas de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2) y tras dichas propuestas con la implementación del sistema de apoyo electroacústico 1 (RE+AE P1) y 2 (RE+AE P2), todos ellos en la hipótesis de iglesia ocupada y con la fuente F2 (o con los altavoces A1 y A2).

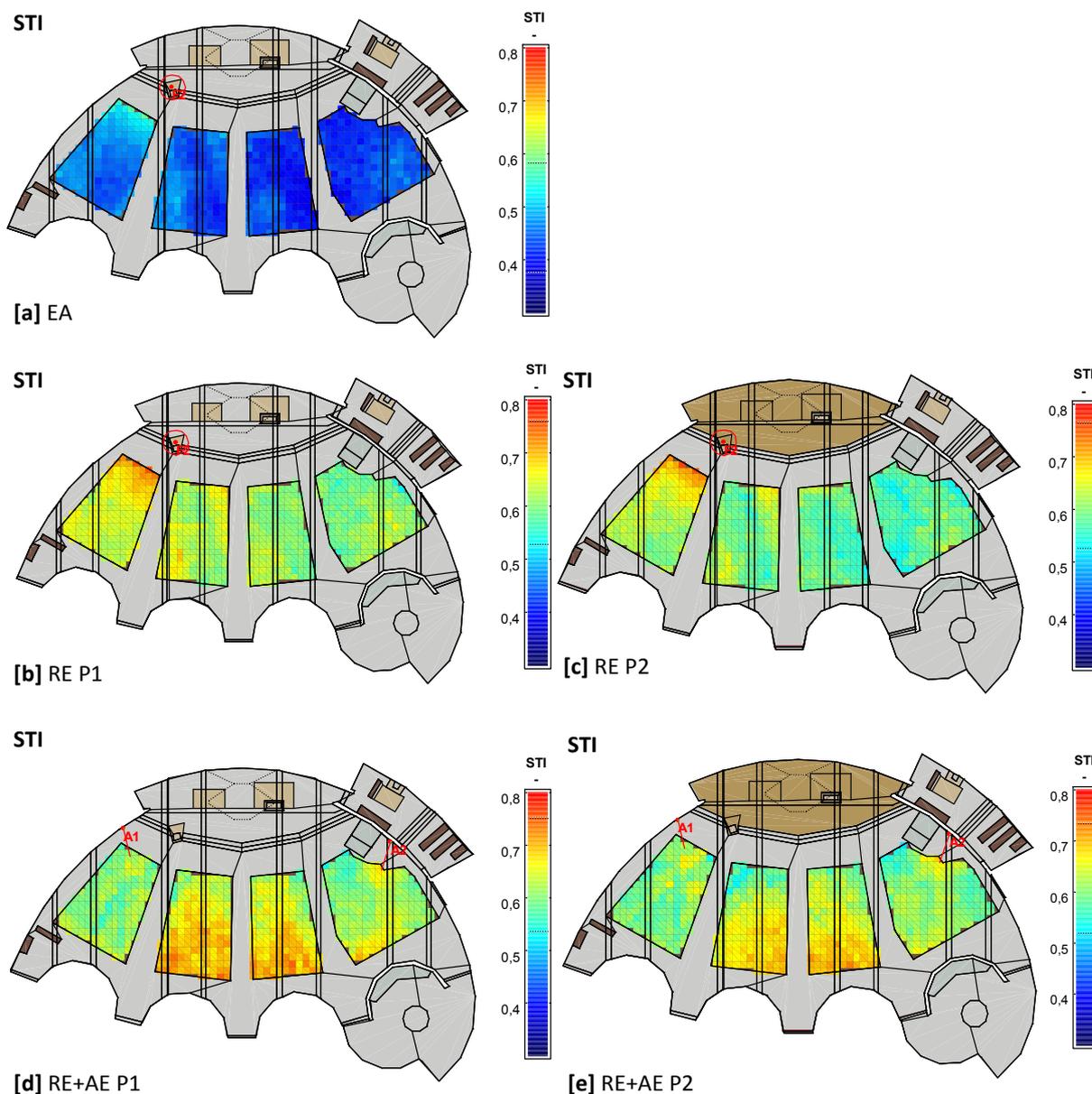


Figura 6.4.49. Índice de transmisión de la palabra STI. Simulaciones estado actual (EA), propuestas de rehabilitación acústica 1 (RE P1) y 2 (RE P2) y propuestas de rehabilitación acústica con apoyo electroacústico 1 (RE+AE P1) y 2 (RE+AE P2). Iglesia ocupada, fuente 2 o altavoces 1 y 2.

En el mapa del STI del estado actual para la sala ocupada (figura 6.4.49 [a]) puede comprobarse los bajos valores del STI en todas la zona de audiencia, especialmente en las zonas más alejadas de la fuente sonora situada en el ambón. Como se indicó anteriormente los valores corresponden a una inteligibilidad entre aceptable y pobre.

En los mapas de las figuras 6.4.49 [b] y [c], puede observarse la mejoría que suponen ambas propuestas de rehabilitación. La distribución espacial de resultados es similar a la del estado actual, dada la posición desplazada de la fuente, pero los valores del STI mejoran sensiblemente. Los valores medios de STI son de 0,62 y 0,60 para las propuestas 1 y 2, respectivamente.

Si a las propuestas de rehabilitación añadimos el sistema de megafonía propuesto (figura 6.4.49 [d] y [e]), el STI alcanza valores aún más favorables, siendo notable la mejora en las zonas centrales de la audiencia, especialmente junto a las paredes de fondo. Los valores medios obtenidos para las propuestas 1 y 2 con apoyo electroacústico son de 0,64 y 0,63, respectivamente. En esta iglesia, con disposición asamblearia, comprobamos nuevamente, que cuando los muros dispersivos cuentan con la suficiente absorción, contribuyen a mejorar la inteligibilidad de la palabra. Por otro lado, en los mapas de distribución se observa que en las filas delanteras de la audiencia se registran los valores más bajos del STI, pero hay que tener en cuenta que estas zonas, al estar más cercanas a la fuente sonora, contarán con el sonido directo que proviene directamente del orador, además del propio del sistema electroacústico.

6.4.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO

Los valores de absorción sonora global de las distintas zonas de la iglesia de Santa Cruz se facilitan en la tabla 6.4.28 y se representan gráficamente en las figuras 6.4.50 y 6.4.51.

PROPUESTA	REVESTIMIENTO	ABSORCIÓN SONORA (m ²)			
		EA VACÍO	EA OCUP	RE VACÍO	RE OCUP
P1	TECHO	23,05	23,05	182,16	182,16
	BANCOS	33,23	174,19	76,78	174,19
	MURO DE FONDO	7,84	7,84	176,34	176,34
	OTROS MATERIALES	25,13	25,13	25,11	25,11
	ABSORCIÓN TOTAL (A_t)	89,25	230,21	460,39	557,80
P2	TECHO	23,05	23,05	182,16	182,16
	BANCOS	33,23	174,19	76,78	174,19
	MURO DE FONDO	7,84	7,84	99,21	99,21
	SUELO PRESBITERIO	2,59	2,59	27,89	27,89
	OTROS MATERIALES	22,55	22,55	22,55	22,55
	ABSORCIÓN TOTAL (A_t)	89,25	230,21	408,58	505,99

Tabla 6.4.28. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²).

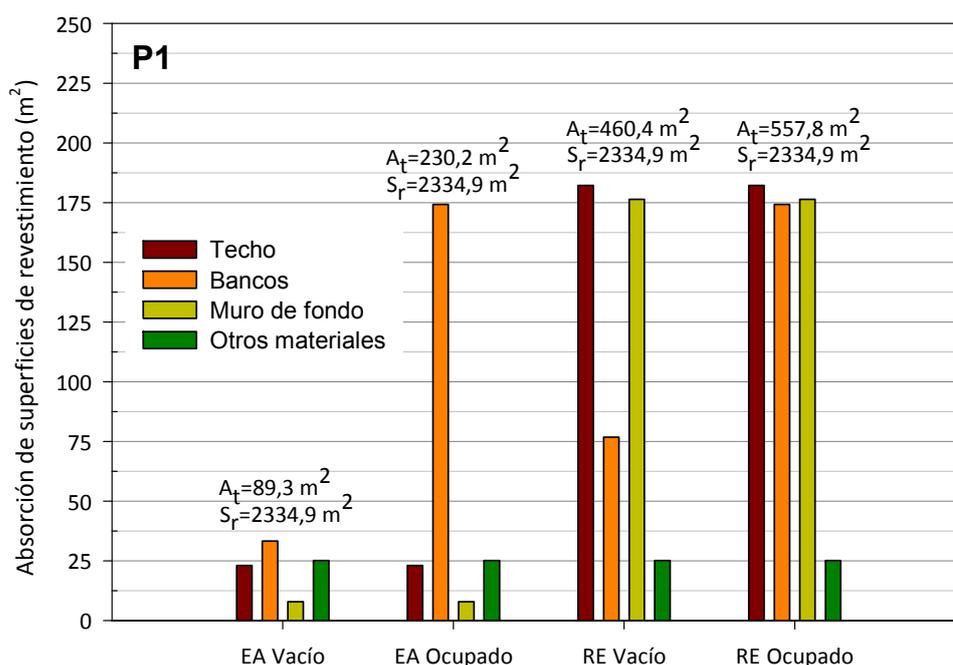


Figura 6.4.50. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promediados en frecuencia del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica 1 (RE).

En este recinto, los valores de absorción del estado actual son los más bajos de todas las iglesias que componen la muestra (figuras 6.4.50 y 6.4.51). De nuevo, la absorción de los bancos ocupados en muy superior a la de los bancos vacíos, concretamente más de cinco veces.

La propuesta de rehabilitación acústica 1 proporciona absorción sonora al techo, a los bancos y a las superficies convexas del muro de fondo. En el caso de iglesia ocupada, los resultados de la absorción del techo, de los bancos y del muro de fondo es muy similar, representando, cada una de ellas, aproximadamente, el 32% de la absorción total de la sala, mientras que el 4,5% restante corresponde al resto de materiales de revestimiento.

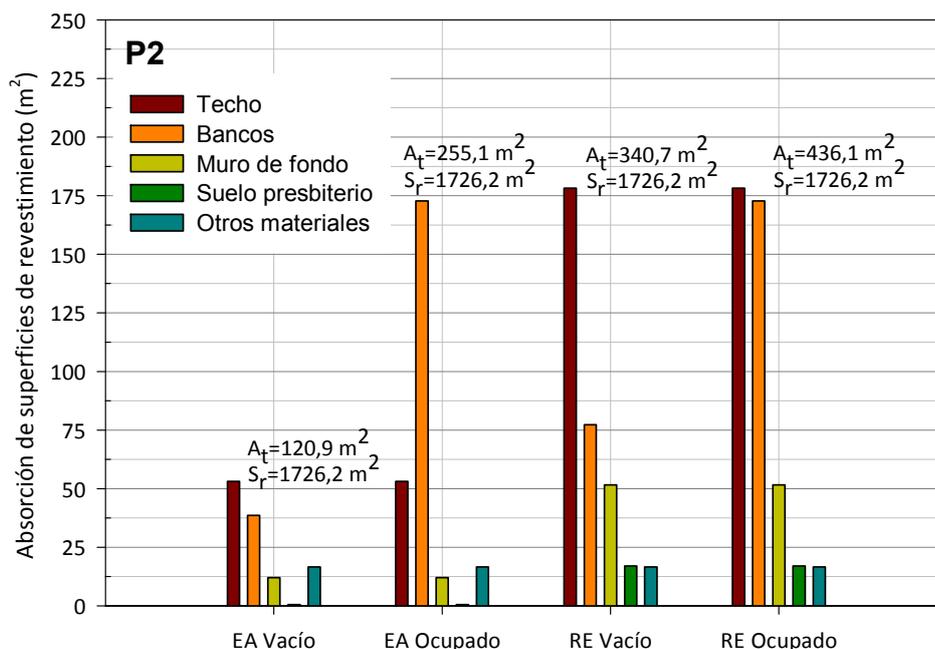


Figura 6.4.51. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m^2). Valores promediados en frecuencia del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica 2 (RE).

La figura 6.4.51 refleja que la propuesta de intervención acústica 2, con respecto a la primera, mantiene la absorción sonora del techo de hormigón visto y de los bancos de madera, reduce la del muro de fondo y la incorpora en el suelo del presbiterio. Por tanto, la diferencia entre ambas propuestas estriba en la absorción sonora de estas dos últimas zonas. La propuesta 2 sólo aporta absorción sonora sobre la parte baja de las superficies convexas y sobre las piezas de hormigón del muro de fondo, es decir, reviste con materiales absorbentes menos de la mitad de la superficie del muro de fondo respecto a la propuesta 1, pero consigue que la absorción sonora en dicho muro ($99,21 m^2$) sea superior a la mitad de la absorción de la propuesta 1 ($176,34 m^2$). Como ocurría con Cuestablanca, el techo vuelve a ser la zona con mayor absorción respecto del resto.

La absorción sonora total de la propuesta de rehabilitación acústica 1 es un 13% superior a la de la propuesta 2, para la iglesia vacía, y del 10% para la iglesia ocupada.

6.4.3.7. CONCLUSIONES

De todas las iglesias que componen la muestra de este trabajo, Santa Cruz de Olerios es el recinto donde se hace más patente la falta de absorción sonora adecuadamente distribuida por el espacio eclesial.

En cuanto a la distribución sonora, en esta iglesia parroquial, Fisac vuelve a utilizar las formas geométricas y arquitectónicas para solucionar lo que él consideraba el problema acústico en el recinto.

El análisis y valoración de los resultados de los parámetros medidos *in situ*, reflejan que obtuvo una sala difusa, con distribución sonora muy homogénea y buena impresión espacial. Sin embargo, la falta de absorción sonora de los materiales de revestimientos empleados en el interior y la alta relación geométrica volumen/plaza, dio lugar a los tiempos de reverberación más altos de todas las iglesias de la muestra y, como consecuencia, a una mayor deficiente inteligibilidad de la palabra y claridad musical.

Las dos propuestas de rehabilitación acústica consiguen corregir estas importantes deficiencias, cumpliendo los objetivos propuestos: procurar que se trate de actuaciones reversibles y que no se alteren las cualidades espaciales, formales y materiales con las que el arquitecto concibió el proyecto.

En el análisis y valoración de las condiciones acústicas resultantes al implementar cada propuesta, puede comprobarse que el comportamiento acústico del recinto es parecido con ambas opciones, por lo que para optar por una u otra habría que valorar otros factores como la facilidad de ejecución, coste económico, etc.

Las pruebas y análisis realizados en ambas propuestas sobre los *muros dispersivos* revelan que los fundamentos acústicos de Fisac sobre dichos elementos, en cuanto a distribución sonora, eran correctos, sin embargo la falta de absorción sonora del material empleado daba lugar a las carencias acústicas puestas de manifiesto en el análisis de las condiciones acústicas del estado actual.

Con ambas propuestas se logra mejorar sensiblemente el comportamiento sonoro del recinto en cuanto al resto de variables y parámetros analizados: EDT, Ts, C₅₀, D₅₀, C₈₀, etc. Mención especial merece la inteligibilidad de la palabra por su importancia en el uso cotidiano del edificio. En este sentido, con la introducción y disposición de los nuevos materiales de revestimiento se han mejorado los índices STI en todos los puntos de la zona de audiencia. El empleo adicional del sistema de megafonía propuesto logra mejorar todavía algo más la inteligibilidad, llegándose a calificar en algunos puntos como excelente.



6.5. IGLESIA PARROQUIAL DE NUESTRA SEÑORA FLOR DEL CARMELO, MADRID

Avda. de el Ferrol, 49. 28029 Madrid

Fecha de construcción: 1983-1991

Edificio sin protección arquitectónica

6.5.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN

En el madrileño barrio del Pilar y a petición de la comunidad religiosa carmelita, a comienzos de los años ochenta Fisac realizó esta iglesia, siguiendo las ideas que los propios Padres Carmelitas le proporcionaron sobre el espacio eclesial a conseguir. Un espacio muy iluminado y alegre para la reunión de los fieles, presidido por una imagen de Cristo Resucitado, donde el ábside apenas se distinga de resto del recinto, que fuese capaz de albergar a muchos o pocos fieles sin que, en este caso, parezca desangelado, fueron algunas de las indicaciones que recibió el arquitecto.

Con lo anterior, Fisac proyectó una iglesia con planta cuadrada, truncada en uno de sus vértices, dispuesta, al igual que el resto de dependencias parroquiales y residenciales, en torno a un patio interior desde el que se accede al templo, creando la transición necesaria entre la calle y el lugar del culto.

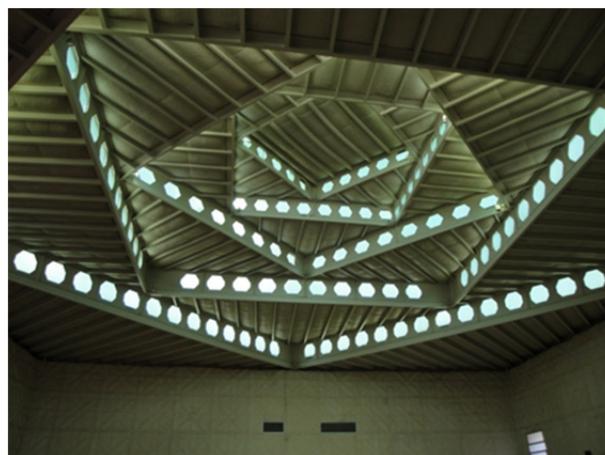
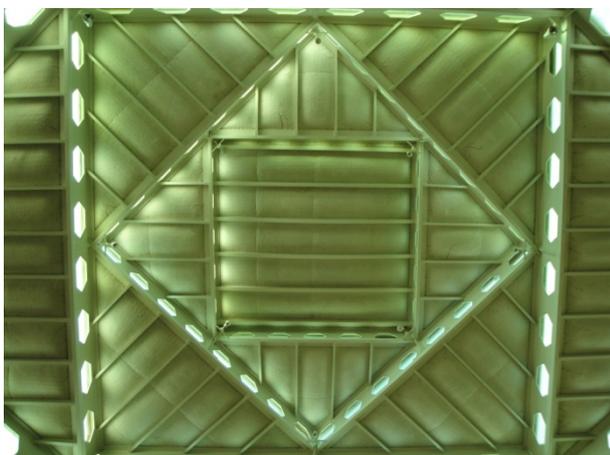


Figura 6.5.1. Vista interior hacia el presbiterio.



Figura 6.5.2. Vista interior desde el presbiterio.

Para las fachadas exteriores del conjunto, e incluso las interiores de la iglesia, Fisac vuelve a emplear elementos prefabricados como paradigma constructivo, disponiendo en los cerramientos piezas de hormigón con tratamiento de encofrado blando, que reproducen dibujos geométricos similares a los alicatados árabes de la Alhambra de Granada o el Alcázar de Sevilla (figuras 6.5.1 y 6.5.2). La estructura de cubierta la resuelve con vigas Boyd, que se superponen en altura y permiten una intensa entrada de luz sobre el presbiterio y buena parte de la zona de fieles, así como perfiles metálicos y entrevigado de hormigón con tratamiento de encofrado blando (figuras 6.5.3 y 6.5.4).



Figuras 6.5.3 y 6.5.4. Cubierta de la iglesia. Vigas Boyd, viguetas metálicas y entrevigado de hormigón.

Este sencillo recinto eclesial es un auténtico espacio de reunión de fieles, donde presbiterio y nave se funden más que nunca. Incluso los focos litúrgicos del presbiterio, es decir, el altar, el ambón y la sede, son elementos livianos y móviles, que facilitar el uso del recinto para otras actividades como

conciertos, reuniones, etc. Adosada a un lateral de la iglesia, se halla la capilla del Sagrario, proyectado como lugar para la oración y el recogimiento (figuras 6.5.7 y 6.5.8).



Figuras 6.5.5 y 6.5.6. Vistas laterales de la iglesia.



Figura 6.5.7. Capilla del Sagrario.



Figura 6.5.8. Vista interior desde la capilla del Sagrario.

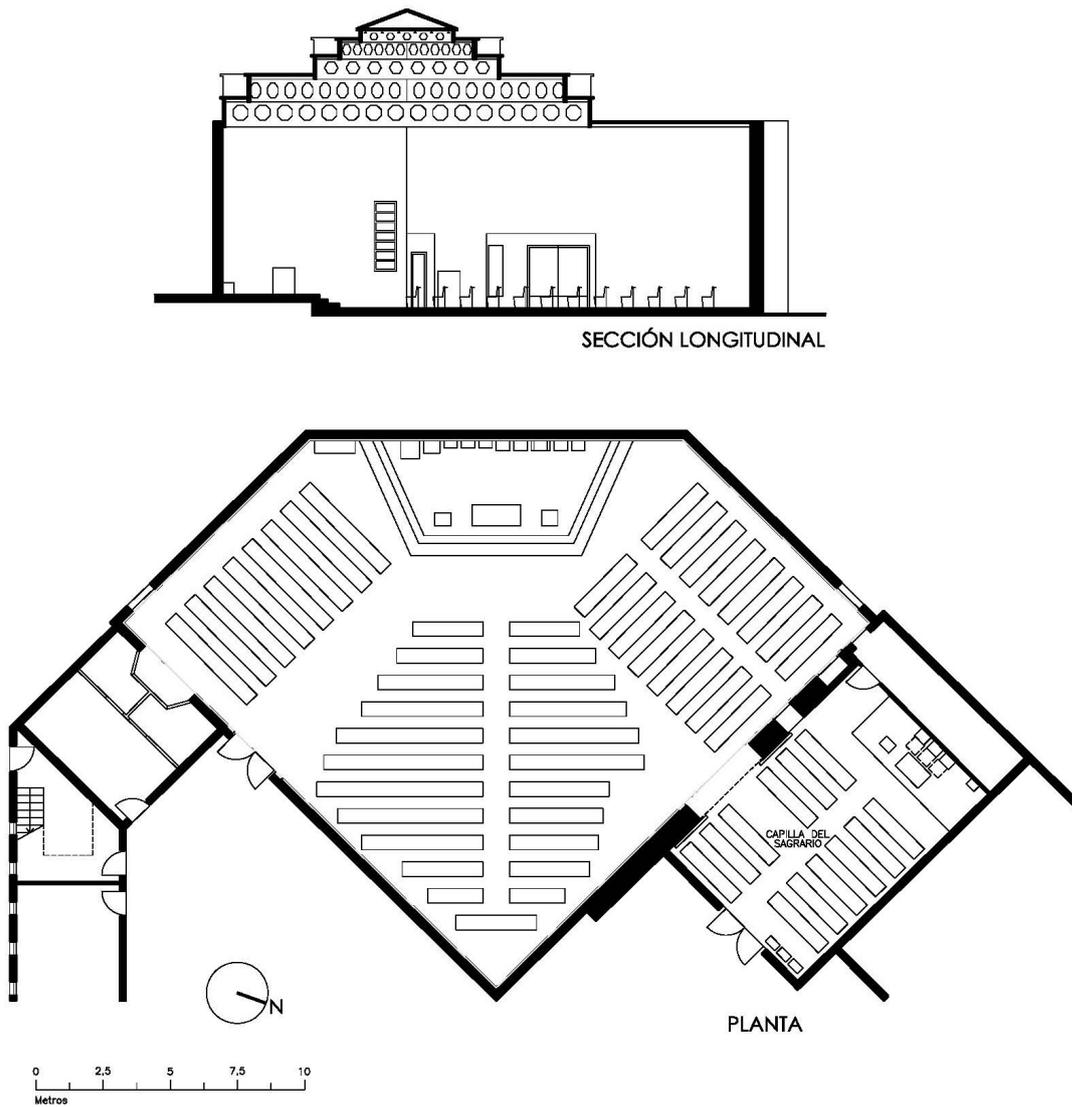


Figura 6.5.9. Plano de planta y sección longitudinal hacia la capilla del Sagrario.

DATOS GEOMÉTRICOS Y DE AFORO	
VOLUMEN	
Volumen interior iglesia (V):	2528 m ³
SUPERFICIES	
Superficie útil iglesia:	335,4 m ²
Superficie construida iglesia:	365,1 m ²
Superficie de revestimientos:	1369,1 m ²
Superficie del presbiterio:	35,9 m ²
Superficie de bancos:	166,3 m ²
Superficie acústica efectiva audiencia (S _A):	228,44 m ²
Superficie de pasillos:	133,2 m ²
DIMENSIONES	
Longitud media:	14,2 m
Anchura media:	18,5 m
Altura media:	9,6 m
AFORO (N)	338 personas
RELACIONES GEOMÉTRICAS	
V / N	7,48 m ³ /plaza
V / S _A	11,07 m ³ /m ²
S _A / N	0,68 m ² /plaza

Tabla 6.5.1. Datos geométricos y de aforo.

MATERIALES DE REVESTIMIENTO Y ACABADOS INTERIORES	
Suelo fieles:	Terrazo
Suelo presbiterio:	Terrazo
Techo:	Viguetas metálicas y entrevigado de hormigón aplantillado
Vigas:	Boyd con vidrio
Paredes:	Hormigón aplantillado
Puertas:	Chapa metálica
Ventanas:	Vidrio simple al ácido
Altar:	Madera
Ambón:	Madera
Bancos:	Madera, sin reclinatorios
Confesionarios:	Madera y vidrio simple

Tabla 6.5.2. Materiales de revestimiento y acabados interiores.

6.5.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL

6.5.2.1. MEDICIÓN *IN SITU*. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

La medida acústica *in situ* de esta iglesia se realizó el 14 de julio de 2010 a las 12:00 h, con una duración aproximada de dos horas y media (figura 6.5.10). A diferencia del resto de iglesias de la muestra, se empleó sólo una posición para la fuente sonora coincidiendo con el punto ocupado por el orador en el altar (F1). Dadas las características geométricas y espaciales de la iglesia, así como, la proximidad entre el altar y el ambón (ambos son elementos móviles realizados en madera, que en el momento de la medición *in situ*, distaban sólo 2 m), se estimó que los resultados a obtener con la fuente situada en el altar, serían representativos de la totalidad del espacio eclesial, y que los resultados que se obtendrían al situar, además, la fuente sonora en el ambón, no aportarían nuevas conclusiones. Además, según nos indicaron los responsables del templo el día de la medición, en la actualidad, aunque sólo en ocasiones excepcionales, se celebra en la iglesia algún tipo de acto musical, en el que los obrantes ocupan precisamente el mismo lugar que el orador en el altar.

Se distribuyeron doce posiciones para el micrófono receptor, cubriendo las diferentes zonas de audiencia, de forma que sus posiciones fueran representativas de la totalidad del espacio (figura 6.5.11). Los valores medios de las variables ambientales registradas durante las medidas fueron 30°C de temperatura y 34% de humedad relativa.



Figura 6.5.10. Fuente situada en el altar y simulador de torso durante la medición acústica *in situ*.

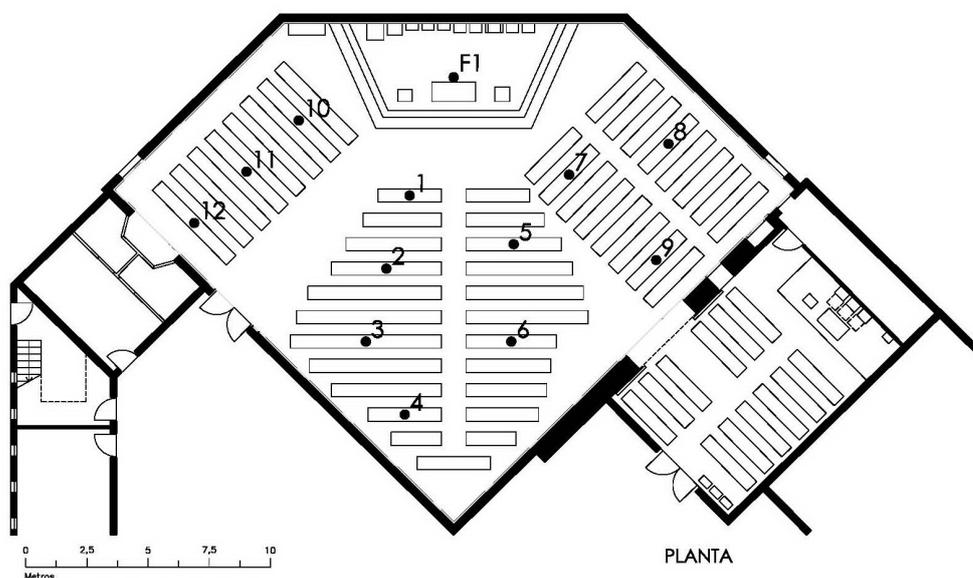


Figura 6.5.11. Posiciones de fuente y receptores.

Reverberación

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_{30} (s)	F1	2,96	3,52	4,13	4,06	3,35	2,69
	σ F1	0,08	0,07	0,04	0,05	0,03	0,02
	Óptimo palabra	1,33	1,17	1,02	0,92	0,92	0,92
	Óptimo música	1,77	1,57	1,36	1,23	1,23	1,23
EDT (s)	F1	2,82	3,33	4,09	4,15	3,32	2,44
	σ F1	0,28	0,24	0,20	0,16	0,09	0,05

Tabla 6.5.3. Valores promediados espacialmente del tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s).
¹Desviación estándar.

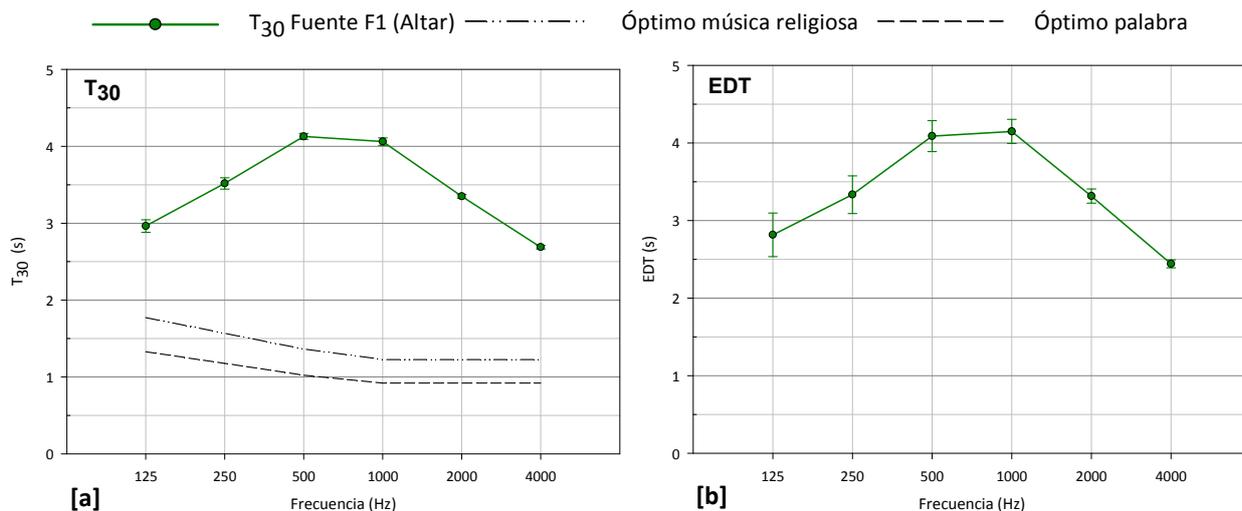


Figura 6.5.12. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1.

Como puede observarse en la figura 6.5.12 [a], en todas las bandas de octava analizadas, los valores medidos del tiempo de reverberación (T_{30}) están muy por encima de los óptimos recomendados para este volumen, registrándose valores superiores a 4 s en las frecuencias medias, lo que supone más del triple del valor aceptado como óptimo para el uso musical. La dispersión espacial (dada por la desviación estándar) es muy pequeña, con valores inferiores a 0,1 s en todas las bandas de octava.

En cuanto a los resultados del EDT (figura 6.5.12 [b]), los valores medidos son muy similares a los valores del T_{30} , aunque la dispersión espacial es mayor en todas las bandas de octava analizadas. En la gráfica vemos que los valores del EDT para las frecuencias medias están por encima de 4 s, con lo que el EDT_{mid} no se ajusta al rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010, y que está entre 1,0 s y 3,0 s.

Los altos valores medidos para ambos parámetros, T_{30} (que evalúa de forma global el comportamiento acústico del recinto) y EDT (relacionado con la impresión subjetiva de reverberación), indican nuevamente una importante falta de absorción sonora en el recinto. Los resultados registrados a bajas frecuencias, inferiores que a las frecuencias medias, denotan el comportamiento del techo de la iglesia como resonador de membrana.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

Como en casos anteriores, los parámetros representados en las gráficas de este apartado son: tiempo central (T_s), claridad para la palabra (C_{50}), definición (D_{50}) y claridad musical (C_{80}).

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_s (ms)	F1	203,83	250,25	301,92	296,92	232,33	172,92
	σ F1	15,12	19,03	18,26	14,11	12,18	9,29

Tabla 6.5.4. Valores promediados espacialmente del tiempo central T_s (ms). ¹Desviación estándar.

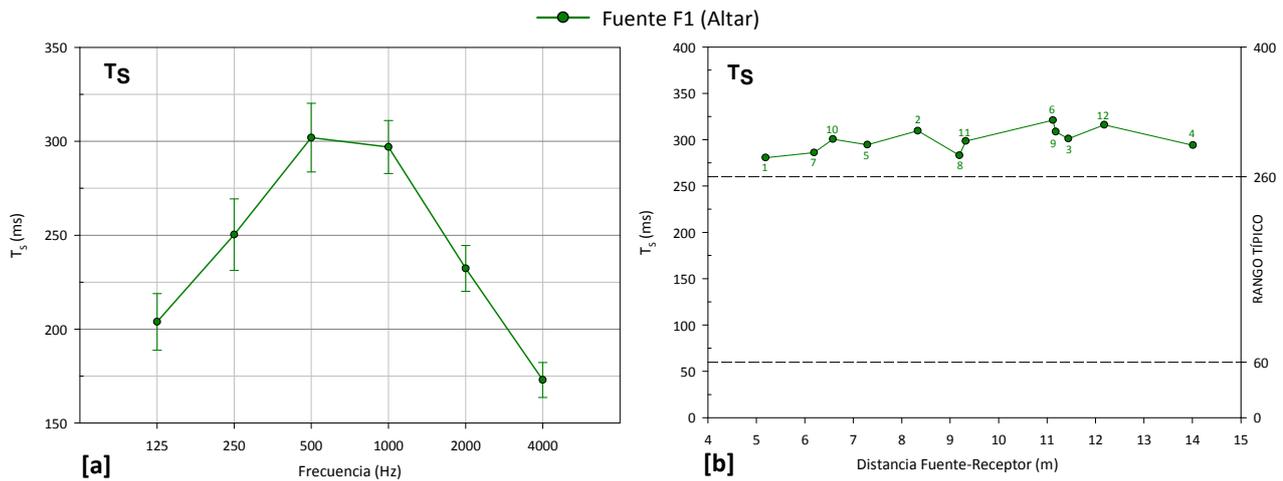
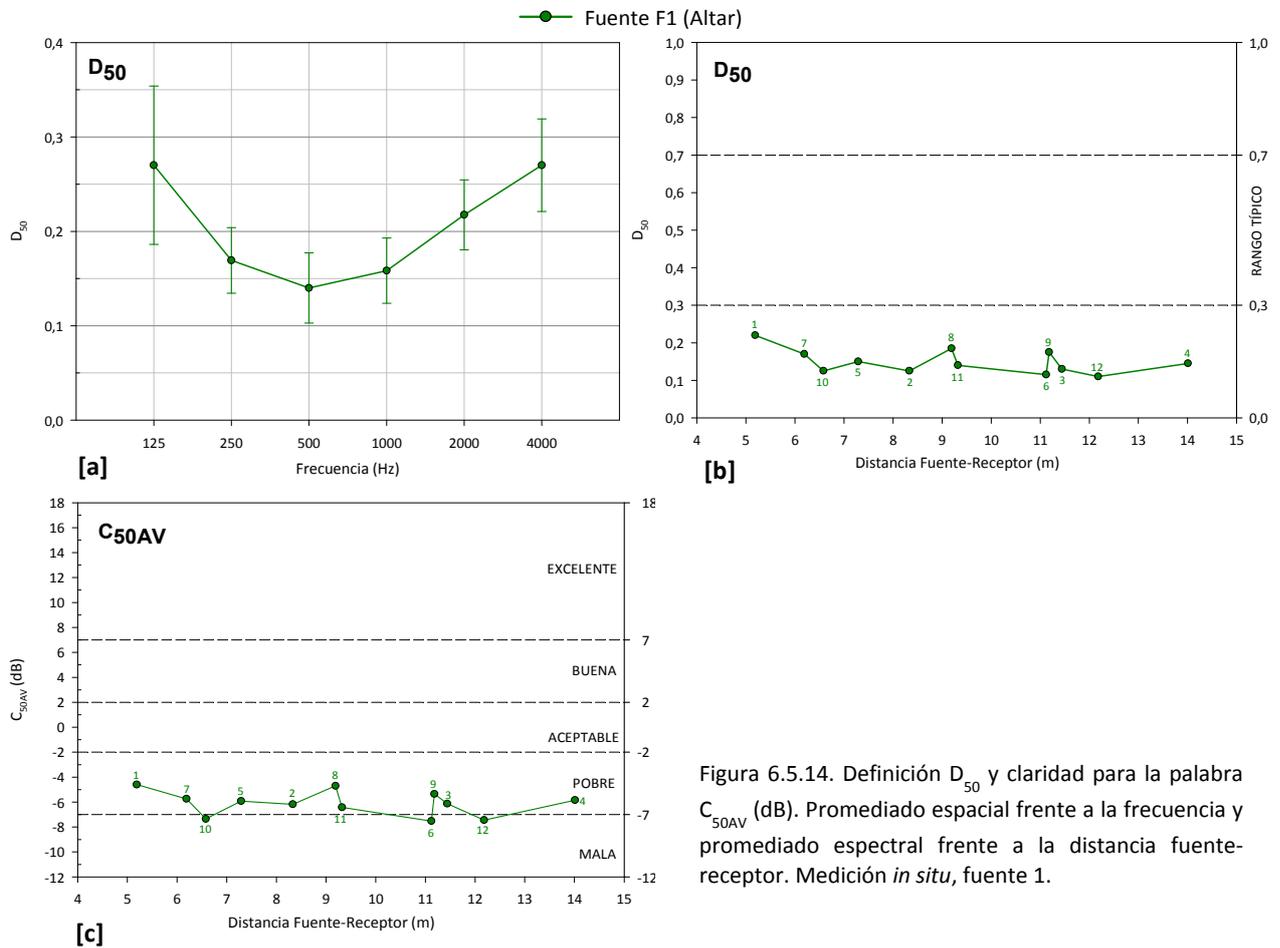


Figura 6.5.13. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1.

Para el tiempo central (T_s) en la figura 6.5.13 [a], se aprecia que los valores registrados en la medición acústica son bastante altos para todas las frecuencias, en especial para 500 Hz y 1000 Hz, lo que supone poca nitidez del sonido a estas frecuencias centrales. En la gráfica que representa el promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor de este parámetro (figura 6.5.13 [b]), puede comprobarse que los resultados obtenidos en todos los puntos de recepción situados en la zona de audiencia, se encuentran por encima del límite superior del rango típico establecido en la norma UNE de referencia.

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D_{50}	F1	0,27	0,17	0,14	0,16	0,22	0,27
	σ F1	0,08	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05

Tabla 6.5.5. Valores promediados espacialmente de la definición D_{50} . ¹Desviación estándar.Figura 6.5.14. Definición D_{50} y claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1.

Los resultados obtenidos para la definición (D_{50}) son muy bajos (figuras 6.5.14 [a] y [b]), donde apenas se supera el valor de 0.25. Los valores más bajos del promediado espacial corresponden a las medias frecuencias y los resultados del promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor están claramente fuera de rango.

La gráfica que representa el promedio espectral de la claridad (figura 6.5.14 [c]), refleja que los resultados del C_{50AV} , se sitúan entre pobres y malos según la escala de valoración de Marshall¹⁹.

¹⁹ Marshall, L.G. (1994). Opus cit.

PARÁMETRO	FUENTE - σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C_{80} (dB)	F1	-2,92	-4,53	-5,40	-5,25	-3,43	-2,09
	σ F1	1,47	1,19	1,12	1,03	0,86	0,81

Tabla 6.5.6. Valores promediados espacialmente de la claridad musical C_{80} (dB). ¹Desviación estándar.

PARÁMETRO	FUENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
STI	F1	0,41	0,35	0,36	0,13	0,36	0,28	0,29	0,23	0,27	0,32	0,16	0,17

Tabla 6.5.7. Valores del índice de transmisión de la palabra STI en cada punto de recepción.

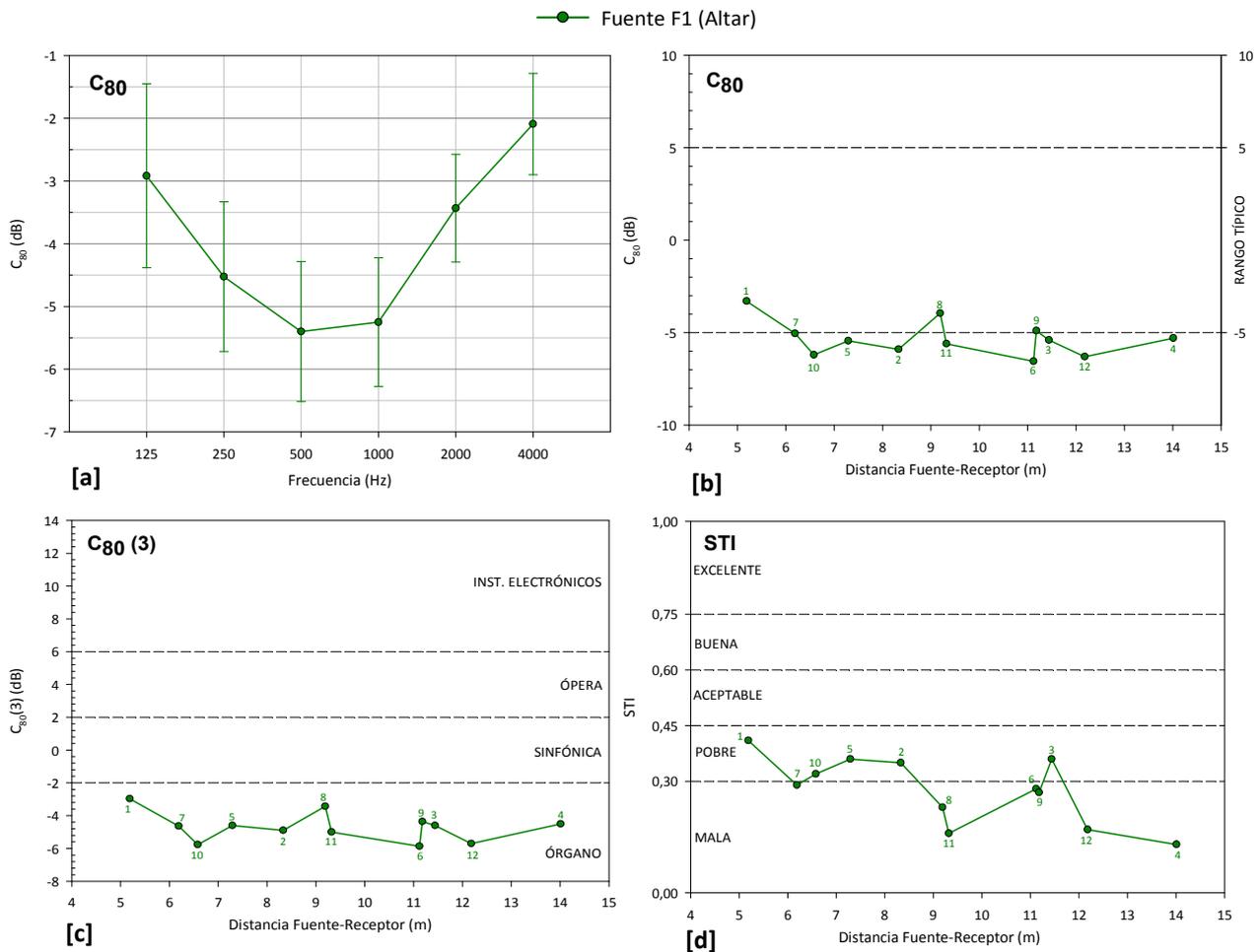


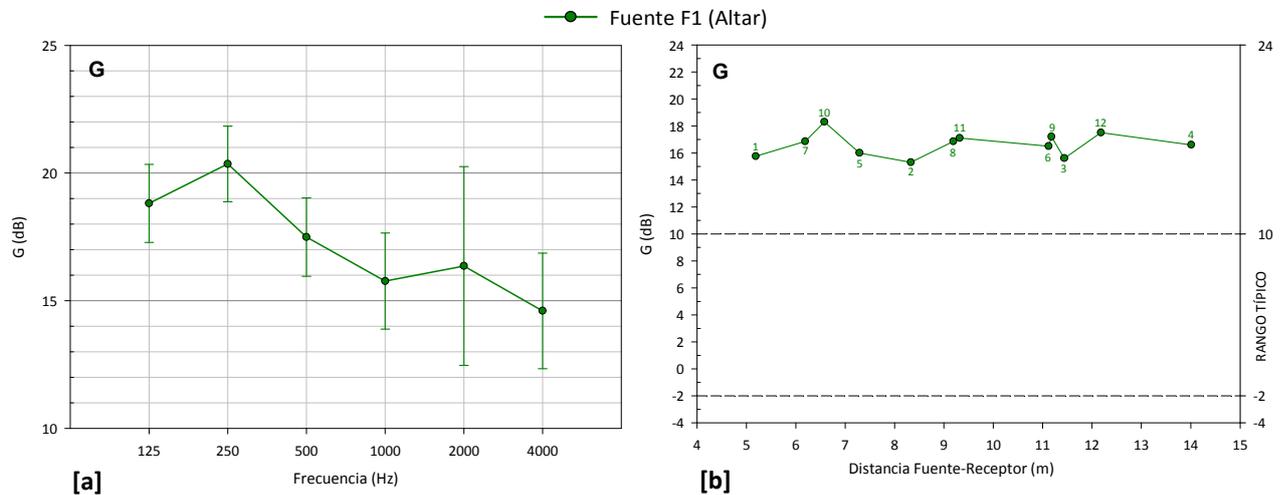
Figura 6.5.15. Claridad musical C_{80} (dB) e índice de transmisión de la palabra STI. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1.

En cuanto a la claridad musical (C_{80}), tanto los resultados promediados espacialmente frente a la frecuencia (figura 6.5.15 [a]) como los promediados espectralmente frente a la distancia fuente y receptor (figura 6.5.15 [b]), nos permiten remitirnos a lo comentado para el C50 y D50. La representación de los resultados del $C_{80}(3)$, para todos los puntos de la audiencia, muestran que el único tipo de música que podría ser admisible en este recinto es aquella que tuviera un carácter reverberante, como las representaciones clásicas de órgano (figura 6.5.15 [c]).

En cuanto a la inteligibilidad de la palabra, valorada por el índice STI (figura 6.5.15 [d]), casi el 60% de los puntos de recepción se encuentran en zonas con inteligibilidad mala, mientras que la del resto es, simplemente, pobre.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	F1	18,81	20,36	17,49	15,77	16,36	14,60
	σ F1	1,53	1,48	1,54	1,88	3,89	2,26

Tabla 6.5.8. Valores promediados espacialmente de la fuerza sonora G (dB). ¹Desviación estándar.Figura 6.5.16. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1.

Como era de esperar por la elevada reverberación del recinto, el nivel sonoro subjetivo, evaluado mediante la fuerza acústica (G), presenta resultados altos. La dispersión de resultados también es considerable, especialmente para las altas frecuencias (figura 6.5.16 [a]).

Esto hace que al representar los valores obtenidos de G en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.1.16 [b]), los valores se sitúen muy por encima del límite superior del rango típico recogido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

Impresión espacial

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
L_J (dB)	F1	8,98	13,08	11,58	9,98	9,37	7,69
	σ F1	1,57	1,56	1,82	1,79	3,95	2,46
J_{LF}	F1	0,13	0,16	0,20	0,25	0,19	0,24
	σ F1	0,10	0,07	0,08	0,09	0,05	0,06

Tabla 6.5.9. Valores promediados espacialmente del nivel sonoro lateral final L_J (dB) y fracción de energía lateral precoz J_{LF} . ¹Desviación estándar.

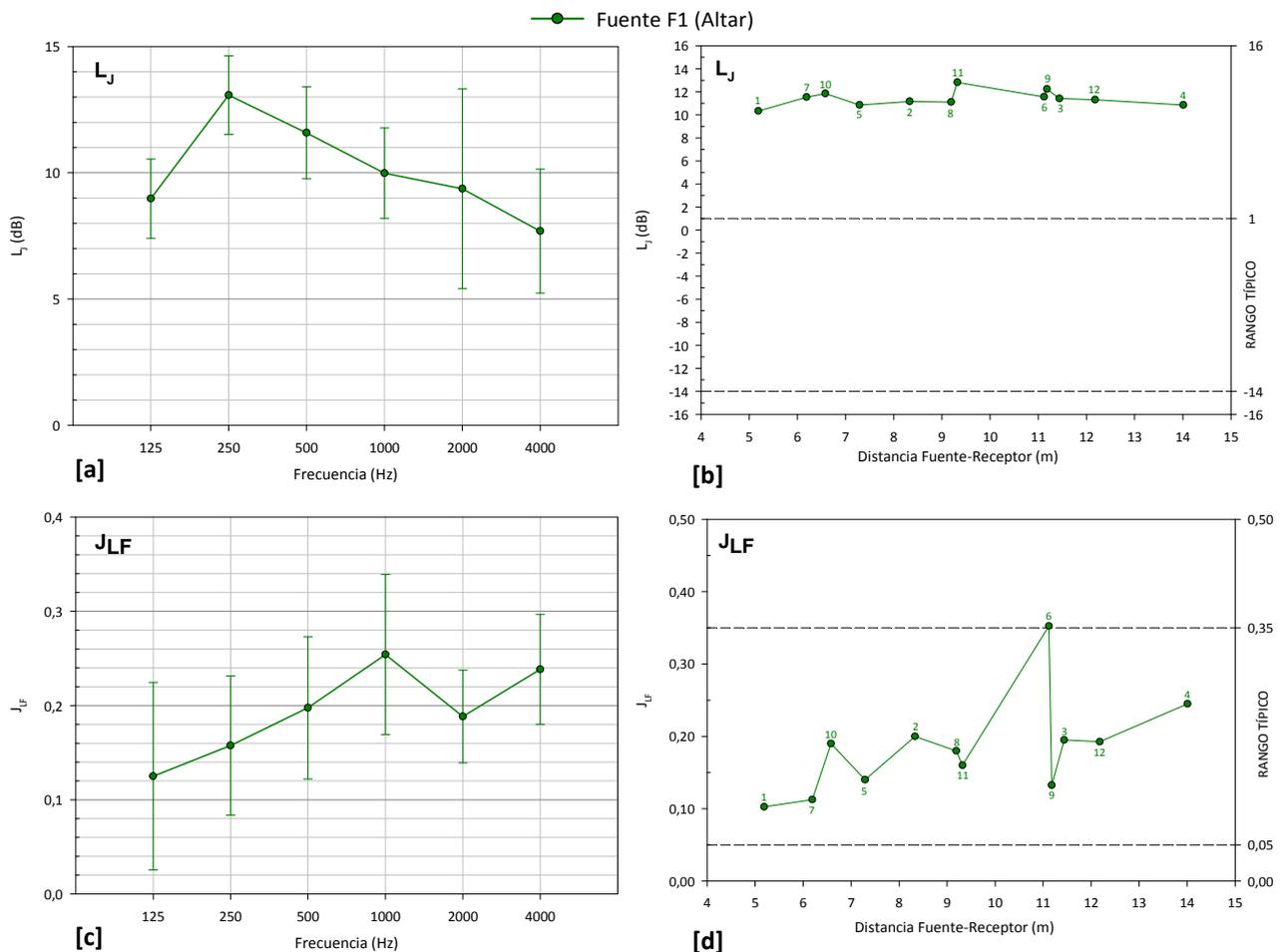


Figura 6.5.17. Nivel sonoro lateral final L_J (dB) y fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1.

Como consecuencia de la gran cantidad de energía sonora tardía en el espacio eclesial, tanto los resultados en bandas de octava del nivel sonoro lateral final (L_J) (figura 6.5.17 [a]), como su promediado espectral (figura 6.5.17 [b]), muestran valores muy altos y, por lo tanto, una importante sensación sonora envolvente del oyente.

La energía lateral precoz (J_{LF}) no presenta resultados tan elevados mientras que su dispersión espacial sí es importante de un punto a otro por la alta sensibilidad de este indicador a la posición de la fuente y receptor (figura 6.5.17 [c]). Los valores del promediado espectral de este parámetro se sitúan dentro del rango típico establecido por la norma ISO (figura 6.5.17 [d]). Los niveles registrados de J_{LF} corresponden a una adecuada amplitud de la fuente sonora.

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
IACC _L	F1	0,89	0,64	0,16	0,11	0,05	0,05
	σ F1	0,03	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01
IACC _E	F1	0,93	0,80	0,44	0,27	0,22	0,16
	σ F1	0,05	0,08	0,16	0,10	0,08	0,04
IACC _A	F1	0,90	0,68	0,20	0,10	0,07	0,07
	σ F1	0,02	0,04	0,04	0,02	0,03	0,02

Tabla 6.5.10. Valores promediados espacialmente de los coeficientes de correlación cruzada interaural: IACC_L, IACC_E y IACC_A. ¹Desviación estándar.

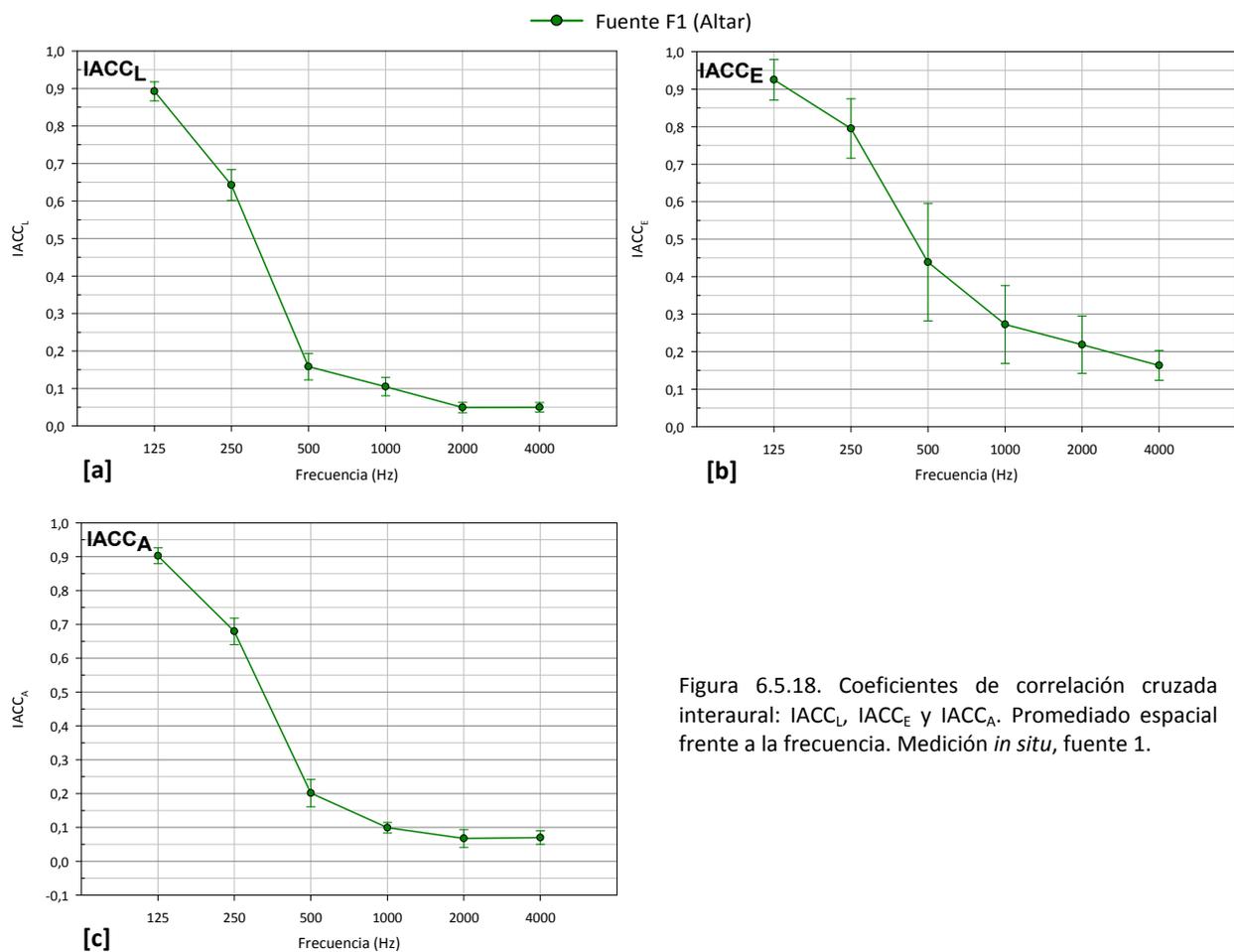


Figura 6.5.18. Coeficientes de correlación cruzada interaural: IACC_L, IACC_E y IACC_A. Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1.

Los resultados de los tres coeficientes de correlación cruzada interaural (IACC_L, IACC_E y IACC_A) se representan en la figura 6.5.18. La gráfica del IACC_L corrobora la sensación sonora envolvente indicada para el L₁, donde el valor de IACC_{L3} es 0,11. Los valores del IACC_E corresponden a una adecuada anchura de la fuente sonora, siendo el IACC_{E3}=0,31, valor que se encuentra dentro del rango de valores de las salas de concierto que Beranek califica como de categoría acústica excelente. La dispersión espacial de resultados es pequeña excepto para los valores del IACC_E.

Ruido de fondo

PARÁMETRO	PUNTO	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
RF (dB)	13	37,07	37,62	35,38	31,02	27,70	24,49

Tabla 6.5.11. Espectro de ruido de fondo registrado (dB).

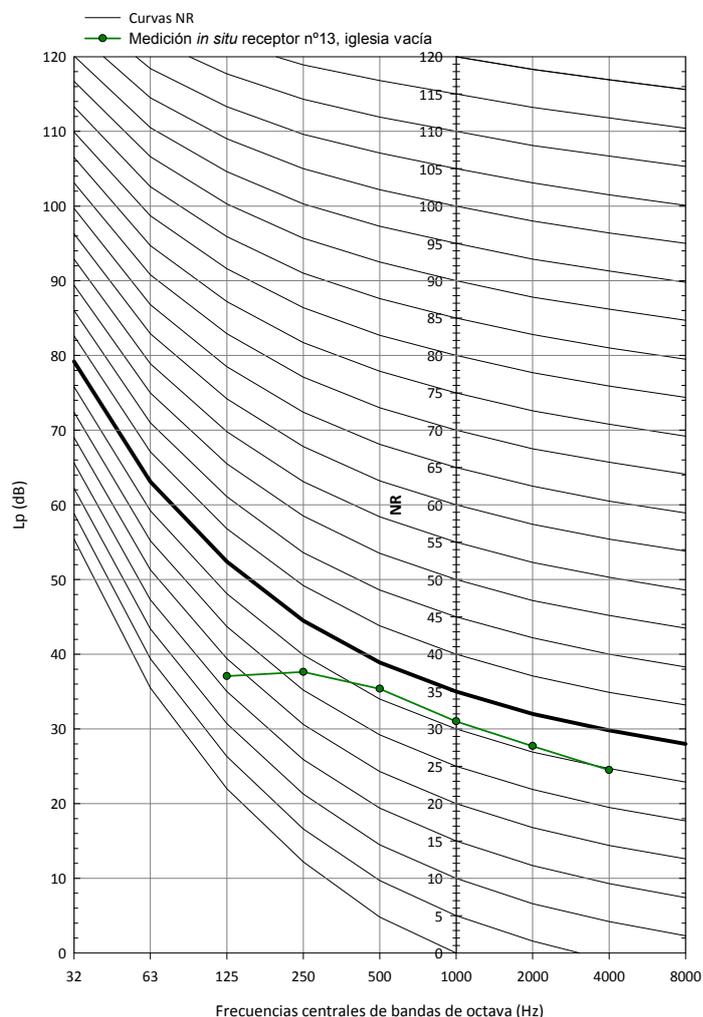


Figura 6.5.19. Curvas NR y espectro de ruido de fondo registrado (dB).

El espectro de ruido de fondo se registró promediando durante cuatro minutos en el punto 13. En la figura 6.5.19, dicho registro se ha superpuesto sobre las curvas NR, el cual corresponde a un índice de NR 32, valor inferior al máximo recomendado para los recintos de culto (NR 35). En este resultado favorable, reflejado en la medida *in situ*, influye la ubicación de la iglesia y sus características constructivas. El complejo parroquial se encuentra situado en un barrio residencial, formado por bloques de viviendas altos y distanciados entre sí y con zonas ajardinadas en las inmediaciones a la iglesia. El complejo parroquial se cierra al exterior y se vuelca en torno a un patio interior que articula todas las dependencias parroquiales. Asimismo, los muros gruesos de hormigón con pocos huecos al exterior, contribuyen al aislamiento acústico del recinto. Durante la ejecución de los trabajos realizados *in situ*, las calzadas adyacentes al conjunto parroquial presentaron una densidad de tráfico media.

Parámetros geométricos y de aforo

V/N (m ³ /plaza)	V/S _A (m ³ /m ²)	S _A /N (m ² /plaza)
7,48	11,07	0,68

Tabla 6.5.12. Valores de parámetros geométricos y de aforo.

En esta iglesia, la relación geométrica V/N se encuentra dentro del rango establecido para las iglesias ($5,1-9,1 \text{ m}^3/\text{plaza}$) y su valor es muy próximo al recomendado para las iglesias (7,2).

La relación V/S_A se encuentra dentro del rango propio de salas de concierto ($10,2-14,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$) y locales polifuncionales ($9,2-12,0 \text{ m}^3/\text{m}^2$). El valor de S_A/N casi coincide con el recomendado para locales polifuncionales ($0,66 \text{ m}^2/\text{plaza}$).

6.5.2.2. AJUSTE DEL MODELO INFORMÁTICO

En la figura 6.5.20, se muestra el modelo informático que reproduce el interior del espacio eclesial y que ha sido realizado con el citado programa de referencia (*CATT-Acoustic* v.8.0k). La zona de audiencia se ha simplificado introduciendo la envolvente de cada agrupación de bancos, siendo la altura de la misma desde el suelo de 0,45 m.

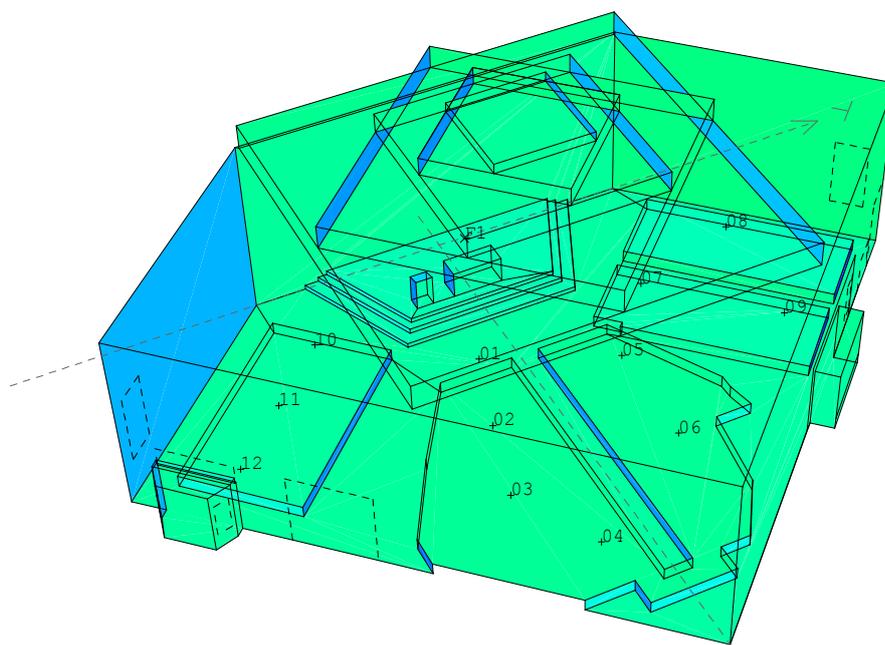


Figura 6.5.20. Modelo tridimensional realizado con el programa *CATT-Acoustic*.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.5.13.

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
Hormigón aplantillado	Paramentos verticales	452,0	33,0
Viguetas metálicas y entrevigado de hormigón aplantillado	Techo	331,3	24,2
Banco de madera	Zona de audiencia	222,5	16,2
Terrazo y mármol	Suelo	176,0	12,9
Vigas Boyd	Techo	106,7	7,8
Puerta metálica	Puertas de acceso y aplacados huecos	44,0	3,2
Vidrio (en área pequeña)	Ventanas	8,6	0,6
Tela de algodón	Altar	8,3	0,6
Puerta de madera	Confesionarios	7,9	0,6
Vidrio (en área grande)	Puerta de vidrio capilla del Sagrario	6,2	0,5
Falso techo escayola	Vestíbulo confesionarios	2,4	0,2
Rejilla de ventilación	Rejilla de madera junto acceso a capilla	1,6	0,1
Enlucido de yeso	Vestíbulo confesionarios	1,6	0,1
TOTAL REVESTIMIENTOS		1369,1	100

Tabla 6.5.13. Áreas de revestimientos.

Como en otras ocasiones, para la sintonización del modelo informático se utilizó como parámetro de ajuste el tiempo de reverberación T_{30} . Las condiciones de cálculo son las especificadas en la tabla 6.5.14, y los coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos se presentan en la tabla 6.5.15.

DATOS Y CONDICIONES DE CÁLCULO	
Algoritmo de cálculo	Nº2, cálculo completo, auralización detallada
Número de conos/rayos	30.000
Ecograma/respuesta al impulso	4,5 s
Densidad del aire	1,15 kg/m ³
Absorción del aire	Activada
Ruido de fondo	Según espectro medido <i>in situ</i>
Condiciones ambientales	30°C, 34%
Tiempo de cálculo	16 horas, 36 minutos (iglesia vacía)
Número de fuentes	1
Número de receptores	12
Número de planos	122

Tabla 6.5.14. Datos y condiciones de cálculo.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DEL ESTADO ACTUAL (%)							
REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Hormigón aplantillado	α	1	1	1	2	2	2
	s	20	25	30	35	40	50
Viguetas metálicas y entrevig. horm. aplantillado	α	30	17	10	8	10	8
	s	25	30	35	40	35	30
Banco de madera (vacío)	α	16	18	18	17	17	16
	s	30	40	50	60	70	80
Banco de madera (ocupado)	α	57	61	75	86	91	86
	s	30	40	50	60	70	80
Terrazo y mármol	α	1	1	1	1	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Vigas Boyd	α	5	8	8	8	5	2
	s	15	20	25	30	35	40
Puerta metálica	α	14	10	6	8	10	10
	s	10	10	10	10	10	10
Vidrio (en área pequeña)	α	4	4	3	3	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Tela de algodón	α	3	4	11	17	24	35
	s	10	10	10	10	10	10
Puerta de madera	α	14	10	6	8	10	10
	s	10	10	10	10	10	10
Vidrio (en área grande)	α	18	6	4	3	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Falso techo escayola	α	16	10	6	4	4	4
	s	10	10	10	10	10	10
Rejilla de ventilación	α	50	50	40	35	30	25
	s	10	10	10	10	10	10
Enlucido de yeso	α	1	1	2	3	4	5
	s	10	10	10	10	10	10

Tabla 6.5.15. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos del estado actual. Los valores resaltados (en color rojo) son los ajustados en el proceso de sintonización.

En la tabla 6.5.15 se muestran los coeficientes de absorción y dispersión sonora de los materiales de revestimiento existentes en el recinto eclesial, destacándose (en color rojo) aquellos con más

incertidumbre y cuyos valores han sido ajustados para la sintonización del tiempo de reverberación (T_{30}).

El techo, formado por viguetas metálicas y entrevigado de hormigón aplantillado y ligeramente curvo, ha sido el material clave para el ajuste del modelo (figura 6.5.12 [a]). A partir del coeficiente de absorción de un forjado metálico nervado conocido, se ha realizado el ajuste aumentando, sobre todo, los coeficientes de las bajas frecuencias por la capacidad de vibración de este elemento constructivo de poco espesor.

Para las vigas Boyd, con vidrios en los huecos del alma de los perfiles metálicos, los coeficientes se han obtenido realizando una media ponderada, atendiendo a las proporciones geométricas de los elementos que integran el conjunto, cuyos coeficientes de absorción y dispersión sonora son conocidos.

Para los coeficientes de *scattering*, se ha admitido un valor por defecto del 10% en todas las bandas de octava analizadas, excepto en los siguientes casos: para los bancos de madera vacíos y los bancos ocupados, se han adoptado los coeficientes de bibliografía publicada^{20,21}; para los paramentos verticales de hormigón aplantillado, el techo de viguetas metálicas y hormigón realizado con encofrado blando y, por último, las vigas Boyd, los valores se han estimado a partir del tamaño de las irregularidades, la profundidad media estructural y la longitud media estructural, para las correspondientes longitudes de onda implicadas.

6.5.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN *IN SITU* Y LA SIMULACIÓN

A partir del modelo ajustado del estado actual (EA) de la iglesia vacía, se procedió, con las mismas condiciones de cálculo, a la simulación acústica de la iglesia ocupada con la fuente situada en el altar (F1). Los resultados de las simulaciones se contrastan con los obtenidos en las medidas experimentales para la misma posición de fuente y receptores.

Reverberación

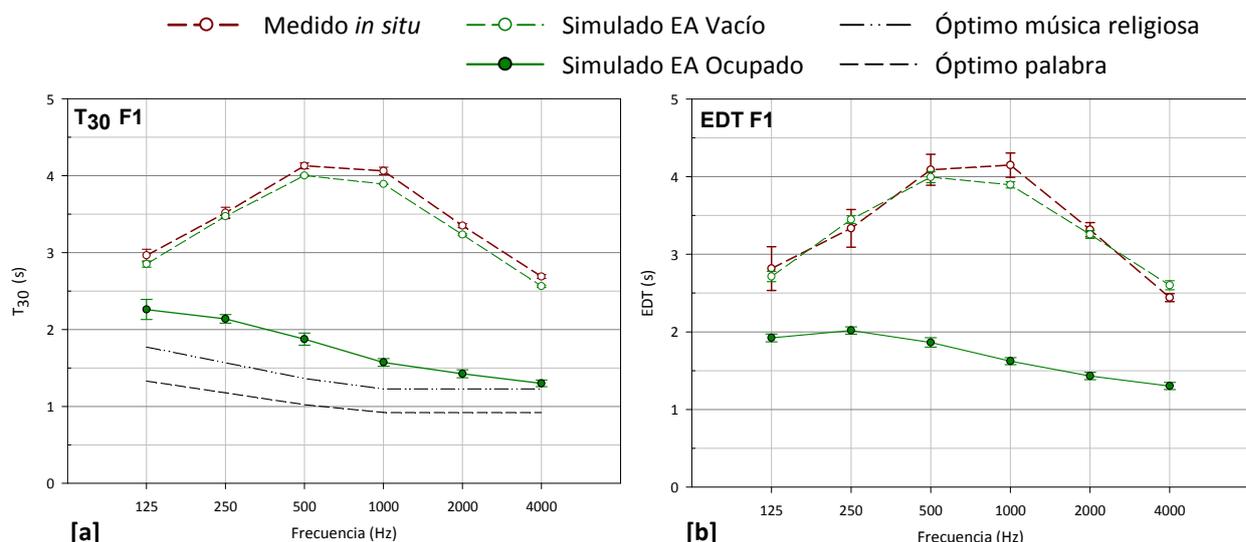


Figura 6.5.21. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1.

En la figura 6.5.21 [a] puede observarse que los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) simulados en la hipótesis de iglesia vacía y con la fuente situada en el altar (F1), difieren menos del umbral

²⁰ Cox, T.J., D'Antonio, P. (2004). Opus cit.

²¹ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2009). Opus cit.

perceptible JND (5% de diferencia sobre los valores medidos *in situ* para las distintas bandas de octava), por lo que consideramos válido el ajuste del modelo de simulación.

Al realizar la simulación con el recinto ocupado al 100% los valores del tiempo de reverberación disminuyen entre 0,5 y 2,5 s, dependiendo de la frecuencia, aunque siguen siendo superiores a los recomendados.

La evolución del EDT (figura 6.5.21 [b]) es muy similar a la comentada anteriormente para el T_{30} , consiguiéndose a la frecuencia de 1000 Hz, un ajuste igual a 1 JND.

La dispersión espacial de resultados es muy pequeña en ambos parámetros, aunque algo mayor en el caso del EDT.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

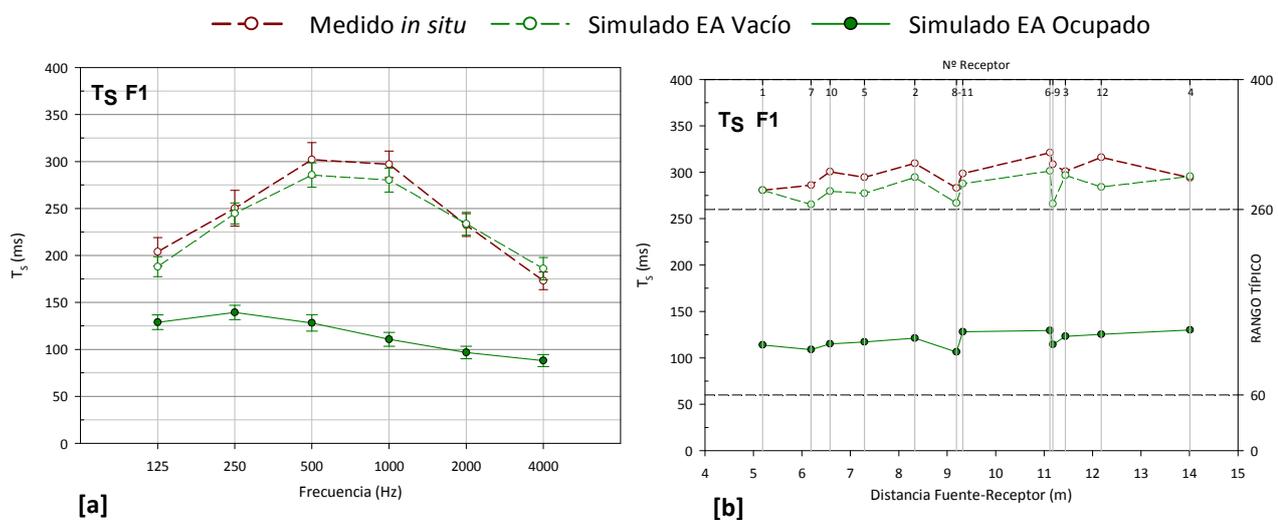


Figura 6.5.22. Tiempo central T_5 (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1.

En las gráficas de la figura 6.5.22 [a], podemos advertir que los resultados del tiempo central T_5 simulados son muy parecidos a los obtenidos en las medidas experimentales, a partir de la respuesta al impulso, para todas las bandas de octava estudiadas, siendo las diferencias inferiores a 2 JND. En cuanto a la dispersión espacial, salvo para la frecuencia de 4000 Hz, los valores son inferiores en la simulación acústica con respecto a la medición *in situ*.

La representación de los resultados del T_5 en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.5.22 [b]), muestran que los valores medidos y simulados presentan tendencias y valores parecidos.

Al igual que ocurría con los parámetros relacionados con la reverberación, la presencia de los fieles en la iglesia reduce considerablemente los valores del T_5 , mejorando la nitidez del sonido, que para todos los puntos de recepción, se encuentra dentro del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

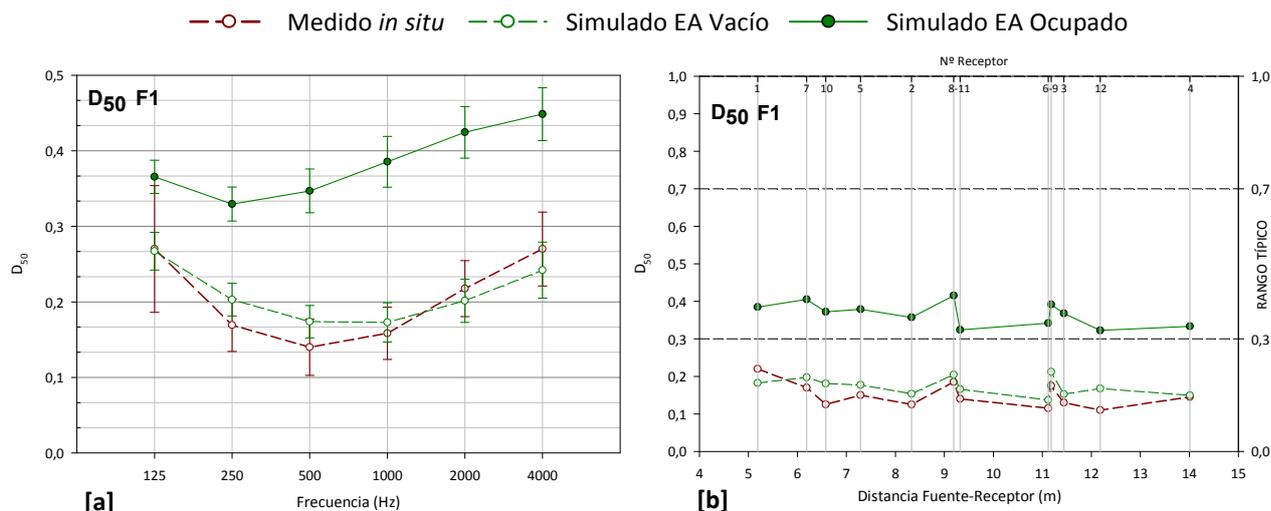


Figura 6.5.23. Definición D_{50} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1.

Las gráficas correspondientes a los resultados de la definición D_{50} corroboran que, el modelo informático se ajusta con bastante aproximación a la realidad acústica del recinto. Las diferencias entre los resultados medidos y calculados, promediados espacialmente frente a la frecuencia (figura 6.5.23 [a]), para la sala vacía, son inferiores a 1 JND. De nuevo, la dispersión espacial es menor en la simulación.

La representación de los resultados del D_{50} en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.5.23 [b]), muestra que cuando la iglesia está ocupada al 100% puede esperarse que la definición esté dentro del rango fijado por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, aunque en el entorno del límite inferior.

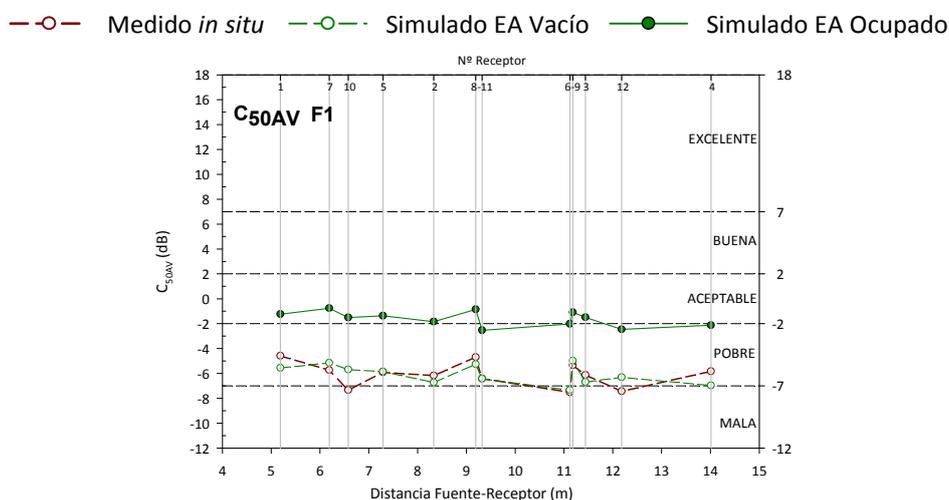


Figura 6.5.24. Claridad para la palabra C_{50} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1

En el caso del C_{50AV} (figura 6.5.24), los valores medidos y simulados presentan un buen ajuste pero se mueven en el límite entre claridad mala y pobre. En condiciones de ocupación del 100% mejora, pero apenas supera el límite de aceptable.

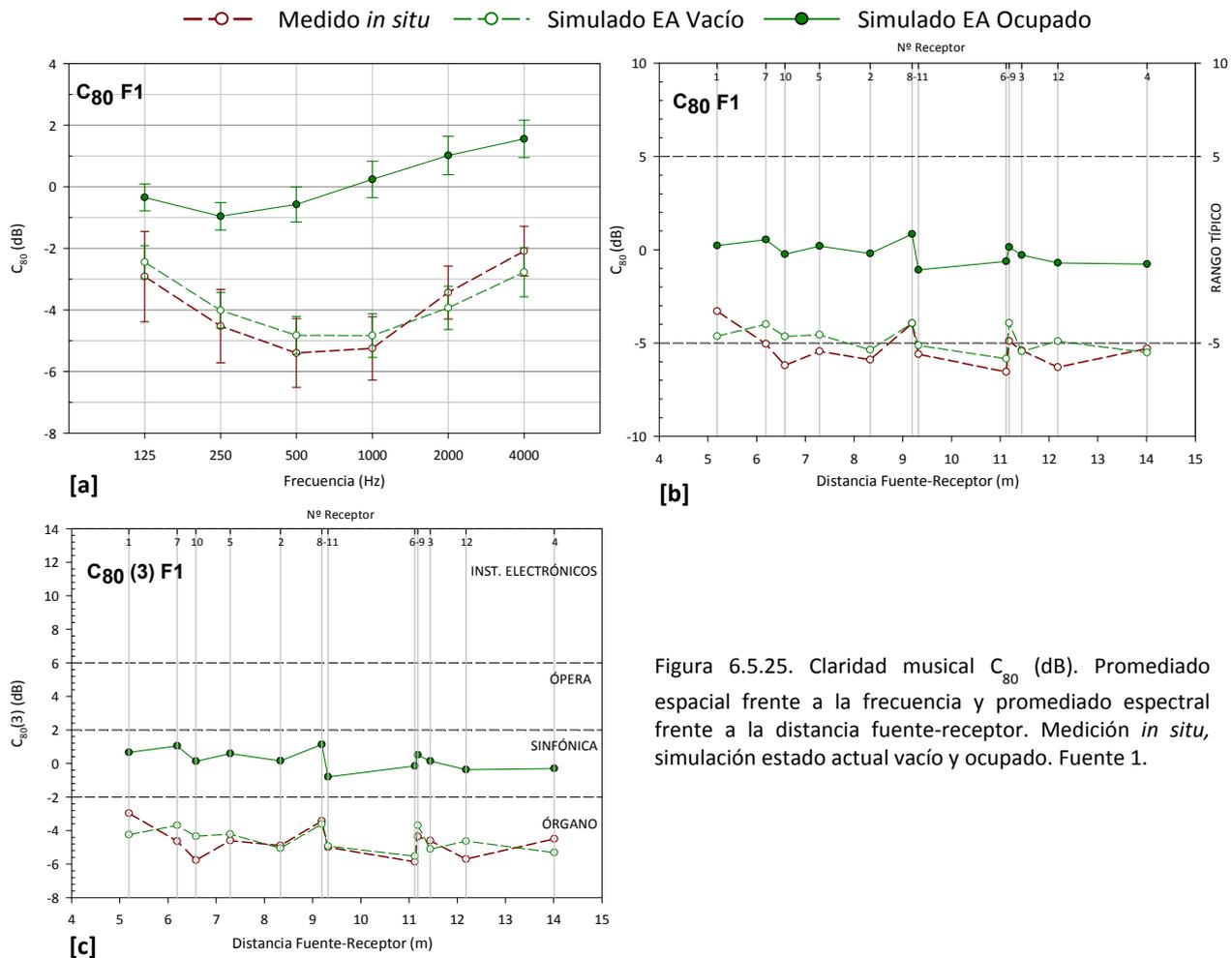


Figura 6.5.25. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1.

En cuanto a los resultados, promediados espacialmente frente a la frecuencia, de la claridad musical (C_{80}), representados en la figura 6.5.25 [a], vemos que se obtienen buenas aproximaciones entre las medidas y los cálculos informáticos para todas las bandas de octava con diferencias inferiores a 1 JND. Asimismo, la dispersión espacial, de nuevo, vuelve a ser inferior en la simulación que en la medición *in situ*.

Para los resultados promediados espectralmente frente a la distancia fuente-receptor, tanto en el C_{80} (figuras 6.5.25 [b]) como en el $C_{80}(3)$ (figuras 6.5.25 [c]) y en la hipótesis de iglesia vacía, en casi todos los puntos de recepción se obtienen resultados simulados y medidos muy parecidos. Cuando la iglesia está ocupada, ambos parámetros aumentan en valor. En el caso del C_{80} queda centrado en el rango típico, mientras que el $C_{80}(3)$ pasa a calificar el recinto como apto para representaciones de música sinfónica. En cualquier caso estamos en valores en torno a 0 dB o ligeramente por encima.

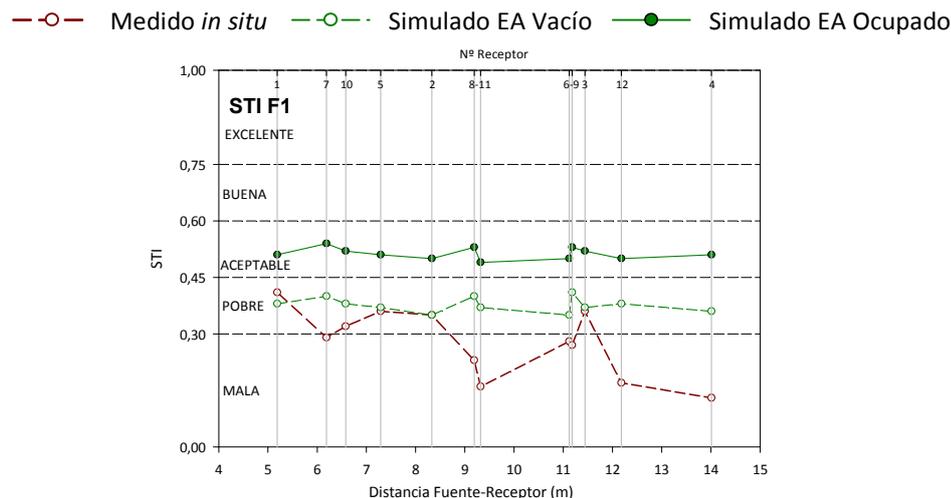


Figura 6.5.26. Índice de transmisión de la palabra STI, frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1.

Respecto al índice de transmisión de la palabra (STI), en la figura 6.5.26, se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor, junto con la escala de inteligibilidad subjetiva. Los resultados de la simulación en la hipótesis de iglesia vacía son parecidos a los resultados de la medida experimental pero sólo para los puntos más cercanos a la fuente y situados frente a ella; se han registrado diferencias entre valores simulados y medidos en los receptores más alejados, así como en los situados en las franjas de bancos laterales, hecho que atribuimos a algún fenómeno sonoro que tuviera lugar pero que no es reproducible con el software de predicción. La simulación acústica permite calificar la inteligibilidad de la iglesia vacía, en todos los puntos de recepción, como pobre. La presencia de la totalidad de los fieles supondría una mejora en la inteligibilidad y un salto cualitativo de la misma a aceptable.

Nivel sonoro subjetivo

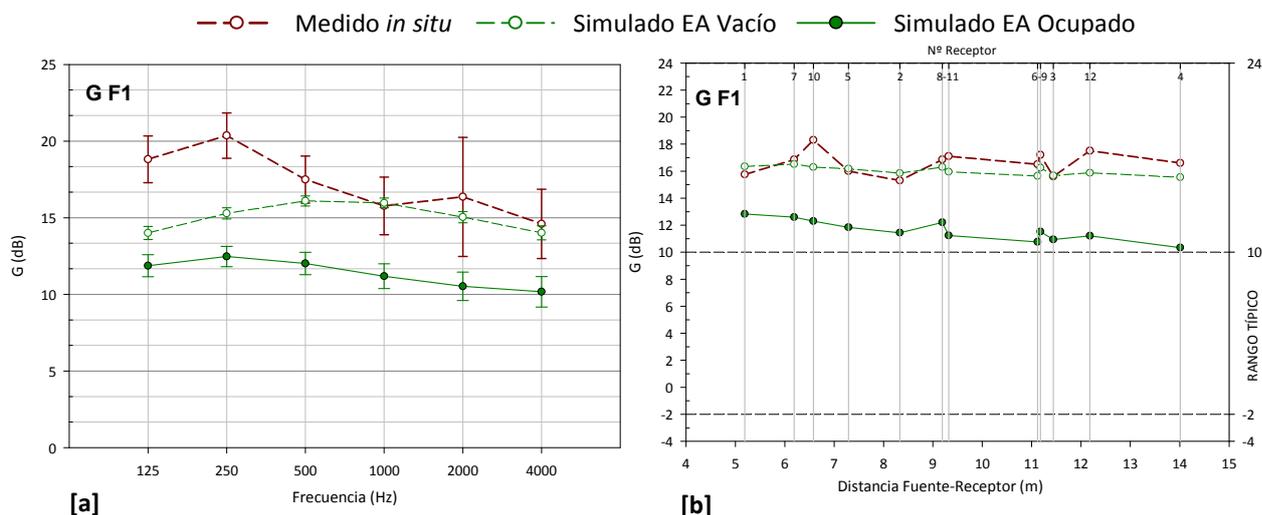


Figura 6.5.27. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1.

Es de destacar que para la fuerza sonora (G) de la iglesia, se obtienen buenas aproximaciones entre los resultados simulados y medidos a partir de los 500 Hz (figura 6.5.27 [a]). Son 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 el ajuste de toda la cadena de medida. Además, el programa toma por defecto como sonido directo toda aportación energética dentro del intervalo de 5 ms a partir de la llegada del sonido directo, lo que se traduce en poca precisión para frecuencias inferiores a 200 Hz. En el

apartado 5.5 del capítulo anterior, se explicó la limitación de la técnica de trazado de conos y se especificó que la frecuencia de Schroeder en esta iglesia es de 500 Hz, en la configuración vacía, y de 250 Hz para la iglesia ocupada.

En cuanto a los resultados de G , promediados espectralmente en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.5.27 [b]), destacar que se obtienen buenas aproximaciones entre valores simulados y medidos, siendo las diferencias, para la mayoría de los puntos, inferiores a 2 JND. Como en los anteriores parámetros acústicos, los valores de la fuerza sonora disminuyen para la iglesia ocupada, aunque siguen estando por encima de los recogidos en la norma UNE.

Impresión espacial

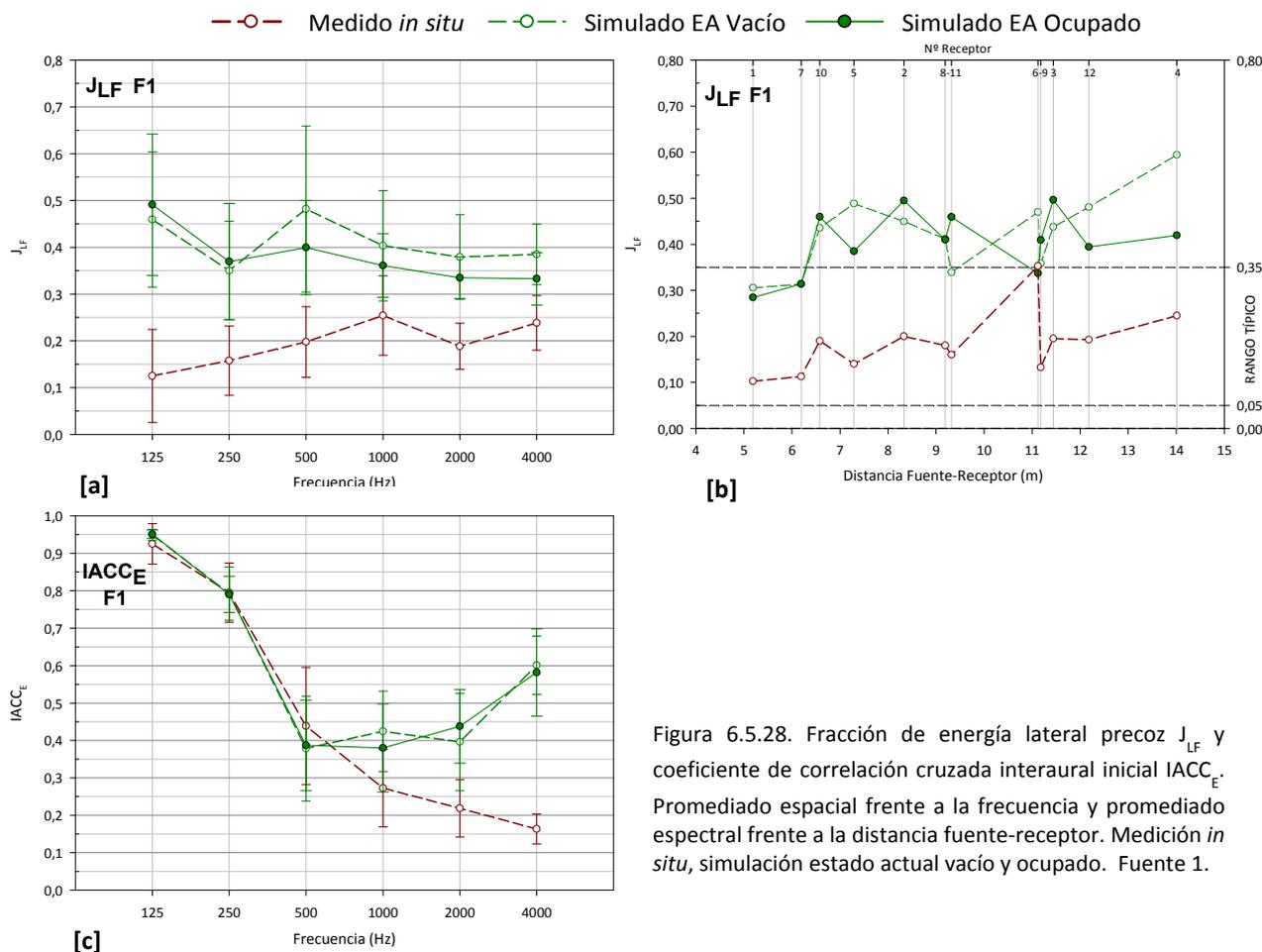


Figura 6.5.28. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1.

Los resultados simulados que menos se ajustan a los medidos *in situ*, los encontramos en los parámetros relacionados con el ancho aparente de la fuente, la envolvente y la audición binaural, representados aquí por J_{LF} y $IACC_E$. Las diferencias llegan a los 6 JND, en el caso del J_{LF} a las frecuencias de 125 y 500 Hz, mientras que para el $IACC_E$ se produce un buen ajuste en la mitad del espectro y, a partir de 1000 Hz existe una variación entre 2 JND y 6 JND.

Para la fracción de energía lateral precoz (J_{LF}), las figuras 6.5.28 [a] y [b] muestran que las simulaciones informáticas proporcionan resultados parecidos en las configuraciones vacío y ocupado, distanciándose ambas sensiblemente de los resultados obtenidos en las medidas, quedando de nuevo a la vista que es un indicador difícil de predecir. Además, la desviación estándar para ambas hipótesis de ocupación, es mayor en las simulaciones que en las mediciones *in situ*.

Para el coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACC_E$), recordemos que cuanto mayor sean sus valores, más similares son las señales percibidas por ambos oídos y, en consecuencia, menor

información proporcionará sobre las características espaciales del campo sonoro. Del análisis de la figura 6.5.28 [c] se deduce que la información espacial está asociada a las frecuencias a partir de 500 Hz, siendo a su vez a estas frecuencias, cuando los valores simulados se diferencian de los obtenidos en las medidas.

6.5.2.4. VALORACIÓN GLOBAL

Como conclusión de este análisis comparativo entre la medición *in situ* y las simulaciones informáticas, podemos afirmar que el modelo acústico, ajustado con el tiempo de reverberación (T_{30}) y con la fuente en posición coincidente con el altar, reproduce la mayoría de los parámetros con una buena aproximación y puede ser validado para su utilización en las predicciones acústicas de las propuestas.

En cuanto al estudio del comportamiento de las ondas sonoras en el recinto, para evaluar la importancia relativa de las superficies implicadas al recibir los impactos de los rayos sonoros, destacar que, cuando la fuente sonora está en el altar, se producen los siguientes fenómenos:

- Desde el altar, el frente de onda avanza hacia la audiencia llegando rápidamente al techo-lucernario escalonado. En dicha zona se generan un gran número de reflexiones de 2º y 3º orden, cuando aún no ha llegado el sonido directo a la parte final del área de la audiencia.
- La propia geometría en planta de la iglesia hace que las paredes de fondo oblicuas aporten beneficiosas reflexiones cortas en las zonas de fondo de la audiencia, excepto en la esquina central convexa, cuya forma da lugar a concentraciones sonoras perjudiciales (ver figura 6.5.11).
- En general, es un aspecto beneficioso desde el punto de vista sonoro, que la forma geométrica de la sala favorezca que las reflexiones de los paramentos verticales lleguen al área de la audiencia. No obstante, esta ventaja se ve contrarrestada por la falta de absorción sonora en las superficies interiores de la iglesia.

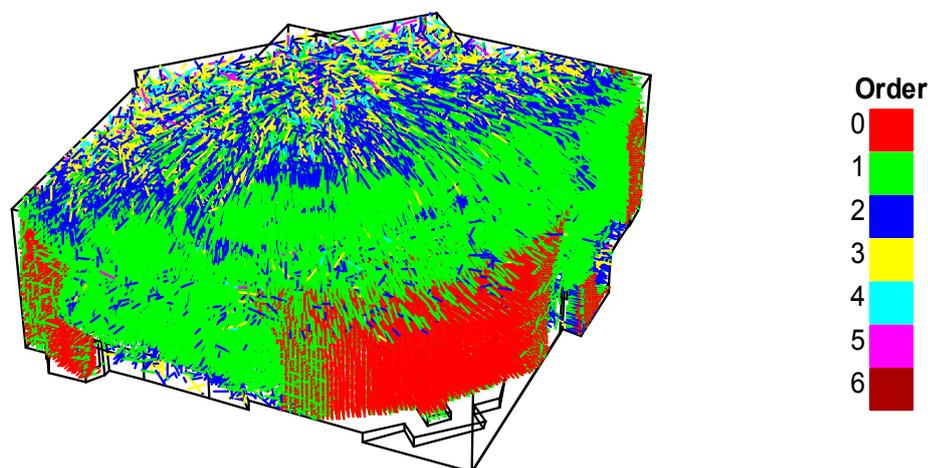


Figura 6.5.29. Visualización de la trayectoria de los rayos sonoros en el modelo informático del recinto. Transcurridos primeros 40 ms, frecuencia de 1000 Hz, fuente 1. Colores según orden de reflexión.

6.5.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA

6.5.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

A partir de los análisis anteriores, se plantea una propuesta de rehabilitación acústica que cumpla con los siguientes objetivos:

- Reducir los tiempos de reverberación actuales, para intentar aproximarlos a los considerados como óptimos para los usos de palabra y música religiosa.
- Mejorar otros parámetros acústicos como la inteligibilidad de la palabra y la claridad musical, reduciendo la energía de las reflexiones largas y aumentando la relación señal-ruido en los distintos puntos de recepción.
- Mantener el buen funcionamiento, en cuanto a distribución sonora, de las superficies reflectantes y reducir o paliar las reflexiones tardías y los fenómenos de concentración sonoros.
- Conseguir que la iglesia tenga un comportamiento acústico parecido independientemente del grado de ocupación de la misma, para no condicionar la acústica del recinto al número de personas que lo ocupen.
- Por la importancia de la inteligibilidad de la palabra en el recinto, proponer una instalación de apoyo electroacústico, que optimice la inteligibilidad en el recinto.

Para conseguir estos objetivos, y los descritos en el apartado 5.6 del capítulo *Método de investigación*, la propuesta de rehabilitación acústica acomete un conjunto de actuaciones, desde dos puntos de vista: a) introducir una serie de revestimientos absorbentes, en zonas estratégicas desde el punto de vista acústico y; b) modificar, de forma casi quirúrgica, la geometría de determinadas zonas. La planimetría de dichas actuaciones se representa en la figura 6.5.30 y sus características se describen a continuación:

- Dotar de absorción sonora al suelo del presbiterio revistiéndolo con una moqueta de lana 2,3 kg/m².
- Aportar la mayor parte de absorción necesaria en la iglesia revistiendo el techo de la misma con paneles de lana de roca de 30 mm de espesor apoyado en las alas de las viguetas metálicas, dejando en su trasdós una cámara de aire de 50 mm (ver detalle en figura 6.5.30). El panel propuesto es el modelo Mono Acoustic TE 1200x1200x30 mm de la marca comercial Rockfon. Con esta operación, se aporta absorción sonora a una de las superficies que recibe más impactos de ondas sonoras.
- Eliminar la esquina cóncava del fondo central de la sala, creando un chaflán con un panel de madera, al tiempo que se dota al mismo de la suficiente absorción sonora. El panel acústico será de tipo perforado de madera lacada (perforaciones de diámetro 5 mm), con velo acústico y manta de lana mineral de 5 cm de espesor, modelo PAP025, lacado en tono neutro según color de los paramentos de la iglesia, de la marca comercial Decustik. Con esta operación además de eliminar la zona de concentraciones sonoras se reduce el volumen del recinto eclesial en 52 m³, pasando a ser de 2476 m³. El espacio eliminado podría utilizarse para albergar instalaciones o como pequeño almacén de mobiliario o utensilios. En las fases previas de análisis de las actuaciones, pudo comprobarse que la modificación de esta zona introduciendo este cambio geométrico contribuía, notablemente, a la mejora del tiempo de reverberación. Esta mejora era proporcional al aumento de la superficie del panel absorbente y a la reducción del volumen del recinto, pues al enfrentar dicha superficie absorbente a la trayectoria que realizan las ondas sonoras, se elimina la concentración de reflexiones que tienen lugar en el encuentro de los muros que cierran la asamblea.
- Incorporación de absorción sonora en el respaldo de los bancos de madera, utilizando el mismo panel de perforado del chaflán de fondo y descrito anteriormente (figura 6.5.31). Como el comportamiento de la iglesia vacía difiere mucho del ocupado, con esta operación

se dota de absorción sonora al propio banco, consiguiéndose que las condiciones acústicas no dependan del estado de ocupación de la iglesia.

6.5.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LA PROPUESTA

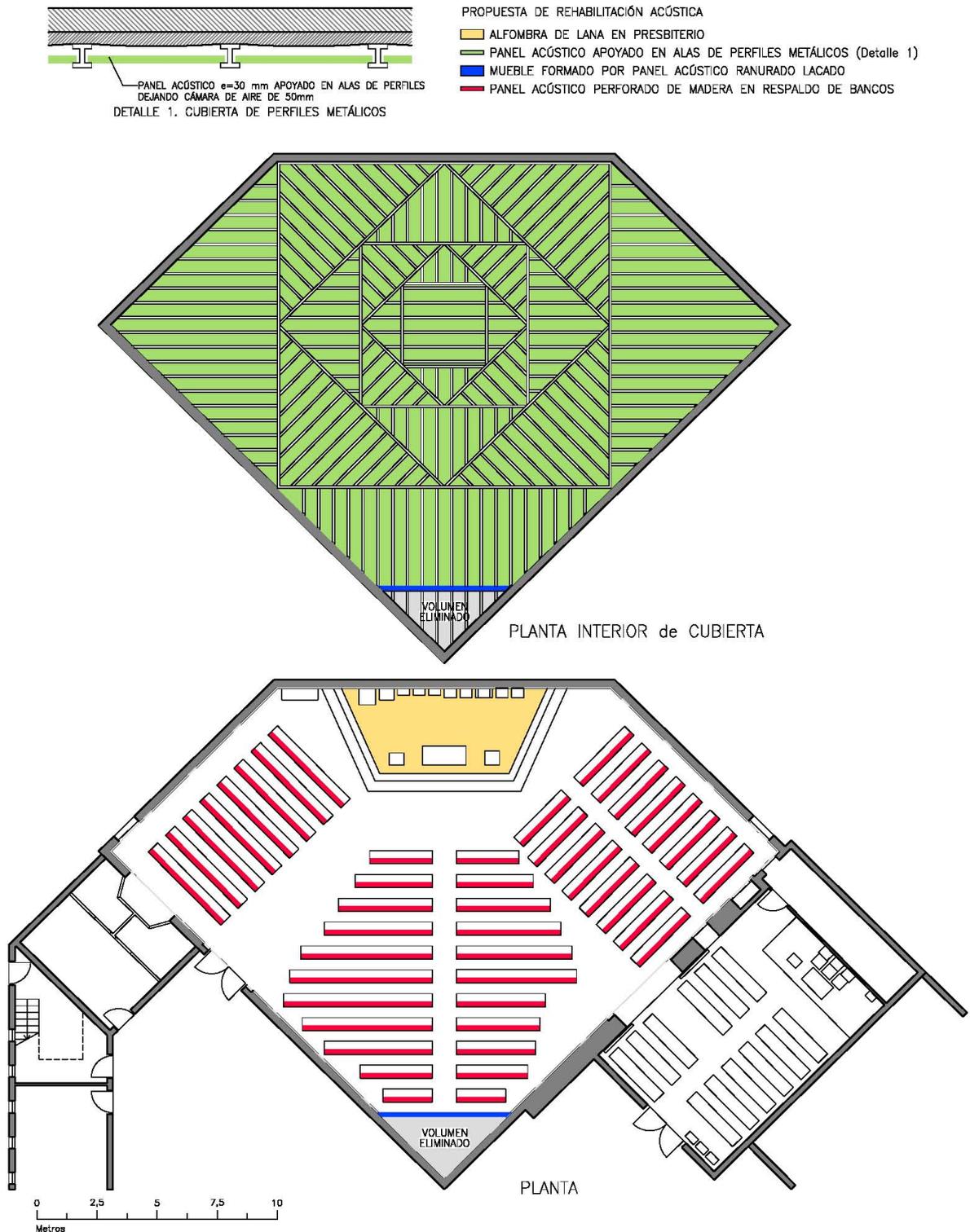


Figura 6.5.30. Planta y sección. Situación de materiales propuestos.

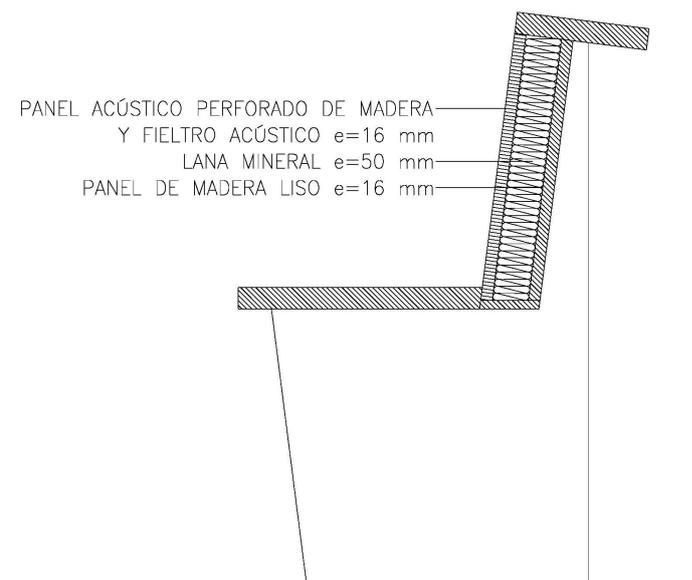


Figura 6.5.31. Sección del banco propuesto.

6.5.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO

En la figura 6.5.32, se muestra el modelo de simulación del volumen interior de la iglesia, realizado con el programa *CATT-Acoustic* v.8.0k, en el que se han incorporado las actuaciones descritas anteriormente para la rehabilitación acústica de la misma.

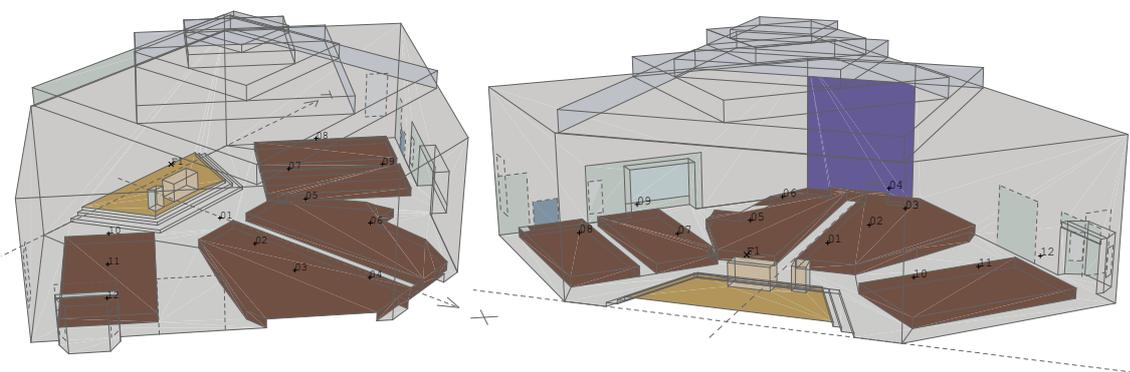


Figura 6.5.32. Modelo tridimensional de la iglesia con la propuesta de rehabilitación acústica.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.5.16.

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
Hormigón aplastillado	Paramentos verticales	399,2	29,9
Viguetas metálicas y entrevigado con panel acústico	Techo	324,1	24,3
Banco de madera con respaldo perforado	Zona de audiencia	219,2	16,4
Terrazo y mármol	Suelo	147,0	11,0
Vigas Boyd	Techo	106,7	8,0
Puerta metálica	Puertas de acceso y aplacados huecos	44,0	3,3
Panel perforado de madera lacada	Chaflán fondo central	36,2	2,7
Moqueta de lana	Presbiterio	23,3	1,7
Vidrio (en área pequeña)	Ventanas	8,6	0,6
Tela de algodón	Altar	8,3	0,6
Puerta de madera	Confesionarios	7,9	0,6
Vidrio (en área grande)	Puerta de vidrio capilla del Sagrario	6,2	0,5

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
Falso techo escayola	Vestíbulo confesionarios	2,4	0,2
Rejilla de ventilación	Rejilla de madera junto acceso a capilla	1,6	0,1
Enlucido de yeso	Vestíbulo confesionarios	1,6	0,1
TOTAL REVESTIMIENTOS		1336,3	100

Tabla 6.5.16. Áreas de revestimientos. Las filas resaltadas corresponden a los materiales propuestos para la rehabilitación.

Para la simulación del nuevo modelo informático, en las hipótesis de iglesia vacía y ocupada, se emplearon las condiciones de cálculo especificadas en la tabla 6.5.17, y los coeficientes de absorción y de dispersión sonora de los nuevos revestimientos presentados en la tabla 6.5.18.

DATOS Y CONDICIONES DE CÁLCULO	
Algoritmo de cálculo	Nº2, cálculo completo, auralización detallada
Número de conos/rayos	30.000
Ecograma/respuesta al impulso	4,5 s
Densidad del aire	1,15 kg/m ³
Absorción del aire	Activada
Ruido de fondo	Según espectro medido <i>in situ</i>
Condiciones ambientales	34°C, 30%
Tiempo de cálculo	2 horas, 31 minutos (iglesia vacía)
Número de fuentes	1
Número de receptores	12
Número de planos	123

Tabla 6.5.17. Datos y condiciones de cálculo.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DE LA PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA (%)							
MATERIAL		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
MOQUETA DE LANA 2,3 kg/m ²	α	17	18	21	50	63	83
	s	10	10	10	10	10	10
TECHO DE VIGUETAS METÁLICAS Y PANEL	α	30	51	85	89	90	89
	s	25	30	35	40	35	30
PANEL PERFORADO FONDO	α	60	75	78	70	45	25
	s	10	10	10	10	10	10
BANCO MADERA VACÍO CON PANEL PERFORADO	α	26	36	40	35	27	18
	s	30	40	50	60	70	80

Tabla 6.5.18. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos introducidos en el recinto eclesial con la propuesta de rehabilitación acústica.

En la tabla 6.5.18. se muestran los coeficientes de absorción y *scattering* de los nuevos materiales propuestos para la simulación de las condiciones acústicas tras la rehabilitación. Los valores de los mismos han sido obtenidos de distintas fuentes publicadas internacionalmente reconocidas, así como de los propios fabricantes de los productos seleccionados (en el anexo 3 se muestra un listado completo de todos los coeficientes de los materiales utilizados en esta investigación, así como la fuente de donde se han obtenido). Los valores de los coeficientes de absorción correspondientes a los materiales formados por varios elementos, como el techo de viguetas metálicas con panel absorbente y el nuevo banco de madera vacío, han sido calculados con una media ponderada, a partir de las proporciones geométricas de los elementos que integran el conjunto. Los coeficientes de dispersión sonora de estas superficies son los mismos que los empleados para el ajuste del modelo informático (tabla 6.5.15)

6.5.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

En este apartado se analizan los resultados de los principales parámetros acústicos. Sistemáticamente, las tablas y las gráficas de cada parámetro muestran los resultados de la medición realizada *in situ*, las simulaciones del estado actual (EA), en sus configuraciones de vacío y ocupado, así como los valores de las simulaciones de la propuesta de rehabilitación acústica (RE), con la sala vacía y ocupada al 100%, correspondiendo todos estos resultados a la fuente coincidente con el altar.

Reverberación

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_{30} (s)	MEDIDO Vacío	2,96	3,52	4,13	4,06	3,35	2,69
		0,08	0,07	0,04	0,05	0,03	0,02
	SIMULADO EA Vacío	2,85	3,47	4,00	3,89	3,23	2,56
		0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
	SIMULADO EA Ocupado	2,26	2,14	1,87	1,57	1,42	1,30
		0,13	0,06	0,08	0,05	0,05	0,04
	SIMULADO RE Vacío	2,18	1,56	1,20	1,11	1,04	0,94
	0,03	0,04	0,05	0,10	0,08	0,11	
	SIMULADO RE Ocupado	1,84	1,41	1,21	0,96	0,94	0,80
		0,05	0,04	0,12	0,05	0,08	0,04
	Óptimo palabra	1,32	1,17	1,01	0,91	0,91	0,91
	Óptimo música	1,76	1,56	1,35	1,22	1,22	1,22
EDT (s)	MEDIDO Vacío	2,82	3,33	4,09	4,15	3,32	2,44
		0,28	0,24	0,20	0,16	0,09	0,05
	SIMULADO EA Vacío	2,71	3,45	3,99	3,89	3,25	2,60
		0,07	0,05	0,07	0,04	0,05	0,06
	SIMULADO EA Ocupado	1,92	2,02	1,86	1,62	1,43	1,30
		0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,05
	SIMULADO RE Vacío	2,03	1,46	1,11	1,01	1,00	0,89
		0,04	0,04	0,07	0,06	0,05	0,05
	SIMULADO RE Ocupado	1,64	1,31	1,04	0,93	0,88	0,77
		0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,04

Tabla 6.5.19. Valores del tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

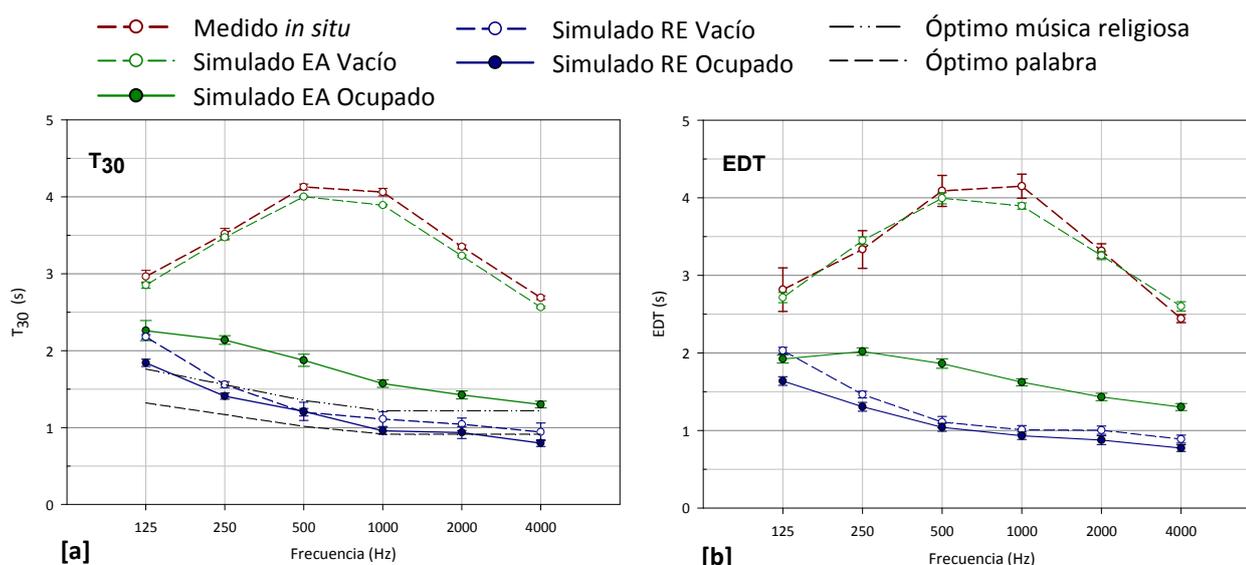


Figura 6.5.33. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Como puede comprobarse en la figura 6.5.33 [a], con la propuesta de rehabilitación se reducen notablemente los tiempos de reverberación (T_{30}) del recinto, tanto con la sala vacía como ocupada. En ambas hipótesis, y para casi todas las frecuencias, los tiempos de reverberación obtenidos se

ajustan a la banda óptima delimitada por los valores recomendados para la música religiosa y la palabra. Cabe destacar la importante bajada, de casi 3 segundos, del tiempo de reverberación medio (500-1000Hz) de la iglesia antes y después de la propuesta de rehabilitación. Asimismo, con la incorporación de absorción adicional en los bancos de madera se consigue que el grado de ocupación de la iglesia no tenga tanta influencia en este indicador, como ocurría antes de la propuesta de reforma. Advertir que los valores de los tiempos de reverberación óptimos especificados en la tabla 6.5.19, y representados en la figura 6.5.33 [a], son los correspondientes al nuevo volumen, resultante de incorporar el panel en el fondo de la iglesia, achaflanando la esquina central.

En cuanto al EDT (figura 6.5.33 [b]), parámetro que se relaciona con las primeras reflexiones de un recinto y que proporciona información sobre la impresión subjetiva de la reverberación frente al tiempo de reverberación, vemos que para las configuraciones de sala vacía y ocupada, los valores son ligeramente inferiores que los obtenidos para el T_{30} . Para ambos estados de ocupación del recinto, los valores a las frecuencias medias son muy próximos a 1,0 s, con lo que los resultados correspondientes al promediado en frecuencia de número único se encuentran dentro del rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010 y que está entre 1,0 s y 3,0 s.

Al igual que en las simulaciones del estado actual, al incorporar la propuesta de rehabilitación acústica, la dispersión espacial en estos parámetros relacionados con la reverberación, es muy pequeña, tanto para la iglesia vacía como ocupada (figura 6.5.33).

Como se indicó en el apartado 6.5.3.1, al valorar la idoneidad de la propuesta de rehabilitación acústica en las fases iniciales, se comprobó que la eliminación de la esquina de fondo del centro de la iglesia incorporando un panel absorbente que achaflanaba el encuentro de los muros de fondo, además de reducir el volumen de la iglesia, contribuía notablemente a la mejora del tiempo de reverberación.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_s (ms)	MEDIDO Vacío	203,83	250,25	301,92	296,92	232,33	172,92
		15,12	19,03	18,26	14,11	12,18	9,29
	SIMULADO EA Vacío	187,96	244,68	285,56	280,20	233,66	185,85
		10,60	11,25	12,94	12,68	12,14	11,97
	SIMULADO EA Ocupado	128,91	139,28	128,14	110,68	96,69	88,03
		7,78	7,68	8,71	7,43	6,65	6,39
SIMULADO RE Vacío	134,89	92,24	62,15	55,82	55,44	50,02	
	6,42	4,70	5,79	6,01	6,19	5,74	
SIMULADO RE Ocupado	105,05	80,21	57,29	49,15	46,00	39,59	
	6,19	5,09	5,26	6,18	5,93	4,97	

Tabla 6.5.20. Valores del tiempo central T_s (ms). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

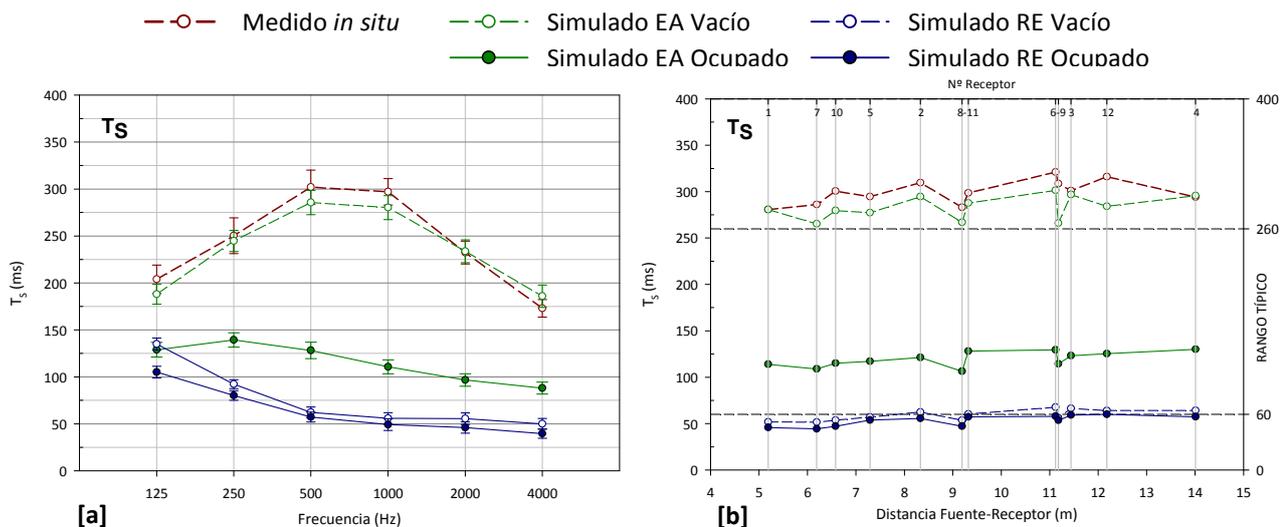


Figura 6.5.34. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

En la gráfica 6.5.34 [a], se observa las actuaciones propuestas disminuyen considerablemente los valores del tiempo central (T_s), lo que se traducirá en una mayor nitidez en el sonido percibido. Para la iglesia vacía, la reducción media de este parámetro es aproximadamente del 50% para sonidos graves, mientras que para frecuencias medias y altas la disminución varía entre el 75 y 80%, respecto los valores originales medidos.

Al representar los valores del tiempo central en cada punto de recepción (gráfica 6.1.34 [b]), vemos que, para las configuraciones de iglesia vacía y ocupada, todos los resultados se encuentran en torno al límite inferior del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D_{50}	MEDIDO Vacío	0,27	0,17	0,14	0,16	0,22	0,27
		0,08	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05
	SIMULADO EA Vacío	0,27	0,20	0,17	0,17	0,20	0,24
		0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04
	SIMULADO EA Ocupado	0,37	0,33	0,35	0,39	0,42	0,45
		0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
	SIMULADO RE Vacío	0,36	0,47	0,60	0,63	0,63	0,66
		0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04
	SIMULADO RE Ocupado	0,44	0,52	0,64	0,68	0,69	0,73
		0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04

Tabla 6.5.21. Valores de la definición D_{50} . Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo) Fuente 1.

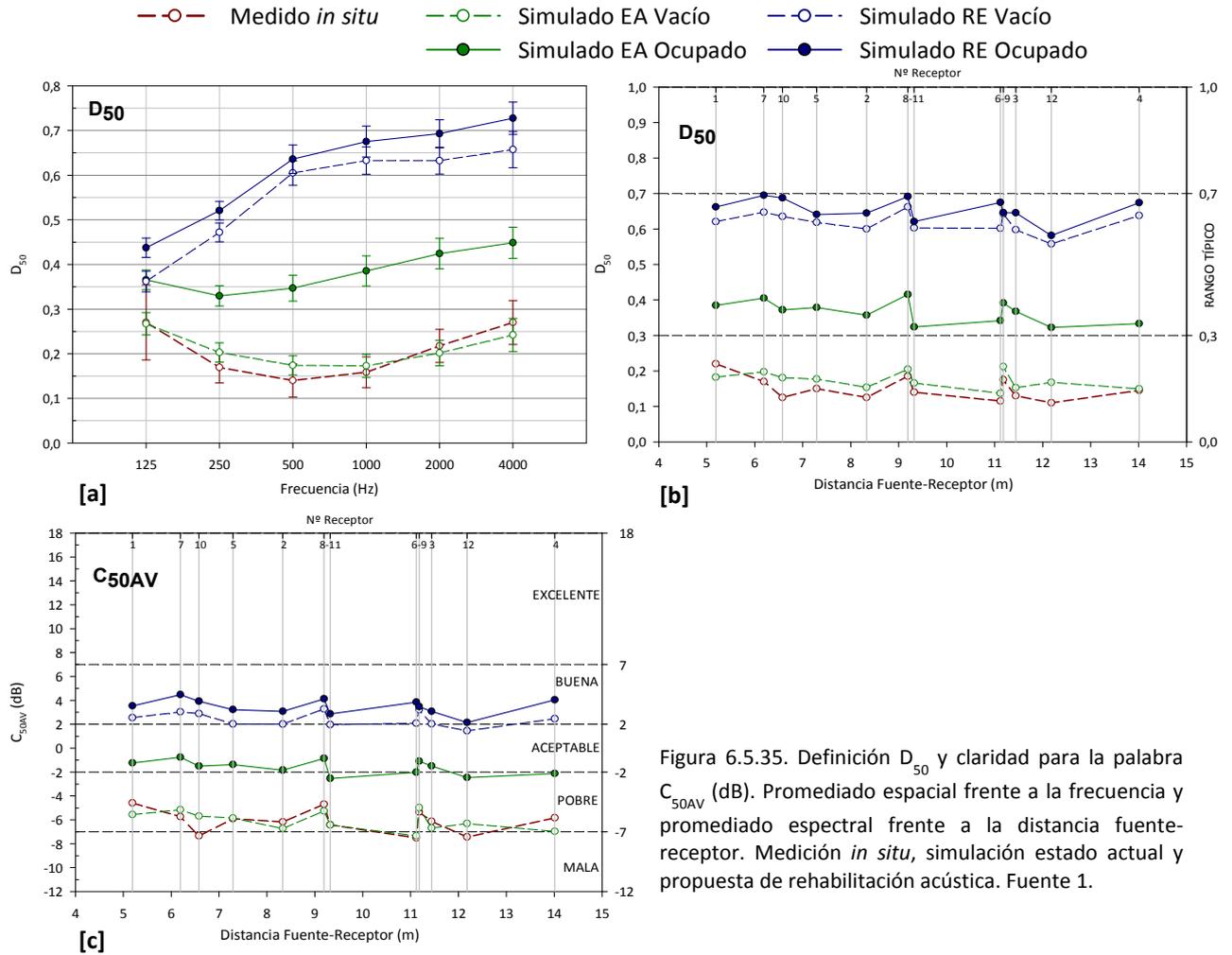


Figura 6.5.35. Definición D_{50} y claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Analizando la figura 6.5.35 [a], puede comprobarse que la definición (D_{50}), mejora sensiblemente sus resultados. Esta mejora es especialmente relevante a medias y altas frecuencias, con aumentos del D_{50} entre 0,25 y 0,45 dependiendo de las frecuencias implicadas y del estado de ocupación.

En cuanto a la representación de resultados en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.5.35 [b]), vemos que al introducir la propuesta de mejora, todos los valores, para ambas configuraciones de ocupación, se encuentra cercanos al límite superior del rango típico que recoge la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

La escala de interpretación de Marshall, califica la claridad para la palabra (figura 6.5.35 [c]) como buena, tanto para la iglesia vacía como ocupada.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C_{80} (dB)	MEDIDO Vacío	-2,92	-4,53	-5,40	-5,25	-3,43	-2,09
		1,47	1,19	1,12	1,03	0,86	0,81
	SIMULADO EA Vacío	-2,45	-4,02	-4,83	-4,83	-3,93	-2,78
		0,54	0,58	0,61	0,71	0,70	0,80
	SIMULADO EA Ocupado	-0,34	-0,96	-0,57	0,24	1,02	1,55
		0,44	0,45	0,57	0,59	0,63	0,61
	SIMULADO RE Vacío	-0,50	1,64	4,08	4,68	4,77	5,45
		0,34	0,32	0,54	0,63	0,65	0,82
	SIMULADO RE Ocupado	0,98	2,54	4,64	5,51	5,96	6,96
		0,35	0,36	0,65	0,79	0,82	0,76

Tabla 6.5.22. Valores de la claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

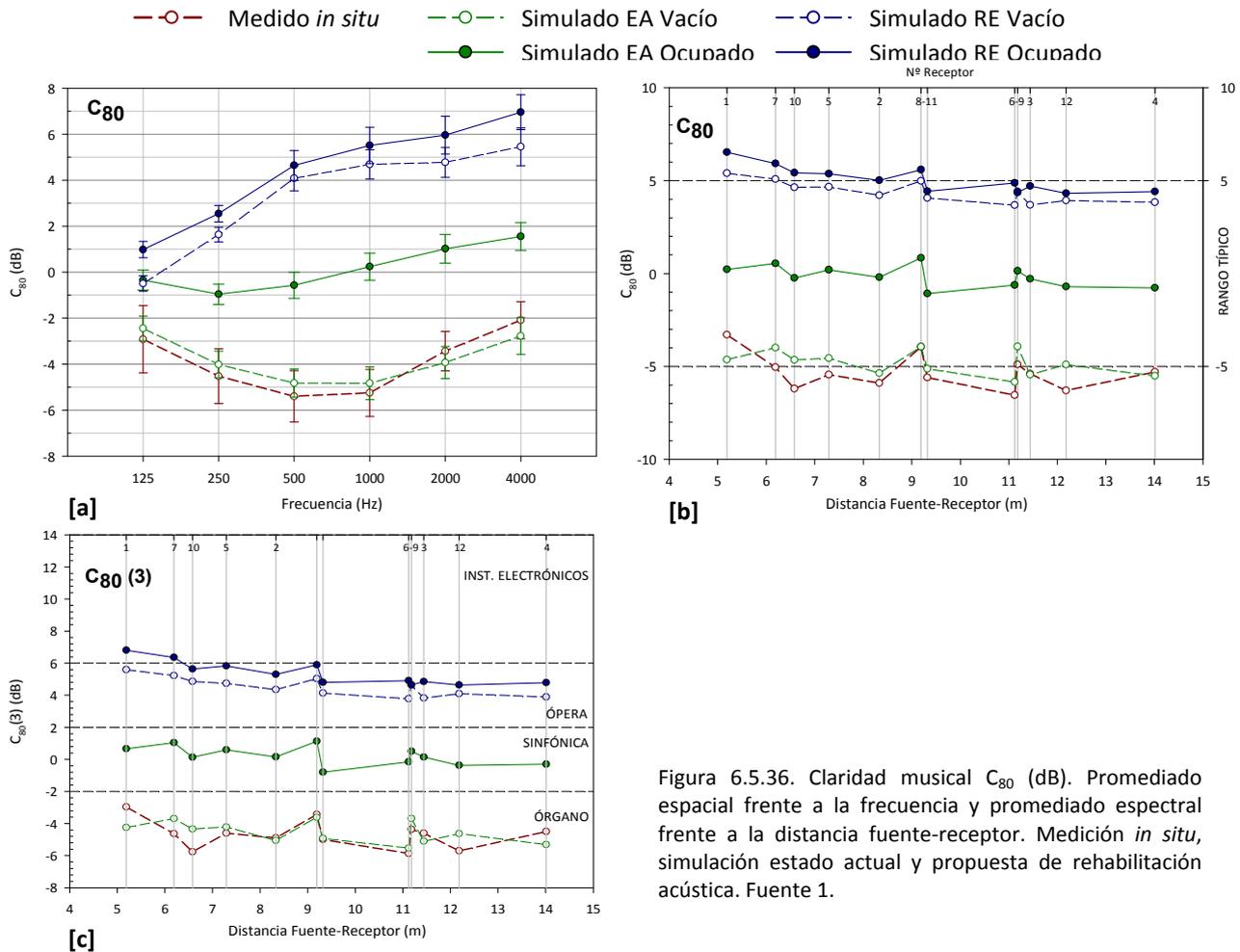


Figura 6.5.36. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

De forma similar a la claridad de la palabra, la claridad musical (C_{80}) mejora sensiblemente con la propuesta de rehabilitación acústica (figura 6.5.36).

Al representar el promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor de este parámetro (figura 6.5.36 [b]), puede comprobarse que, con la sala vacía, se ha pasado del límite inferior al superior del rango típico al superior, es decir, la mejora del C_{80} es de aproximadamente +10dB. Los resultados obtenidos para el $C_{80}(3)$ (figura 6.5.36 [c]) muestran que tanto para la iglesia vacía como ocupada, el recinto tiene la claridad musical necesaria para representaciones de ópera.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.5.37, se aportan los mapas de resultados de la claridad musical (C_{80}) global en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA) y tras la propuesta de rehabilitación acústica (RE), ambos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente coincidente con el altar.

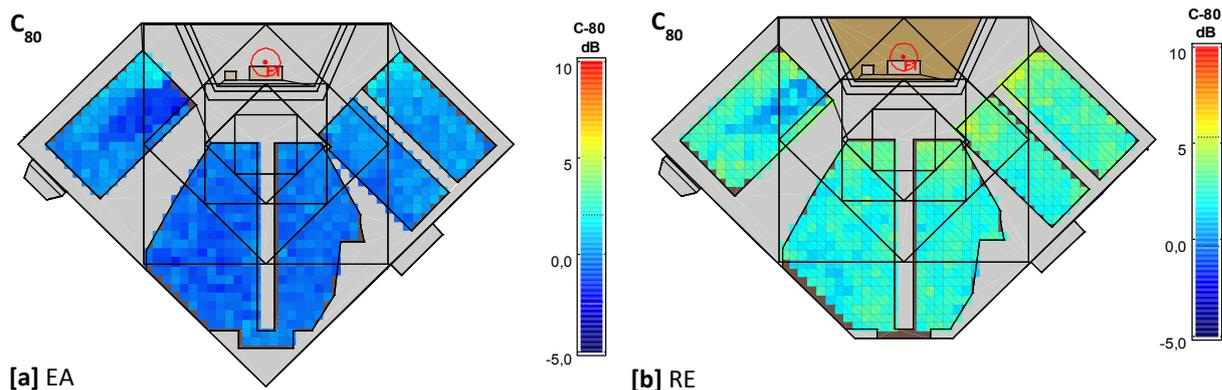


Figura 6.5.37. Claridad musical C_{80} global (dB). Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

En el mapa del estado actual (figura 6.5.37 [a]), se observa que el rango de valores del C_{80} oscila entre -2.5 y +2.5 dB, registrándose los niveles más altos en las zonas laterales de la audiencia más cercanas a la fuente sonora y, a la vez, más influenciadas por las reflexiones provenientes de la pared de fondo del presbiterio y de las paredes laterales. Salvo esta precisión, la distribución espacial de la claridad musical es bastante homogénea en la superficie de la audiencia, registrándose valores similares en la totalidad de la misma.

Con la propuesta de rehabilitación (figura 6.5.37 [b]), los valores de la claridad musical aumentan sensiblemente (ahora están por encima de 0 dB), manteniendo esa adecuada distribución espacial sobre la audiencia, similar al estado actual anterior.

En general, los resultados de las magnitudes acústicas relacionadas con el aspecto subjetivo del oyente sobre claridad del sonido percibida, mejoran notablemente con la propuesta de rehabilitación acústica. Al igual que en otras iglesias analizadas, es de destacar que, en todos los parámetros analizados de este grupo, el comportamiento de la iglesia vacía tras la intervención no es tan deficiente como en el estado actual, existiendo muy poca diferencia entre los resultados de las hipótesis de iglesia vacía y ocupada.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	MEDIDO Vacío	18,81	20,36	17,49	15,77	16,36	14,60
		1,53	1,48	1,54	1,88	3,89	2,26
	SIMULADO EA Vacío	14,01	15,28	16,09	15,96	15,04	14,01
		0,43	0,37	0,32	0,32	0,37	0,46
	SIMULADO EA Ocupado	11,87	12,47	12,01	11,18	10,52	10,17
		0,71	0,66	0,73	0,81	0,93	1,00
	SIMULADO RE Vacío	12,52	10,66	8,58	8,08	8,01	7,74
		0,54	0,71	0,96	1,04	0,90	1,05
	SIMULADO RE Ocupado	11,19	9,87	7,90	7,18	6,92	6,57
		0,69	0,84	1,03	1,15	1,15	1,19

Tabla 6.5.23. Valores de la fuerza sonora G (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

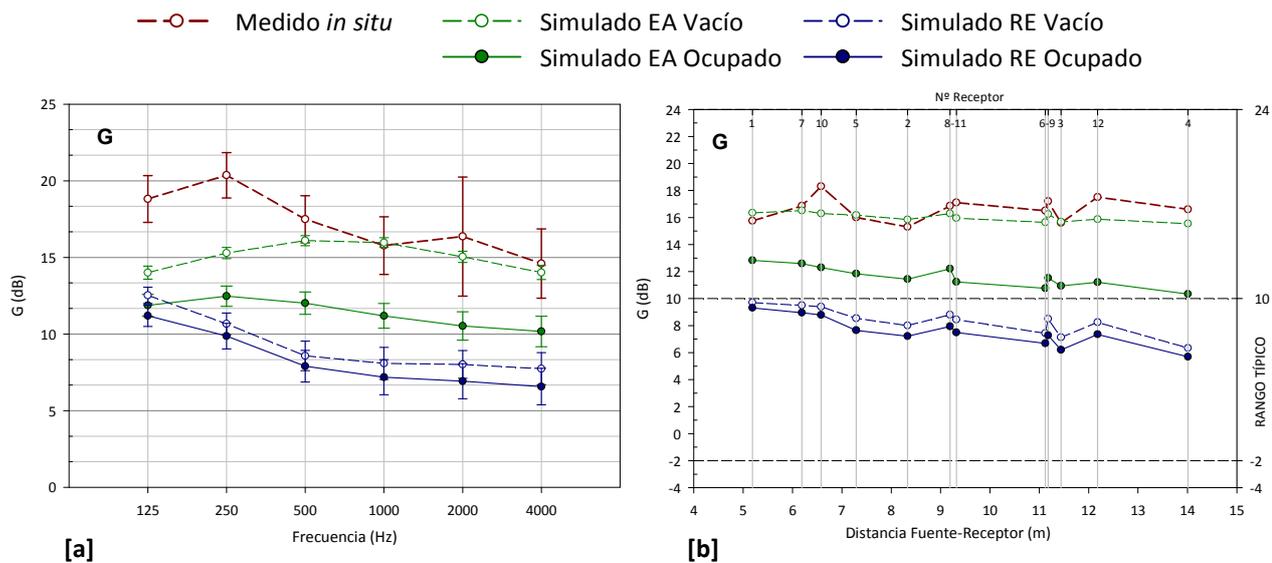


Figura 6.5.38. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Como en otras iglesias de la muestra en las que se han disminuido los elevados tiempos de reverberación, los resultados de la fuerza acústica (G) bajan sensiblemente con respecto al estado actual.

En la hipótesis de iglesia vacía, la propuesta de rehabilitación disminuye los valores de G medidos en todas las frecuencias, un valor medio de 8 dB (figura 6.5.38 [a]), manteniendo una distribución espectral homogénea. Como puede observarse en la gráfica correspondiente al promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.5.38 [b]), para todos los puntos de recepción distribuidos en la zona de audiencia, tanto para la iglesia vacía como ocupada, los valores de G se sitúan dentro del rango típico (límite superior) de referencia.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.5.39, se aportan los mapas de resultados de la fuerza sonora G global en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA) y tras la propuesta de rehabilitación acústica (RE), ambos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente coincidente con el altar.

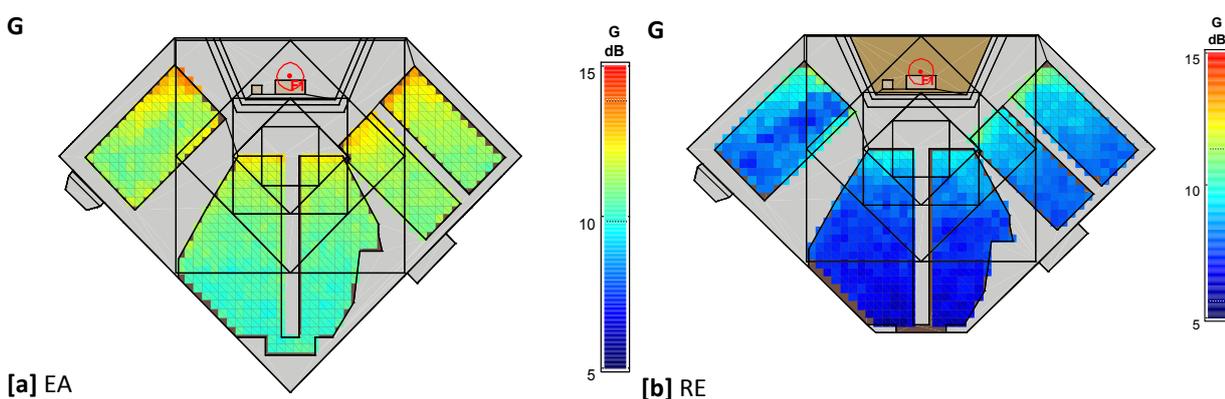


Figura 6.5.39. Fuerza sonora G global en dB. Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

En el mapa de la figura 6.5.39 [a], se representa la distribución espacial de la fuerza sonora (G) correspondiente a la simulación del estado actual. En este estado, el nivel sonoro se aprecia homogéneo sobre la superficie de audiencia, con un valor medio de 11,11 dB y desviación estándar de 0,71 dB. Los valores más altos se registran en las zonas delanteras de la audiencia más cercanas a la fuente sonora, mientras que los valores más bajos corresponden a los puntos de la audiencia más alejados de la fuente.

Con la propuesta de rehabilitación (figura 6.5.39 [b]) y la incorporación de los nuevos revestimientos absorbentes en el recinto, los valores de la fuerza sonora decrecen una media aproximada de -3 dB. En este caso, el valor medio de la fuerza acústica pasa a ser de 8,11 dB y la desviación estándar de 1,02 dB.

Impresión espacial

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
J_{LF}	MEDIDO Vacío	0,13 0,10	0,16 0,07	0,20 0,08	0,25 0,09	0,19 0,05	0,24 0,06
	SIMULADO EA Vacío	0,46 0,14	0,35 0,11	0,48 0,18	0,40 0,12	0,38 0,09	0,38 0,06
	SIMULADO EA Ocupado	0,49 0,15	0,37 0,12	0,40 0,10	0,36 0,07	0,33 0,04	0,33 0,06
	SIMULADO RE Vacío	0,49 0,21	0,40 0,13	0,44 0,13	0,36 0,09	0,31 0,09	0,32 0,08
	SIMULADO RE Ocupado	0,49 0,20	0,40 0,23	0,44 0,20	0,32 0,09	0,31 0,09	0,30 0,10
	$IACC_E$	MEDIDO Vacío	0,93 0,05	0,80 0,08	0,44 0,16	0,27 0,10	0,22 0,08
SIMULADO EA Vacío		0,95 0,02	0,79 0,07	0,38 0,14	0,42 0,11	0,40 0,13	0,60 0,08
SIMULADO EA Ocupado		0,95 0,01	0,79 0,05	0,39 0,12	0,38 0,12	0,44 0,10	0,58 0,12
SIMULADO RE Vacío		0,95 0,02	0,76 0,07	0,37 0,14	0,43 0,10	0,48 0,15	0,59 0,10
SIMULADO RE Ocupado		0,95 0,02	0,77 0,09	0,42 0,17	0,43 0,10	0,52 0,13	0,58 0,11

Tabla 6.5.24. Valores de la fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

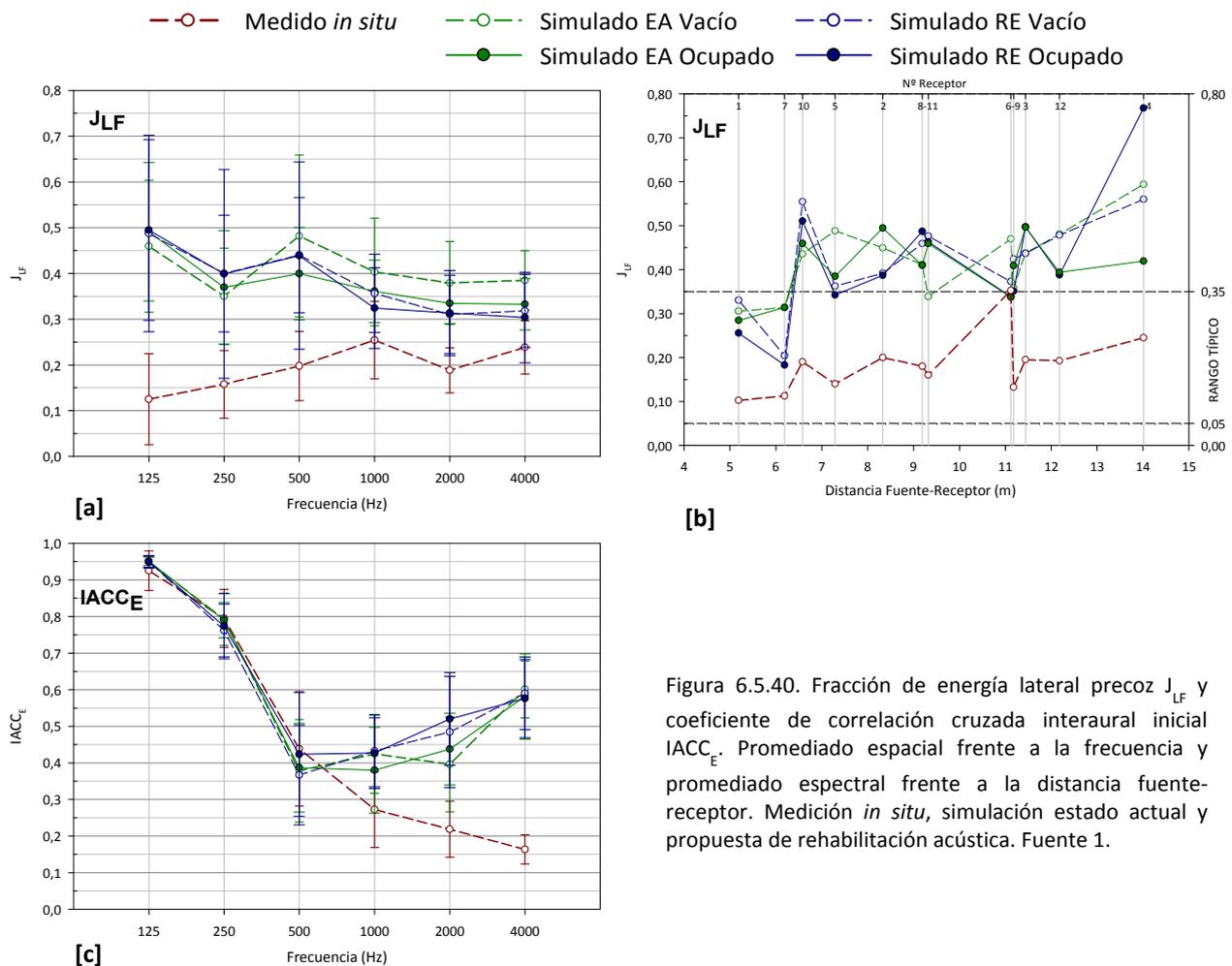


Figura 6.5.40. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACC_E$. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

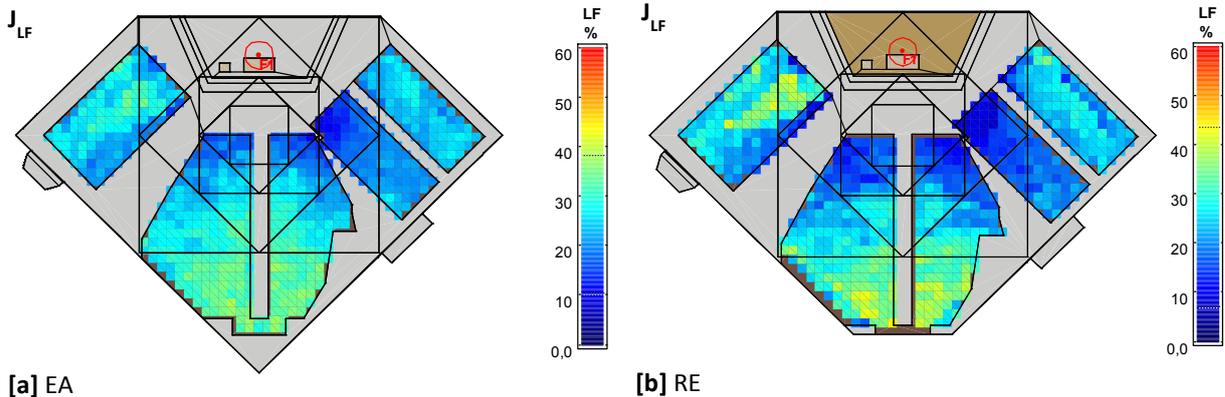
Como se observa en la figura 6.5.40 [a], los resultados de la fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) simulados en las distintas hipótesis, aparecen desplazados verticalmente con respecto a la medida del estado actual. Esto nos hace pensar que como mínimo, y suponiendo que la simulación del estado actual vacío debería aproximarse a la medición *in situ*, la iglesia mantendrá unas condiciones de espacialidad parecidas a las originales.

Algo similar ocurre con la representación de J_{LF} en cada punto en función de su distancia a la fuente (figura 6.5.40 [b]). En este caso, incluso, las simulaciones quedan por encima del límite superior del rango típico de referencia.

Con el coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACC_E$) no ocurre lo mismo. De la lectura de la figura 6.5.40 [c], podemos afirmar que en todas las simulaciones el valor de este parámetro permanece prácticamente invariable hasta la frecuencia de 500 Hz, mientras que para el resto del espectro aumenta su valor con la frecuencia disminuyendo, por tanto, la información espacial asociada al recinto. Salvo a la frecuencia de 2000 Hz, las diferencias entre los resultados simulados del estado actual y con la propuesta son inferiores a 1 JND, corroborando la información aportada por el J_{LF} , sobre el mantenimiento de las condiciones de espacialidad existentes.

En la figura 6.5.41, se representa la distribución espacial de la fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) global sobre la superficie de la audiencia. Como de costumbre, el mapa de la izquierda corresponde a la simulación del estado actual y el de la derecha a la propuesta de rehabilitación. De la comparación de ambos mapas podemos afirmar que la espacialidad en muchos puntos de la zona de audiencia mejora sobre el estado inicial. En concreto, el aumento de este indicador se observa en la zona central de fondo de la iglesia y en los bancos laterales. Esta mejora la atribuimos especialmente a dos actuaciones: 1) en primer lugar, la incorporación de absorción sobre el techo, que da más

protagonismo a las reflexiones de las paredes laterales y; 2) al chaflán absorbente que se introduce en el fondo de la iglesia.



[a] EA [b] RE
Figura 6.5.41. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} global (%). Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

6.5.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)

Con el fin de evaluar los resultados de la inteligibilidad de la iglesia, en la tabla 6.5.25 y en figura 6.5.42, se presentan los valores obtenidos del *Speech Transmission Index* (STI). Junto a las hipótesis estudiadas para el resto de parámetros acústicos, en este caso, volvemos a añadir los resultados correspondientes a la simulación de la propuesta de rehabilitación acústica con apoyo electroacústico (AE) vacío y ocupado.

CONFIGURACIÓN		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
STI	MEDIDO Vacío	0,41	0,35	0,36	0,13	0,36	0,28	0,29	0,23	0,27	0,32	0,16	0,17
	SIMULADO EA Vacío	0,38	0,35	0,37	0,36	0,37	0,35	0,40	0,40	0,41	0,38	0,37	0,38
	SIMULADO EA Ocupado	0,51	0,50	0,52	0,51	0,51	0,50	0,54	0,53	0,53	0,52	0,49	0,50
	SIMULADO RE Vacío	0,62	0,59	0,60	0,61	0,60	0,60	0,63	0,63	0,64	0,62	0,60	0,61
	SIMULADO RE Ocupado	0,66	0,62	0,63	0,66	0,63	0,65	0,68	0,67	0,66	0,66	0,63	0,64
	SIMULADO RE+AE Vacío	0,67	0,64	0,67	0,68	0,66	0,66	0,75	0,71	0,65	0,73	0,73	0,68
	SIMULADO RE+AE Ocupado	0,73	0,70	0,73	0,71	0,72	0,70	0,78	0,77	0,72	0,78	0,78	0,73

Tabla 6.5.25. Valores del índice de transmisión de la palabra STI en cada punto de recepción. Fuente 1.

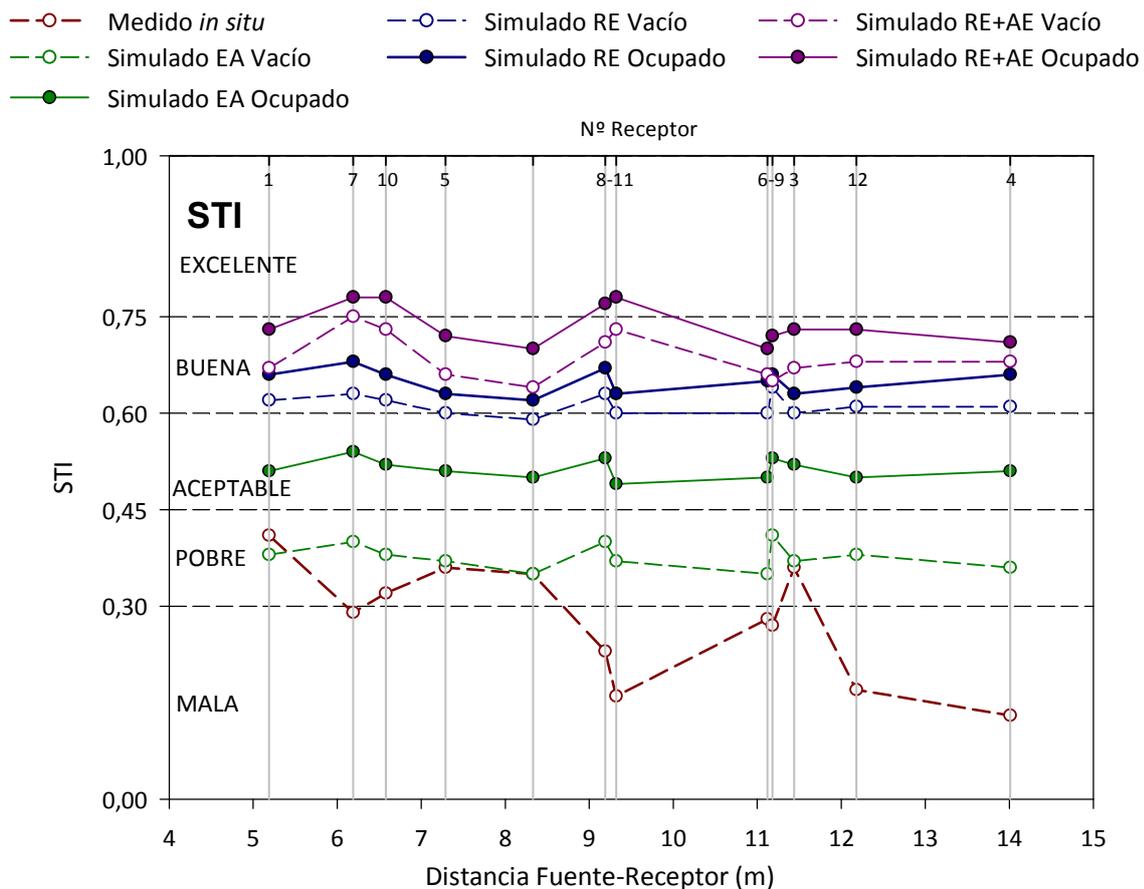


Figura 6.5.42. Índice de transmisión de la palabra STI frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual, propuesta de rehabilitación acústica y apoyo electroacústico. Fuente 1.

Como puede observarse, los valores del índice STI medidos *in situ* en la iglesia vacía, califican la inteligibilidad en los distintos puntos del recinto entre pobre y mala. En la simulación con la iglesia ocupada al 100%, los valores pasan a ser aceptables.

Con la propuesta de rehabilitación se mejoran sensiblemente los resultados de la inteligibilidad. En las dos configuraciones, vacía y ocupada, la inteligibilidad pasa a ser buena en casi todos los puntos de recepción. El aumento medio de este parámetro es del 60% y 27%, respectivamente, para la sala vacía y ocupada, respecto de los valores obtenidos en las simulaciones del estado actual.

Con el objetivo de alcanzar una máxima inteligibilidad, se han realizado distintas simulaciones con varios tipos de altavoces, variando además su posición, altura y orientación. El sistema propuesto consta de dos altavoces de columna (marca Duran Audio BV, modelo DC180 Axys Intellivox), dispuestos a ambos lados del presbiterio a una altura de 1,90 m desde el suelo al centro del altavoz (figura 6.5.43). Estos altavoces incorporan la tecnología *Digital Directivity Control (DDC)* que permite controlar el patrón de directividad vertical del producto *intellivox* y dirigir el sonido hacia el oyente, manteniendo una cobertura uniforme en el plano de audiencia y apartando el haz de las superficies que pueden causar reflexiones no deseadas. El sistema permite obtener relaciones entre sonido directo y reverberante muy elevadas, situación que favorece la adecuada inteligibilidad de la palabra.

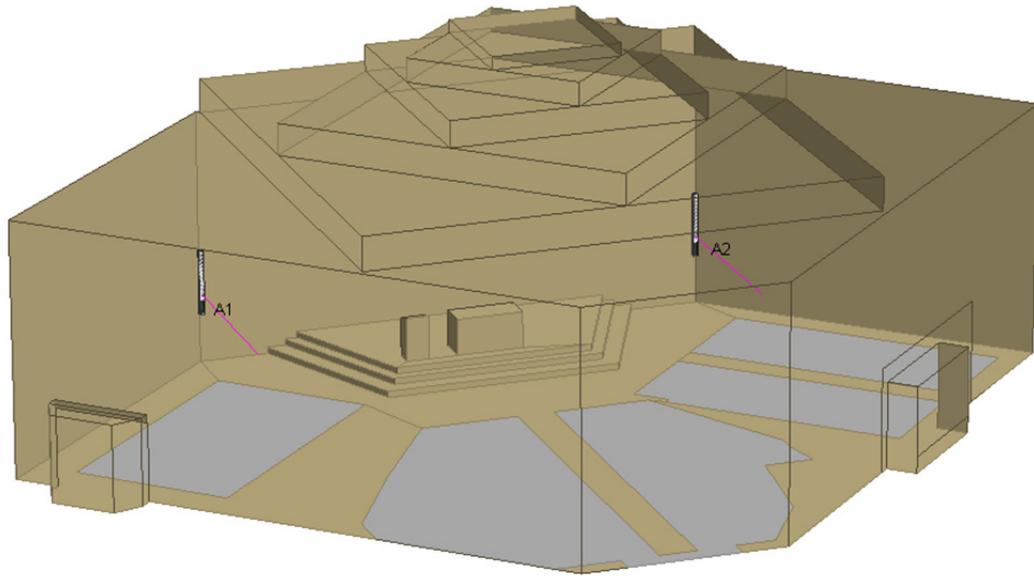
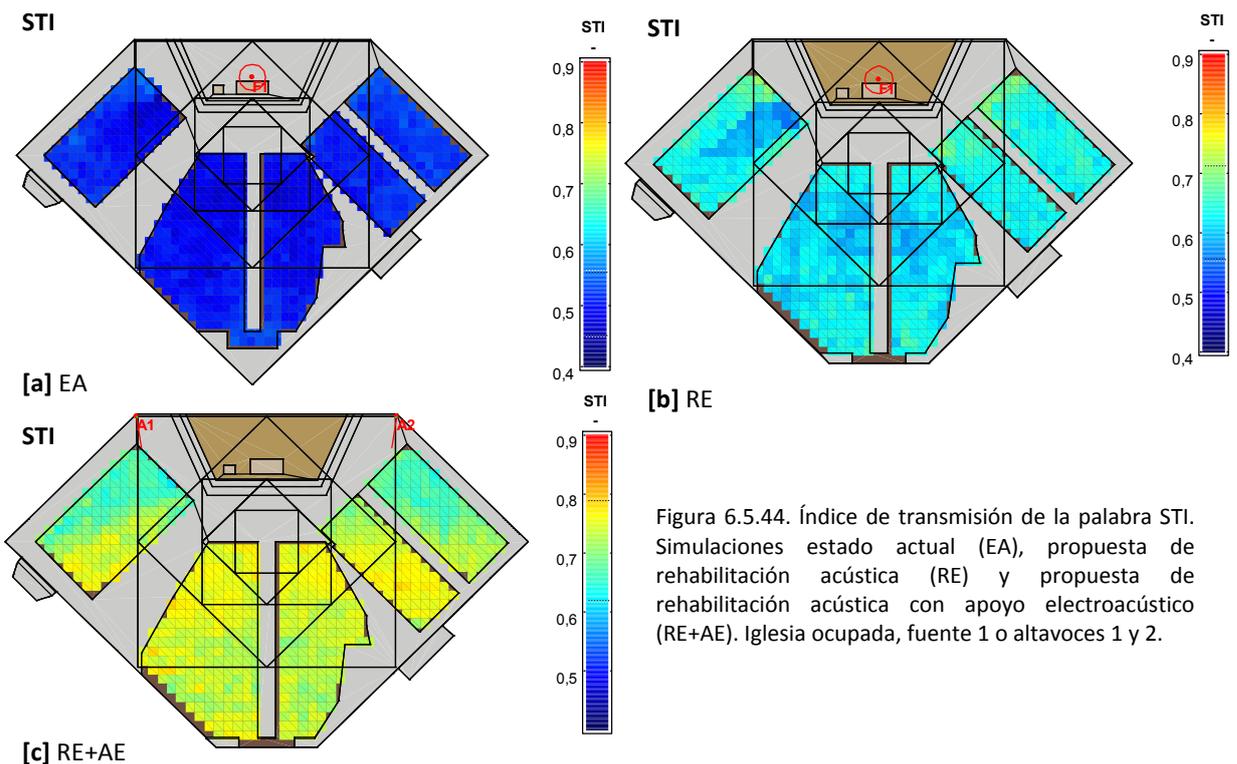


Figura 6.5.43. Modelo tridimensional: posición de altavoces.

Como puede observarse en la figura 6.5.42, el uso del apoyo electroacústico en el recinto aumenta los resultados del STI en todos los puntos distribuidos en el área de la audiencia. La mejora es de un 13% y 14% en la hipótesis de sala vacía y ocupada, respectivamente. Con el sistema implementado, la inteligibilidad pasa a calificarse como buena, con la iglesia vacía, y entre buena y excelente cuando los fieles ocupan los bancos. Hay que tener en cuenta que sólo con la propuesta de rehabilitación la inteligibilidad era buena en todos los puntos de recepción.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.5.44 se aportan los mapas de resultados del índice de transmisión de la palabra (STI), correspondientes a la simulación del estado actual (EA), tras la propuesta de rehabilitación acústica (RE) y tras dicha propuesta con la utilización del sistema de apoyo electroacústico (RE+AE), todos ellos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente en el altar o los altavoces dispuestos en el presbiterio.



En los dos primeros mapas del índice STI (figura 6.5.44 [a] y [b]), correspondiente al estado actual (EA) y la propuesta de rehabilitación (RE), podemos observar que la inteligibilidad de la palabra es bastante homogénea en toda la zona de audiencia. Con la propuesta, se observa claramente un aumento de este parámetro y, por lo tanto, de la capacidad de entendimiento de las palabras pronunciadas por un orador. En esta última situación, el valor medio obtenido es de 0,63, que corresponde a una inteligibilidad calificada como buena.

Con la incorporación del sistema de apoyo electroacústico (figura 6.5.44 [c]), la distribución espacial del STI deja ser tan homogénea, pero a cambio se mejora la inteligibilidad en gran parte de la zona de audiencia. La adición de la propuesta de rehabilitación y la implementación del sistema de megafonía eleva el valor medio en la zona de audiencia hasta 0,73. Asimismo, el mapa de distribución indica que es en las franjas laterales de la audiencia donde se registran los valores más bajos del STI, debido a la abertura de las paredes laterales que formalizan la disposición asamblearia.

6.5.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO

Los valores de absorción sonora global para las distintas zonas de la iglesia de Nuestra Señora Flor del Carmelo, en sus dos configuraciones y grados de ocupación, se presentan en la tabla 6.5.26 y gráficamente en la figura 6.5.45. Recordemos que el desglose de resultados de absorción sonora a frecuencias bajas, medias y altas, se aportan en la figura A2.7 del anexo 2.

REVESTIMIENTO	ABSORCIÓN SONORA (m ²)			
	EA VACÍO	EA OCUP	RE VACÍO	RE OCUP
TECHO	52,23	52,23	240,83	240,83
BANCOS	37,83	169,10	66,49	166,59
MUROS DE FONDO	9,75	9,75	33,57	33,57
SUELO PRESBITERIO	0,31	0,31	9,79	9,79
OTROS MATERIALES	6,83	6,83	3,45	3,45
ABSORCIÓN TOTAL (A_t)	106,95	238,23	354,13	454,23

Tabla 6.5.26. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²).

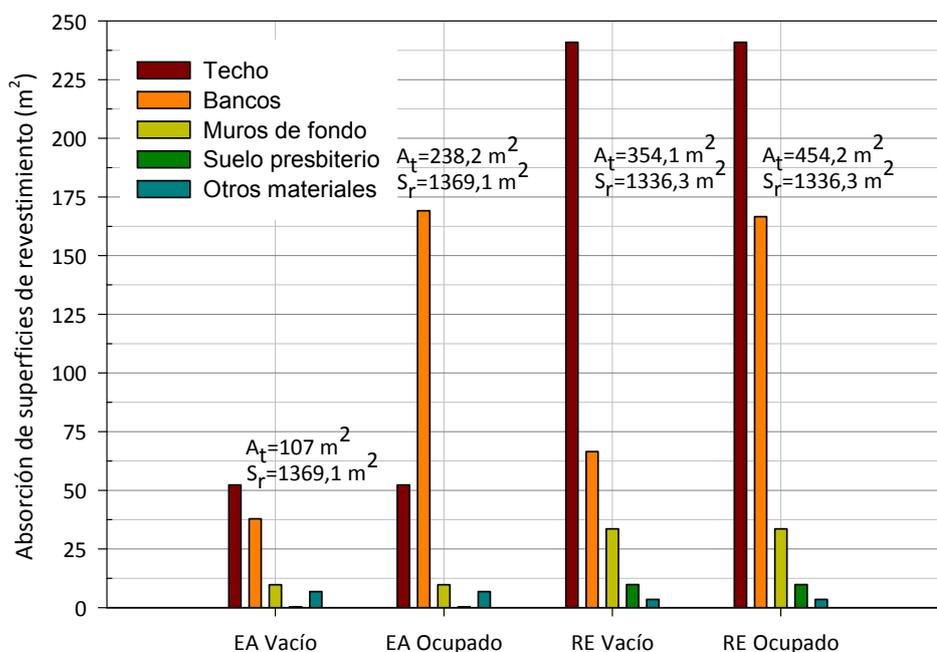


Figura 6.5.45. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promediados en frecuencia del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica (RE).

En el estado actual, prácticamente la mitad de la absorción sonora total de la iglesia vacía corresponde al techo de viguetas metálicas y hormigón aplastillado (48%), debido a la elevada

absorción a frecuencias bajas de este elemento (ver figura A2.7 del anexo 2). Al igual que en las demás iglesias, la diferencia de absorción sonora de los bancos vacíos y los ocupados es muy significativa.

La propuesta de rehabilitación acústica eleva considerablemente la absorción sonora del techo, sobre todo a medias y altas frecuencias, constituyendo el 68% y 53% de la absorción total, para el recinto vacío y ocupado, respectivamente. Asimismo, la intervención propuesta aumenta la absorción sonora en los muros de fondo, en el suelo del presbiterio y en los bancos para los fieles. Esta última operación disminuye la diferencia entre ambos estados de ocupación.

Como en la iglesia de Santa Ana, la superficie total de revestimientos (S_r) disminuye al eliminar el chaflán formado por los muros de fondo. Sin embargo, la intervención propuesta eleva la absorción sonora total asociada a los revestimientos, siendo 3,3 y 1,9 veces superior a la absorción del estado actual, para el recinto vacío y ocupado, respectivamente.

6.5.3.7. CONCLUSIONES

A pesar de haber proyectado y construido esta iglesia casi veinte años después del Concilio Vaticano II, parece que las cuestiones acústicas no fueron un objetivo claro en este proyecto de Fisac, frente a otros aspectos postconciliares, como la formalización del espacio de la asamblea. Su incondicional fidelidad al programa, a pesar de que, como él mismo decía, los padres carmelitas le pedían *cosas bastante raras*, y su trayectoria profesional centrada, en este momento, en la investigación de las posibilidades plásticas del hormigón, fueron las principales razones del proyecto.

Sin embargo, sus moderadas dimensiones y volumen interior unido a la propia forma de la iglesia en planta, resultado del giro de un cuadrado truncado en un vértice, son aspectos favorables desde el punto de vista acústico, en combinación con una correcta disposición de elementos absorbentes sonoros. La disposición de las dos paredes de fondo oblicuas (en planta) favorecen las reflexiones sobre el área de la audiencia. En cambio, el lucernario central del techo tiene un comportamiento similar al de una cúpula, produciéndose gran cantidad de reflexiones tardías que son desfavorables. De ahí la incorporación de elementos absorbentes en el mismo.

Como se pudo comprobar en los análisis del estado actual, la carencia de absorción sonora de todos los revestimientos interiores da lugar a elevados tiempos de reverberación y, como consecuencia, a una deficiente inteligibilidad de la palabra y claridad musical, aun cuando, la impresión espacial era buena, como se deduce de los resultados de los parámetros medidos *in situ*.

La propuesta de rehabilitación acústica consigue corregir estas deficiencias, realizando un conjunto de actuaciones totalmente reversibles, que no desvirtúan los aspectos espaciales, formales y materiales con que el arquitecto concibió el proyecto.

Finalmente, de nuevo vuelve a ponerse de manifiesto que un adecuado sistema de apoyo electroacústico, en combinación con una estudiada elección de revestimientos absorbentes y reflectantes, pueden llegar a mejorar uno de los aspectos que más importancia tienen en el uso cotidiano de estos recintos de culto: la inteligibilidad de la palabra.



6.6. IGLESIA PARROQUIAL DE SANTIAGO. PUMAREJO DE TERA

Plaza de José Onega. Pumarejo de Tera (Zamora)

Fecha de construcción: 1984

Bien de Interés Cultural (BIC) con categoría de monumento

6.6.1. DATOS GENERALES E INFORMACIÓN

Asentada sobre la traza de la antigua iglesia, la cual se había hundido y de la que el arquitecto decidió conservar la espadaña, se trata de una iglesia asamblearia, aunque las características del solar no permitieron la abertura deseada de los muros laterales.



Figura 6.6.1. Vista interior hacia el presbiterio.



Figura 6.6.2. Vista interior desde el presbiterio.

El cerramiento se resuelve mediante muros de mampostería realizados por los habitantes del pueblo, con las piedras traídas de cerros cercanos de Villageriz, que armonizan con la espadaña restaurada y con el paisaje urbano. La estructura de cubierta queda vista por el interior y está formada por cerchas tridimensionales de tubo de acero en el sentido longitudinal de la nave (figura 6.6.3), sobre las que se colocaron los paneles de viruta de madera prensada y las piezas de pizarra como terminación (figura 6.6.4).



Figura 6.6.3. Detalle de estructura de cubierta.



Figura 6.6.4. Detalle de panel de cubierta.

Como en proyectos anteriores, el muro izquierdo envuelve el presbiterio, que se ilumina lateralmente al encontrarse con el muro derecho. Asimismo, el muro posterior, con traza en forma de V, permite la iluminación en su centro y dispersa las ondas sonoras, realizándose el acceso al templo desde el lateral. Se trata de un templo oscuro, contando tan sólo con dichas aberturas de luz a modo de vidrieras rasgadas verticalmente en el muro de piedra, formadas por piezas de u-glass.



Figura 6.6.5. Presbiterio.



Figura 6.6.6. Iluminación presbiterio.



Figura 6.6.7. Iluminación muro posterior.

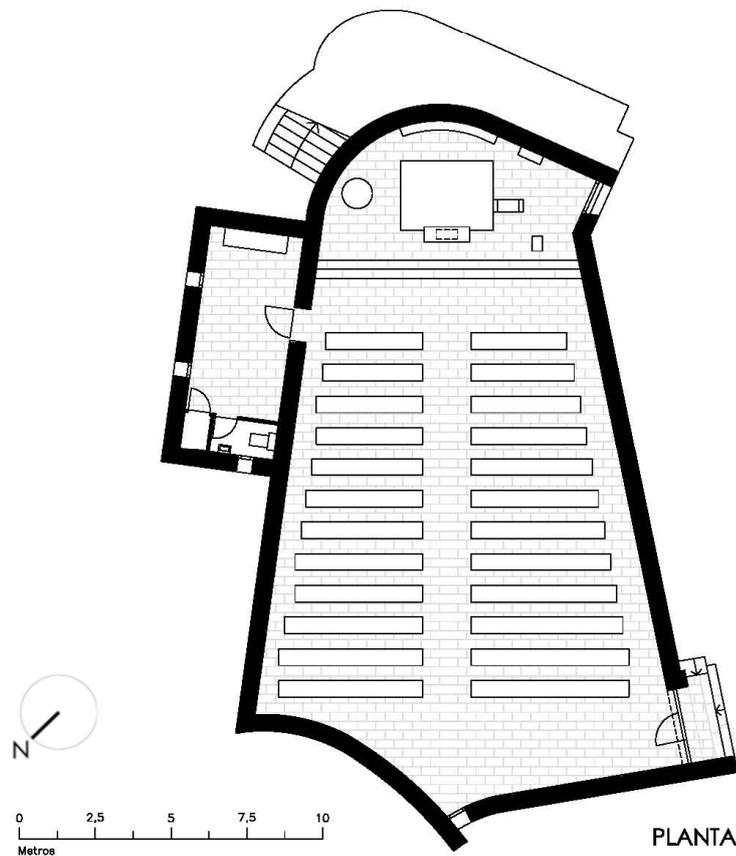
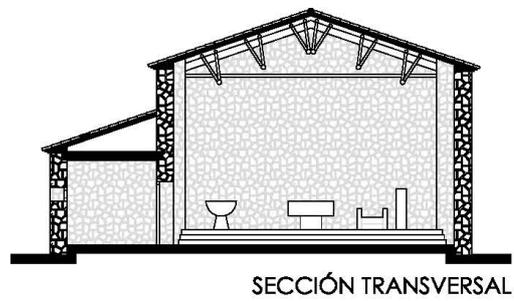
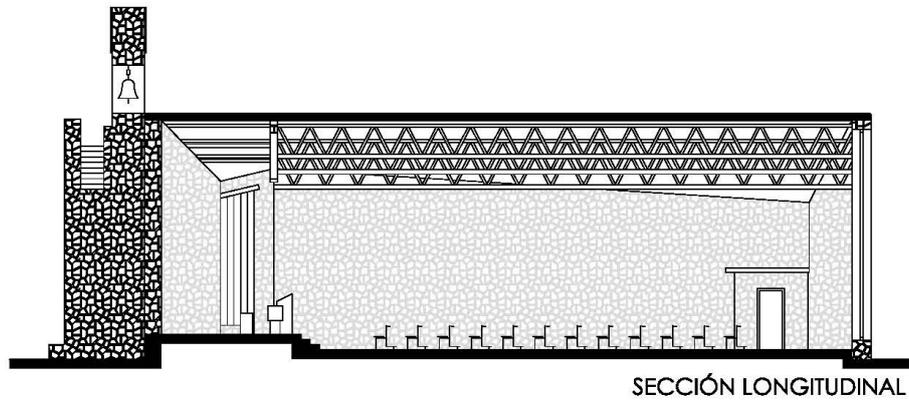


Figura 6.6.8. Plano de planta, sección transversal y sección longitudinal.

DATOS GEOMÉTRICOS Y DE AFORO	
VOLUMEN	
Volumen interior iglesia (V):	1424 m ³
SUPERFICIES	
Superficie útil iglesia:	227,4 m ²
Superficie construida iglesia:	262,7 m ²
Superficie de revestimientos:	876,4 m ²
Superficie del presbiterio:	38,3 m ²
Superficie de bancos:	100,3 m ²
Superficie acústica efectiva audiencia (S _A):	134,38 m ²
Superficie de pasillos:	88,8 m ²
DIMENSIONES	
Longitud media:	20,8 m
Anchura media:	10,4 m
Altura media:	6,6 m
AFORO (N)	193 personas
RELACIONES GEOMÉTRICAS	
V / N	7,38 m ³ /plaza
V / S _A	10,60 m ³ /m ²
S _A / N	0,70 m ² /plaza

Tabla 6.6.1. Datos geométricos y de aforo.

MATERIALES DE REVESTIMIENTO Y ACABADOS INTERIORES	
Suelo fieles:	Pizarra
Suelo presbiterio:	Pizarra
Techo:	Cerchas metálicas y paneles absorbentes de virutas de madera prensada
Paredes:	Piedra con junta abierta
Puertas:	Madera
Ventanas:	Vidrio U-glass
Altar:	Pizarra y piedra
Ambón:	Pizarra
Bancos:	Madera
Retablo:	Madera policromada

Tabla 6.6.2. Materiales de revestimiento y acabados interiores.

6.6.2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA DEL ESTADO ACTUAL

6.6.2.1. MEDICIÓN *IN SITU*. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

Como se indicó en el apartado 5.2.1 del capítulo 5, *Método de investigación*, la medida acústica *in situ* de esta iglesia se realizó el 14 de septiembre de 2010 a las 12:00 h, con una duración aproximada de tres horas. Se emplearon dos posiciones para la fuente sonora, según el uso habitual de la iglesia: la primera (F1), en el punto ocupado por el orador en el altar y, la segunda (F2), en el ambón donde se leen las lecturas (figura 6.6.9). Se distribuyeron diez posiciones para el micrófono receptor, cubriendo las diferentes zonas de audiencia, de forma que sus posiciones fueran representativas de la totalidad del espacio (figura 6.6.10). Los valores medios de las variables ambientales registradas durante las medidas fueron 21,5°C de temperatura y 40% de humedad relativa.



Figura 6.6.9. Receptor nº7 y fuente F2, situada en el ambón, durante la medición acústica *in situ*.

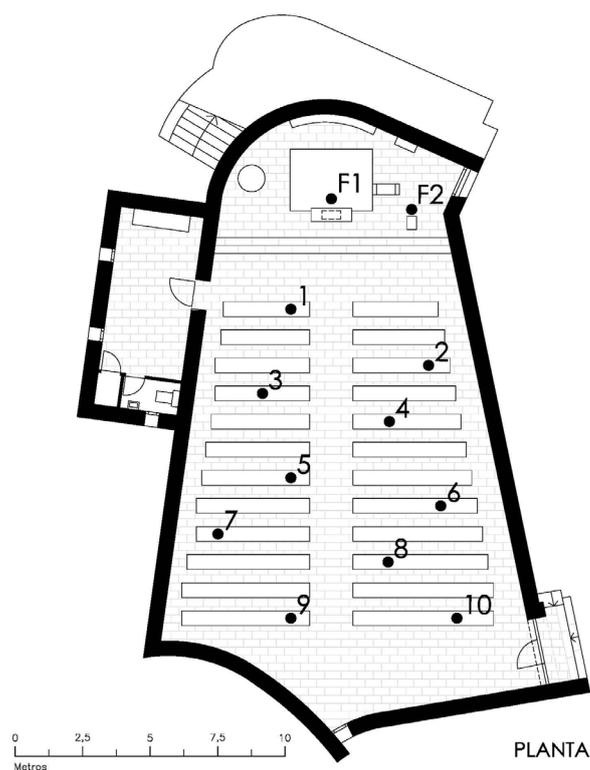


Figura 6.6.10 Posiciones de fuentes y receptores.

Reverberación

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_{30} (s)	F1	1,93	1,64	1,16	0,92	0,72	0,64
	σ F1	0,04	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01
	F2	1,87	1,62	1,17	0,91	0,73	0,64
	σ F2	0,07	0,08	0,06	0,02	0,01	0,01
	Óptimo palabra	1,10	0,97	0,84	0,76	0,76	0,76
Óptimo música	1,46	1,29	1,13	1,01	1,01	1,01	
EDT (s)	F1	1,96	1,54	0,91	0,72	0,66	0,61
	σ F1	0,22	0,22	0,24	0,11	0,04	0,06
	F2	1,67	1,48	0,90	0,75	0,70	0,62
	σ F2	0,35	0,23	0,08	0,10	0,05	0,07

Tabla 6.6.3. Valores promediados espacialmente del tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s).
¹Desviación estándar.

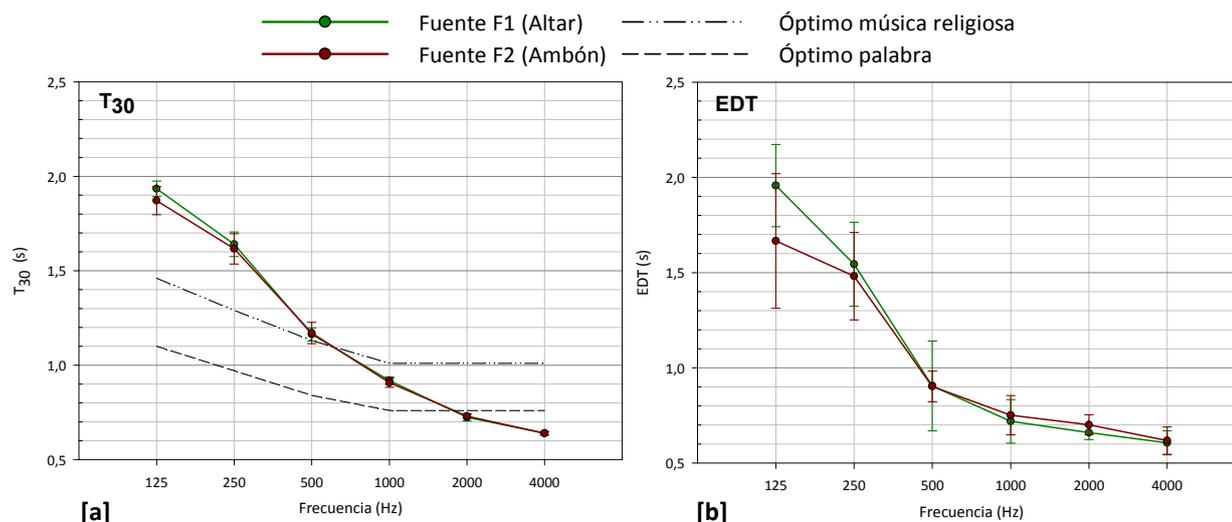


Figura 6.6.11. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

Como puede observarse en la figura 6.6.11 [a], los valores medidos del tiempo de reverberación (T_{30}) son muy similares para las dos posiciones de la fuente. Lo mismo ocurre con la dispersión espacial (dada por la desviación estándar) que además presenta un valor pequeño (menor que 0,10 en todas las bandas de octava). Para los sonidos graves (frecuencias de 125 Hz y 250 Hz), la iglesia resulta algo reverberante tanto para la música (los valores medidos se alejan 0,5 s, aproximadamente, de los óptimos recomendados) como para la palabra (alrededor de 0,7-0,8s por encima). Para las frecuencias centrales de 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz, los valores se aproximan a las óptimos recomendables para ambos usos. Concretamente, a la frecuencia de 1000 Hz, los valores medidos se encuentran en el centro de la banda óptima definida por ambas curvas. A altas frecuencias la sala podría resultar algo seca, ya que los resultados obtenidos a 4000Hz distan un 16% por debajo de los valores óptimos para el uso de palabra.

En cuanto a los resultados del EDT (figura 6.6.11 [b]), los valores medidos son muy similares para ambas fuentes, salvo a baja frecuencia, donde se aprecian diferencias mayores a 2 JND para la frecuencia de 125 Hz. El comportamiento en frecuencias es similar al T_{30} , presentando la misma tendencia y acusando una mayor sensación de reverberación a bajas frecuencias, si bien los valores del EDT son ligeramente inferiores al T_{30} . La dispersión espacial para la fuente 2, situada en el ambón, es mayor que para la fuente 1 situada en el altar, fundamentalmente a frecuencias bajas. Los resultados del EDT, correspondientes al promediado en frecuencia de número único (0,82 s para F1 y 0,83 s para F2), son inferiores al rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010 (entre 1,0 s y 3,0 s).

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_s (ms)	F1	131,10	112,40	65,40	49,70	47,40	44,00
	σ F1	13,80	11,06	14,13	9,12	5,42	8,14
	F2	129,70	114,00	65,80	49,40	48,80	44,20
	σ F2	17,00	11,93	14,42	9,06	8,07	9,62

Tabla 6.6.4. Valores promediados espacialmente del tiempo central T_s (ms). ¹Desviación estándar.

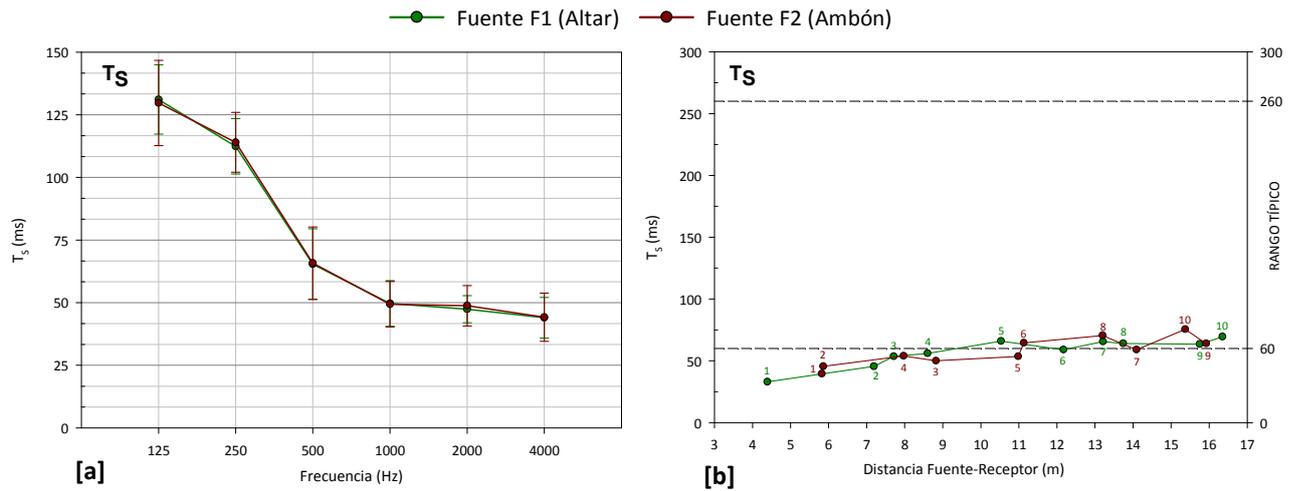


Figura 6.6.12. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

Para el tiempo central (figura 6.6.12 [a]), los resultados medios registrados para ambas posiciones de la fuente son prácticamente coincidentes, si bien la dispersión espacial es algo mayor cuando la fuente se sitúa en el ambón (F2).

La gráfica que representa el promedio espectral de este parámetro, en función de la distancia entre fuente y receptor (figura 6.6.12 [b]), también refleja un comportamiento similar para ambas posiciones de la fuente. Como puede observarse, los resultados obtenidos en todos los puntos de recepción situados en la zona de audiencia, se sitúan en torno al límite inferior del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, lo que denota una buena nitidez del sonido.

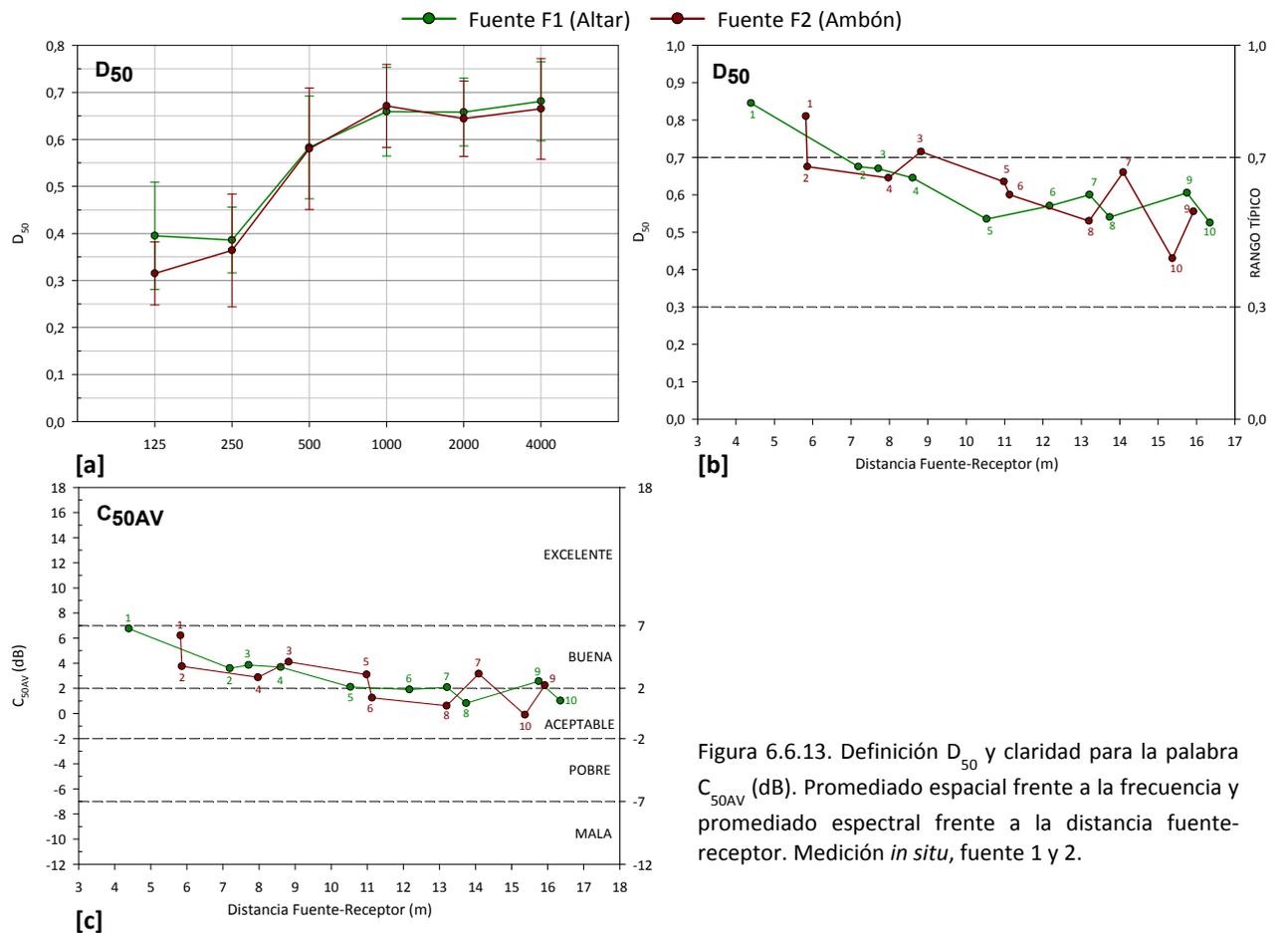


Figura 6.6.13. Definición D_{50} y claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D ₅₀	F1	0,4	0,39	0,58	0,66	0,66	,068
	σ F1	0,11	0,07	0,11	0,09	0,07	0,08
	F2	0,32	0,36	0,58	0,67	0,64	0,67
	σ F2	0,07	0,12	0,13	0,09	0,08	0,11

Tabla 6.6.5. Valores promediados espacialmente de la claridad para la palabra C₅₀ (dB) y definición D₅₀. ¹Desviación estándar.

Como se aprecia en la primera gráfica de la figura 6.6.13, los resultados de la definición para ambas fuentes prácticamente coinciden salvo a la frecuencia de 125 Hz, donde son algo mayores cuando la fuente se sitúa en el altar (F1), con diferencias inferiores a 2 JND.

En cuanto al promedio espectral en función de la distancia entre fuente y receptor, los parámetros de definición (D₅₀) y claridad para la palabra (C_{50AV}) presentan un comportamiento espacial parecido para ambas posiciones de fuente (figuras 6.6.13 [b] y [c]). Los resultados del D₅₀, prácticamente, se ajustan en todos los puntos al rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, salvo los correspondientes al punto 1 situado cerca de ambas fuentes sonoras, donde los resultados son superiores. Los valores del C_{50AV}, según la escala de valoración de Marshall, califican la claridad de la palabra entre buena y aceptable.

Del análisis de estos resultados se desprende que la iglesia, en su estado actual, presenta unas buenas condiciones para el uso de la palabra.

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C ₈₀ (dB)	F1	0,27	0,93	4,89	6,42	6,65	7,20
	σ F1	1,64	1,92	2,19	1,46	0,88	1,35
	F2	-0,29	0,34	4,50	6,14	6,05	7,04
	σ F2	1,51	1,41	1,70	1,41	1,15	1,59

Tabla 6.6.6. Valores promediados espacialmente de la claridad musical C₈₀ (dB). ¹Desviación estándar.

PARÁMETRO	FUENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
STI	F1	0,69	0,58	0,57	0,60	0,56	0,53	0,55	0,52	0,58	0,53
	F2	0,59	0,66	0,58	0,67	0,58	0,60	0,58	0,54	0,62	0,54

Tabla 6.6.7. Valores del índice de transmisión de la palabra (STI) en cada punto de recepción.

Analizando globalmente la claridad musical (C₈₀), y como era esperable de los resultados obtenidos para el C50 y D50, tanto los resultados promediados espacialmente frente a la frecuencia (figura 6.6.14 [a]) como los promediados espectralmente frente a la distancia fuente y receptor (figura 6.6.14 [b] y [c]), conllevan observaciones similares a las descritas para éstos.

Un análisis más detallado nos permite afirmar que: a) Los resultados del promedio espacial del C₈₀ son ligeramente superiores para la fuente situada en el altar (F1), lo que refleja una mayor claridad musical cuando la fuente está en el altar, aunque las diferencias son inferiores a 1 JND; b) Los valores del promediado espectral (figura 6.6.14 [c]) se sitúan en torno al límite superior del rango típico establecido por la citada norma de referencia, incluso se supera en algunos puntos lo que denota una muy buena claridad musical; c) De forma similar, los resultados del C₈₀(3) para los puntos más cercanos a las fuentes califican el recinto como apropiado para la audición de instrumentos con apoyo electroacústico, mientras que los valores del resto de puntos de la audiencia lo hacen idóneo para representaciones musicales donde la claridad musical es importante, como la ópera.

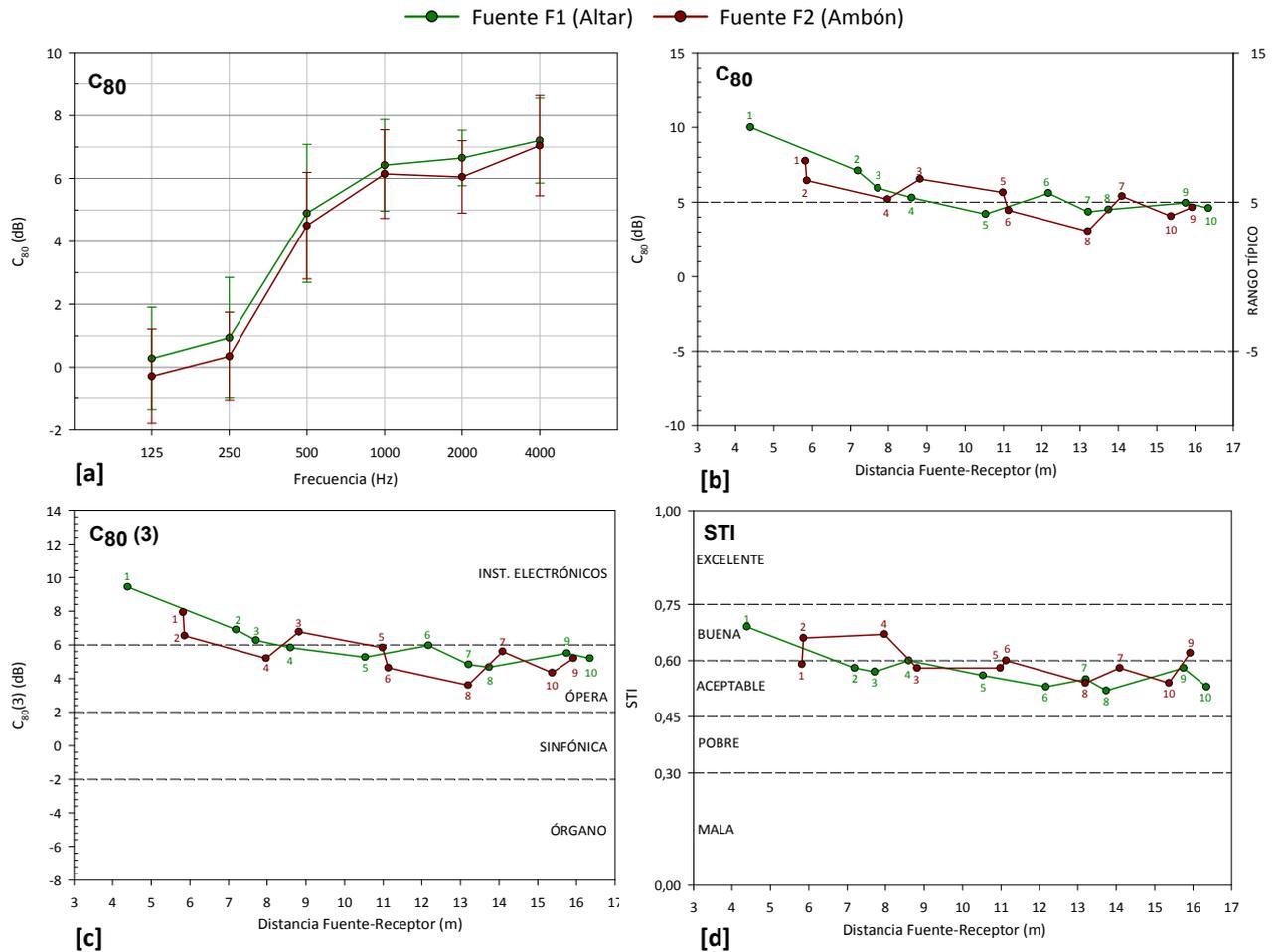


Figura 6.6.14. Claridad musical C_{80} (dB) e índice de transmisión de la palabra STI. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

En cuanto a la inteligibilidad de la palabra, valorada por el índice STI, se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor, junto con la escala de interpretación subjetiva (figura 6.6.14 [d]). Para ambas fuentes, la inteligibilidad, sin apoyo electroacústico, está considerada entre buena y aceptable en todos los puntos de la zona de audiencia. Aunque los mejores resultados del índice STI se obtienen para los puntos más cercanos a la fuente sonora, en general, al tratarse de una iglesia de pequeñas proporciones, apenas se produce disminución de la inteligibilidad de la palabra al aumentar la distancia fuente-receptor.

Como resumen de ambos parámetros podemos afirmar que estos resultados eran esperables dada la poca reverberación de una iglesia, y que la misma presenta una adecuada claridad musical e inteligibilidad de la palabra.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	FUENTE - σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	F1	20,86	19,01	11,17	8,32	9,36	9,60
	σ F1	1,71	2,69	0,95	2,06	3,00	2,13
	F2	20,71	19,78	10,63	7,75	8,92	8,46
	σ F2	2,82	2,46	1,18	2,71	3,62	2,52

Tabla 6.6.8. Valores promediados espacialmente de la fuerza sonora G (dB). ¹Desviación estándar.

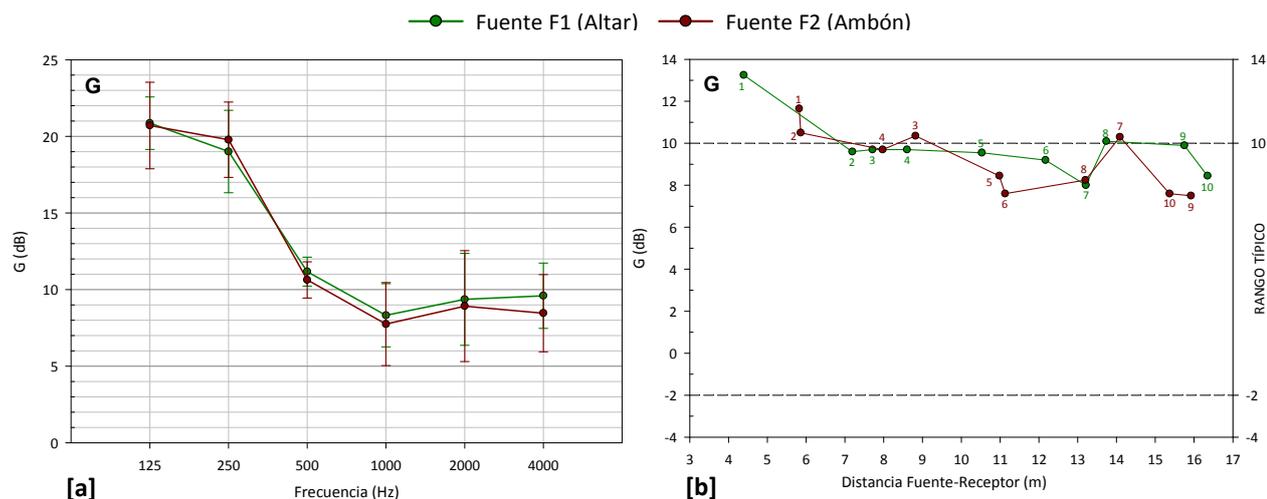


Figura 6.6.15. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

El nivel sonoro subjetivo, evaluado mediante la fuerza acústica (G), igualmente presenta para las dos posiciones de la fuente resultados similares (con diferencias menores de 1 JND salvo a 4000 Hz) si bien, la dispersión espacial es mayor para la fuente 2 situada en el ambón, con lo que el comportamiento de la fuerza acústica es más homogéneo cuando la fuente sonora se sitúa en el centro del presbiterio (figura 6.6.15 [a]). Esto puede deberse a que la ubicación de la fuente 1, en el centro del presbiterio, hace que la distribución de reflexiones tempranas sea más homogénea en la zona de audiencia, con lo que se favorece la creación de un campo sonoro más difuso.

Al representar los valores obtenidos de G en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figura 6.1.14 [b]), vemos que los resultados se sitúan en torno al límite superior del rango típico recogido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

Ambas gráficas de G reflejan que esta iglesia presenta un nivel sonoro adecuado, previsible por las pequeñas dimensiones y el reducido volumen de la misma.

Impresión espacial

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
L_j (dB)	F1	10,94	10,48	1,64	-2,51	-2,93	-2,86
	σ F1	1,70	2,07	1,09	1,04	2,35	2,00
	F2	10,21	11,01	0,92	-2,88	-2,71	-4,09
	σ F2	2,98	2,31	1,71	1,97	3,45	2,10
J_{LF}	F1	0,10	0,22	0,22	0,22	0,18	0,20
	σ F1	0,05	0,10	0,06	0,04	0,04	0,02
	F2	0,12	0,24	0,23	0,24	0,21	0,21
	σ F2	0,06	0,11	0,06	0,08	0,03	0,05

Tabla 6.6.9. Valores promediados espacialmente del nivel sonoro lateral final L_j (dB) y fracción de energía lateral precoz J_{LF} . ¹Desviación estándar.

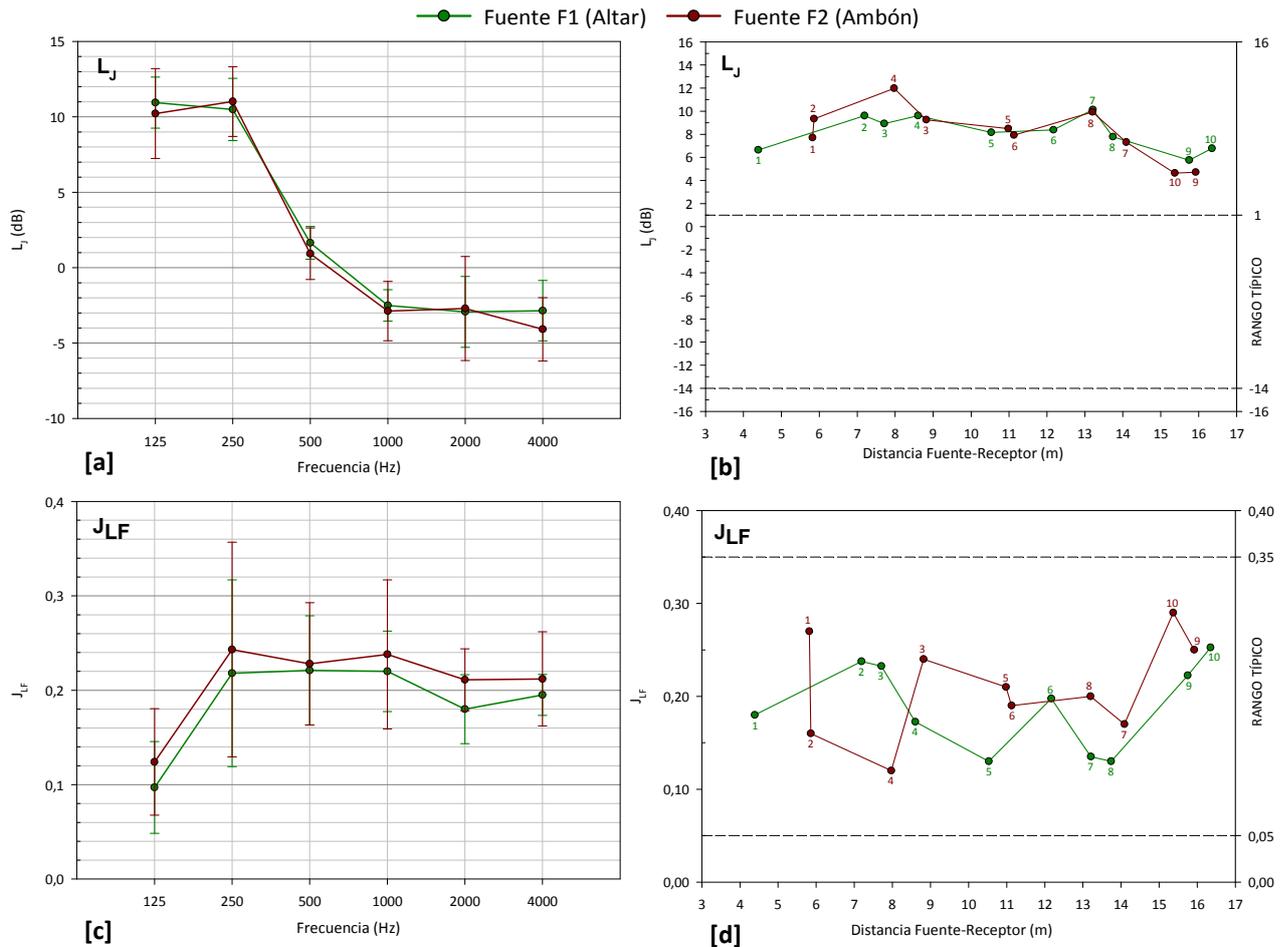


Figura 6.6.16. Nivel sonoro lateral final L_j (dB) y fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

En la figura 6.6.16 [a], puede observarse los resultados del nivel sonoro lateral final (L_j) obtenidos para las dos posiciones de la fuente. Del análisis de ambas gráficas podemos afirmar: a) Existe un comportamiento muy parecido para ambas posiciones de fuente, con valores casi coincidentes, si bien, la dispersión espacial es mayor para la fuente 2; b) En ambas posiciones los valores obtenidos fueron mayores a frecuencias bajas, como también ocurría con el tiempo de reverberación y con la fuerza sonora; c) Como consecuencia de lo anterior, la iglesia presenta una mayor sensación de espacialidad para los sonidos graves (125 y 250 Hz); d) En general, la sala presenta una sensación de sonido envolvente ya que los valores promediados espacialmente (figura 6.6.16 [b]) superan con holgura el límite superior del rango típico, siendo además su comportamiento bastante homogéneo en la totalidad de la zona de audiencia.

En cuanto a la anchura aparente de la fuente, definida por la energía lateral precoz (J_{LF}), la figura 6.6.16 [c] muestra ligeras diferencias en los resultados de las posiciones de la fuente, ya que, por definición, se trata de un parámetro muy sensible a la posición de la misma, si bien es cierto que esas diferencias son menores que el valor umbral perceptible (JND). Para todos los puntos de recepción, los valores del promediado espectral se sitúan dentro del rango típico establecido por la norma ISO (figura 6.6.16 [d]). Los niveles de J_{LF} registrados corresponden a una adecuada amplitud de la fuente sonora.

Del estudio de las gráficas del J_{LF} podemos decir que: a) El ancho aparente de la fuente percibido presenta un comportamiento similar a todas las frecuencias, excepto a 125 Hz donde la fracción de energía lateral temprana es menor; b) Los valores promediados espectralmente están centrados en la banda del rango típico, a diferencia del L_j con altos resultados respecto al umbral recomendado; c)

Como era de esperar, el J_{LF} es más sensible a la posición de la fuente, tal y como se observa en los resultados.

Los datos aportados por los indicadores acústicos anteriores sobre la espacialidad del sonido de esta iglesia, se corrobora con los resultados del IACC (tabla 6.6.10 y figura 6.6.17).

PARÁMETRO	FUENTE – σ^1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
IACC _L	F1	0,87	0,63	0,23	0,17	0,14	0,11
	σ F1	0,04	0,09	0,06	0,07	0,05	0,05
	F2	0,89	0,67	0,22	0,15	0,13	0,10
	σ F2	0,03	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03
IACC _E	F1	0,92	0,77	0,50	0,27	0,18	0,16
	σ F1	0,03	0,08	0,11	0,08	0,09	0,06
	F2	0,94	0,77	0,43	0,29	0,21	0,16
	σ F2	0,04	0,07	0,13	0,10	0,07	0,06
IACC _A	F1	0,89	0,70	0,40	0,21	0,16	0,13
	σ F1	0,02	0,07	0,10	0,07	0,08	0,06
	F2	0,91	0,72	0,35	0,22	0,17	0,13
	σ F2	0,03	0,05	0,11	0,08	0,06	0,05

Tabla 6.6.10. Valores promediados espacialmente de los coeficientes de correlación cruzada interaural: IACC_L, IACC_E y IACC_A. ¹Desviación estándar.

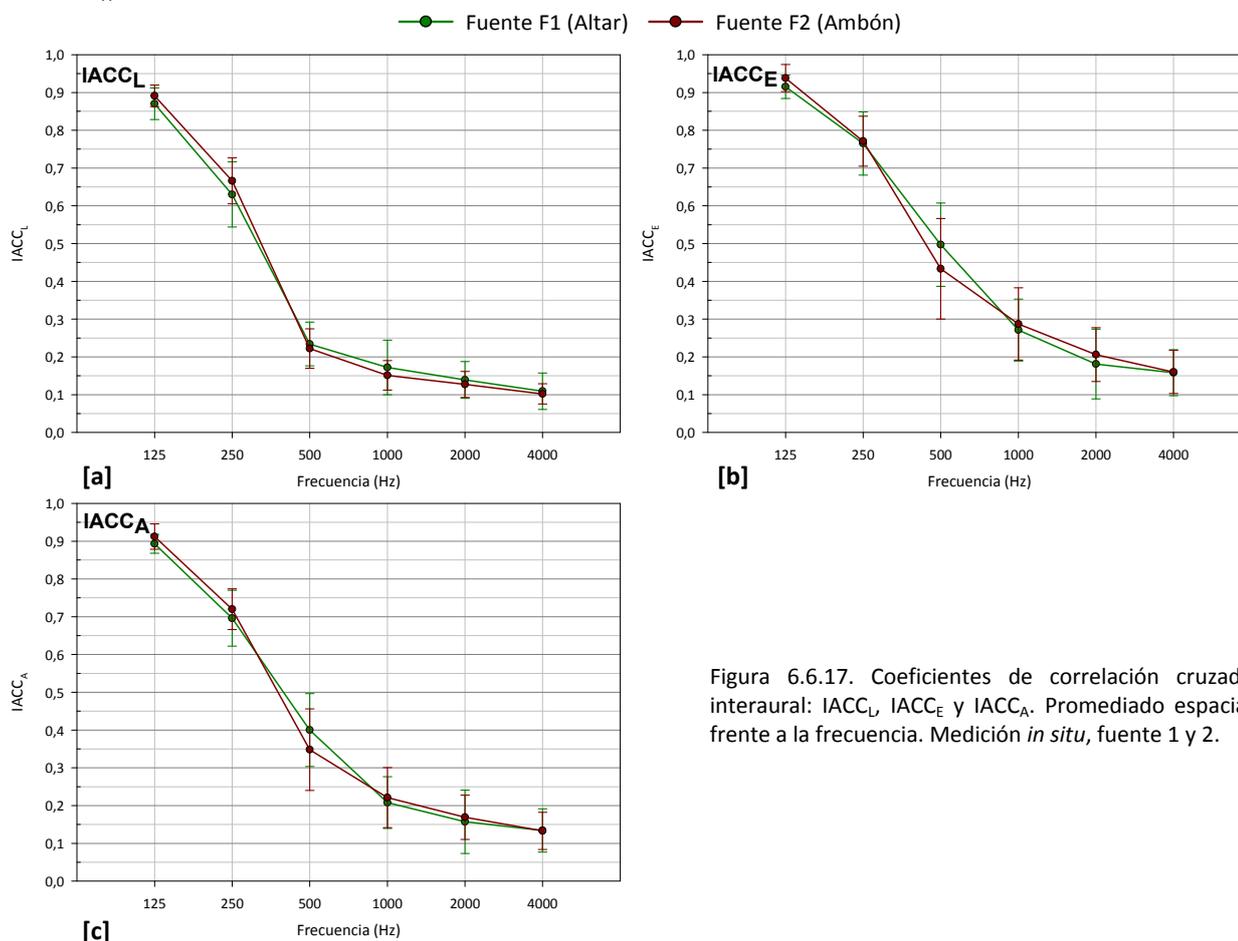


Figura 6.6.17. Coeficientes de correlación cruzada interaural: IACC_L, IACC_E y IACC_A. Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, fuente 1 y 2.

De analizar las figuras 6.6.17 [a], [b] y [c] podemos resumir: a) los valores de los índices del IACC son casi idénticos para las dos posiciones de la fuente, presentando resultados más bajos a los sonidos agudos; b) Los tres índices (IACC_L, IACC_E y IACC_A) son similares aunque la dispersión es mucho menor en la parte tardía (IACC_L) que en la temprana y total (IACC_E y IACC_A); c) Resultados para IACC_{L3} de 0,17 y para IACC_{E3} de 0,25 (valores medios para F1 y F2) corresponden a una sensación sonora envolvente con clara localización de la fuente sonora.

Ruido de fondo

PARÁMETRO	PUNTO	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
RF (dB)	5	37,55	37,31	35,81	31,52	29,27	25,12

Tabla 6.6.11. Espectro de ruido de fondo registrado (dB).

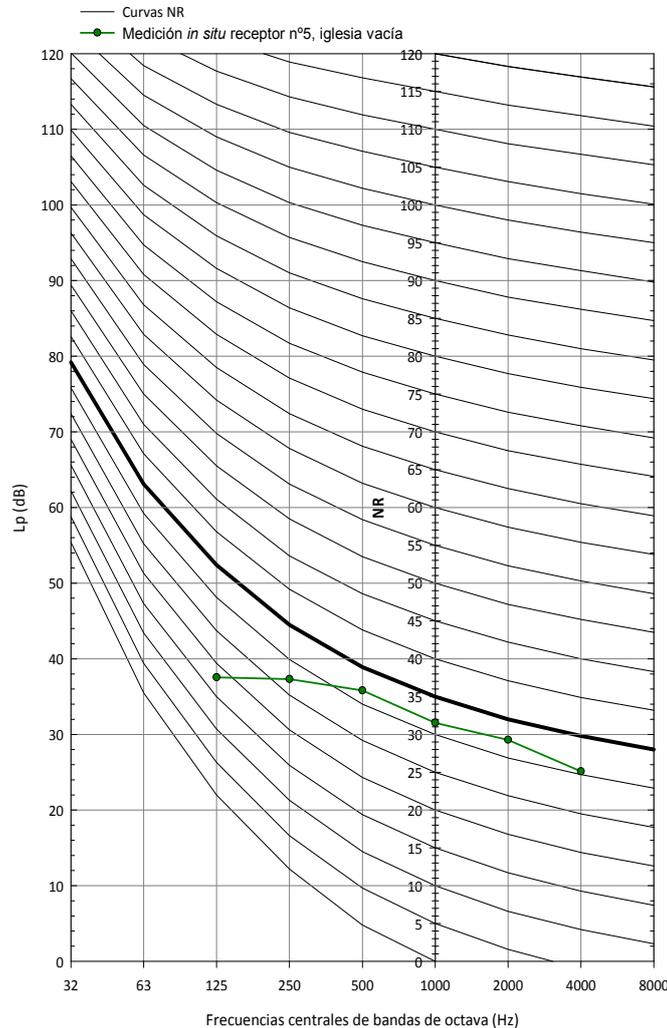


Figura 6.6.18. Curvas NR y espectro de ruido de fondo registrado (dB).

El espectro de ruido de fondo se registró promediando durante cuatro minutos en la posición del receptor 5. En la figura 6.6.18, se ha superpuesto dicho registro sobre las curvas NR, obteniéndose un índice de 32, valor inferior al máximo recomendado para los recintos de culto (NR 35). Estos resultados son esperables dada la ubicación de la iglesia en un entorno silencioso, así como por estar delimitada por muros gruesos de mampostería, de gran aislamiento acústico, y presentando pocos huecos al exterior.

Parámetros geométricos y de aforo

V/N (m ³ /plaza)	V/S_A (m ³ /m ²)	S_A/N (m ² /plaza)
7,38	10,60	0,70

Tabla 6.6.12. Valores de parámetros geométricos y de aforo.

En la iglesia de Pumarejo, la relación geométrica V/N se encuentra dentro del rango establecido para las iglesias (5,1-9,1 m³/plaza) y su valor es muy próximo al recomendado para dicho uso (7,2 m³/plaza). El resultado del parámetro V/S_A coincide con el valor recomendado para locales polifuncionales (10,6 m³/m²), mientras que el valor de S_A/N es superior al recomendado para dichos locales (0,66 m²/plaza).

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DEL ESTADO ACTUAL (%)							
REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Mampostería de piedra	α	4	4	6	6	7	9
	s	15	20	30	40	50	60
Panel absorbente de viruta de madera	α	35	43	60	74	88	85
	s	10	10	10	10	10	10
Banco madera vacío	α	16	18	18	17	17	16
	s	30	40	50	60	70	80
Banco madera ocupado	α	57	61	75	86	91	86
	s	30	40	50	60	70	80
Pizarra	α	2	2	2	2	3	3
	s	10	10	10	10	10	10
Retablo	α	32	28	27	27	20	17
	s	30	40	50	60	70	80
Vidrio (en área pequeña)	α	4	4	3	3	2	2
	s	10	10	10	10	10	10
Puerta de madera	α	14	10	6	8	10	10
	s	10	10	10	10	10	10
Moqueta (pesada)	α	2	6	14	37	60	65
	s	10	10	10	10	10	10
Tela de algodón	α	3	4	11	17	24	35
	s	10	10	10	10	10	10

Tabla 6.6.15. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos del estado actual. Los valores resaltados (en color rojo) son los ajustados en el proceso de sintonización.

En esta tabla se muestran los coeficientes de absorción y dispersión sonora de los materiales de revestimiento existentes en el recinto eclesial, destacándose los materiales con más incertidumbre y cuyos valores han sido ajustados para sintonizar el modelo.

Los coeficientes de absorción de los muros de mampostería se han modificado ligeramente al alza, a todas las frecuencias, a partir de los propuestos por Meisser²² para muros de sillería sin enlucir, pues en la iglesia que nos ocupa éstos son de mampostería tosca e irregular, previsiblemente de mayor absorción sonora. En cuanto al techo, los valores propuestos se han obtenido a partir de paneles de viruta fina de madera comercializados por el fabricante Knauff²³, aumentando fundamentalmente su absorción a frecuencias bajas. Este hecho se justifica por los resultados del tiempo de reverberación medido a dicha frecuencia (figura 6.6.11 [a]). Asimismo, la composición del techo de la iglesia, formado por paneles de poco espesor trasdosados por cámara de aire, hace que este se comporte como un resonador de membrana, aumentando la absorción a bajas frecuencias. La diferencia entre el coeficiente de absorción acústica considerado en el techo de la iglesia y el facilitado por el fabricante del panel mediante ensayo de laboratorio, se justifica por el propio sistema constructivo del caso que nos ocupa, pues el panel se coloca apoyado sobre una estructura de cerchas metálicas vistas, formando una cubierta a dos aguas con perfilera auxiliar también vista, siendo estas condiciones de montaje muy diferentes a las ensayadas en laboratorio.

Para los coeficientes de *scattering*, se ha admitido un valor por defecto del 10% en todas las bandas de octava analizadas, excepto en los siguientes casos: para los bancos de madera vacíos y ocupados, se han adoptado los coeficientes de bibliografía publicada^{24, 25}; y para los muros de mampostería, los valores se han estimado a partir del tamaño de las irregularidades, la profundidad y longitud media estructural, según las longitudes de onda implicadas.

²² Meisser, M. (1973). *Acústica de los edificios*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A. p.54.

²³ URL: http://www.knaufinsulation.es/files/ki_es/upload/documents/HERAKLITH_FINO.pdf, [última consulta: 9 abril 2012]

²⁴ Cox, T.J. y D'Antonio, P. (2004). Opus cit.

²⁵ Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2009). Opus cit.

6.6.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEDICIÓN *IN SITU* Y LA SIMULACIÓN

A partir del modelo ajustado del estado actual (EA) con la iglesia vacía, y utilizando las mismas condiciones de cálculo, se procedió a realizar la simulación acústica de la iglesia ocupada, tanto con la fuente situada en el altar (F1) como en el ambón (F2). Para la fuente F2 también se hizo la simulación sin presencia de público en las zonas de audiencia.

Los resultados de las simulaciones, para cada fuente, se comparan con los obtenidos en las medidas experimentales. Para facilitar el análisis de resultados en este apartado, las gráficas situadas en la columna izquierda muestran los valores correspondientes a la fuente 1, y las gráficas de la columna derecha, los de la fuente 2.

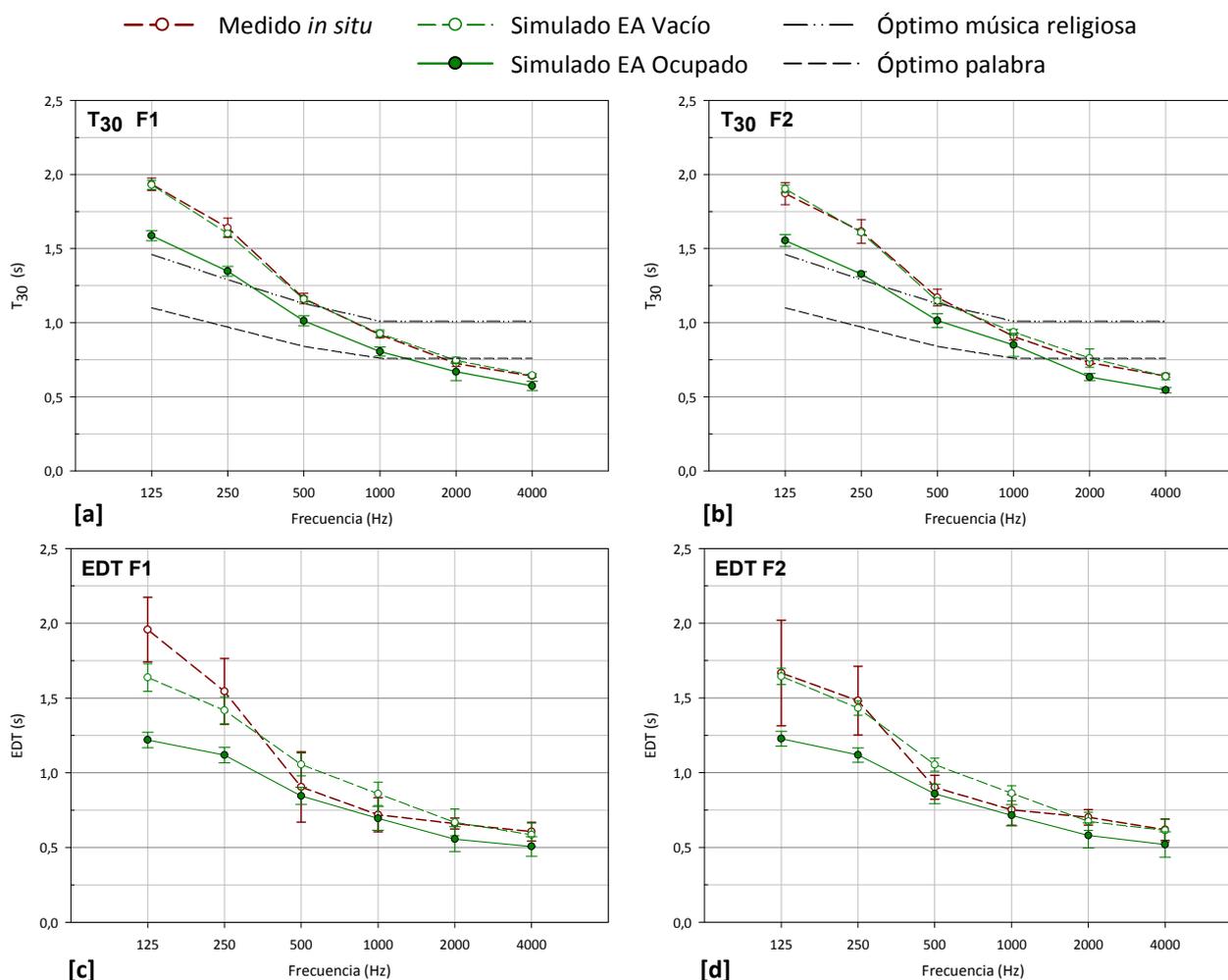
Reverberación

Figura 6.6.20. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

En la figura 6.6.20 [a], observamos que los valores del tiempo de reverberación (T_{30}) ajustados en la simulación acústica del campo sonoro de la iglesia, en la hipótesis vacía de fieles y con la fuente situada en el altar (F1), difieren menos del umbral perceptible *Just Noticeable Difference* (JND), que corresponde a un 5% de los valores medidos *in situ* para las distintas bandas de octava, lo que demuestra la idoneidad del modelo informático, pues reproduce este indicador con suficiente aproximación y fiabilidad.

Aunque el ajuste del modelo tridimensional de iglesia se ha realizado con la fuente en posición 1 (coincidente con el altar), en la figura 6.6.20 [b] vemos que, con la fuente en posición 2 (en el

ambón), la diferencia entre valores medidos y simulados del T_{30} , también son inferiores a un JND en todas las frecuencias estudiadas.

Al realizar la simulación acústica del recinto ocupado, los valores del tiempo de reverberación disminuyen ligeramente, para ambas fuentes, siendo este descenso más notable a bajas frecuencias, donde los valores se aproximan a los óptimos recomendados para la música religiosa.

En cuanto al EDT, en las figuras 6.6.20 [c] y [d] observamos que, para las dos posiciones de la fuente, la aproximación entre los resultados simulados y medidos es algo menor que para el T_{30} , sobre todo a frecuencias medias y, en el caso de la fuente 1, además a frecuencias bajas. No obstante, para la mayoría de las frecuencias, las diferencias que se aprecian son inferiores a 2 JND, valores aceptables para simulaciones, según se indicó en el apartado 5.5 del capítulo de *Método de investigación*.

La dispersión espacial obtenida en las simulaciones, con las dos posiciones de la fuente, es muy pequeña en el caso del T_{30} y, algo mayor para el EDT, pero en ambos casos, es inferior a las obtenidas en la medición *in situ*.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

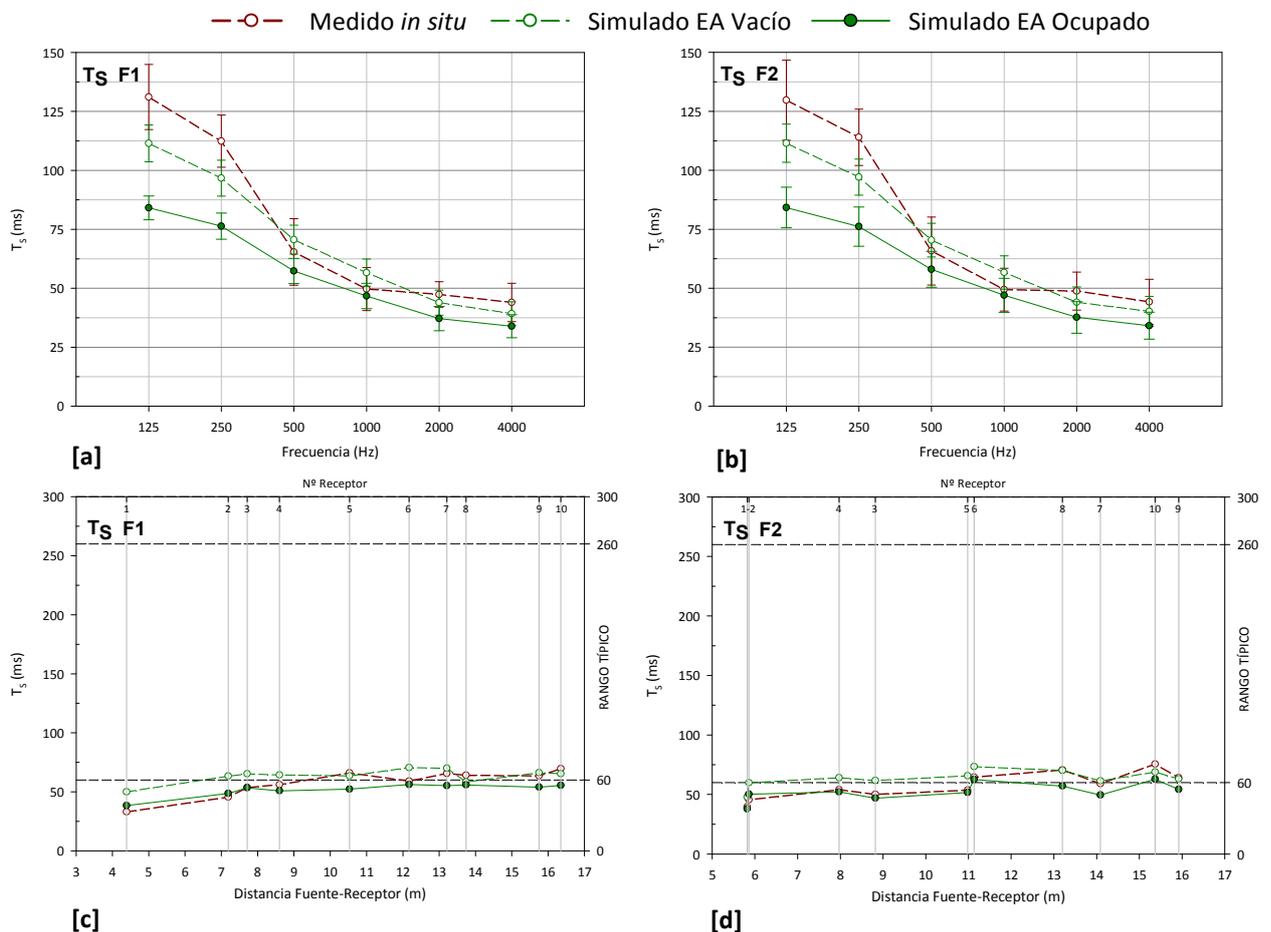


Figura 6.6.21. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Como puede comprobarse en las gráficas de la figura 6.6.21 [a] y [b], para las dos posiciones de la fuente, los resultados del tiempo central T_s obtenidos en la simulación acústica, están muy próximos a los obtenidos en las medidas, para bandas de octava superiores a 500 Hz. Discrepancias algo mayores se han obtenido para las bajas frecuencias, aunque las diferencias entre valores medidos y simulados son inferiores a 2 JND. La dispersión espacial presenta valores inferiores en los resultados de la simulación acústica frente a los obtenidos en la medición *in situ*.

La representación de los resultados del T_5 en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor (figuras 6.6.21 [c] y [d]), muestran que los valores medidos y simulados presentan tendencias y rangos similares, con diferencias menores de 2 JND.

Al igual que ocurriría con los parámetros relacionados con la reverberación, la presencia de los fieles en la iglesia reduce ligeramente los valores del T_5 , mejorando la nitidez del sonido en todos los puntos de recepción y para ambas posiciones de la fuente.

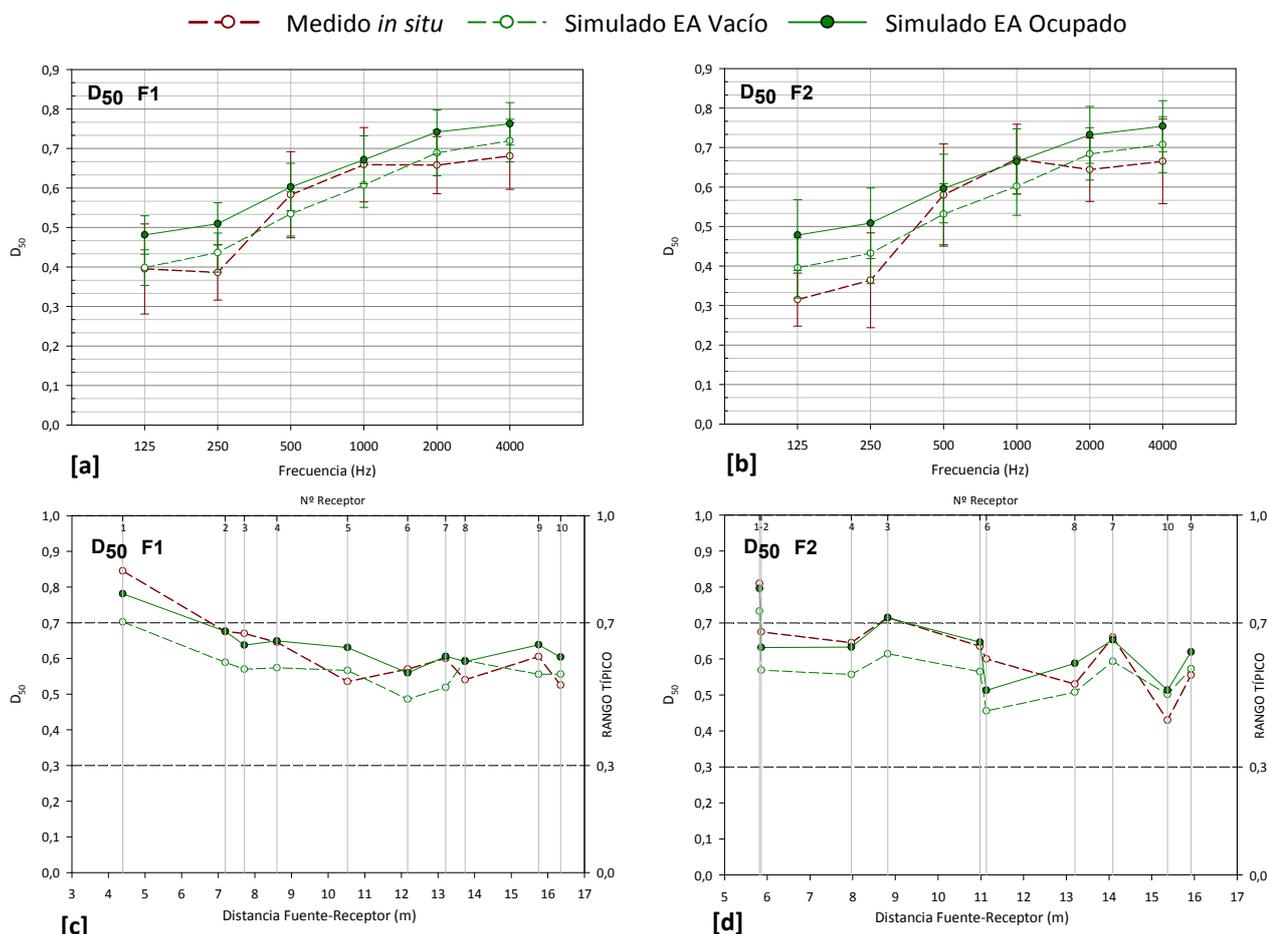


Figura 6.6.22. Definición D_{50} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Las gráficas correspondientes a los resultados de definición D_{50} , promediados espacialmente frente a la frecuencia (figuras 6.6.22 [a] y [b]), muestran que las diferencias entre los valores medidos y calculados, para la sala vacía y para ambas posiciones de la fuente, son inferiores a 2 JND. De nuevo, la dispersión espacial, es menor en la simulación que en la medición *in situ*, y mayor cuando la fuente se sitúa en el ambón (F2), tanto en la configuración vacía como ocupada.

Para la iglesia ocupada, los resultados en la mayoría de los puntos de recepción de la zona de audiencia, se encuentran dentro del rango típico establecido por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. Los valores más elevados de la definición, para las dos posiciones de la fuente, corresponden al punto 1.

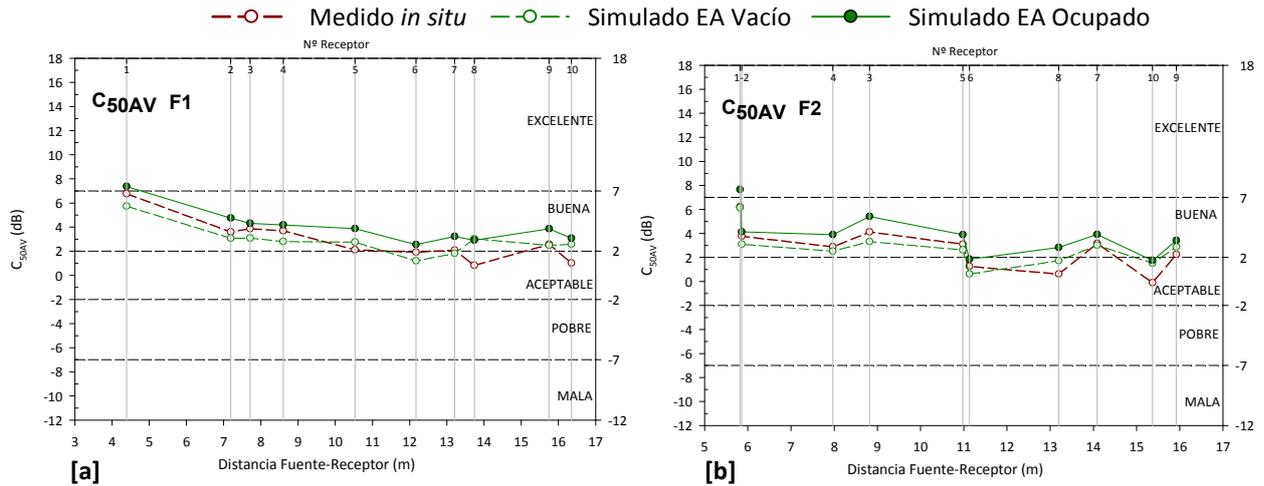


Figura 6.6.23. Claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Como en las magnitudes acústicas simuladas y analizadas anteriormente, los resultados del C_{50AV} mejoran ligeramente cuando la iglesia está ocupada por los fieles. Según la escala de interpretación de Marshall, la claridad para la palabra, para las dos posiciones de la fuente, puede calificarse como buena en todos los puntos de recepción, excepto en el punto 1, cercano a ambas fuentes sonoras y situado en posición centrada en la iglesia, donde la claridad se califica como excelente.

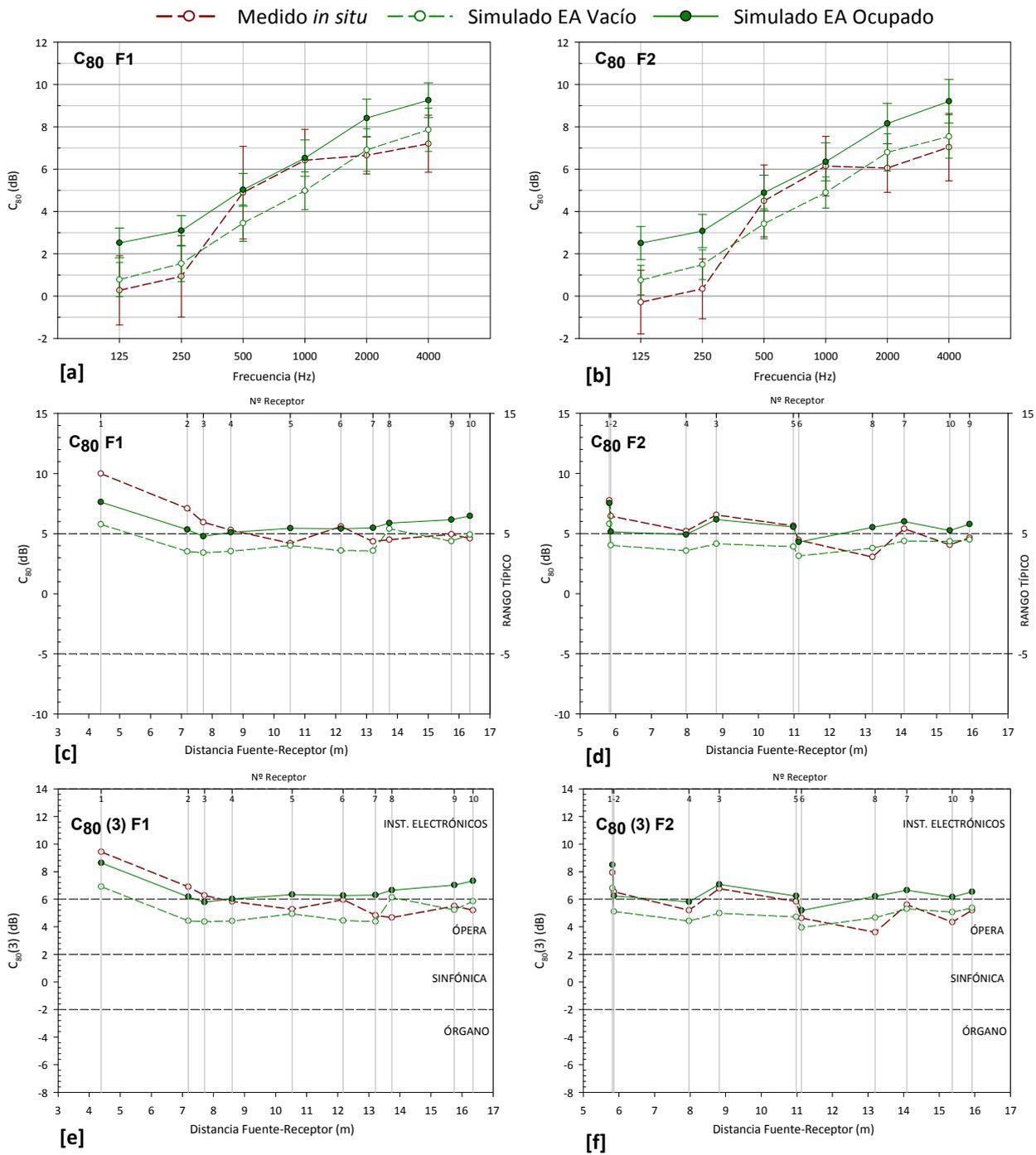


Figura 6.6.24. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Los datos promediados espacialmente frente a la frecuencia de la claridad musical (C_{80}), representados en las figuras 6.6.24 [a] y [b], son muy similares a los anteriormente analizados para la claridad para la palabra C_{50} y la definición D_{50} . Para las dos fuentes, las mayores diferencias, entre valores medidos y calculados, se obtienen para las frecuencias medias, si bien, son inferiores a 2 JND. La dispersión espacial sigue siendo inferior en los valores simulados frente a los medidos.

Los resultados promediados espectralmente, en función de la distancia fuente-receptor, tanto para el C_{80} (figuras 6.6.24 [c] y [d]) como para el $C_{80}(3)$ (figuras 6.6.24 [e] y [f]), reflejan mejores aproximaciones entre los resultados medidos y los simulados con la iglesia vacía, para los puntos más alejados de ambas fuentes sonoras.

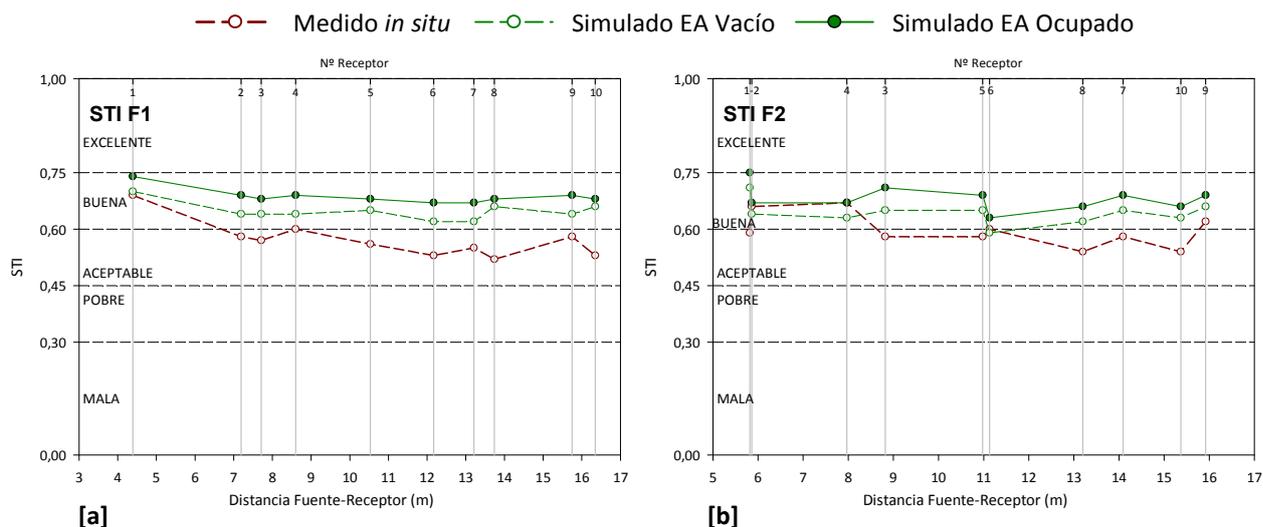


Figura 6.6.25. Índice de transmisión de la palabra STI, frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1.

Respecto al índice de transmisión de la palabra (STI), en la figura 6.6.25 se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor, junto con la escala de inteligibilidad subjetiva. Los resultados de la simulación, para ambas fuentes en la configuración desocupada, son mejores que los resultados de la medida experimental, que en su conjunto permitan calificar la inteligibilidad de la sala como buena, 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 ligera mejora en la inteligibilidad, y según la escala de valoración subjetiva, también corresponde a una inteligibilidad buena.

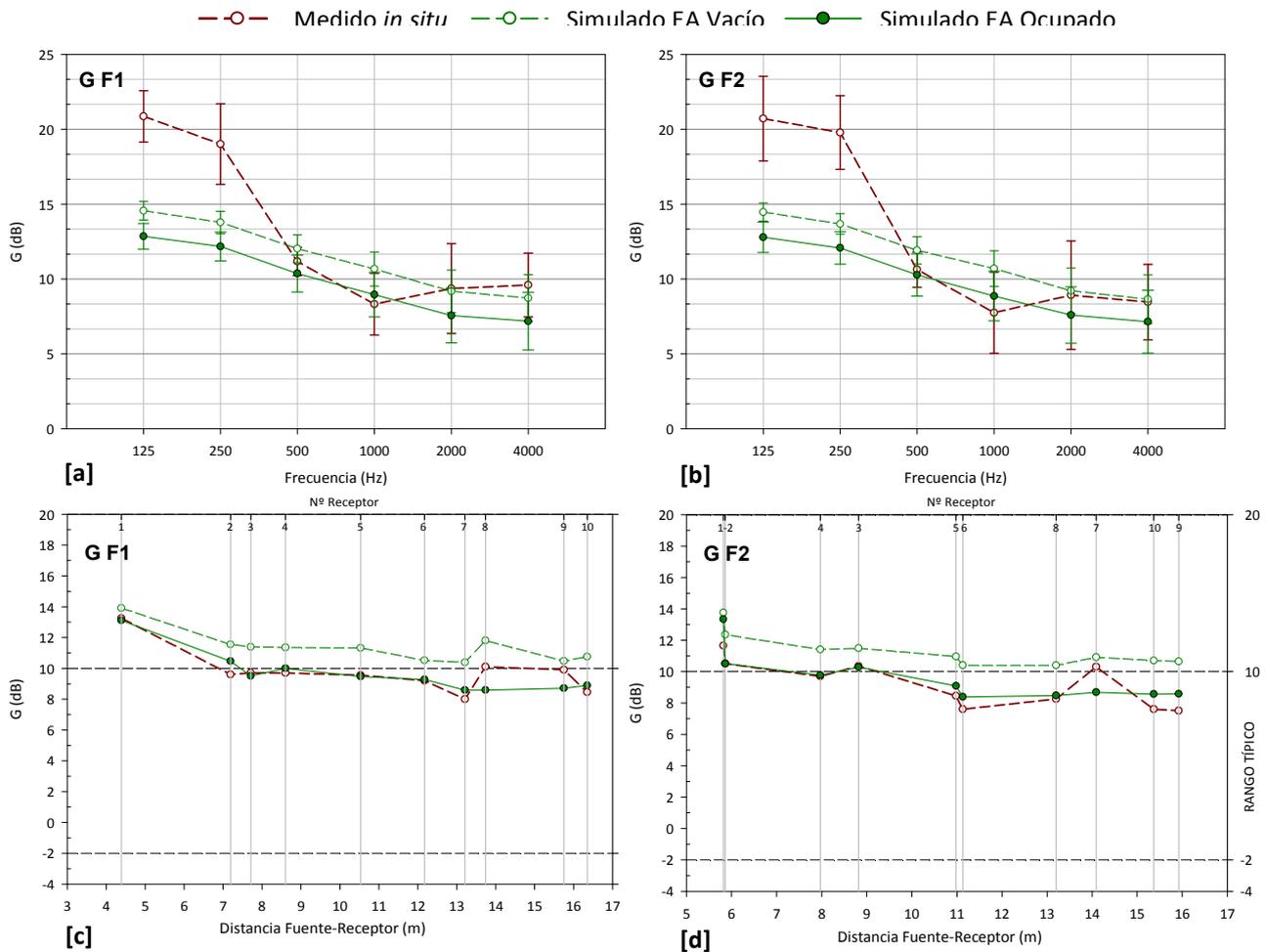
Nivel sonoro subjetivo

Figura 6.6.26. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Al igual que ocurría en otras iglesias y por los motivos comentados al respecto, para la fuerza sonora (G) no se obtienen buenas aproximaciones entre los resultados simulados y medidos para frecuencias inferiores a 500 Hz (figuras 6.6.26 [a] y [b]). Destacar también que para la frecuencia de 1000 Hz, los valores de G simulados para ambas fuentes son mayores que los obtenidos en la medición experimental y la diferencia entre ellos superior a 2JND. La dispersión espacial es inferior en las simulaciones informáticas que en las medidas experimentales.

Las gráficas correspondientes al promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor (figuras 6.6.26 [c] y [d]) muestran que los resultados obtenidos en la simulación considerando la presencia de los fieles, son similares a los obtenidos en la medición *in situ* con la iglesia vacía.

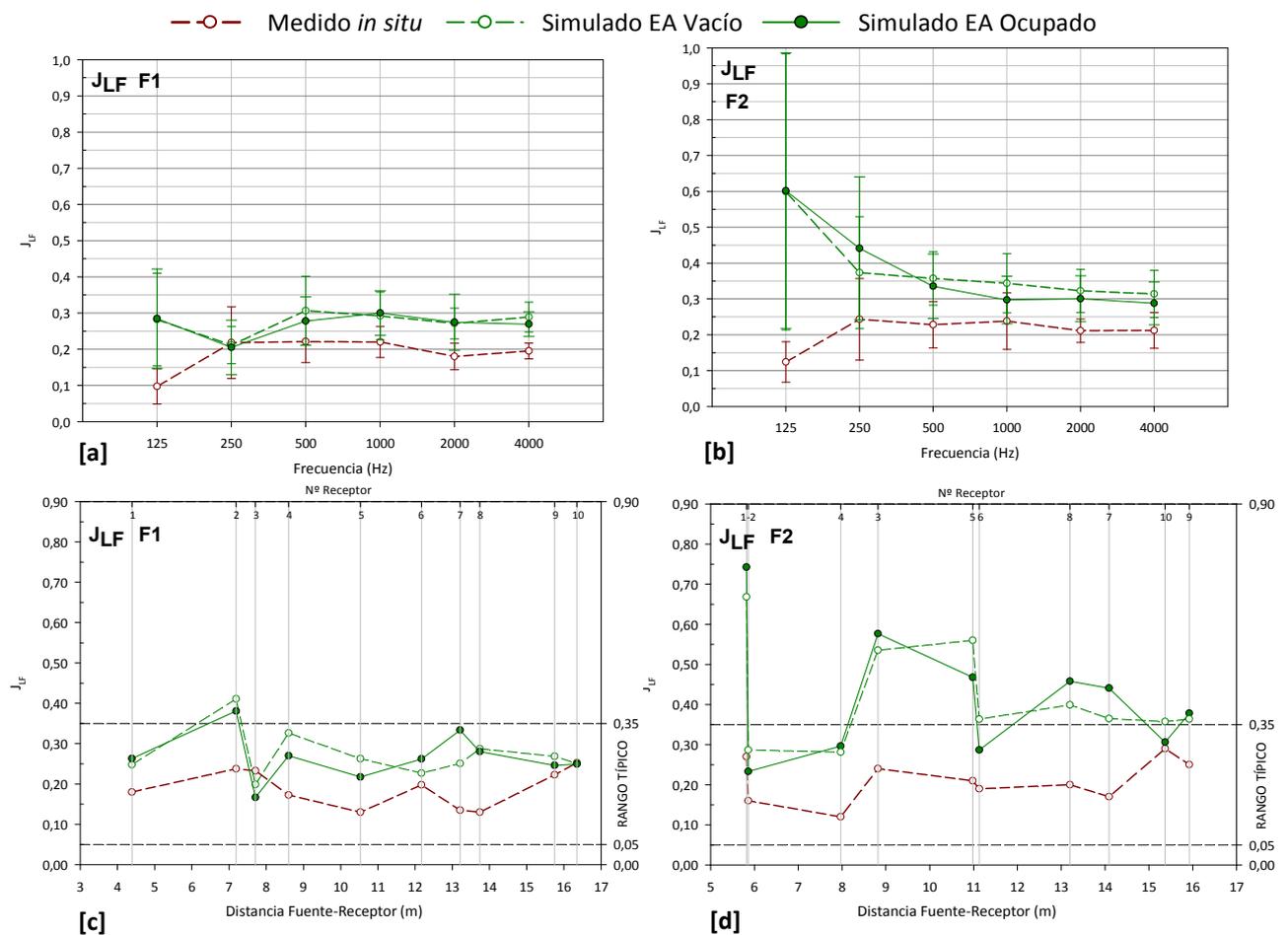
Impresión espacial

Figura 6.6.27. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

Los resultados simulados que menos se ajustan a los medidos *in situ*, los encontramos en los parámetros relacionados con el ancho aparente de la fuente, la envolvente y la audición binaural, representados aquí por J_{LF} y $IACC_E$, si bien las diferencias superan ligeramente 2 JND en la mayoría de bandas de octava analizadas.

Para la fracción de energía lateral precoz (figura 6.6.27), las simulaciones informáticas arrojan resultados similares en las configuraciones vacío y ocupado, y se distancian algo de los resultados obtenidos en las medidas, aunque las gráficas siguen las mismas tendencias. A diferencia de los parámetros analizados anteriormente, la desviación estándar para ambas fuentes es mayor en las simulaciones que en las mediciones *in situ*.

Por último, los datos obtenidos para el coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACC_E$) presentados en la figura 6.6.28, indican que la información espacial está asociada a las medias y altas frecuencias. Al igual que ocurría con el J_{LF} , los valores simulados se distancian de los obtenidos en las medidas a estas frecuencias, siendo a su vez parecidos los obtenidos con las simulaciones del recinto vacío y ocupado.

Al igual que con J_{LF} , la desviación estándar de este parámetro es mayor en las simulaciones informáticas que en las mediciones *in situ*.

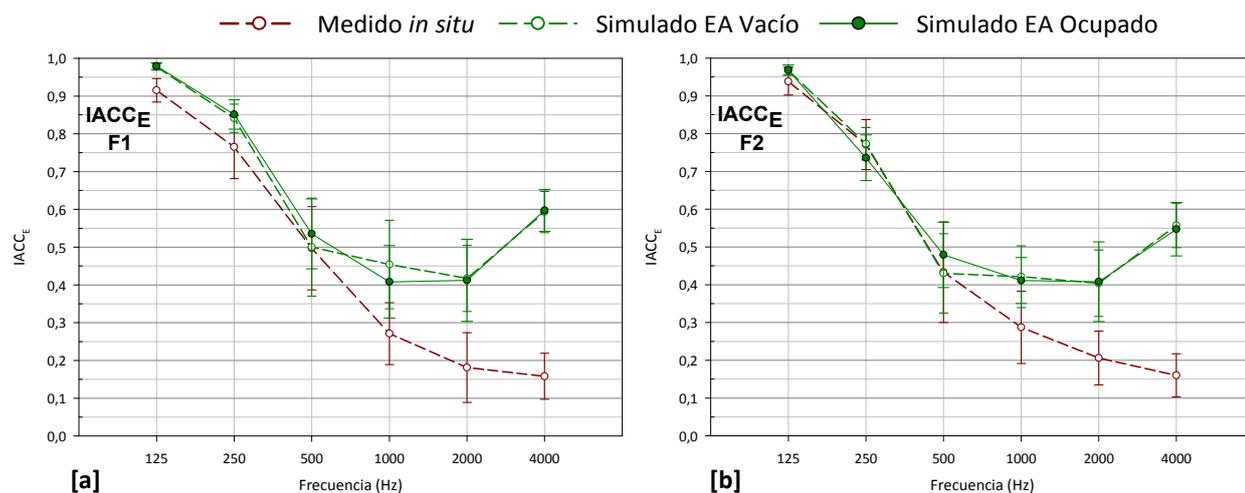


Figura 6.6.28. Coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACCE$. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual vacío y ocupado. Fuente 1 y 2.

6.6.2.4. VALORACIÓN GLOBAL

Como conclusión de este análisis comparativo entre la medición *in situ* y las simulaciones informáticas, podemos afirmar que el modelo informático tridimensional, ajustado a partir del tiempo de reverberación (T_{30}) y con la fuente en posición coincidente con el altar, presenta un comportamiento acústico muy similar al que posee realmente el recinto en su estado original.

En general, la posición de la fuente en el altar o en el ambón no conlleva diferencias significativas en los parámetros acústicos analizados. Los resultados de magnitudes acústicas relacionadas con la reverberación son claramente indiferentes a la posición de la fuente; sin embargo, los parámetros relacionados con la inteligibilidad de la palabra y la claridad del sonido percibida, presentan resultados algo mejores para la fuente situada en el centro del presbiterio coincidente con el altar (F1).

Apoyándonos en lo anterior, al incorporar al modelo ajustado la propuesta de rehabilitación acústica, únicamente se presentarán los resultados para una sola posición de fuente, ya que las conclusiones que se obtendrían, para ambas posiciones de la fuente, serían similares. En el caso de la iglesia que nos ocupa, el estudio se realizará para la fuente situada en el altar (F1), que además es la más representativa y habitual en el uso cotidiano del recinto.

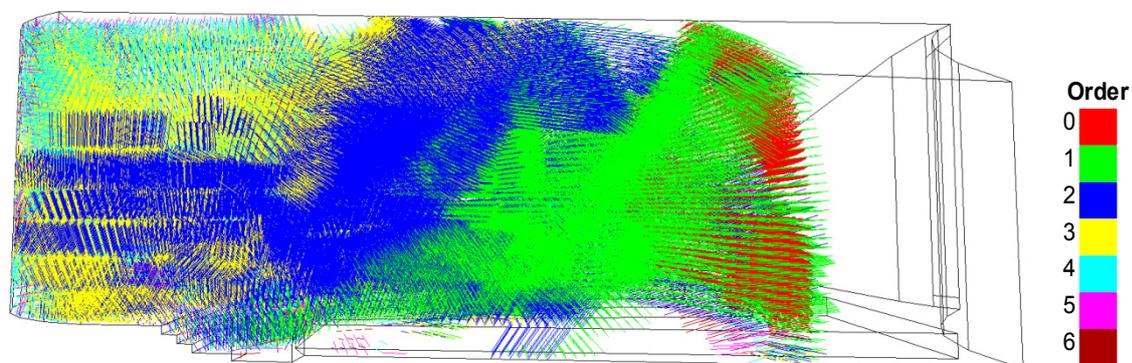


Figura 6.6.29. Visualización de la trayectoria de los rayos sonoros en el modelo informático del recinto. Trascorridos primeros 40 ms, frecuencia de 1000 Hz, fuente 1. Colores según orden de reflexión.

Por otro lado, según se explicó en el apartado 5.5 del capítulo anterior, para plantear la propuesta de rehabilitación acústica, resulta fundamental el estudio previo del comportamiento de las ondas sonoras en el recinto, para evaluar la importancia relativa de las superficies implicadas en las

reflexiones sonoras. Tras su estudio en esta iglesia, se ha podido comprobar que cuando la fuente se sitúa en el altar (F1), las primeras reflexiones tienen lugar en la pared de fondo que conforma el presbiterio, y a continuación en el techo situado sobre el mismo. Mientras el frente de onda avanza hacia la audiencia (figura 6.6.29), la disposición y ligera abertura de los muros laterales provoca que sobre ellos se produzcan pocas reflexiones tempranas, correspondiendo al techo de la iglesia las mayores aportaciones de éstas.

6.6.3. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA

6.6.3.1. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

Tras el análisis de las condiciones del estado actual de la iglesia, la intervención propuesta intentará alcanzar los objetivos generales descritos en el apartado 5.6 del capítulo *Método de investigación*, así como los siguientes objetivos específicos:

- Disminuir ligeramente los tiempos de reverberación actuales a frecuencias bajas y aumentarlos a altas frecuencias, para ajustarlos a los considerados como óptimos para los usos de palabra y música religiosa.
- Mantener la buena distribución sonora existente en el recinto.
- Lograr que la iglesia tenga un buen comportamiento sonoro, independientemente del grado de ocupación de la misma, de tal forma que su acústica no esté tan condicionada por el número de personas que la ocupen.
- Por la importancia de la inteligibilidad de la palabra en el recinto, proponer una adecuada instalación de megafonía, que mejore la inteligibilidad en el recinto.

Para conseguir lo anterior, la propuesta de rehabilitación acústica se apoya en un conjunto de actuaciones orientadas, en su mayoría, a la implementación en el recinto de revestimientos absorbentes, dispuestos estratégicamente desde el punto de vista acústico y arquitectónico. El conjunto de actuaciones previstas, cuya localización se representan en las figuras 6.6.30 y 6.6.31, se describen a continuación:

- Colocación de un panel de madera contrachapado de espesor 6 mm, suspendido 50 mm, sobre el espacio del presbiterio y las primeras filas de bancos (un tercio de la nave aproximadamente). Con esta operación de sencilla ejecución, se aporta absorción sonora a frecuencias bajas y se disminuye a altas frecuencias, a una de las superficies que recibe más impactos de ondas sonoras de primer orden.
- Incorporación de absorción sonora en el respaldo de los bancos de madera, mediante la utilización de un panel acústico ranurado de madera por la cara vista y perforado por la cara posterior, incluyendo velo acústico y manta de lana mineral de 50 mm de espesor (marca: Decustik, modelo: D+007, figura 6.6.31). En la parte posterior del respaldo, tras la lana mineral, se dispone un panel de madera liso de 16 mm de espesor. Como el comportamiento de la iglesia vacía difiere sensiblemente del ocupado, con esta operación se dota de absorción sonora al propio banco, consiguiéndose que las condiciones acústicas no dependan tanto del estado de ocupación de la iglesia.

Para llegar a esta propuesta de rehabilitación se han analizado y estudiado otras opciones. Entre ellas cabe destacar el cambio total del material del techo o la sustitución parcial del mismo en las franjas laterales, junto a los muros. Finalmente, se optó por la opción descrita anteriormente que, con menos modificaciones, obtenía mejores resultados.

6.6.3.2. PLANOS Y DETALLES DE LA PROPUESTA

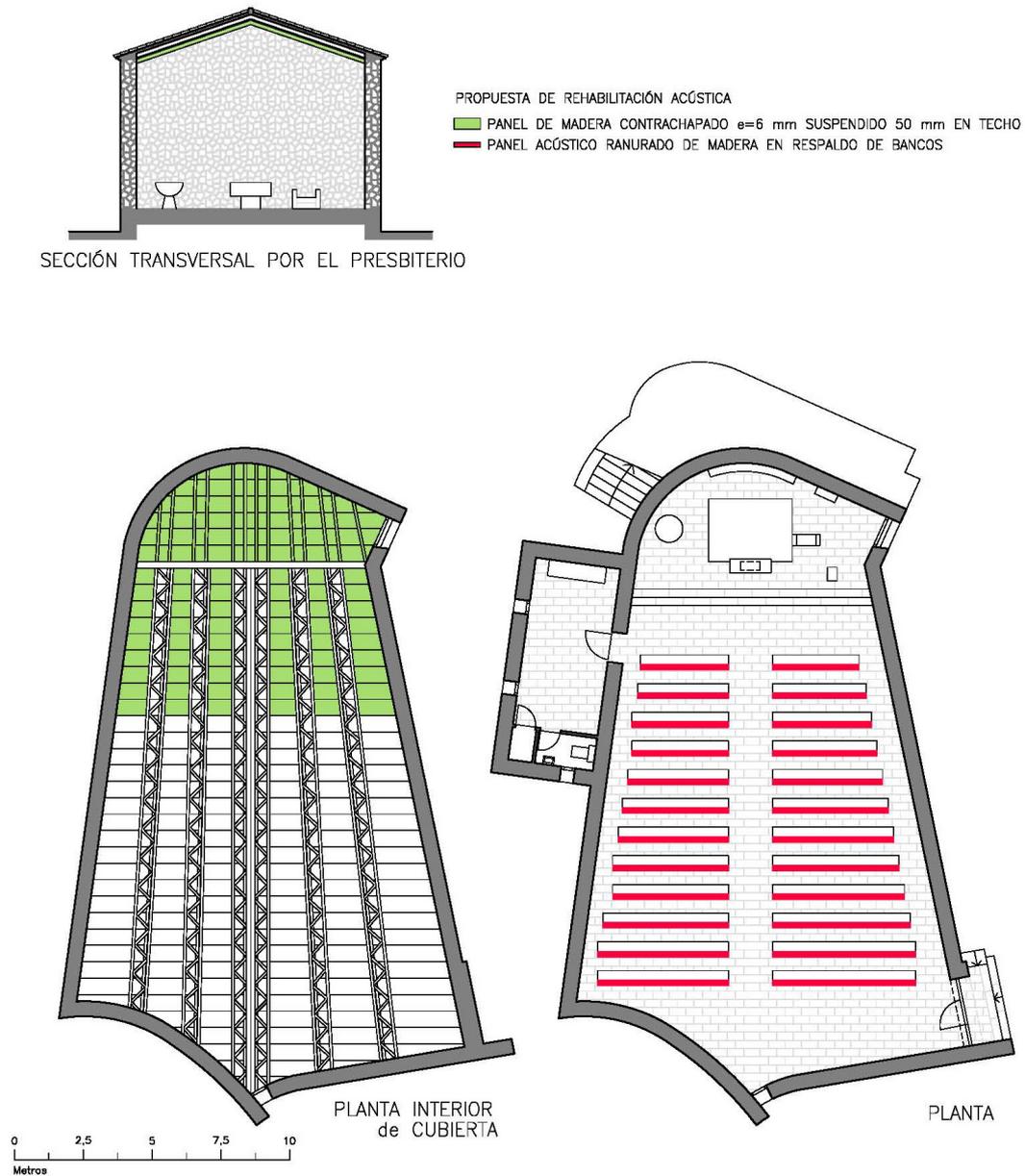


Figura 6.6.30. Plantas y sección. Situación de materiales de revestimiento propuestos.

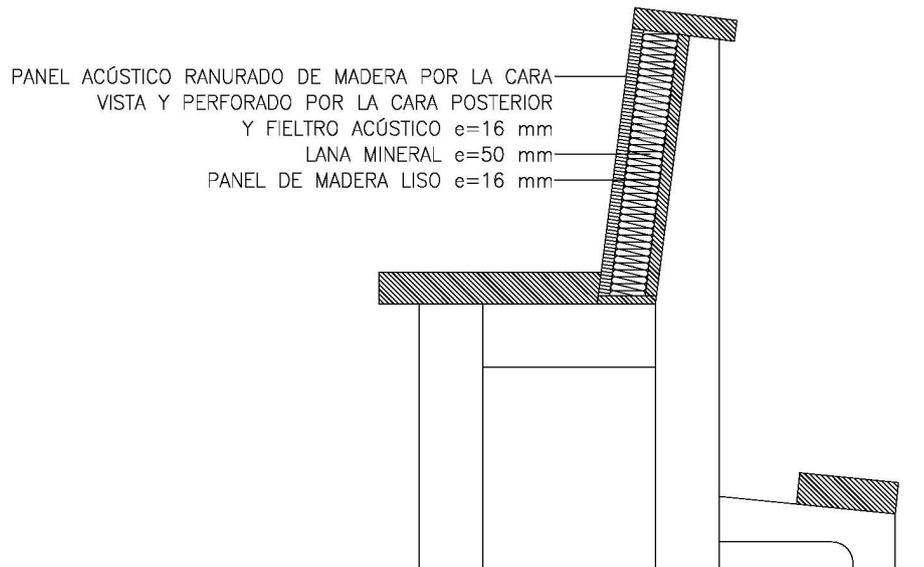


Figura 6.6.31. Sección del banco propuesto.

6.6.3.3. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL CAMPO SONORO

En la figura 6.1.32, se muestran dos axonometrías del modelo informático tridimensional del espacio interior de la iglesia, realizado con el programa *CATT-Acoustic* v.8.0k, en el que se han incorporado los elementos propuestos para la rehabilitación acústica de la misma.

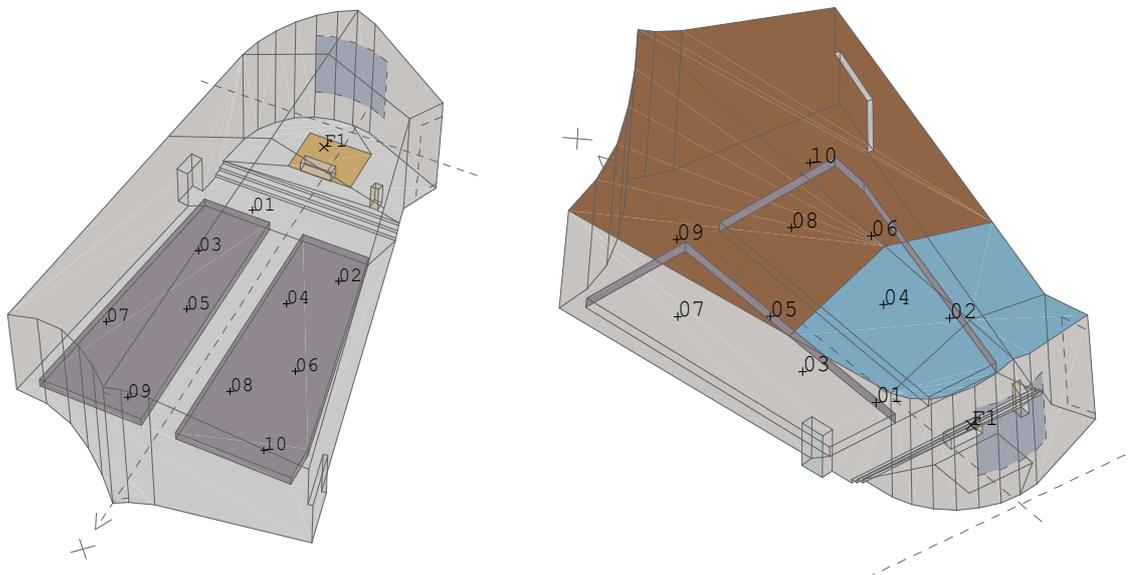


Figura 6.6.32. Modelo tridimensional de la iglesia con la propuesta de rehabilitación acústica.

La naturaleza y la superficie de los distintos materiales y acabados interiores, así como el porcentaje que representa sobre el total de los revestimientos de la iglesia, se especifican en la tabla 6.6.16.

IGLESIA PARROQUIAL DE SANTIAGO. PUMAREJO DE TERA (ZAMORA)

UBICACIÓN DE REVESTIMIENTOS Y ÁREAS			
REVESTIMIENTO	ZONA	Área (m ²)	Área (%)
Mampostería de piedra	Muros de cerramiento	336,1	38,3
Panel absorbente de viruta de madera	Techo	167,9	19,2
Banco de madera con respaldo ranurado	Zona de audiencia	129,5	14,8
Pizarra	Suelo	126,4	14,4
Panel de madera contrachapado	Techo presbiterio	74,8	8,5
Retablo	Presbiterio	12,7	1,4
Vidrio (en área pequeña)	Ventanas (U-glass)	9,6	1,1
Puerta de madera	Puertas de acceso y sacristía	8,7	1,0
Moqueta (pesada)	Alfombra altar	7,0	0,8
Tela de algodón	Altar	3,8	0,4
TOTAL REVESTIMIENTOS		876,4	100

Tabla 6.6.16. Áreas de revestimientos. Las filas resaltadas corresponden a los materiales propuestos para la rehabilitación.

Para la simulación de las nuevas condiciones acústicas del modelo, en las hipótesis de iglesia vacía y ocupada, se emplearon las condiciones de cálculo especificadas en la tabla 6.6.17, y los coeficientes de absorción y de dispersión sonora de los nuevos revestimientos presentados en la tabla 6.6.18.

DATOS Y CONDICIONES DE CÁLCULO	
Algoritmo de cálculo	Nº2, cálculo completo, auralización detallada
Número de conos/rayos	35.000
Ecograma/respuesta al impulso	2,5 s
Densidad del aire	1,19 kg/m ³
Absorción del aire	Activada
Ruido de fondo	Según espectro medido <i>in situ</i>
Condiciones ambientales	21,5°C, 40%
Tiempo de cálculo	1 hora 35 minutos (iglesia vacía)
Número de fuentes	1
Número de receptores	10
Número de planos	65

Tabla 6.6.17. Datos y condiciones de cálculo.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) Y DISPERSIÓN SONORA (s) DE LOS REVESTIMIENTOS DE LA PROPUESTA DE REHABILITACIÓN ACÚSTICA (%)

REVESTIMIENTO		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Panel de madera contrachapado (techo)	α	60	42	35	12	8	8
	s	10	10	10	10	10	10
Banco de madera con respaldo ranurado (vacío)	α	31	47	47	43	40	40
	s	30	40	50	60	70	80

Tabla 6.6.18. Coeficientes de absorción y dispersión sonora de los revestimientos introducidos en el recinto eclesial con la propuesta de rehabilitación acústica.

En la tabla 6.6.18 se muestran los coeficientes de absorción y *scattering* de los revestimientos utilizados para la simulación de las condiciones acústicas de la propuesta de rehabilitación. Los valores de los mismos han sido obtenidos de fuentes reconocidas y publicadas internacionalmente, así como del propio fabricante del producto seleccionado (en el anexo 3 se muestra un listado completo de todos los coeficientes de los materiales utilizados en esta investigación, así como la fuente de donde se han obtenido). Los valores de los coeficientes de absorción correspondientes a revestimientos heterogéneos, como los bancos de madera con respaldo absorbente, han sido obtenidos analíticamente, a partir de las proporciones geométricas de los elementos que integran el conjunto. Los coeficientes de dispersión sonora de estas superficies son los mismos que los empleados para el ajuste del modelo informático (tabla 6.6.15)

6.6.3.4. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS

En este apartado se analizan los resultados de los principales parámetros acústicos. Sistemáticamente, las tablas y las gráficas de cada parámetro muestran los resultados de la medición realizada *in situ*, las simulaciones del estado actual (EA), en sus configuraciones de vacío y ocupado, así como los valores de las simulaciones de la propuesta de rehabilitación acústica (RE), con la sala vacía y ocupada al 100%, correspondiendo todos estos resultados a la fuente en posición 1.

Reverberación

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_{30} (s)	MEDIDO Vacío	1,93 0,04	1,64 0,06	1,16 0,03	0,92 0,02	0,72 0,02	0,64 0,01
	SIMULADO EA Vacío	1,93 0,03	1,60 0,02	1,16 0,02	0,93 0,03	0,75 0,02	0,65 0,01
	SIMULADO EA Ocupado	1,59 0,03	1,35 0,03	1,01 0,03	0,81 0,03	0,67 0,06	0,57 0,03
	SIMULADO RE Vacío	1,67 0,05	1,42 0,03	1,16 0,04	1,08 0,02	0,92 0,02	0,80 0,01
	SIMULADO RE Ocupado	1,51 0,03	1,39 0,05	1,04 0,02	0,92 0,03	0,80 0,03	0,70 0,03
	Óptimo palabra Óptimo música	1,10 1,46	0,97 1,29	0,84 1,13	0,76 1,01	0,76 1,01	0,76 1,01
EDT (s)	MEDIDO Vacío	1,96 0,22	1,54 0,22	0,91 0,24	0,72 0,11	0,66 0,04	0,61 0,06
	SIMULADO EA Vacío	1,64 0,09	1,42 0,09	1,06 0,08	0,86 0,08	0,67 0,09	0,59 0,08
	SIMULADO EA Ocupado	1,22 0,05	1,12 0,05	0,85 0,06	0,70 0,08	0,56 0,08	0,51 0,07
	SIMULADO RE Vacío	1,37 0,06	1,24 0,06	1,03 0,05	1,00 0,05	0,84 0,04	0,72 0,04
	SIMULADO RE Ocupado	1,18 0,06	1,15 0,04	0,93 0,03	0,84 0,04	0,73 0,03	0,64 0,03

Tabla 6.6.19. Valores del tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

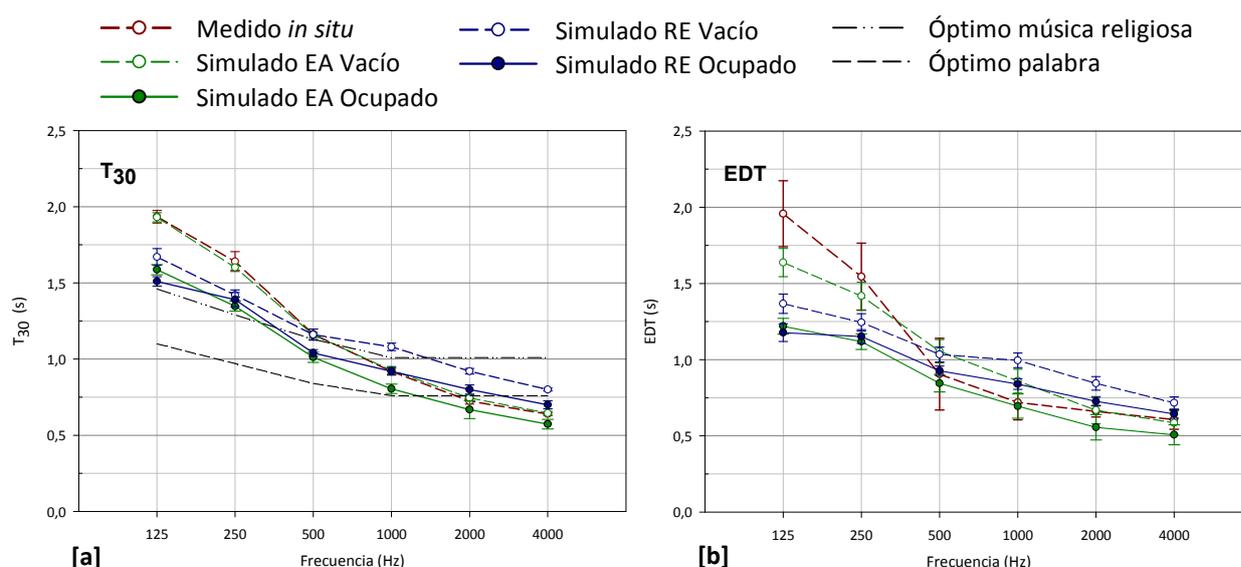


Figura 6.6.33. Tiempo de reverberación T_{30} (s) y tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Como puede comprobarse en la gráfica de la figura 6.6.33 [a], con la propuesta de rehabilitación se consiguen reducir ligeramente los tiempos de reverberación (T_{30}) del recinto a frecuencias bajas, y

aumentarlos a frecuencias altas, de forma que todos los resultados para las dos hipótesis de ocupación, están dentro o muy próximos a la banda tonal óptima definida por los tiempos de reverberación recomendados para la palabra y la música religiosa. Para la sala vacía, el resultado a la frecuencia de 500 Hz es el mismo que para el estado actual, y para la sala ocupada, los resultados a 250 y 500 Hz son prácticamente coincidentes. Como era esperable, en la hipótesis de sala ocupada, los tiempos de reverberación son inferiores a los del recinto vacío, pero las diferencias son muy pequeñas (en torno a 0,12s de media).

Similar comportamiento presenta el EDT para los dos estados de ocupación (figura 6.6.33 [b]), de forma que, en general, la impresión subjetiva de la reverberación disminuye a bajas frecuencias y aumenta para las frecuencias medias y altas. Este hecho ayudaría a corregir la sensación sonora a sonidos agudos, pues la sala en el estado actual (vacía y ocupada), era algo sorda a altas frecuencias. Con la propuesta de rehabilitación y para ambas configuraciones de ocupación, los resultados correspondientes al promediado en frecuencia de número único (EDT_{mid}) se sitúan en torno al límite inferior del rango típico que establece la norma UNE-EN-ISO 3382-1: 2010 y que es de 1,0 s.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_s (ms)	MEDIDO Vacío	131,10	112,40	65,40	49,70	47,40	44,00
		13,80	11,06	14,13	9,12	5,42	8,14
	SIMULADO EA Vacío	111,44	96,70	70,62	56,61	43,89	39,23
		7,81	7,64	6,14	5,78	5,28	5,01
	SIMULADO EA Ocupado	84,10	76,37	57,33	46,72	37,15	33,91
		5,05	5,54	5,36	5,36	5,13	4,86
	SIMULADO RE Vacío	92,46	84,78	70,57	68,68	58,69	51,29
		6,36	5,84	5,10	3,90	2,69	2,70
	SIMULADO RE Ocupado	79,41	78,47	63,78	59,27	51,44	45,87
		5,92	5,51	5,21	4,54	4,13	4,26

Tabla 6.6.20. Valores del tiempo central T_s (ms). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

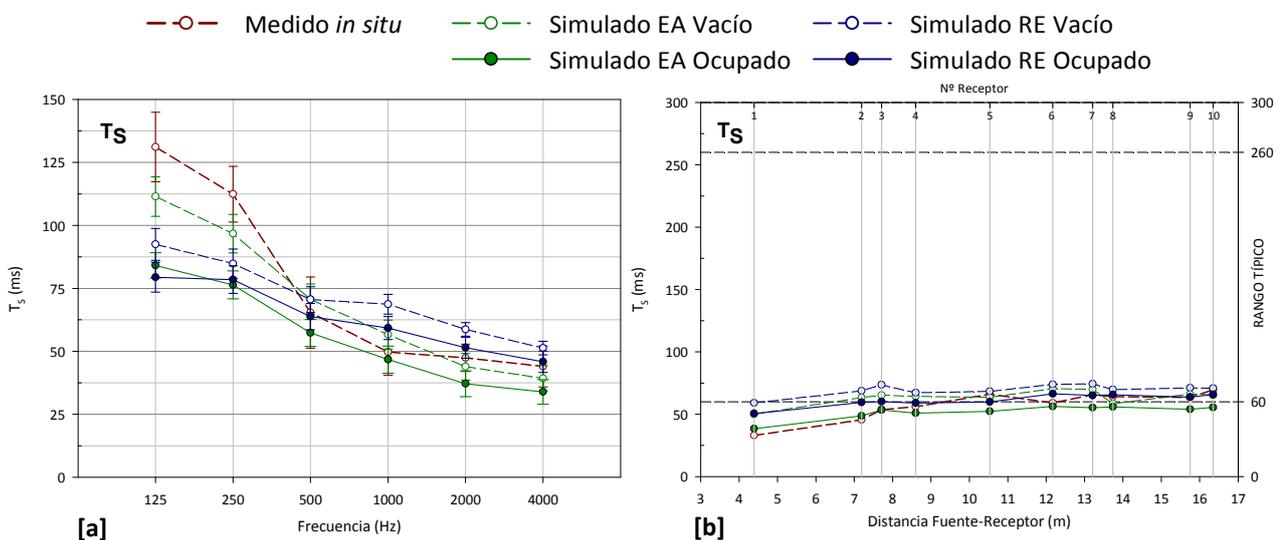


Figura 6.6.34. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

En lo que respecta al tiempo central (T_s), en la gráfica 6.6.34 [a] puede comprobarse que al incorporar la propuesta de medidas correctoras de revestimientos, los valores de este indicador presentan un comportamiento en frecuencia similar al descrito para los parámetros de reverberación. Para las medias y altas frecuencias, los valores de T_s son superiores a los del estado actual pero las diferencias son inferiores a 2 JND.

Al representar los valores del tiempo central en cada punto de recepción (gráfica 6.6.34 [b]), se aprecia que, para las configuraciones de iglesia vacía y ocupada, la distribución de resultados es bastante uniforme en la zona de audiencia, con valores algo mayores que para el estado actual y que se mantienen próximos al límite inferior del rango típico.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
D ₅₀	MEDIDO Vacío	0,4	0,39	0,58	0,66	0,66	0,68
		0,11	0,07	0,11	0,09	0,07	0,08
	SIMULADO EA Vacío	0,40	0,44	0,53	0,61	0,69	0,72
		0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05
	SIMULADO EA Ocupado	0,48	0,51	0,60	0,67	0,74	0,76
		0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05
	SIMULADO RE Vacío	0,45	0,48	0,53	0,54	0,59	0,64
		0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03
	SIMULADO RE Ocupado	0,50	0,50	0,56	0,58	0,63	0,67
		0,06	0,06	0,06	0,05	0,04	0,05

Tabla 6.6.21. Valores de la definición D₅₀. Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

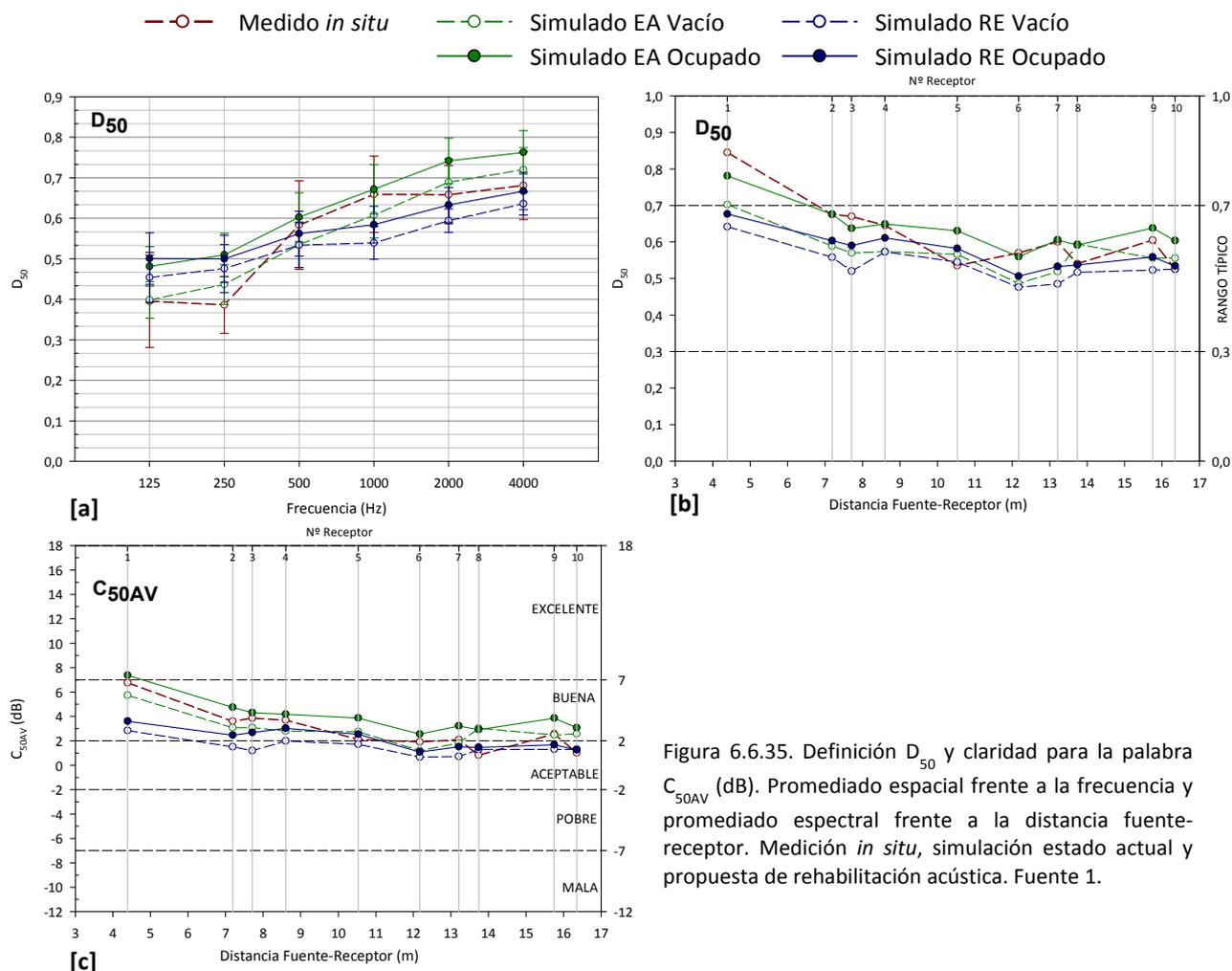


Figura 6.6.35. Definición D₅₀ y claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Como era de esperar, con el aumento del tiempo de reverberación a altas frecuencias, los valores de la definición disminuyen a dichas frecuencias (figura 6.6.35 [a]), si bien, las diferencias están muy próximas a 2 JND.

El promedio espectral del D₅₀ (figura 6.6.35 [b]) muestra una distribución homogénea de resultados, con valores algo inferiores a los del estado actual, pero dentro del rango típico, para ambas configuraciones de ocupación.

En la figura 6.6.35 [c], se aprecia un comportamiento similar para la claridad para la palabra (C_{50AV}), que pasa a calificarse entre aceptable y buena, tanto para la iglesia vacía como ocupada.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
C_{80} (dB)	MEDIDO Vacío	0,27	0,93	4,89	6,42	6,65	7,20
		1,64	1,92	2,19	1,46	0,88	1,35
	SIMULADO EA Vacío	0,78	1,54	3,45	4,98	6,91	7,86
		0,81	0,86	0,86	0,89	1,01	1,02
	SIMULADO EA Ocupado	2,52	3,09	5,02	6,52	8,42	9,26
		0,70	0,72	0,78	0,86	0,89	0,82
	SIMULADO RE Vacío	1,78	2,31	3,51	3,70	4,84	5,89
		0,85	0,72	0,64	0,53	0,43	0,43
	SIMULADO RE Ocupado	2,83	2,88	4,23	4,77	5,83	6,72
		0,86	0,66	0,55	0,45	0,41	0,51

Tabla 6.6.22. Valores de la claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

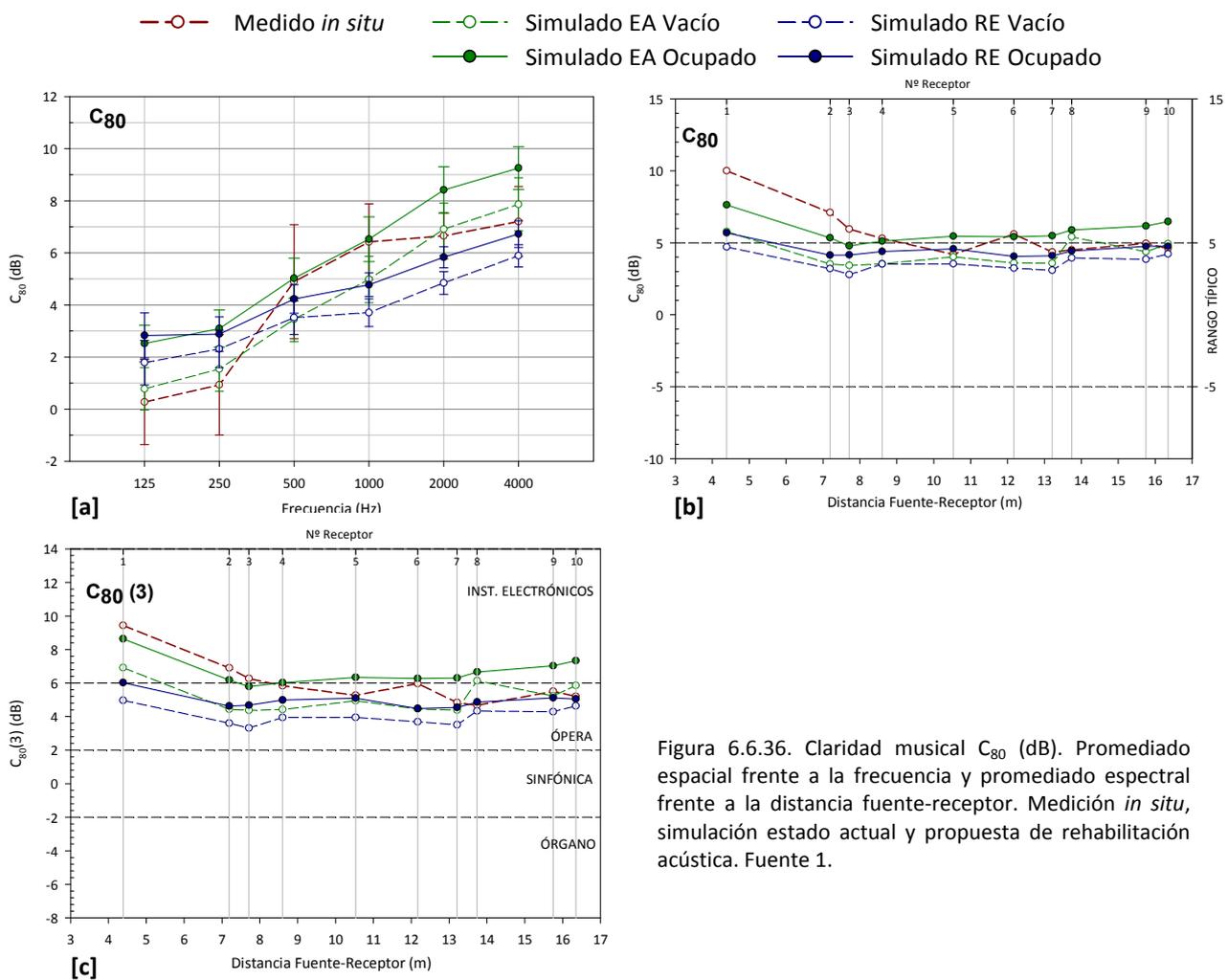


Figura 6.6.36. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

En correspondencia con los resultados comentados anteriormente, la claridad musical C_{80} experimenta una sensible disminución para las medias y altas frecuencias, siendo las diferencias superiores a 2 JND para estas últimas frecuencias (figura 6.6.36 [a]). Los resultados del promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor de este parámetro (figura 6.6.36 [b]), tanto para la iglesia vacía como ocupada, disminuyen ligeramente, concentrándose sus valores próximos al límite superior del intervalo establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

Los resultados obtenidos del $C_{80}(3)$ (figura 6.6.36 [c]), tanto para la iglesia vacía como ocupada, indican que, tras la propuesta de intervención, el recinto es adecuado para la audición de música de ópera.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.6.37, se aportan los mapas de resultados de la claridad musical (C_{80}) global en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA), con la fuente en posición 1 (altar), y tras la propuesta de rehabilitación acústica (RE), ambos en su configuración de iglesia ocupada.

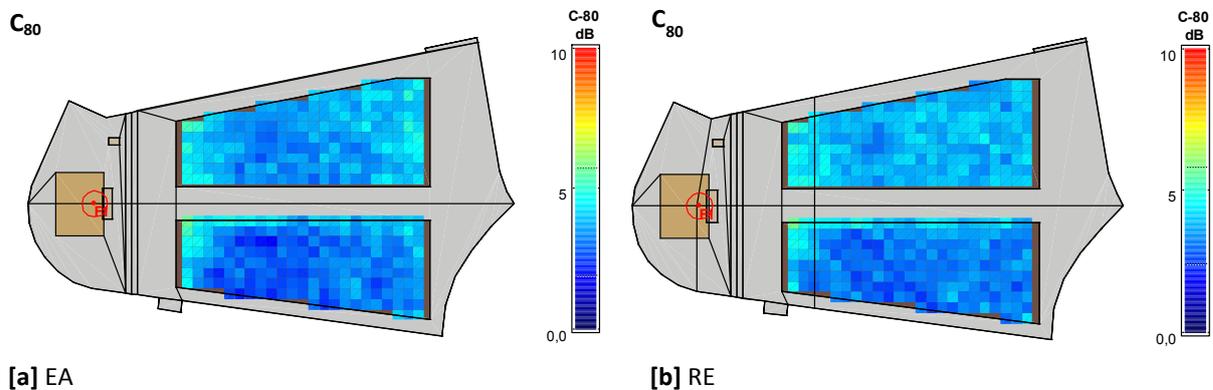


Figura 6.6.37. Claridad musical C_{80} global (dB). Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

Ambas simulaciones reflejan una distribución espacial del C_{80} sobre la superficie de la audiencia bastante homogénea, presentado los valores más altos en las primeras filas de bancos (figura 6.6.37). El valor medio de la claridad es algo mayor tras la incorporación de las medidas correctoras, en concreto 3,64 dB, frente a 3,54 dB para el estado actual.

En general, podemos afirmar que los resultados de las magnitudes acústicas, relacionadas con el aspecto subjetivo del oyente sobre claridad del sonido percibida, son más desfavorables por el aumento de reverberación a frecuencias altas que propone la propuesta de rehabilitación acústica. En el estado actual, los bajos valores del T_{30} a dichas frecuencias (dando lugar a un recinto algo seco), propician unos resultados de definición y claridad muy favorables, que lógicamente, disminuyen cuando T_{30} aumenta y se acerca a los valores óptimos de reverberación.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
G (dB)	MEDIDO Vacío	20,86	19,01	11,17	8,32	9,36	9,60
		1,71	2,69	0,95	2,06	3,00	2,13
	SIMULADO EA Vacío	14,56	13,78	12,02	10,67	9,18	8,73
		0,63	0,75	0,93	1,14	1,42	1,56
	SIMULADO EA Ocupado	12,85	12,17	10,37	8,95	7,56	7,18
		0,85	0,96	1,24	1,49	1,83	1,92
	SIMULADO RE Vacío	13,07	12,74	11,90	11,83	11,01	10,27
		0,57	0,73	0,93	1,17	1,41	1,62
	SIMULADO RE Ocupado	12,10	12,20	11,03	10,60	9,66	9,03
		0,80	0,92	1,26	1,63	1,95	2,10

Tabla 6.6.24. Valores de la fuerza sonora G (dB). Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

De forma similar al comportamiento que presenta el tiempo de reverberación tras la intervención propuesta, los resultados de G, promediados espacialmente (figura 6.6.38 [a]), disminuyen a bajas frecuencias y aumentan a medias y altas frecuencias, para ambos estados de ocupación. Es de destacar la homogeneidad de los resultados para las distintas bandas de octava.

En cuanto al promedio espectral de la iglesia vacía y ocupada (figura 6.6.38 [b]), los resultados son algo mayores que para el estado actual, manteniéndose en torno al límite superior del rango típico establecido en la norma UNE de referencia.

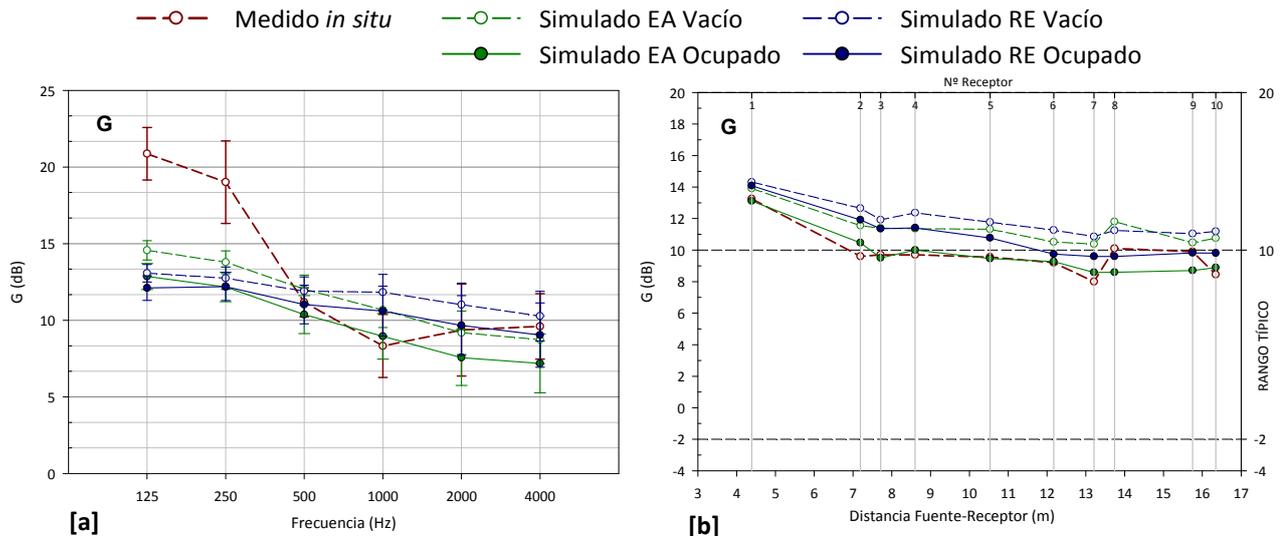


Figura 6.6.38. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.6.39 se aportan los mapas de la fuerza acústica G en dB, correspondientes a la simulación del estado actual (EA) y a la propuesta de rehabilitación acústica (RE), para la configuración de iglesia ocupada con la fuente en la posición 1, coincidente con el altar.

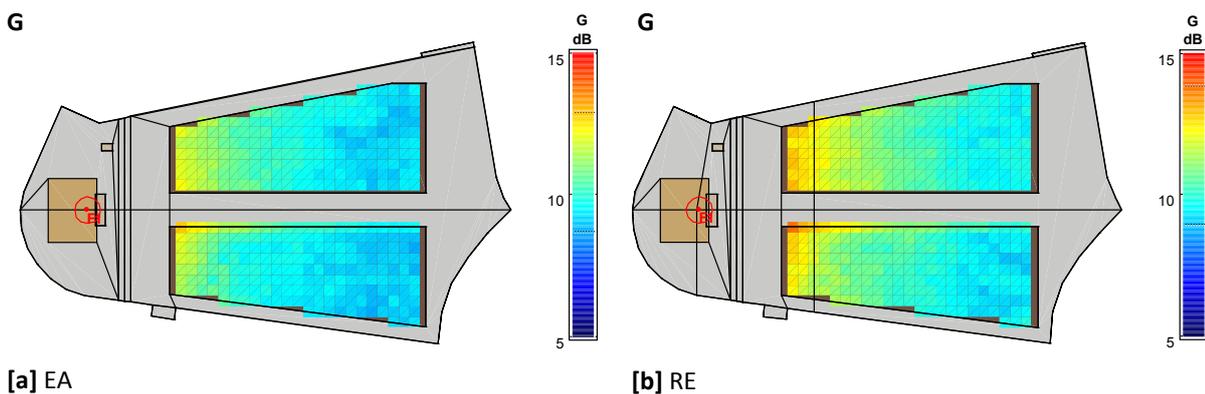


Figura 6.6.39. Fuerza acústica G global en dB. Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

Tanto en el mapa de distribución sonora del estado actual (figura 6.6.39 [a]) como en el de la propuesta (figura 6.6.39 [b]), puede observarse una gran homogeneidad del nivel sonoro sobre la superficie de audiencia, con la excepción normal de las zonas donde predomina el campo directo. Los valores medios de presión sonora y la desviación estándar en el estado actual son 9,85 dB y 0,82 dB, respectivamente. En el caso de la propuesta de rehabilitación son 10,48 dB y 1 dB.

Impresión espacial

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
J_{LF}	MEDIDO Vacío	0,10	0,22	0,22	0,22	0,18	0,20
		0,05	0,10	0,06	0,04	0,04	0,02
	SIMULADO EA Vacío	0,28	0,21	0,31	0,29	0,27	0,29
		0,13	0,05	0,09	0,07	0,04	0,04
	SIMULADO EA Ocupado	0,28	0,20	0,28	0,30	0,27	0,27
		0,14	0,08	0,07	0,06	0,08	0,03
	SIMULADO RE Vacío	0,29	0,19	0,27	0,31	0,29	0,27
		0,16	0,06	0,04	0,09	0,07	0,06
	SIMULADO RE Ocupado	0,28	0,19	0,27	0,28	0,25	0,24
		0,16	0,05	0,09	0,06	0,07	0,04

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
IACC _E	MEDIDO Vacío	0,92	0,77	0,50	0,27	0,18	0,16
		0,03	0,08	0,11	0,08	0,09	0,06
	SIMULADO EA Vacío	0,98	0,84	0,50	0,45	0,42	0,59
		0,01	0,04	0,13	0,12	0,09	0,05
	SIMULADO EA Ocupado	0,98	0,85	0,54	0,41	0,41	0,60
		0,01	0,04	0,09	0,10	0,11	0,06
	SIMULADO RE Vacío	0,98	0,85	0,49	0,40	0,36	0,52
		0,01	0,05	0,07	0,11	0,09	0,09
	SIMULADO RE Ocupado	0,98	0,86	0,54	0,42	0,37	0,53
		0,01	0,04	0,10	0,08	0,09	0,06

Tabla 6.6.25. Valores de la fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial IACC_E. Promediado espacial (arriba) y desviación estándar (abajo). Fuente 1.

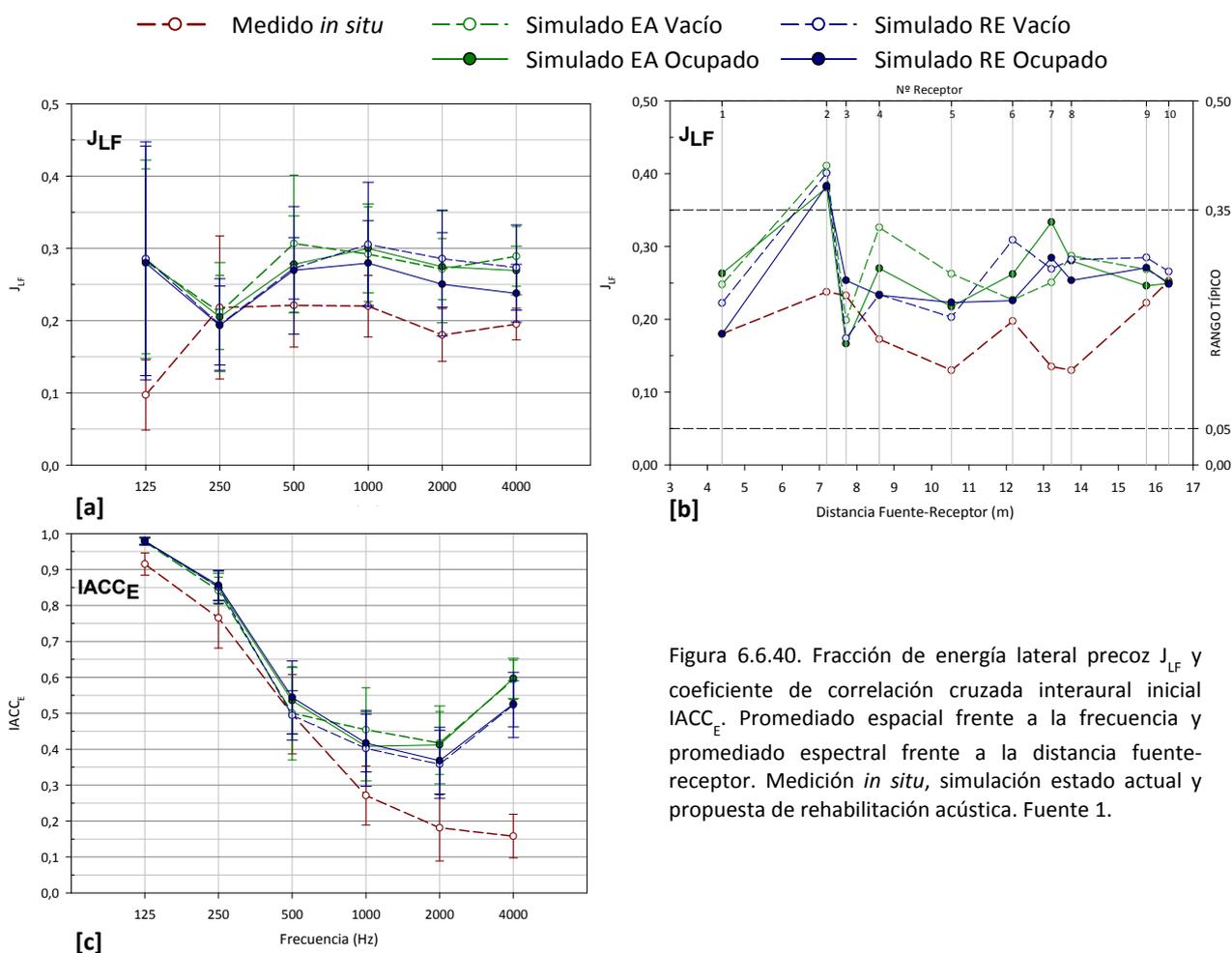


Figura 6.6.40. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial IACC_E. Promediado espacial frente a la frecuencia y promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor. Medición *in situ*, simulación estado actual y propuesta de rehabilitación acústica. Fuente 1.

Los resultados de los parámetros relacionados con la impresión espacial, fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) y coeficiente de correlación cruzada interaural inicial (IACC_E) indican que tras la intervención acústica, el oyente sigue manteniendo buenas condiciones de impresión espacial, permaneciendo envuelto en la sensación sonora y con capacidad de situar espacialmente las posibles fuentes.

En la figura 6.6.40 [a], se muestran los resultados promediados espacialmente de J_{LF} correspondientes a la propuesta de mejora, apreciándose que son similares a los obtenidos en el estado actual, con diferencias inferiores a 1 JND. En el promediado espectral de este parámetro (figura 6.6.40 [b]), de nuevo se aprecian diferencias sensibles entre los diferentes puntos de recepción, ya que se trata de un indicador difícil de simular.

En cuanto a los valores de $IACC_E$ (figura 6.6.40 [c]), destacar que con la propuesta de rehabilitación los resultados, para ambas condiciones de ocupación, son casi coincidentes. Para frecuencias superiores a 500 Hz, los valores son más bajos que los del estado actual, difiriendo menos de 1 JND respecto a éstos. No obstante, los resultados de $IACC_{E3}$ (0,43 para la iglesia vacía y 0,44 para la iglesia ocupada) corresponderían una amplitud de fuente sonora muy buena, según Beranek para auditorios y salas de conciertos.

La distribución espacial de la fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) global sobre la superficie de la audiencia, muestra resultados muy similares tanto en el estado actual (figura 6.6.41 [a]) como con la propuesta de rehabilitación (figura 6.6.41 [b]). En ambos casos, la energía que percibe el oyente de las direcciones laterales es bastante homogénea, si bien los valores más altos se registran en las franjas delanteras y traseras de la audiencia.

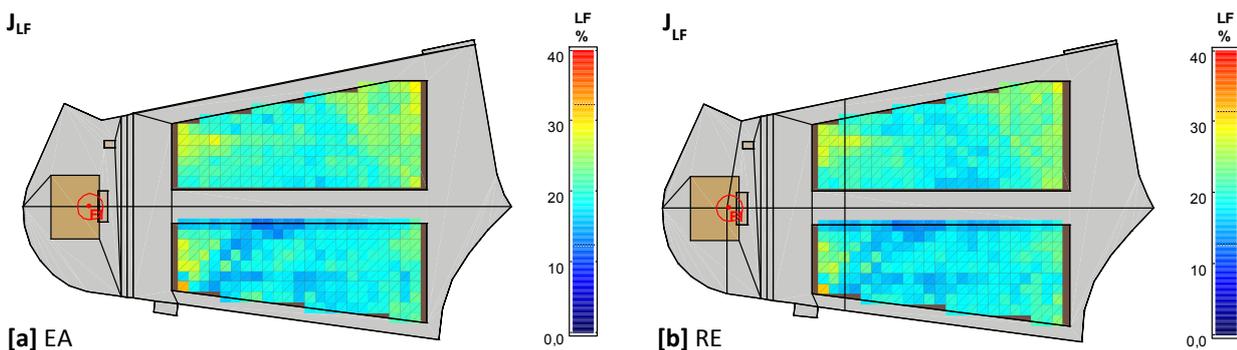


Figura 6.6.41. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} global (%). Simulaciones estado actual (EA) y propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia ocupada, fuente 1.

6.6.3.5. ESTUDIO DE LA INTELIGIBILIDAD MEDIANTE EL ÍNDICE DE TRANSMISIÓN DE LA PALABRA (SIN Y CON APOYO ELECTROACÚSTICO)

Al igual que en las iglesias anteriores, en este apartado se evalúa la inteligibilidad en esta iglesia mediante el índice de transmisión de la palabra (STI). Junto a las hipótesis estudiadas anteriormente para el resto de parámetros acústicos, se aportan, además, los resultados correspondientes a la simulación de la propuesta de rehabilitación acústica con apoyo electroacústico (AE) vacío y ocupado, ofreciéndose los datos registrados en los diez puntos de recepción, frente a la distancia fuente-receptor (tabla 6.6.23). En la representación gráfica (figura 6.6.42), los valores se contrastan con la escala de inteligibilidad subjetiva.

CONFIGURACIÓN		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
STI	MEDIDO Vacío	0,69	0,58	0,57	0,60	0,56	0,53	0,55	0,52	0,58	0,53
	SIMULADO EA Vacío	0,70	0,64	0,64	0,64	0,65	0,62	0,62	0,66	0,64	0,66
	SIMULADO EA Ocupado	0,74	0,69	0,68	0,69	0,68	0,67	0,67	0,68	0,69	0,68
	SIMULADO RE Vacío	0,66	0,62	0,61	0,63	0,63	0,61	0,61	0,63	0,63	0,64
	SIMULADO RE Ocupado	0,68	0,65	0,65	0,66	0,66	0,63	0,64	0,64	0,66	0,65
	SIMULADO RE+AE Vacío	0,64	0,67	0,73	0,70	0,74	0,70	0,72	0,70	0,70	0,70
	SIMULADO RE+AE Ocupado	0,69	0,71	0,77	0,74	0,78	0,74	0,75	0,74	0,73	0,73

Tabla 6.6.23. Valores del índice de transmisión de la palabra (STI) en cada punto de recepción. Fuente 1.

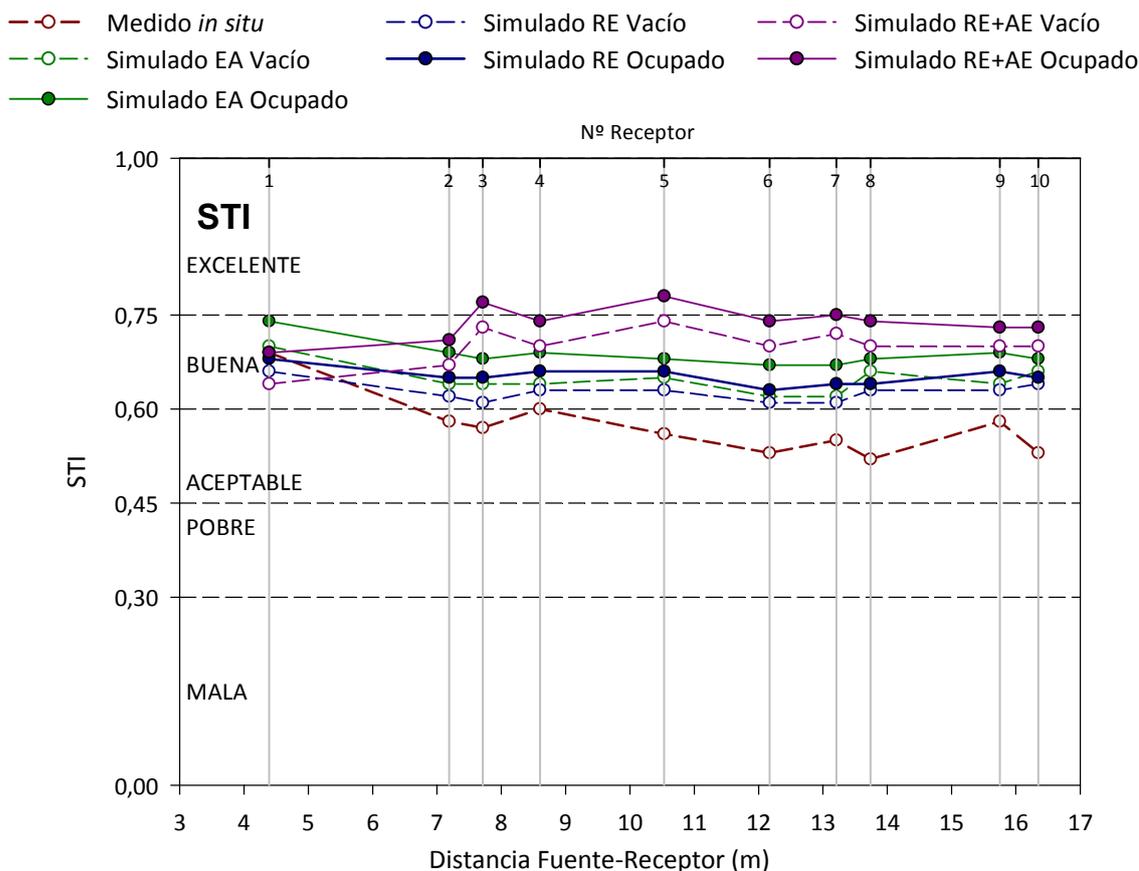


Figura 6.6.42. Índice de transmisión de la palabra STI frente a la distancia fuente-receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad. Medición *in situ*, simulación estado actual, propuesta de rehabilitación acústica con apoyo electroacústico. Fuente 1.

A diferencia de otras iglesias analizadas en esta investigación, la Iglesia de Pumarejo en su estado actual parte de unas condiciones favorables en lo referente a inteligibilidad de la palabra, ya que los valores simulados con la sala vacía y ocupada se califican como buenos (figura 6.6.42).

El ligero aumento de los tiempos de reverberación, para frecuencias superiores a 500 Hz, que la intervención propone para evitar un recinto sordo a frecuencias altas, conlleva una leve disminución de los valores del STI en cada punto de recepción respecto a los del estado actual, si bien la inteligibilidad de la palabra se califica como buena, tanto para la iglesia vacía como ocupada.

Sin embargo, al incorporar, junto a los nuevos revestimientos, un sistema de apoyo electroacústico compuesto por un altavoz de columna (marca *Duran Audio BV*, modelo *DC180 Axys Intellivox*²⁶) dispuesto en el lado izquierdo del

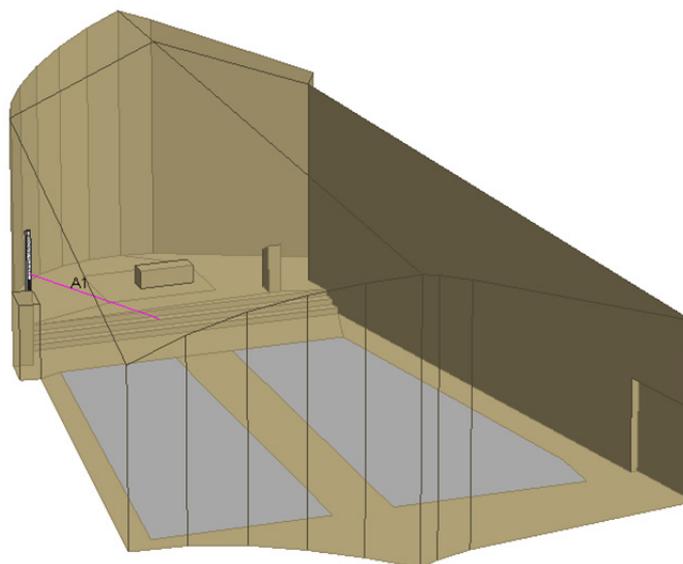


Figura 6.6.43. Modelo tridimensional: posición de altavoz.

²⁶ Los datos técnicos del equipo fueron descritos al realizar el análisis de inteligibilidad con apoyo electroacústico de la iglesia de Santa Ana de Moratalaz.

presbiterio a una altura de 1,40 m desde el suelo al centro del altavoz (figura 6.6. 43), se mejoran notablemente los resultados de la inteligibilidad. En el caso de la sala vacía, la inteligibilidad se sigue calificando como buena, aunque los valores obtenidos son mejores que sin el sistema de apoyo electroacústico. Para la iglesia ocupada, la inteligibilidad se considera entre buena y excelente en los puntos de recepción estudiados. El aumento medio de este parámetro, al introducir el apoyo electroacústico junto a las demás medidas correctoras, es del 11% y 14% para la sala vacía y ocupada, respectivamente.

Para analizar la distribución espacial de resultados sobre la superficie de audiencia, en la figura 6.6.44 se aportan los mapas de resultados del índice de transmisión de la palabra (STI), correspondientes a la simulación del estado actual (EA), tras la propuesta de rehabilitación acústica (RE) y tras dicha propuesta con la utilización del sistema de apoyo electroacústico (RE+AE), todos ellos en su configuración de iglesia ocupada y con la fuente en posición 1, coincidente con el altar, o con el altavoz en el presbiterio.

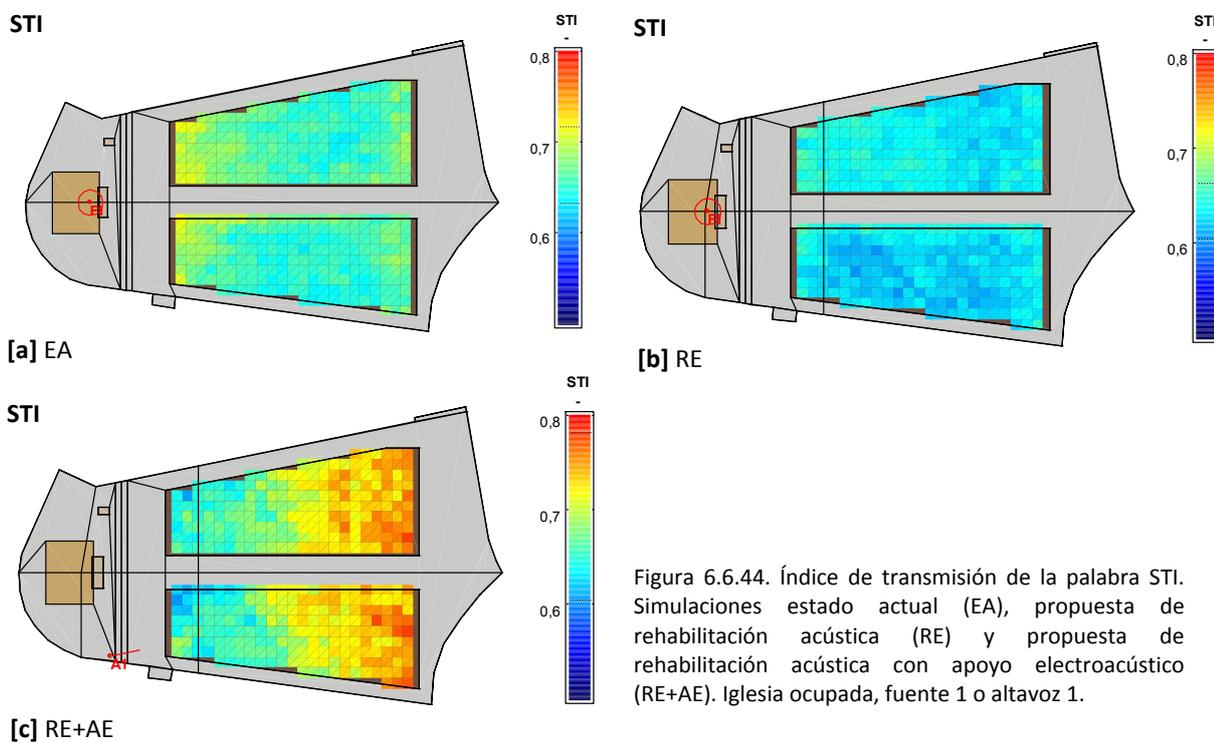


Figura 6.6.44. Índice de transmisión de la palabra STI. Simulaciones estado actual (EA), propuesta de rehabilitación acústica (RE) y propuesta de rehabilitación acústica con apoyo electroacústico (RE+AE). Iglesia ocupada, fuente 1 o altavoz 1.

Los resultados de la figura 6.6.44 [a] (estado actual) presentan una distribución bastante homogénea, siendo los valores ligeramente mejores en las zonas delanteras de la audiencia. El valor medio obtenido es de 0,66. En la figura 6.6.44 [b], se aprecia el descenso en los valores del STI que provoca la propuesta de rehabilitación, siendo su valor medio 0,63. Sin embargo, la figura 6.6.44 [c] refleja la repercusión del sistema electroacústico (unido a la propuesta de rehabilitación) en la mejora de la inteligibilidad en las zonas posteriores de la audiencia. En este caso, el valor medio registrado es de 0,70. En dicho mapa de distribución se observa que en las filas delanteras de la audiencia se registran los valores más bajos del STI. No obstante, y como se indicó con anterioridad, hay que tener en cuenta el efecto favorable del sonido directo que proviene directamente del orador, además del propio del sistema electroacústico.

6.6.3.6. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO

Al igual que el caso de la iglesia de Santa María Magdalena, la iglesia de Pumarejo también contaba con un techo absorbente desde su construcción. Esto queda reflejado en los valores de absorción sonora mostrados en la tabla 6.6.26 y en la figura 6.6.45. En ellas se aprecia que es esta zona la que tiene más peso en la absorción total, debido a su elevada absorción sonora a frecuencias medias y altas, tal y como se refleja en las gráficas de la figura A2.8 del anexo 2.

REVESTIMIENTO	ABSORCIÓN SONORA (m ²)			
	EA VACÍO	EA OCUP	RE VACÍO	RE OCUP
TECHO	155,73	155,73	128,31	128,31
BANCOS	22,02	98,42	53,53	98,42
OTROS MATERIALES	30,18	30,18	30,18	30,18
ABSORCIÓN TOTAL (A_t)	207,93	284,34	212,02	256,91

Tabla 6.6.26. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²).

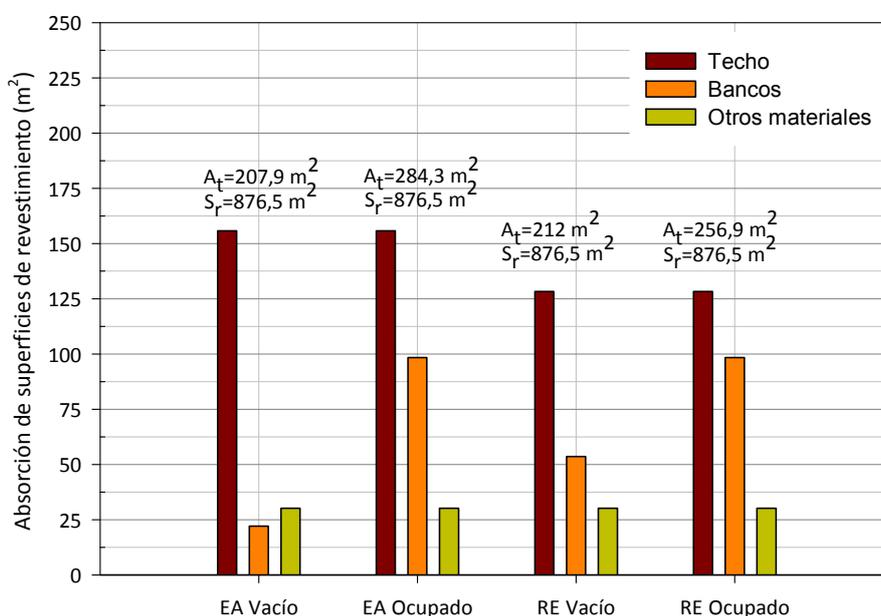


Figura 6.6.45. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promediados en frecuencia del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica (RE).

Sin embargo, con la intervención planteada, la absorción sonora asociada a este elemento disminuye sensiblemente (21,4%), debido a las características absorbentes del panel propuesto para el techo del presbiterio y el primer tercio de la nave (con elevada absorción a bajas frecuencias y poca absorción a medias y altas frecuencias), resultando un valor promedio menor que en el estado actual. La diferencia de absorción sonora entre los bancos vacíos y ocupados, tanto en el estado actual como tras la propuesta, es la menor registrada para todas las iglesias de la muestra de estudio.

6.6.3.7. CONCLUSIONES

La iglesia de Santiago de Pumarejo de Tera es la única de la muestra de este trabajo de investigación, que en su estado actual, posee buenas condiciones acústicas. Las razones que se consideran determinantes en este comportamiento las podemos sintetizar en tres puntos: a) Su reducido tamaño y volumen con respecto a sus predecesoras; b) Su forma y proporciones, muy condicionadas por los límites del solar; y, c) Al tratarse de una de las últimas iglesias construidas por Fisac, y a pesar de la falta de recursos, es un espacio donde se conjugan las formas arquitectónicas y el empleo de materiales absorbentes.

A pesar de este buen comportamiento sonoro, y por tanto del estrecho margen de mejora, la propuesta de rehabilitación acústica consigue ajustar los resultados de los parámetros relacionados

con la reverberación y mejorar la inteligibilidad de la palabra. Sin embargo, con el análisis y valoración de los resultados de los distintos parámetros acústicos, se ha comprobado que los relacionados con la claridad del sonido percibida, el nivel sonoro subjetivo o la impresión espacial, presentaban valores adecuados antes de la propuesta y, tras ésta, apenas cambian sus resultados.

7

ANÁLISIS Y VALORACIÓN SONORA GLOBAL DE LA MUESTRA DE IGLESIAS

Tras la valoración acústica individual de las iglesias que componen la muestra de estudio, desde el análisis pormenorizado de sus condiciones sonoras actuales hasta las previstas tras la propuesta de rehabilitación acústica, en este capítulo se valora globalmente el comportamiento acústico de la muestra, a partir del análisis de los siguientes apartados:

- 7.1. Los parámetros acústicos valorados para cada iglesia en el capítulo 6.
- 7.2. La absorción sonora inicial y final de los espacios estudiados.
- 7.3. Las relaciones geométricas y de aforo.
- 7.4. La correlación del tiempo de reverberación y las relaciones del apartado 7.3.
- 7.5. El análisis energético en relación al modelo analítico μ .

En el primer apartado se valoran los parámetros acústicos relacionados con los aspectos acústicos subjetivos del oyente: reverberación, inteligibilidad de la palabra y claridad musical, nivel sonoro subjetivo, impresión espacial y ruido de fondo. Los resultados de cada parámetro, y su correspondiente análisis, se presentan de dos formas: mostrando los resultados promediados espacialmente y en frecuencia, para las bandas de octava especificadas en la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 o, en su defecto, para las más representativas aceptadas internacionalmente; y, en segundo lugar, mediante el promedio espacial frente a la frecuencia.

En general, los resultados se muestran en las siguientes hipótesis y configuraciones:

- Medición *in situ* de las condiciones acústicas actuales con la iglesia vacía.
- Simulación del estado actual (EA) con la iglesia ocupada al 100%¹.
- Simulaciones de la propuesta de rehabilitación acústica (RE), tanto para la sala vacía como ocupada².

Los resultados de las cuatro hipótesis corresponden siempre a la fuente en posición 1.

En el caso de las iglesias del colegio Asunción Cuestablanca y de Santa Cruz de Oleiros, en las que se realizaron dos propuestas de rehabilitación acústica, los resultados recogidos en este apartado, corresponden a la propuesta que consigue un mejor comportamiento acústico del recinto, es decir, la propuesta 2 para la iglesia de Cuestablanca y la propuesta 1 para la iglesia de Santa Cruz.

Para mayor claridad de las gráficas, cada parámetro se representa frente al volumen interior del recinto, con lo que los resultados de las distintas hipótesis de cada iglesia coinciden en la misma vertical³. A su vez, cada iglesia se identifica con un código abreviado. En la tabla 7.1 se especifican dichos códigos y los volúmenes de los recintos eclesiales, ordenados de menor a mayor, correspondientes al estado actual (EA) y tras implementar las propuestas de rehabilitación (RE). Además se indica si el volumen eclesial permanece inalterado (=) o si la intervención propone la reducción del mismo, cuantificando, en este caso, el porcentaje reducido (\downarrow X%).

¹ Excepto en promediados espaciales frente a la frecuencia.

² Los valores promediados espacialmente frente a la frecuencia corresponden sólo a las iglesias vacías.

³ Excepto para las iglesias de Santa Ana y Flor del Carmelo, donde la propuesta de rehabilitación acústica (RE) propone la reducción del volumen eclesial.

IGLESIA	PUMAREJO DE TERA	FLOR DEL CARMELO	CUESTABLANCA	SANTA ANA	SANTA CRUZ	S.M. MAGDALENA
CÓDIGO	PT	FC	CU	SA	SC	SM
VOLUMEN EA (m ³)	1424	2528	3188	3674	3812	4583
VOLUMEN RE (m ³)	1424 (=)	2476 (↓2%)	3188 (=)	3486(↓5%)	3812 (=)	4583 (=)

Tabla 7.1. Códigos de las iglesias y volúmenes de los recintos eclesiales correspondientes al estado actual (EA) y a la propuesta de rehabilitación acústica (RE).

A partir de la valoración de la absorción sonora de cada iglesia realizada en el capítulo anterior, en el segundo apartado de esta sección, se analiza globalmente la absorción sonora para el conjunto de la muestra, tratando varios aspectos:

- Para el estado actual y tras las intervenciones acústicas propuestas, se compara la absorción sonora de los elementos y materiales de revestimientos más significativos (techo, bancos y muro de fondo).
- Se analizan los resultados de las relaciones entre superficie de revestimientos y absorción sonora total (S_r/At), y entre volumen y absorción sonora total (V/At), comparando sus valores para las mismas configuraciones del punto anterior.
- Para las propuestas de rehabilitación acústica, se estudia la dependencia de la variable absorción sonora total (At) frente a la superficie de revestimiento (S_r) y el volumen (V).

En tercer lugar, se presentan las relaciones geométricas y de aforo, estudiadas individualmente para cada iglesia en el capítulo 6, contrastándose de forma global para la muestra de estudio y comparando los resultados con los valores recomendados.

En el cuarto apartado del capítulo, se realiza una correlación de parámetros, contrastando los resultados del tiempo de reverberación con los de las relaciones geométricas y de aforo del apartado anterior.

Finalmente, se incluye el análisis energético de las iglesias de la muestra, en relación al modelo analítico μ , desarrollado en las investigaciones de las iglesias gótico-mudéjares⁴, y que pudiera servir de base para la estimación y predicción de algunos parámetros, tanto geométricos como acústicos, en la tipología de iglesias estudiadas en este trabajo de investigación.

⁴ Zamarreño, T., Girón, S. y Galindo, M. (2007). Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 121, p. 234–250.

7.1. ASPECTOS SUBJETIVOS DEL OYENTE

Reverberación

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	PT	FC	CU	SA	SC	SM
$T_{30, \text{mid}}$ (s)	MEDIDO Vacío	1,04	4,09	4,12	5,73	6,79	2,61
	SIMULADO EA Ocupado	0,91	1,72	2,42	2,25	2,65	2,47
	SIMULADO RE Vacío	1,12	1,15	1,63	1,72	1,26	1,56
	SIMULADO RE Ocupado	0,98	1,08	1,56	1,58	1,14	1,56

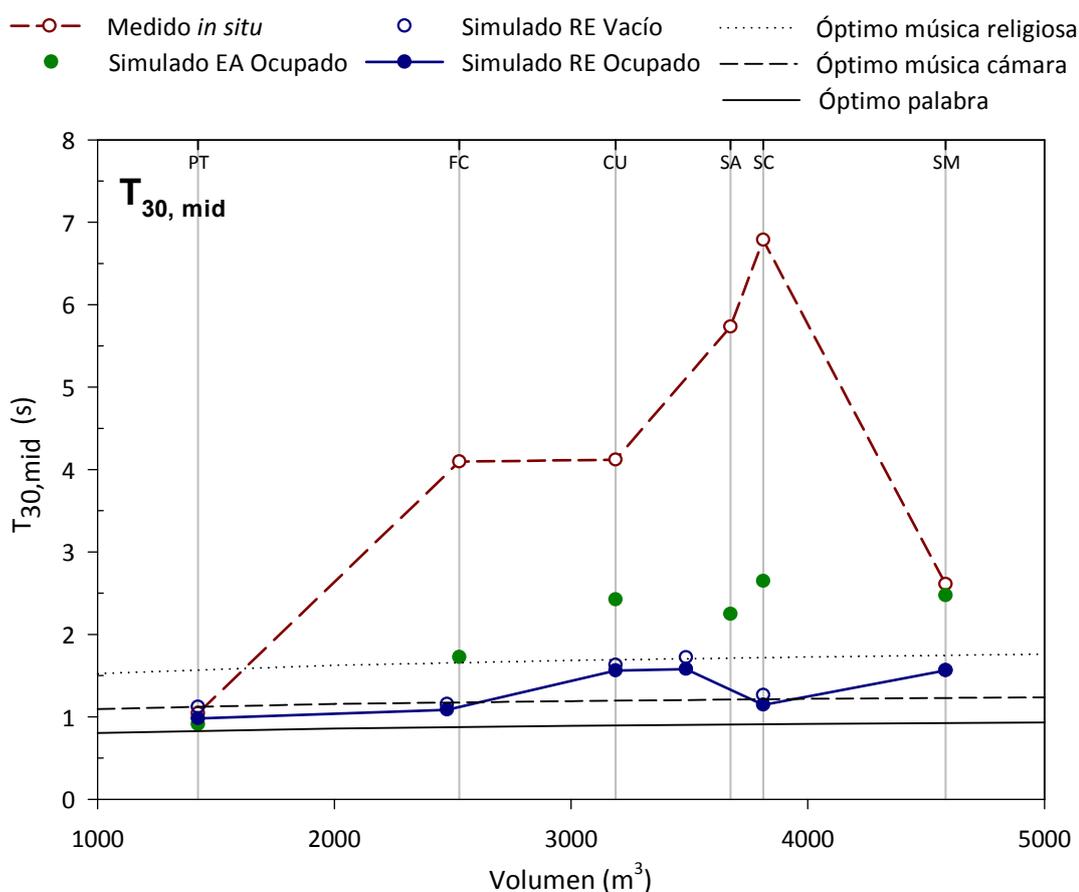
Tabla 7.2. Valores del tiempo de reverberación medio $T_{30, \text{mid}}$ (s).

Figura 7.1. Tiempo de reverberación $T_{30, \text{mid}}$ (s). Promediado espacial frente al volumen. Medición *in situ*, simulación estado actual (ocupado) y propuesta de rehabilitación acústica (vacío y ocupado). Fuente 1.

Los valores del tiempo de reverberación presentados en la tabla 7.2 y en la figura 7.1 corresponden al $T_{30, \text{mid}}$ (media aritmética de los valores de T_{30} correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1kHz). En la citada gráfica, los resultados se comparan con los tiempos de reverberación óptimos propuestos por Knudsen y Harris⁵.

En estos resultados, que recogen el comportamiento global de la muestra, se distinguen dos grupos claramente diferenciados: el primero, constituido por aquellas iglesias proyectadas por Fisac con tratamientos absorbentes (PT y SM), y el segundo, formado por las iglesias cuyo revestimiento interior principal es el hormigón visto (FC, CU, SA y SC). En la tabla 7.3 se resumen los valores promedio del $T_{30, \text{mid}}$ para cada configuración y grupo de iglesia.

⁵ Knudsen, V.O. y Harris, C.M. (1988). *Acoustical Designing in Architecture*. (5 Ed.). Nueva York: Acoustical Society of America. p. 171-174 y 331-341.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	Techos absorbentes PT, SM	Hormigón visto FC, CU, SA, SC
$T_{30, \text{mid}}$ (s)	MEDIDO Vacío	1,82	5,18
	SIMULADO EA Ocupado	1,69	2,26
	SIMULADO RE Vacío	1,29	1,44
	SIMULADO RE Ocupado	1,24	1,34

Tabla 7.3. Valor promedio del tiempo de reverberación $T_{30, \text{mid}}$ (s) en cada configuración y grupo de iglesia.

En cuanto al primer grupo, destacar que la iglesia de Pumarejo de Tera es la de menor volumen de la muestra y que las características absorbentes sonoras debidas al techo, hacen que los valores del $T_{30, \text{mid}}$, en el estado actual, se encuentren dentro de la banda óptima definida por las curvas tonales recomendadas para la palabra y la música de cámara. Con la propuesta de rehabilitación, el valor de este indicador apenas varía para los dos estados de ocupación, ya que la intervención modifica, fundamentalmente, las frecuencias altas.

A este grupo también pertenece la iglesia de Santa María Magdalena que es la de mayor volumen de la muestra y, como vimos en el apartado 6.3 del capítulo anterior, su tiempo de reverberación presenta un comportamiento singular.

En la zona central de la gráfica, aparecen los resultados del $T_{30, \text{mid}}$ correspondientes al segundo grupo de iglesias. Todas ellas tienen en común la falta de absorción sonora en su estado original, lo que se traduce en tiempos de reverberación elevados. Es de destacar que los valores del $T_{30, \text{mid}}$, de este grupo de iglesias, crece conforme aumenta el volumen de las mismas.

Al comparar los valores del $T_{30, \text{mid}}$ obtenidos en la medición *in situ* y en la simulación del estado actual con la iglesia ocupada de fieles, se observa una disminución global media de 2,92 s del tiempo de reverberación, con un rango comprendido entre 1,7 s para la iglesia de Cuestablanca y 4,14 s para la de Santa Cruz. No obstante, esta disminución no es suficiente ya que los valores de reverberación están por encima de los recomendables.

Con la introducción de las medidas correctoras acústicas en cada iglesia, se observan dos aspectos importantes:

- Estos resultados globales de reverberación, tanto en las hipótesis de iglesias vacías como ocupadas, se sitúan dentro de la banda tonal comprendida entre los valores óptimos para la palabra y la música religiosa, definidos por Knudsen y Harris.
- Los valores del $T_{30, \text{mid}}$ para los dos estados de ocupación son muy parecidos, con lo que la acústica de cada iglesia no queda condicionada a su grado de ocupación.

En concreto, las propuestas consiguen, para las iglesias ocupadas, una disminución media del $T_{30, \text{mid}}$ de 0,92 s sobre el valor obtenido para los recintos ocupados en el estado actual. Luego la diferencia global media del $T_{30, \text{mid}}$, obtenido en las mediciones experimentales y con las intervenciones acústicas en la hipótesis de iglesias ocupadas, es de 3,84 s, con un rango comprendido entre 2,56 s para la iglesia de Cuestablanca y 5,65 s para la de Santa Cruz.

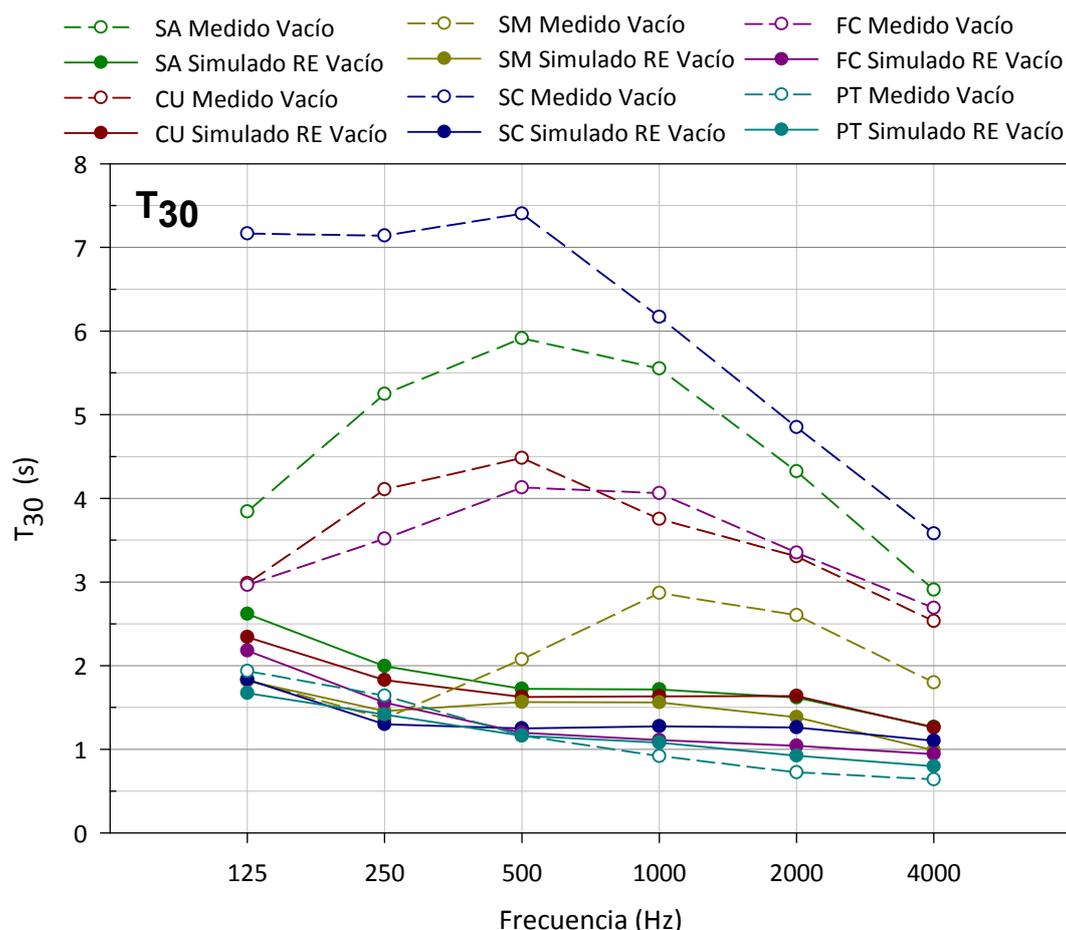


Figura 7.2. Tiempo de reverberación T_{30} (s). Promediado espacial frente a la frecuencia para todas las iglesias. Medición *in situ* y propuesta de rehabilitación acústica (vacío). Fuente 1.

En los resultados del T_{30} promediados espacialmente frente a la frecuencia (figura 7.2), de nuevo se observa una clara diferenciación entre los dos grupos de iglesias antes definidos, atendiendo a sus revestimientos interiores.

En general, en las iglesias proyectadas con revestimientos de hormigón visto, los valores más altos del T_{30} medidos *in situ* corresponden a las frecuencias medias, observándose una disminución de valores a bajas y a altas frecuencias. En el primer caso, se atribuye al comportamiento de los techos de grandes luces como resonadores de membrana, lo que hace aumentar su absorción a bajas frecuencias (excepto para la iglesia de Santa Cruz por tratarse de un techo prefabricado con mucha más rigidez). A altas frecuencias, los tiempos de reverberación registrados disminuyen debido a la absorción del aire. Las iglesias de Cuestablanca y Flor del Carmelo presentan valores por frecuencia de T_{30} similares, aunque el volumen de la primera iglesia es un 26% superior al de la segunda.

La gráfica refleja el comportamiento singular que presenta la iglesia de Santa María Magdalena, donde el panel de lana de roca empleado en el techo contribuye a la obtención de tiempos de reverberación más bajos que en las anteriores iglesias, destacando la alta absorción a frecuencias bajas por su comportamiento como un resonador de membrana. Los resultados más pequeños del T_{30} obtenidos en las medidas experimentales corresponden a la iglesia de Pumarejo de Tera, debido a la absorción sonora de los paramentos toscos de mampostería y del panel de virutas de madera prensada dispuesto en el techo, así como a su reducido volumen interior.

Con las propuestas de rehabilitación acústica, se consigue que la muestra de iglesias sea muy homogénea en cuanto al comportamiento en frecuencia del tiempo de reverberación. Ahora las curvas siguen una misma tendencia, con leves diferencias entre iglesias debido a su distinto volumen, y con unos tiempos que van disminuyendo progresivamente conforme aumenta la frecuencia y sin

presentar cambios bruscos, de igual forma que lo hacen los tiempos óptimos recomendados en la bibliografía. Para todas las iglesias, los valores de T_{30} son inferiores a 2 s a frecuencias medias.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	PT	FC	CU	SA	SC	SM
$EDT_{mid}(s)$	MEDIDO Vacío	0,81	4,12	4,08	5,74	6,72	1,35
	SIMULADO EA Ocupado	0,77	1,74	2,09	2,03	2,59	1,2
	SIMULADO RE Vacío	1,02	1,06	1,33	1,54	1,23	0,85
	SIMULADO RE Ocupado	0,89	0,99	1,16	1,29	1,06	0,83

Tabla 7.4. Valores del tiempo de caída inicial medio EDT_{mid} (s).

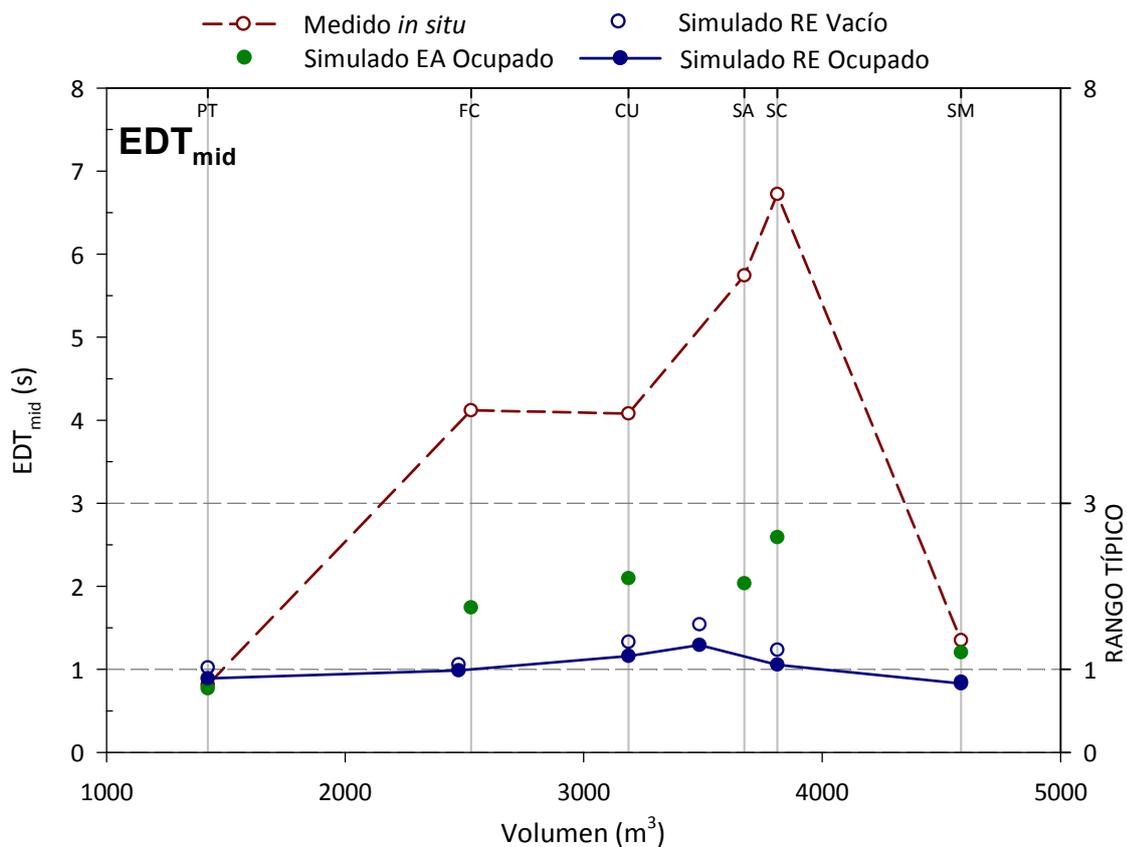


Figura 7.3. Tiempo de caída inicial EDT_{mid} (s). Promediado espacial frente al volumen. Medición *in situ*, simulación estado actual (ocupado) y propuesta de rehabilitación acústica (vacío y ocupado). Fuente 1.

Para el tiempo de reverberación inicial (EDT), los valores presentados en la tabla 7.4 y en la figura 7.3 son los correspondientes al EDT_{mid} (media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1kHz) especificado en la norma UNE de referencia.

Dada la correlación entre el $T_{30, mid}$ y el EDT_{mid} , las observaciones a realizar sobre éste último parámetro son muy similares a las realizadas anteriormente para el $T_{30, mid}$.

La disminución media del EDT_{mid} entre los valores obtenidos en las mediciones acústicas y las simulaciones del estado actual de las iglesias ocupadas es de 3,06 s, situándose, para esta última configuración, los resultados de todas las iglesias dentro del rango típico establecido por la norma, aunque como se aprecia en la gráfica 7.1, no se corresponden con los valores óptimos recomendados.

La implementación de las medidas de corrección acústicas en los recintos, supone una disminución media, para las iglesias de hormigón visto ocupadas, sobre el anterior resultado del EDT_{mid} de 0,98 s.

En los cálculos de estos valores medios se han excluido las iglesias de Santa María Magdalena y de Pumarejo de Tera.

Al igual que ocurría con el $T_{30, \text{mid}}$, con la propuesta de rehabilitación se consiguen resultados del EDT_{mid} muy similares para ambas hipótesis de ocupación. Dichos resultados se concentran en torno al límite inferior establecido por la norma y que es de 1 s.

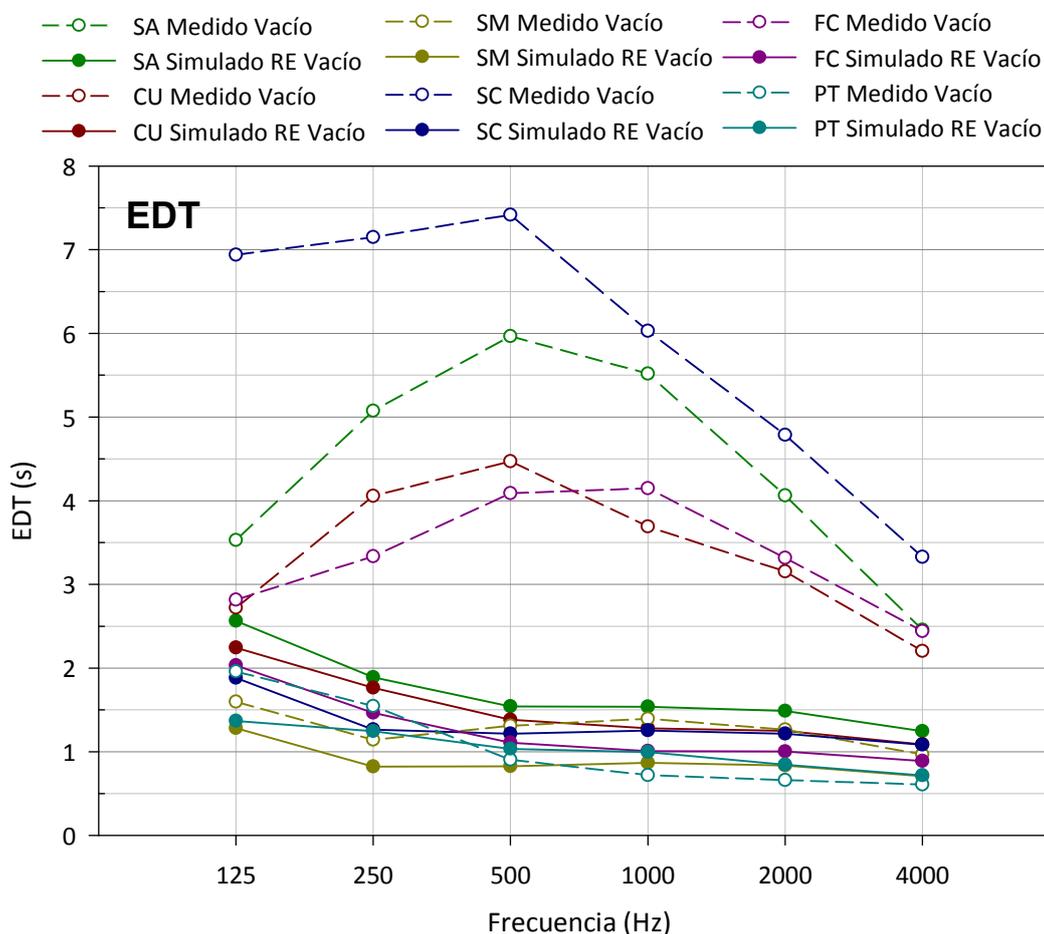


Figura 7.4. Tiempo de caída inicial EDT (s). Promediado espacial frente a la frecuencia para todas las iglesias. Medición *in situ* y propuesta de rehabilitación acústica (vacío). Fuente 1.

El análisis de la figura 7.4, correspondiente al comportamiento frecuencial del EDT para el conjunto de las iglesias, arroja comentarios similares a los realizados a la figura 7.2 relativa al T_{30} . Para la iglesia de Santa María Magdalena, cabe destacar que el rango de valores del EDT obtenidos *in situ* es similar al calculado con las simulaciones de las propuestas de intervención para todas las iglesias.

En general, aunque la mejora de los tiempos de reverberación con las propuestas de rehabilitación es común a todas iglesias, es de destacar la disminución de los mismos obtenidos para las iglesias más reverberantes, es decir, las iglesias de Santa Ana y de Santa Cruz de Oleiros. Las diferencias menores corresponden a la iglesia de Pumarejo de Tera.

Inteligibilidad de la palabra y claridad musical

En este apartado se estudian los resultados de los parámetros acústicos relativos al aspecto subjetivo de la claridad del sonido percibida: tiempo central (T_s), definición (D_{50}), claridad para la palabra (C_{50AV}), claridad musical (C_{80}) e índice de transmisión de la palabra (STI).

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	PT	FC	CU	SA	SC	SM
T_s (ms)	MEDIDO Vacío	57,55	299,42	281,71	412,46	501,63	88,56
	SIMULADO EA Ocupado	52,02	119,41	136,4	138	179,78	70,26
	SIMULADO RE Vacío	69,63	58,98	79,79	94,11	76,55	49,66
	SIMULADO RE Ocupado	61,53	53,22	68,07	74,57	61,81	46,89

Tabla 7.5. Valores del tiempo central T_s (ms) promediados para las frecuencias de 500 y 1000 Hz.

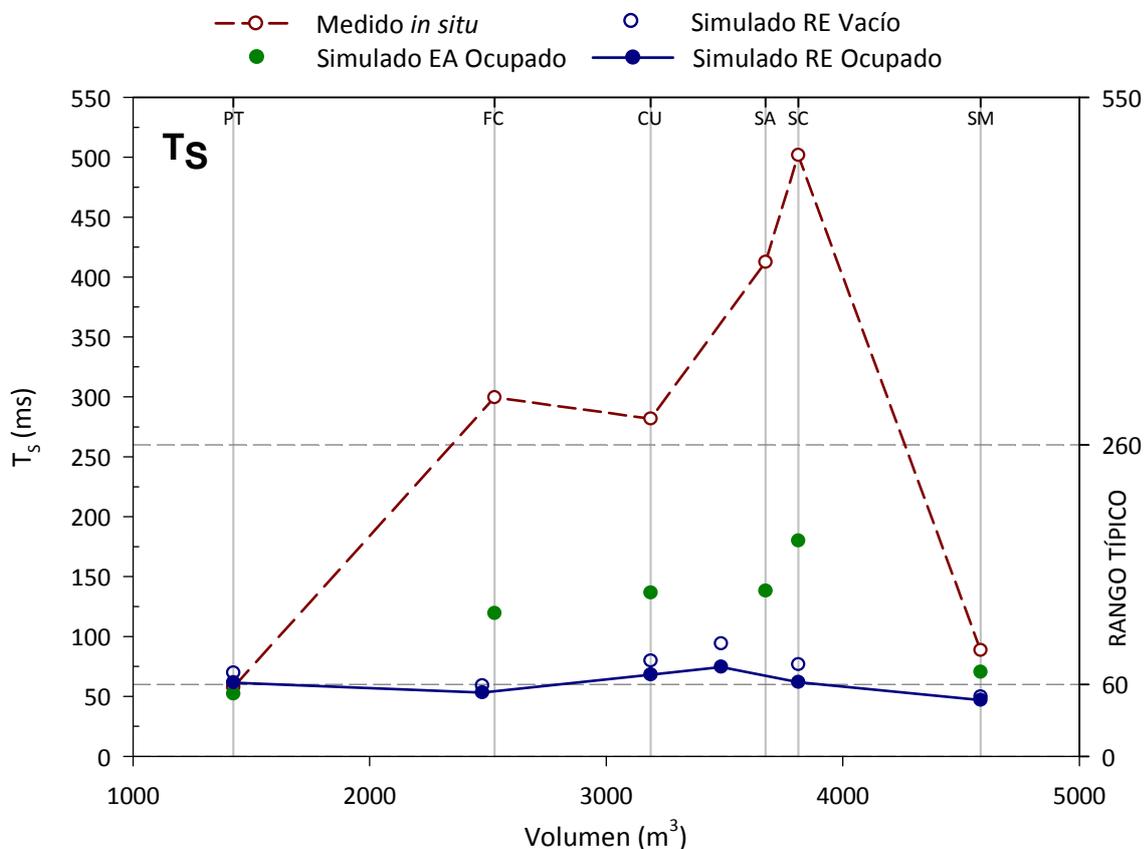


Figura 7.5. Tiempo central T_s (ms) . Promediado espacial frente al volumen. Medición *in situ*, simulación estado actual (ocupado) y propuesta de rehabilitación acústica (vacío y ocupado). Fuente 1.

En la tabla 7.5 y en figura 7.5 se facilitan los valores del tiempo central (T_s) promediados espacialmente para las frecuencias de 500 y 1000 Hz, según especifica la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. En ellas se aprecia, para cada iglesia, la evolución de los resultados del T_s y, con ello, de la nitidez del sonido en las distintas configuraciones analizadas. Frente a los altos valores del T_s registrados en la medición acústica *in situ* en las iglesias más reverberantes, las propuestas de rehabilitación acústica reducen los resultados del T_s mejorando la nitidez del sonido en las mismas. Al igual que ocurría con el EDT_{mid} , las medidas correctoras acústicas permiten obtener resultados del T_s muy similares para ambas hipótesis de ocupación, concentrándose dichos resultados en torno al límite inferior establecido por la norma y que son 60 ms. La disminución del valor medio global del tiempo central, obtenido con las simulaciones de las propuestas de intervención en las iglesias de hormigón visto ocupadas respecto a los resultados de las medidas experimentales, es de 309 ms, con un rango comprendido entre 214 ms para la iglesia de Cuestablanca y 440 ms para la de Santa Cruz.

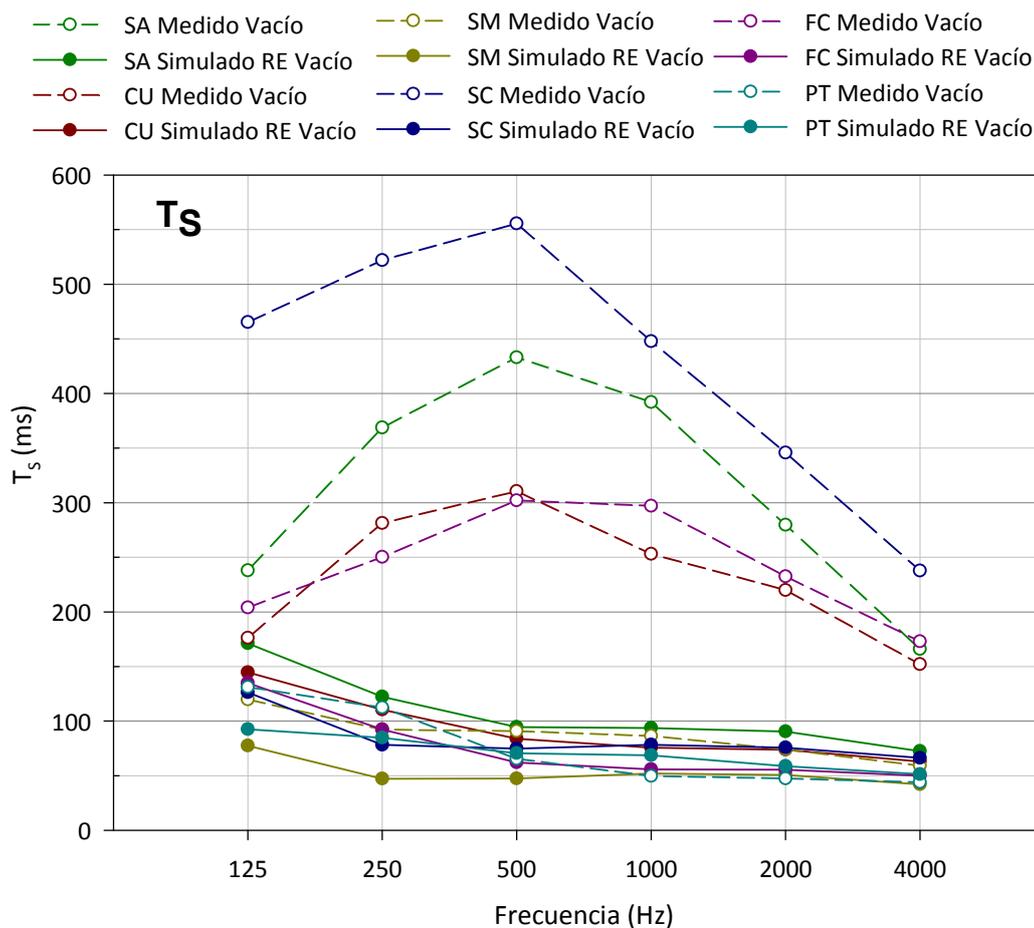


Figura 7.6. Tiempo central T_s (ms). Promediado espacial frente a la frecuencia para todas las iglesias. Medición *in situ* y propuesta de rehabilitación acústica (vacío). Fuente 1.

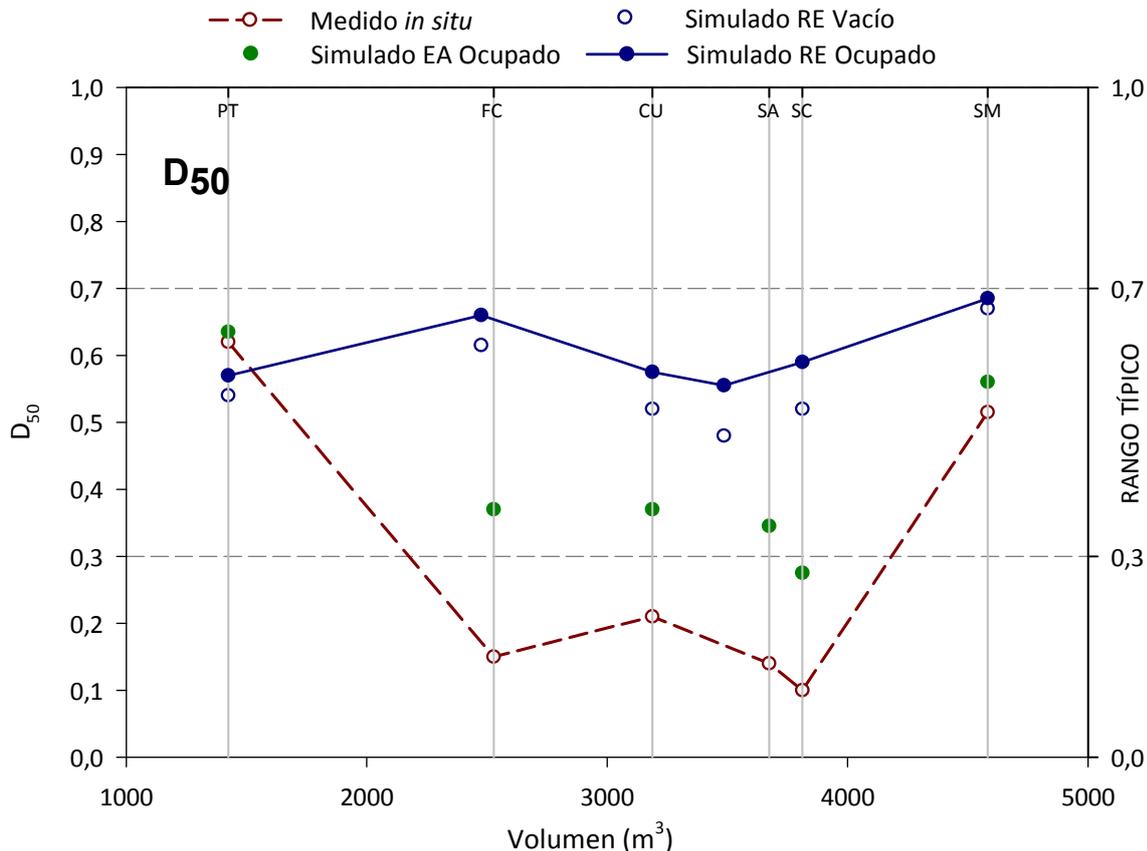
La distribución de resultados del T_s representados en la figura 7.6 es similar a la del EDT de la figura 7.4, lo que refleja la relación existente entre ambos parámetros.

De nuevo, los resultados del T_s de las medidas experimentales, denotan claramente los dos grupos de iglesias en la muestra:

- Valores elevados del T_s , y por tanto poca nitidez del sonido, corresponden a las cuatro iglesias realizadas en hormigón visto que, por su falta de absorción sonora, presentaban tiempos de reverberación elevados.
- Valores del T_s dentro del intervalo recomendado por la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 (entre 60 y 260 ms a frecuencias medias), y con ello, nitidez adecuada, en las iglesias con revestimientos absorbentes (PT y SM).

Las actuaciones propuestas en las iglesias mejoran el comportamiento global de la muestra, haciendo que la tendencia de resultados del T_s sea mucho más homogénea y de valores acordes con el rango típico de la citada norma.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	PT	FC	CU	SA	SC	SM
D ₅₀	MEDIDO Vacío	0,62	0,15	0,21	0,14	0,1	0,52
	SIMULADO EA Ocupado	0,64	0,37	0,37	0,35	0,28	0,56
	SIMULADO RE Vacío	0,54	0,62	0,52	0,48	0,52	0,67
	SIMULADO RE Ocupado	0,57	0,66	0,58	0,56	0,59	0,69

Tabla 7.6. Valores promedio de la definición D₅₀ promediados para las frecuencias de 500 y 1000 Hz.Figura 7.7. Definición D₅₀. Promediado espacial frente al volumen. Medición *in situ*, simulación estado actual (ocupado) y propuesta de rehabilitación acústica (vacío y ocupado). Fuente 1.

Los valores aportados para la definición (D₅₀) en este apartado corresponden al promediado espacial para las frecuencias de 500 Hz y 1kHz según establece la norma UNE de referencia.

Frente a los bajos resultados de la definición obtenidos en las medidas experimentales con las iglesias de hormigón vacías, la figura 7.7 muestra la mejora sucesiva de este parámetro en las simulaciones: primero al considerar la presencia de los fieles en las iglesias y, posteriormente, al simular las propuestas de rehabilitación de cada iglesia vacía y ocupada (salvo PT). En estas dos últimas configuraciones, los valores del D₅₀ para todas las iglesias se sitúan en la mitad superior del rango típico establecido por la citada norma. El aumento del valor medio global del D₅₀, obtenido con las simulaciones de las propuestas de intervención con las iglesias ocupadas (excluyendo la iglesia de Santa María Magdalena y de Pumarejo de Tera) respecto a las medidas experimentales, es de 0,45, con un rango comprendido entre 0,37 para la iglesia de Cuestablanca y 0,51 para la de Flor del Carmelo.

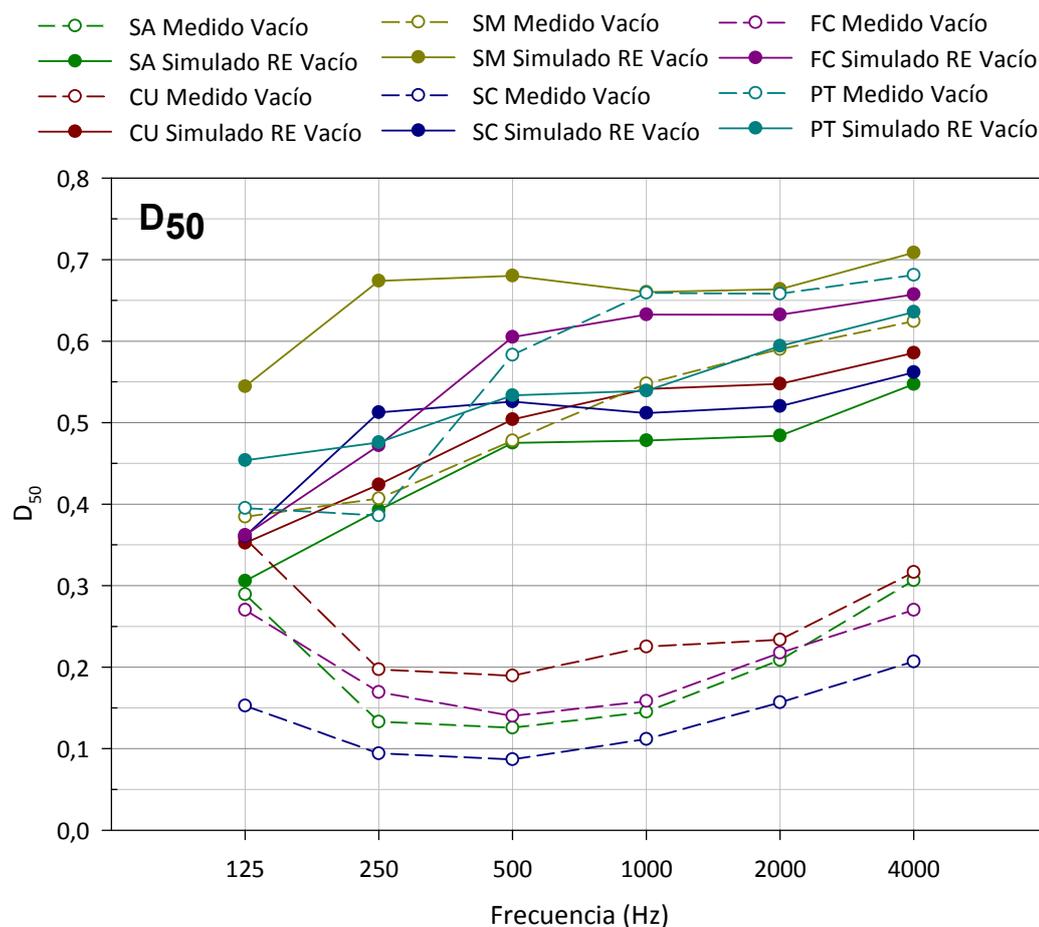
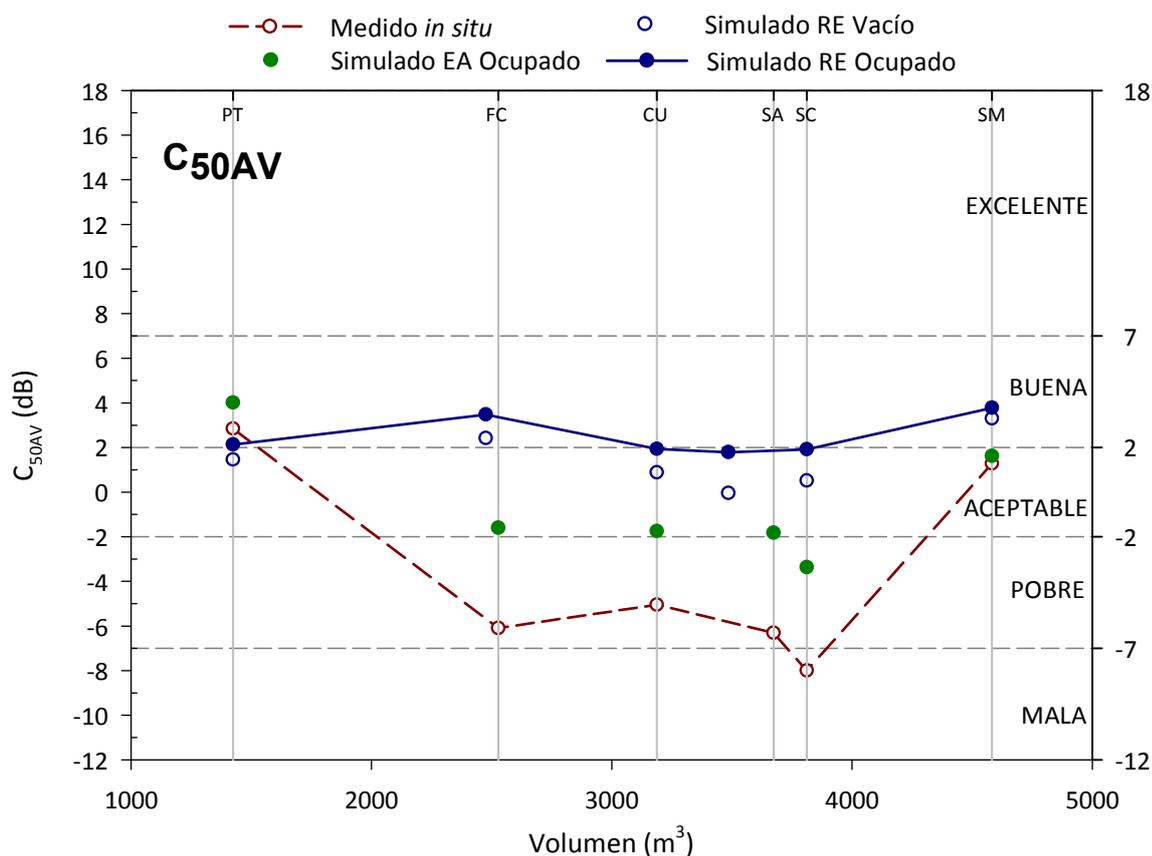


Figura 7.8. Definición D_{50} . Promediado espacial frente a la frecuencia para todas las iglesias. Medición *in situ* y propuesta de rehabilitación acústica (vacío). Fuente 1.

En la figura 7.8, se aprecia que en los resultados medidos *in situ* de la definición distinguimos, nuevamente, dos grupos: el primero, correspondiente a las iglesias de hormigón visto con valores muy bajos de D_{50} para las frecuencias medias; y el segundo, formado por las iglesias de Santa María Magdalena y Pumarejo de Tera, con valores adecuados para la definición.

Con la propuesta de rehabilitación acústica, la definición mejora para todas las iglesias (salvo PT a medias y altas frecuencias por los motivos aludidos en su análisis individual), sobre todo en las iglesias de hormigón visto que son las que más margen de mejora presentan. Los nuevos valores de la definición a medias frecuencias se sitúan dentro del rango típico de la norma.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	PT	FC	CU	SA	SC	SM
C_{50AV} (dB)	MEDIDO Vacío	2,84	-6,1	-5,05	-6,31	-8	1,27
	SIMULADO EA Ocupado	4,01	-1,61	-1,75	-1,83	-3,37	1,62
	SIMULADO RE Vacío	1,45	2,41	0,88	-0,05	0,51	3,3
	SIMULADO RE Ocupado	2,13	3,48	1,93	1,79	1,92	3,78

Tabla 7.7. Valores promedio de la claridad para la palabra C_{50AV} (dB) promediados para las frecuencias de 500 y 1000 Hz.Figura 7.9. Claridad para la palabra C_{50AV} (dB). Promediado espacial frente al volumen. Medición *in situ*, simulación estado actual (ocupado) y propuesta de rehabilitación acústica (vacío y ocupado). Fuente 1.

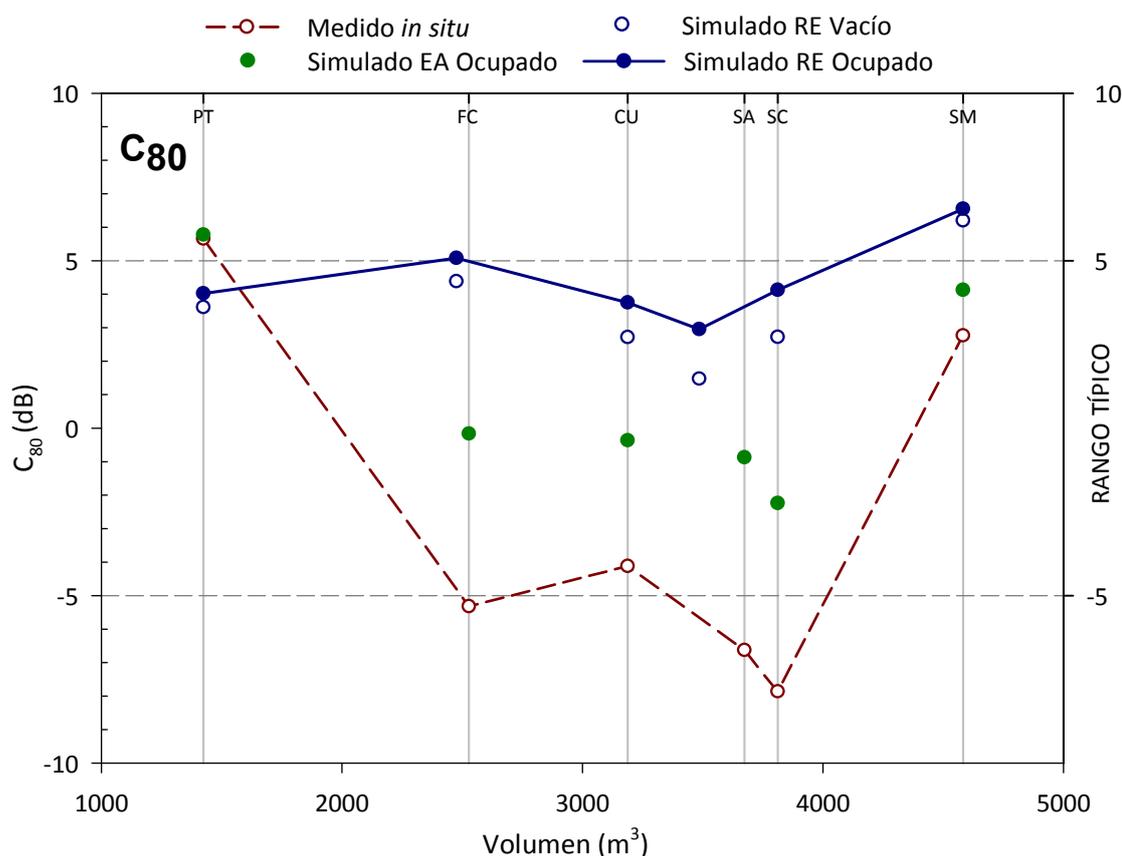
Para la claridad de la palabra se analizan los valores promediados espacialmente del C_{50AV} y se contrastan con la escala de valoración de Marshall⁶. El comportamiento de este parámetro es muy similar al que presenta el D_{50} .

En la figura 7.9, se observa que, salvo para las iglesias de Pumarejo de Tera y Santa María Magdalena, la claridad para la palabra de las demás iglesias, obtenida en las mediciones acústicas realizadas *in situ*, se califica entre pobre y mala. Las simulaciones con las iglesias ocupadas permiten predecir una claridad aceptable en casi todos los recintos.

Las actuaciones sobre los revestimientos interiores de las iglesias mejoran el C_{50AV} para ambos estados de ocupación, pudiéndose calificar la claridad para la palabra como buena en todas las iglesias ocupadas. En estos casos, el aumento del valor medio global del C_{50AV} en las iglesias de hormigón visto, respecto a las medidas experimentales, es de 8,68 dB en la hipótesis de ocupación al 100%, con un rango comprendido entre 6,98 dB para la iglesia de Cuestablanca y 9,92 dB para la de Santa Cruz.

⁶ Marshall, L.G. (1994). An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96 (4), p. 2251-2261.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	PT	FC	CU	SA	SC	SM
C_{80} (dB)	MEDIDO Vacío	5,66	-5,33	-4,13	-6,63	-7,87	2,76
	SIMULADO EA Ocupado	5,77	-0,17	-0,37	-0,88	-2,24	4,13
	SIMULADO RE Vacío	3,61	4,38	2,71	1,47	2,72	6,2
	SIMULADO RE Ocupado	4,02	5,08	3,75	2,95	4,12	6,55

Tabla 7.8. Valores de la claridad musical C_{80} (dB) promediados para las frecuencias de 500 y 1000 Hz.Figura 7.10. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente al volumen. Medición *in situ*, simulación estado actual (ocupado) y propuesta de rehabilitación acústica (vacío y ocupado). Fuente 1.

Para la valoración de la claridad musical, se analizan los resultados del C_{80} , promediados espacialmente para las frecuencias de 500 y 1000 Hz según recoge la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. Los resultados de este parámetro recogidos en la tabla 7.8 y representados en la figura 7.10, presentan un comportamiento similar a los descritos para la definición (D_{50}) y la claridad para la palabra (C_{50}). Salvo para las iglesias de Pumarejo de Tera y de Santa María Magdalena, los valores medidos del C_{80} se sitúan en torno al límite inferior del rango típico establecido por la norma, mientras que tal introducir las correcciones propuestas, los valores de dicho parámetro mejoran considerablemente, situándose, para las iglesias ocupadas, en torno al límite superior de dicho rango típico. El aumento del valor medio global del C_{80} , en las iglesias con volumen comprendido entre 2000 y 4000 m³, entre las dos configuraciones comentadas es de 9,97 dB, con un rango comprendido entre 7,88 dB para la iglesia de Cuestablanca y 11,99 dB para la de Santa Cruz.

El análisis de los resultados de la claridad musical C_{80} , representados en la figura 7.11, arroja observaciones similares a las anteriormente expuestas para la definición en relación a la figura 7.8.

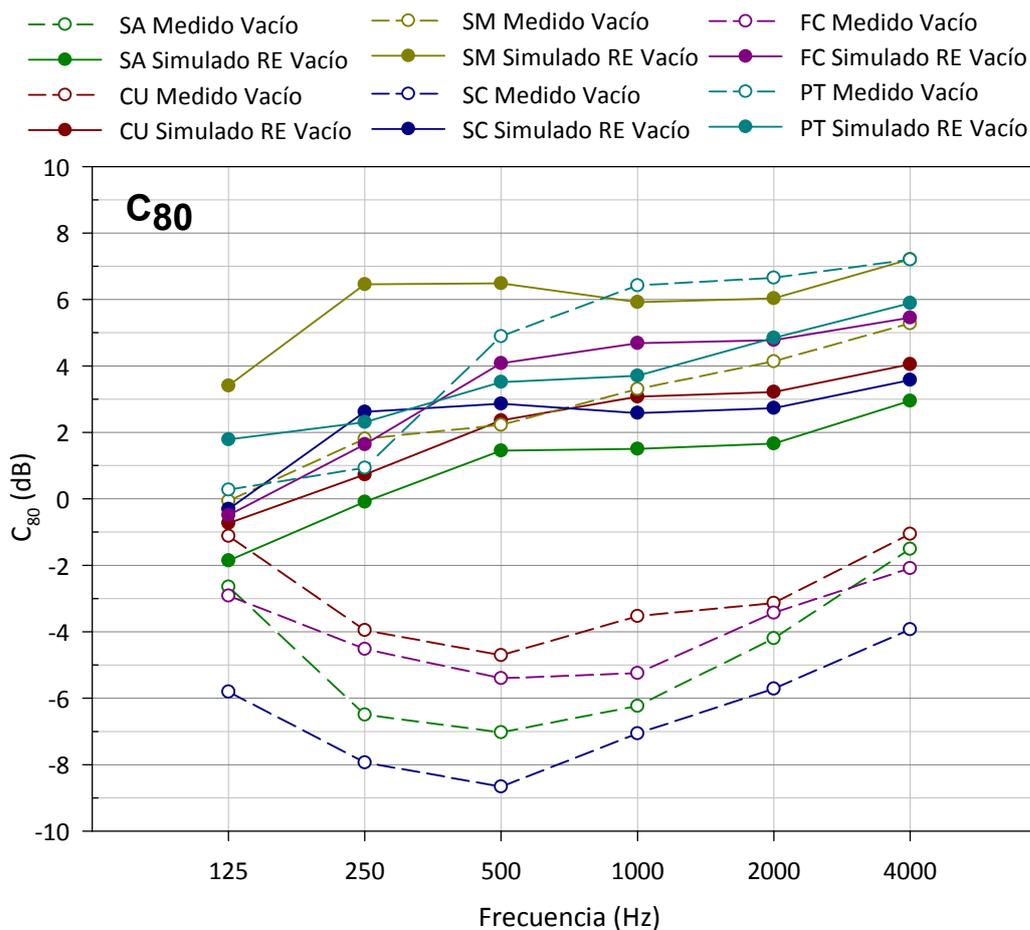


Figura 7.11. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia para todas las iglesias. Medición *in situ* y propuesta de rehabilitación acústica (vacío). Fuente 1.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	PT	FC	CU	SA	SC	SM
$C_{80}(3)$ (dB)	MEDIDO Vacío	5,99	-4,69	-3,8	-5,82	-7,15	3,22
	SIMULADO EA Ocupado	6,65	0,23	-0,09	-0,47	-1,87	4,27
	SIMULADO RE Vacío	4,02	4,51	2,88	1,54	2,72	6,14
	SIMULADO RE Ocupado	4,94	5,37	3,96	3,26	4,22	6,58

Tabla 7.9. Valores promedio de la claridad musical $C_{80}(3)$ (dB).

Los resultados del $C_{80}(3)$, presentados en la tabla 7.9 y en la figura 7.12, reflejan que la disminución paulatina de los tiempos de reverberación existentes con las distintas configuraciones e hipótesis representadas, conlleva que iglesias inicialmente adecuadas para la audición de música de órgano (propia de espacios muy reverberantes) sean, tras la propuesta de rehabilitación, adecuadas para la audición de música de ópera (donde se requiere una alta claridad del sonido musical). En este caso, la diferencia entre el valor medio global del $C_{80}(3)$, obtenido con las medidas experimentales y las simulaciones de las propuestas de intervención con las iglesias ocupadas, es de 9,57 dB, con un rango comprendido entre 7,76 dB para la iglesia de Cuestablanca y 11,37 dB para la de Santa Cruz.

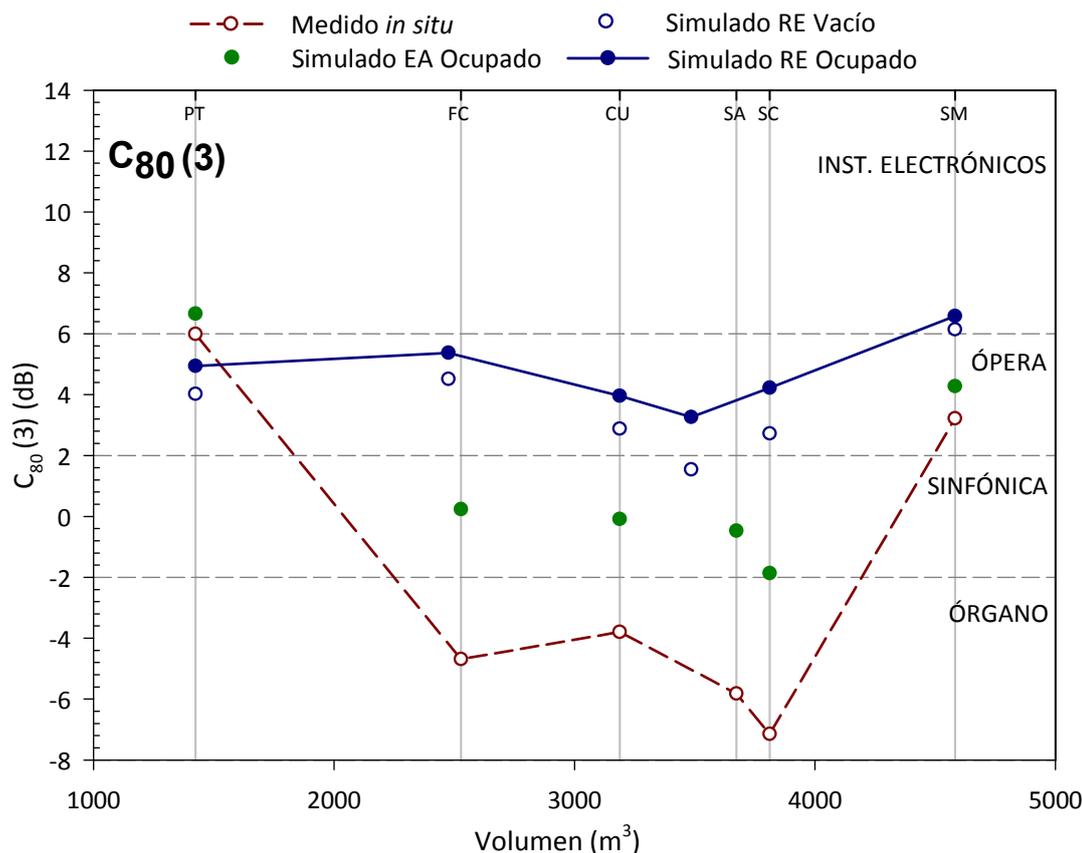


Figura 7.12. Claridad musical $C_{80}(3)$ (dB). Promediado espacial frente al volumen. Medición *in situ*, simulación estado actual (ocupado) y propuesta de rehabilitación acústica (vacío y ocupado). Fuente 1.

Para el estudio de la inteligibilidad de la palabra mediante el índice STI, en cada iglesia se han agrupado los resultados de dicho índice de dos formas: la primera corresponde a los valores promediados espacialmente para la totalidad de los receptores (tabla 7.10 y figura 7.13); y en la segunda, se ha realizado el promediado espacial por zonas de bancos, distinguiendo zona central-delantera, de fondo y lateral (figura 7.14). En ambos casos, los resultados se contrastan con la escala de interpretación subjetiva. Para la iglesia de Santa Cruz de Oleiros, los resultados representados son los registrados con la fuente en posición 2, coincidente con el ambón, mientras que para las demás iglesias, los resultados se refieren a la fuente situada en el altar (F1).

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	PT	FC	CU	SA	SC	SM
STI	MEDIDO Vacío	0,57	0,25	0,24	0,34	0,26	0,49
	SIMULADO EA Ocupado	0,69	0,51	0,51	0,51	0,47	0,64
	SIMULADO RE Vacío	0,63	0,61	0,58	0,55	0,61	0,67
	SIMULADO RE Ocupado	0,65	0,65	0,62	0,61	0,66	0,69
	SIMULADO RE+AE Vacío	0,70	0,69	0,64	0,65	0,68	0,73
	SIMULADO RE+AE Ocupado	0,74	0,74	0,68	0,71	0,72	0,74

Tabla 7.10. Valores promedio del índice de transmisión de la palabra STI.

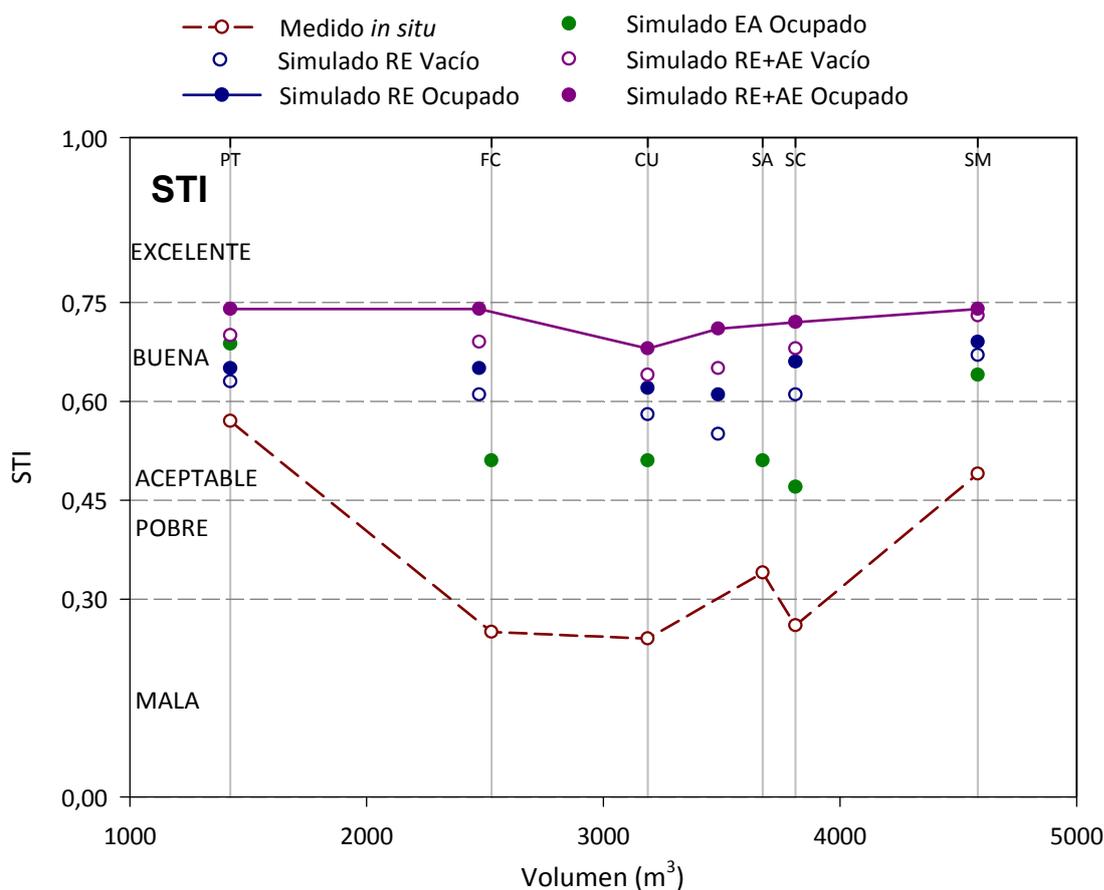


Figura 7.13. Índice de transmisión de la palabra STI. Promediado espacial frente al volumen. Medición *in situ*, simulación estado actual (ocupado) y propuesta de rehabilitación acústica (vacío y ocupado). Fuente 1 (Fuente 2, sólo para iglesia de Santa Cruz de Oleiros).

Los resultados de este parámetro para las distintas configuraciones e hipótesis, representados en la figura 7.13, reflejan la paulatina mejora conseguida en la inteligibilidad de la palabra en todas las iglesias, aspecto básico por la importancia del uso oral en estos recintos. Aunque dicha mejora es más acusada en las iglesias más reverberantes ejecutadas en hormigón visto, también en las iglesias con tratamientos absorbentes, la inteligibilidad para la palabra aumenta sensiblemente.

Con las propuestas de rehabilitación, globalmente podemos afirmar, que en las iglesias más reverberantes pasamos de una inteligibilidad mala-pobre a aceptable-buena, con los recintos totalmente vacíos, y de una inteligibilidad aceptable a buena, en condiciones de total ocupación.

Por otro lado, se pone de manifiesto que un adecuado sistema de apoyo electroacústico mejora sensiblemente los resultados, si esta actuación va acompañada de las citadas propuestas de rehabilitación.

El aumento del valor medio global del STI del conjunto de recintos, obtenido con las simulaciones de las propuestas de intervención con las iglesias ocupadas respecto a las medidas experimentales, es de 0,29, mientras que el incremento, si consideramos además el sistema de apoyo electroacústico, es de 0,37.

Con el fin de analizar la inteligibilidad entre las distintas zonas de la audiencia, los receptores distribuidos en el área de bancos para los fieles se han clasificado, según su posición en zona central-delantera, fondo o lateral⁷ (tabla 7.11). A modo de ejemplo, en la figura 7.14 se aporta el esquema de clasificación de receptores, según su situación, en la iglesia de Santa Cruz de Oleiros.

⁷ Situación de receptores en cada iglesia definida en plano en el apartado 6.X.2.1 de cada iglesia.

IGLESIA	SITUACIÓN DE RECEPTORES		
	CENTRO-DELANTE	FONDO	LATERAL
PUMAREJO DE TERA	1, 2, 3, 4, 5	6, 7, 8, 9, 10	-
FLOR DEL CARMELO	1, 2, 5, 7	3, 4, 6	8, 9, 10, 11, 12
CUESTABLANCA	3, 4, 6, 8, 10	5, 7, 9, 11	1, 2, 12, 13, 14
SANTA ANA	3, 5, 6, 8, 10, 11	4, 7, 9, 12	1, 2, 13, 14
SANTA CRUZ	4, 5, 7, 8	3, 6, 9, 11	1, 2, 10, 12
S.M. MAGDALENA	3, 4, 6, 7	2, 5, 9	1, 8

Tabla 7.11. Clasificación de receptores según su situación en las iglesias.

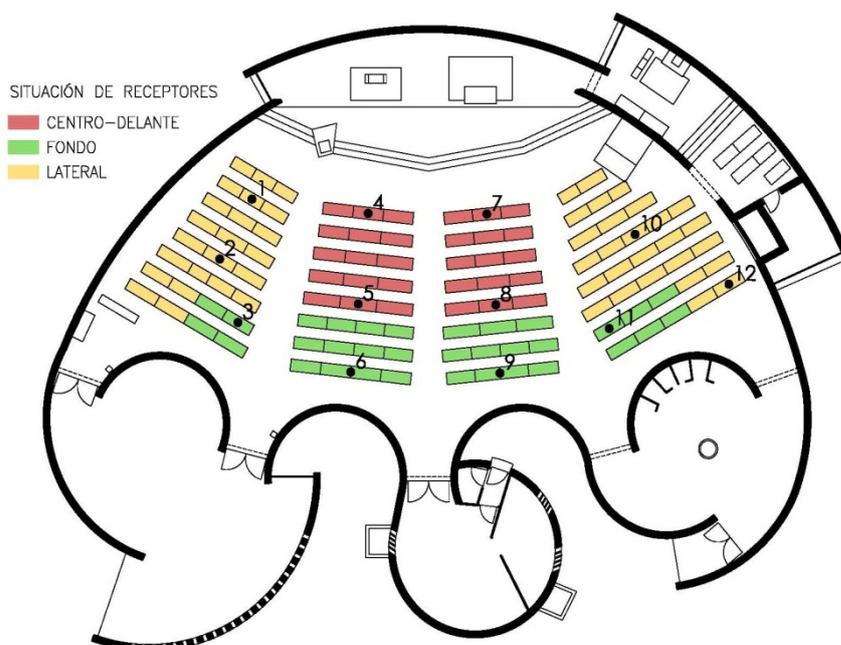


Figura 7.14. Esquema de clasificación de receptores. Iglesia de Santa Cruz de Oleiros.

Los resultados promediados para cada una de las zonas en las distintas iglesias se muestran en la figura 7.15.

En ella se aprecian resultados bastante interesantes. En el estado original medido, la inteligibilidad en las iglesias evoluciona de mejor a peor en el siguiente orden: bancos centrales-delanteros, fondo y laterales. Sin embargo, tras las propuestas de rehabilitación y la implementación de los sistemas de apoyo electroacústico se consiguen dos aspectos favorables: el primero es que en todas estas zonas la inteligibilidad mejora sensiblemente; y el segundo es que ya no existen tantas diferencias entre unas y otras.

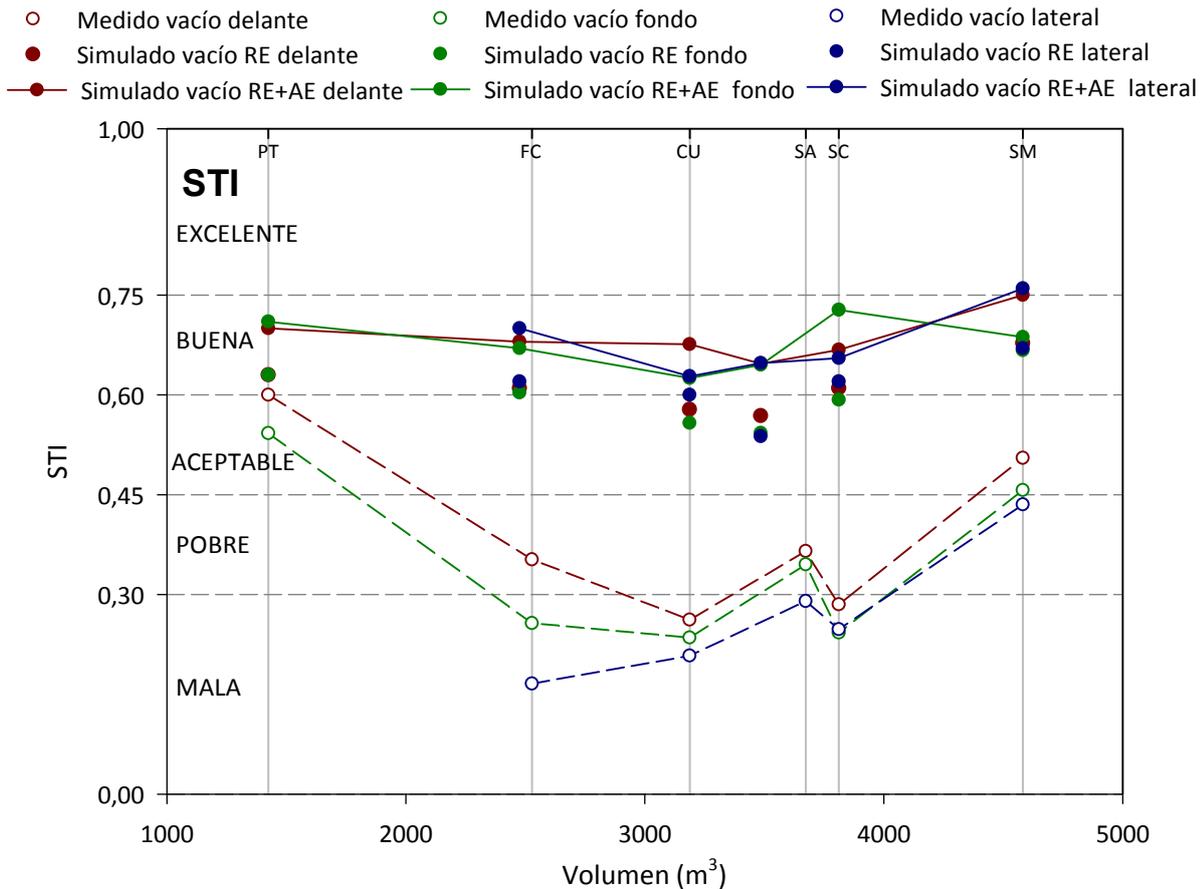


Figura 7.15. Índice de transmisión de la palabra STI. Promediado espacial por zonas de bancos frente al volumen. Medición *in situ* y propuesta de rehabilitación acústica, sin y con apoyo electroacústico (vacío). Fuente 1 (Fuente 2, sólo para iglesia de Santa Cruz de Oleiros).

En todos estos parámetros relativos a la inteligibilidad de la palabra y la claridad musical, es de destacar la similitud entre los resultados obtenidos para las iglesias vacías y ocupadas con las propuestas de rehabilitación acústica, frente a las diferencias registradas entre ambas hipótesis de ocupación para el estado actual. Con las correcciones propuestas para las distintas iglesias se consigue que la calidad acústica de cada recinto no dependa de su grado de ocupación.

Nivel sonoro subjetivo

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	PT	FC	CU	SA	SC	SM
G_{mid} (dB)	MEDIDO Vacío	9,75	16,63	15,05	17,71	17,04	6,65
	SIMULADO EA Ocupado	9,66	11,6	11,71	11,45	11,26	5,27
	SIMULADO RE Vacío	11,86	8,33	9,48	9,34	8,05	5,01
	SIMULADO RE Ocupado	10,81	7,54	8,4	7,96	6,71	4,54

Tabla 7.12. Valores de la fuerza sonora G_{mid} (dB).

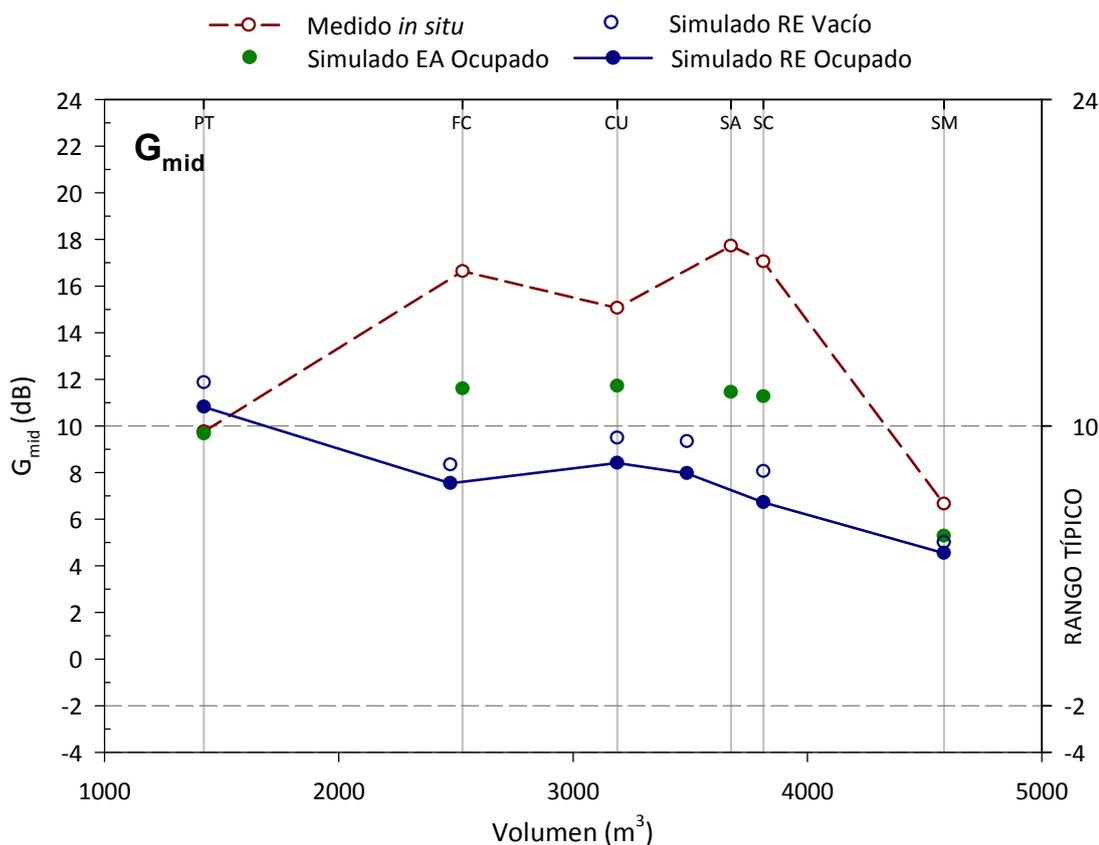


Figura 7.16. Fuerza sonora G_{mid} (dB). Promediado espacial frente al volumen. Medición *in situ*, simulación estado actual (ocupado) y propuesta de rehabilitación acústica (vacío y ocupado). Fuente 1.

Para el análisis de este aspecto subjetivo del oyente, se facilitan, en la tabla 7.12 y figura 7.16, los resultados de la fuerza sonora (G_{mid}) promediados espacialmente para las frecuencias de 500 Hz y 1kHz, según indica la norma UNE de referencia.

Salvo para las dos iglesias con tiempos de reverberación más bajos (PT y SM), los resultados medios globales de G_{mid} medidos *in situ* reflejan un elevado nivel sonoro del campo reverberado, incluso cuando las iglesias están ocupadas. Las propuestas de rehabilitación en cada iglesia consiguen disminuir los tiempos de reverberación y, con ello, los resultados de G_{mid} , situándolos dentro del rango de valores recomendados por la norma. La figura refleja el caso particular de Pumarejo de Tera tras la rehabilitación, donde el aumento de los tiempos de reverberación a frecuencias superiores a 1000 Hz, repercute en valores de G_{mid} algo mayores que para el estado actual.

Para las iglesias de hormigón visto, la diferencia entre el valor medio global del G_{mid} , obtenido con las medidas experimentales y las simulaciones de las propuestas de intervención con las iglesias ocupadas, es de 8,96 dB, con un rango comprendido entre 6,65 dB para la iglesia de Cuestablanca y 10,33 dB para la de Santa Cruz.

Los resultados correspondientes a las propuestas de rehabilitación de las iglesias ocupadas muestran una tendencia descendente de G_{mid} al aumentar el volumen de los recintos, tal y como indican Cirillo y Martellotta⁸.

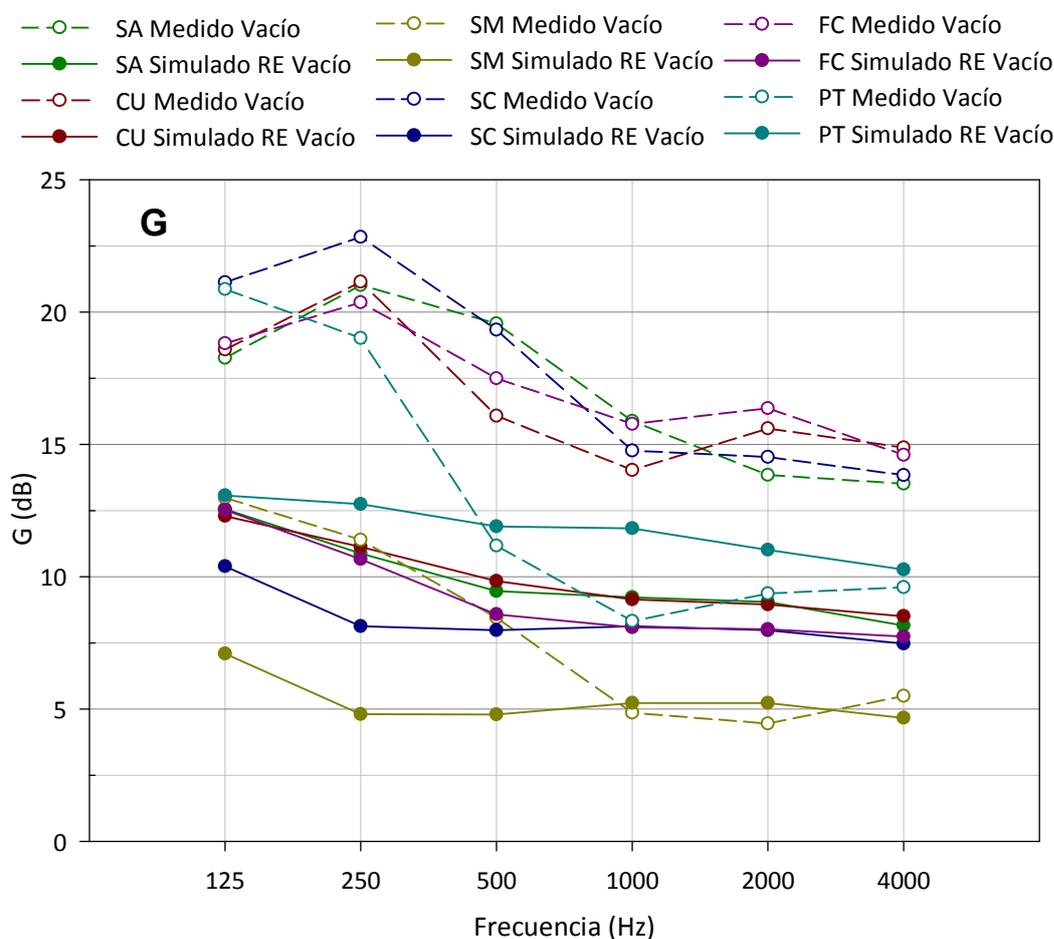


Figura 7.17. Fuerza sonora G (dB). Promediado espacial frente a la frecuencia para todas las iglesias. Medición *in situ* y propuesta de rehabilitación acústica (vacío). Fuente 1.

Al igual que ocurriera con los anteriores parámetros analizados, el promediado espacial frente a la frecuencia de los valores de G medidos *in situ* (figura 7.17) resultan mucho más altos en las iglesias construidas en hormigón visto. La reducción del nivel sonoro del campo reverberado conseguido con las medidas correctoras, disminuye los resultados de G acercándolos a valores adecuados.

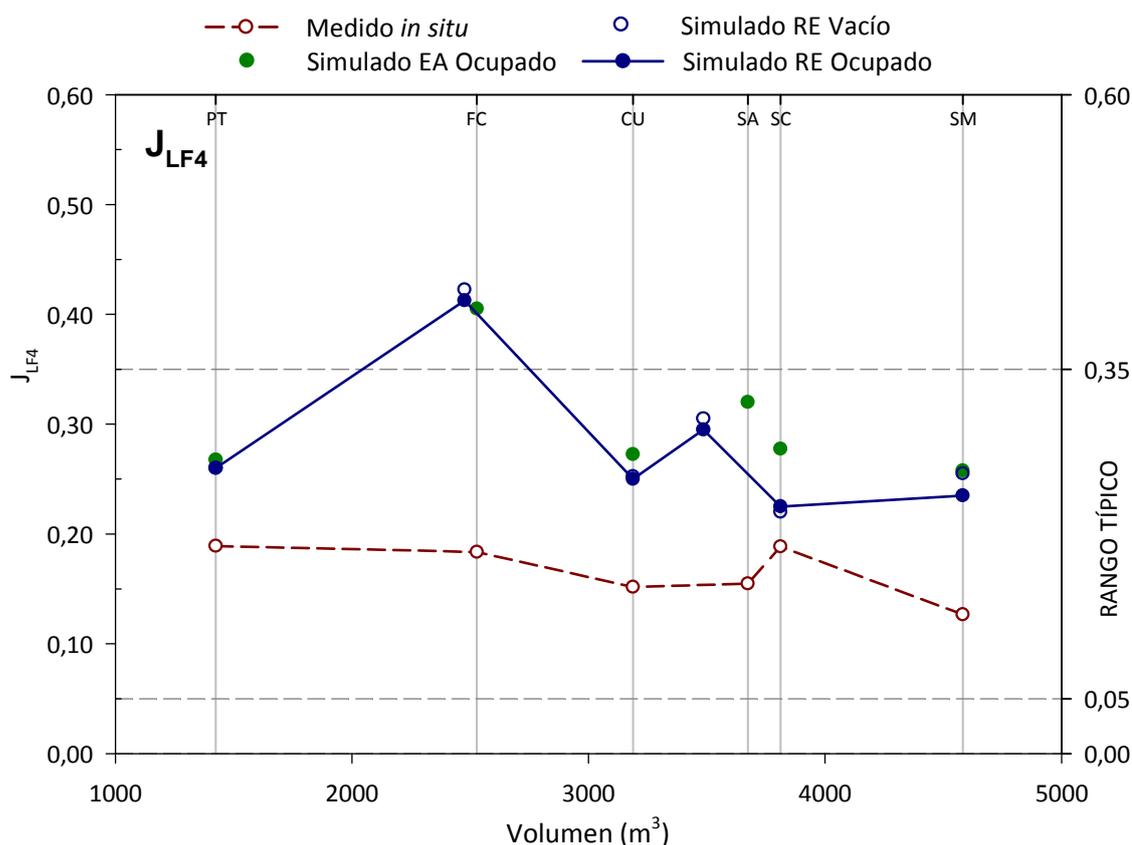
De nuevo, caso especial son las iglesias de Pumarejo de Tera y Santa María Magdalena. En el primer caso, los valores medidos, en el estado original, y simulados, para las propuestas de intervención, con la iglesia vacía, apenas varían para las frecuencias de 500 y 4000 Hz, mientras que para la segunda iglesia son similares para frecuencias superiores a 1000 Hz.

Impresión espacial

Para la valoración de la impresión espacial con el ancho aparente de la fuente, se analiza la fracción de energía lateral precoz (J_{LF}) y el coeficiente de correlación cruzada interaural inicial ($IACC_E$). Para el J_{LF} se muestran y analizan los resultados promediados espacialmente para las frecuencias de 125 a 1000 Hz (J_{LF4}) según recoge la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, y, posteriormente, el promediado espacial para todas las frecuencias. En el caso del $IACC_E$, los valores aportados y analizados en primer lugar, corresponden al promediado espacial para las frecuencias de 500 a 2000 Hz ($IACC_{E3}$), y por último, se muestran los resultados promediados espacialmente frente a la frecuencia.

⁸ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006). *Worship, acoustics and architecture*. Essex: Multi-Science Publishing Co. p. 202.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	PT	FC	CU	SA	SC	SM
J_{LF4}	MEDIDO Vacío	0,19	0,18	0,15	0,15	0,19	0,13
	SIMULADO EA Ocupado	0,27	0,41	0,27	0,32	0,28	0,26
	SIMULADO RE Vacío	0,26	0,42	0,25	0,31	0,22	0,26
	SIMULADO RE Ocupado	0,26	0,41	0,25	0,30	0,23	0,24

Tabla 7.13. Valores de la fracción de energía lateral precoz J_{LF4} .Figura 7.18. Fracción de energía lateral precoz J_{LF4} . Promediado espacial frente al volumen. Medición *in situ*, simulación estado actual (ocupado) y propuesta de rehabilitación acústica (vacío y ocupado). Fuente 1.

En el análisis acústico individual realizado para cada iglesia en el capítulo 6, se observaba que todas ellas presentan unas buenas condiciones de impresión espacial en su estado actual. En la figura 7.18 se aprecia que los resultados del J_{LF4} medidos en las iglesias son muy similares y apenas varían con el volumen, con un rango de valores que oscila entre 0,13 y 0,19. Sin embargo, y como se puso de manifiesto en los distintos análisis individuales, existían variaciones significativas entre los resultados de las mediciones *in situ* y las simulaciones en las mismas condiciones, con diferencias que superaban los 2JND.

Partiendo de este desfase entre medición y simulación, del análisis de la figura 7.18 podemos realizar las siguientes observaciones:

- Con las propuestas de rehabilitación acústicas, todas las iglesias de la muestra siguen manteniendo unas buenas condiciones de espacialidad, con valores de J_{LF4} ligeramente por debajo de los simulados para el estado actual ocupado.
- Los valores simulados de J_{LF4} tras las propuestas son prácticamente coincidentes en las dos hipótesis analizadas: iglesias vacías y ocupadas.

- Tras las propuestas de rehabilitación, las iglesias de mayor volumen con disposición asamblearia (CU, SA, SC y SM) presentan unos valores de J_{LF4} similares, con diferencias máximas entre ellas de 0,09.
- Los resultados más altos del J_{LF4} , corresponden a la iglesia Flor del Carmelo, los cuales exceden del rango típico. En esta iglesia, la amplitud de la fuente sonora repercute en una mayor impresión espacial del sonido y mejor valoración subjetiva de la calidad acústica de la sala.

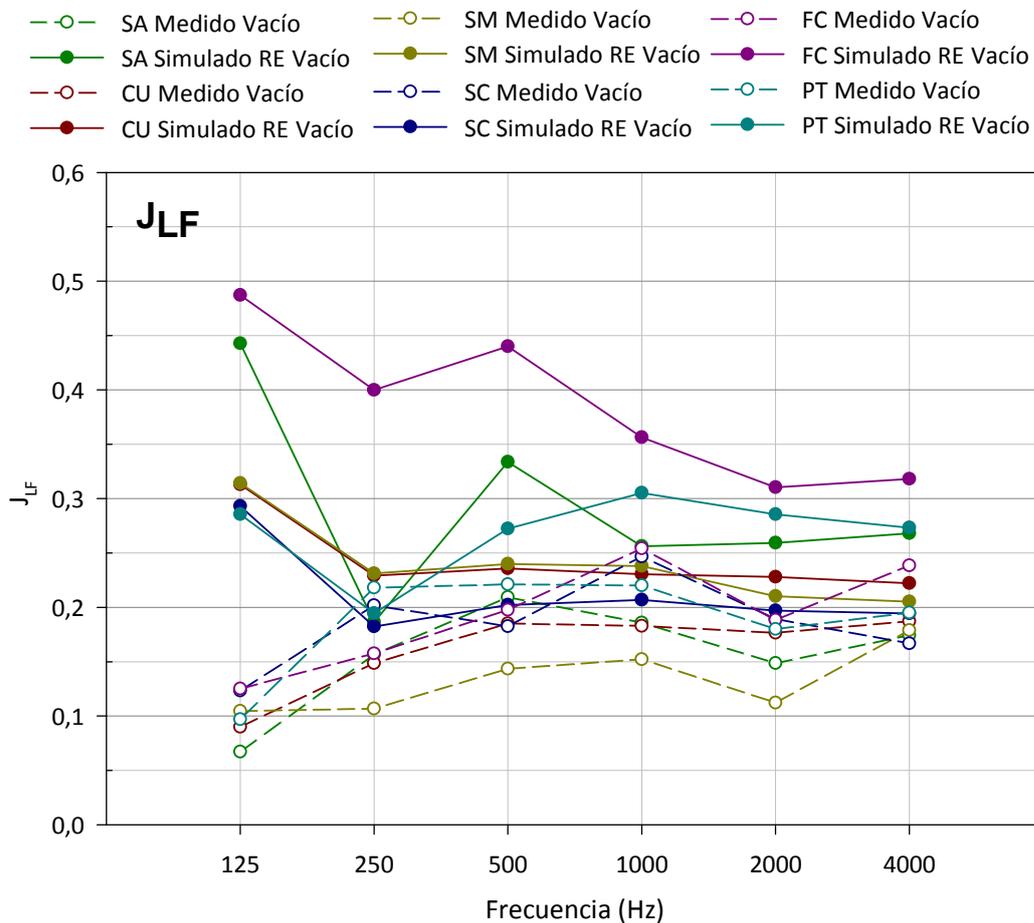


Figura 7.19. Fracción de energía lateral precoz J_{LF} . Promediado espacial frente a la frecuencia para todas las iglesias. Medición *in situ* y propuesta de rehabilitación acústica (vacío). Fuente 1.

La gráfica de la figura 7.19 refleja el estrecho margen en el que se mueven los valores del J_{LF} medidos para cada frecuencia, en todas las iglesias que componen la muestra de estudio. En los resultados de las simulaciones de las propuestas de rehabilitación, se distinguen dos grupos de iglesias atendiendo a la amplitud aparente de fuente sonora: el primer grupo, formado por las iglesias de Cuestablanca, Santa Cruz y Santa María Magdalena, presenta resultados similares a los medidos *in situ* y con valores homogéneos para frecuencias superiores a 250 Hz; para el segundo grupo, formado por las restantes iglesias, los resultados registrados son más altos que los medidos, para la mayoría de las frecuencias, mostrando tras la rehabilitación, mayor anchura de la fuente sonora.

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	PT	FC	CU	SA	SC	SM
IACC _{E3}	MEDIDO Vacío	0,32	0,31	0,38	0,35	0,42	0,49
	SIMULADO EA Ocupado	0,45	0,4	0,43	0,44	0,47	0,49
	SIMULADO RE Vacío	0,42	0,43	0,49	0,46	0,55	0,5
	SIMULADO RE Ocupado	0,44	0,46	0,51	0,48	0,54	0,53

Tabla 7.14. Valores del coeficiente de correlación cruzada interaural inicial medio IACC_{E3} promediados para las frecuencias de 500 a 2000 Hz.

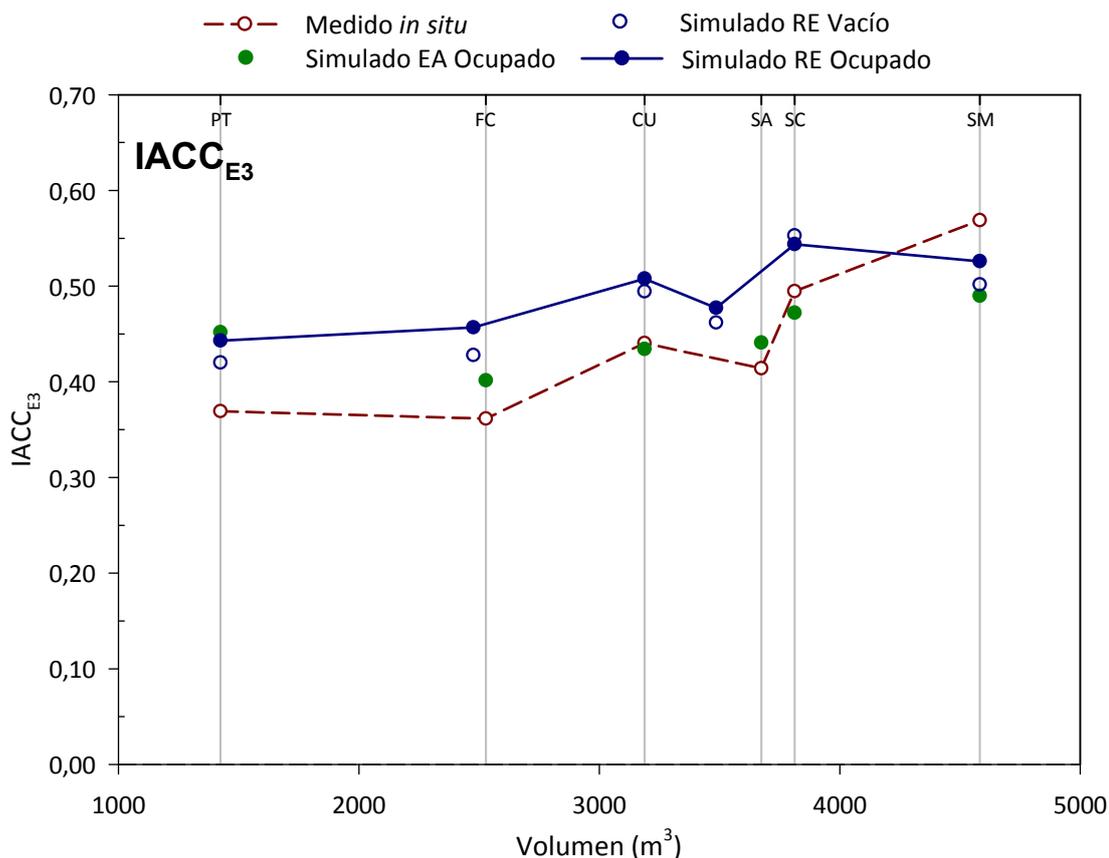


Figura 7.20. Coeficiente de correlación cruzada interaural inicial medio IACC_{E3}. Promediado espacial frente al volumen. Medición *in situ*, simulación estado actual (ocupado) y propuesta de rehabilitación acústica (vacío y ocupado). Fuente 1.

En la gráfica de la figura 7.20, se aprecia que, en cada una de las hipótesis representadas y para casi todas las iglesias, los valores medios del IACC_{E3} crecen conforme aumenta el volumen del recinto. Con las propuestas de rehabilitación acústica se obtienen resultados de IACC_{E3} sensiblemente mayores, excepto en las iglesias de Santa María Magdalena y Pumarejo de Tera. Con dichas propuestas, el aumento del valor medio global de este parámetro (exceptuando SM y PT) con las iglesias ocupadas, respecto a las medidas experimentales, es de 0,13.

El aumento generalizado de los resultados del IACC_{E3} y, con ello, la disminución de la espacialidad del sonido en las salas, está relacionado con la introducción de los revestimientos absorbentes y la consecuente reducción de la energía en las reflexiones tempranas en los recintos.

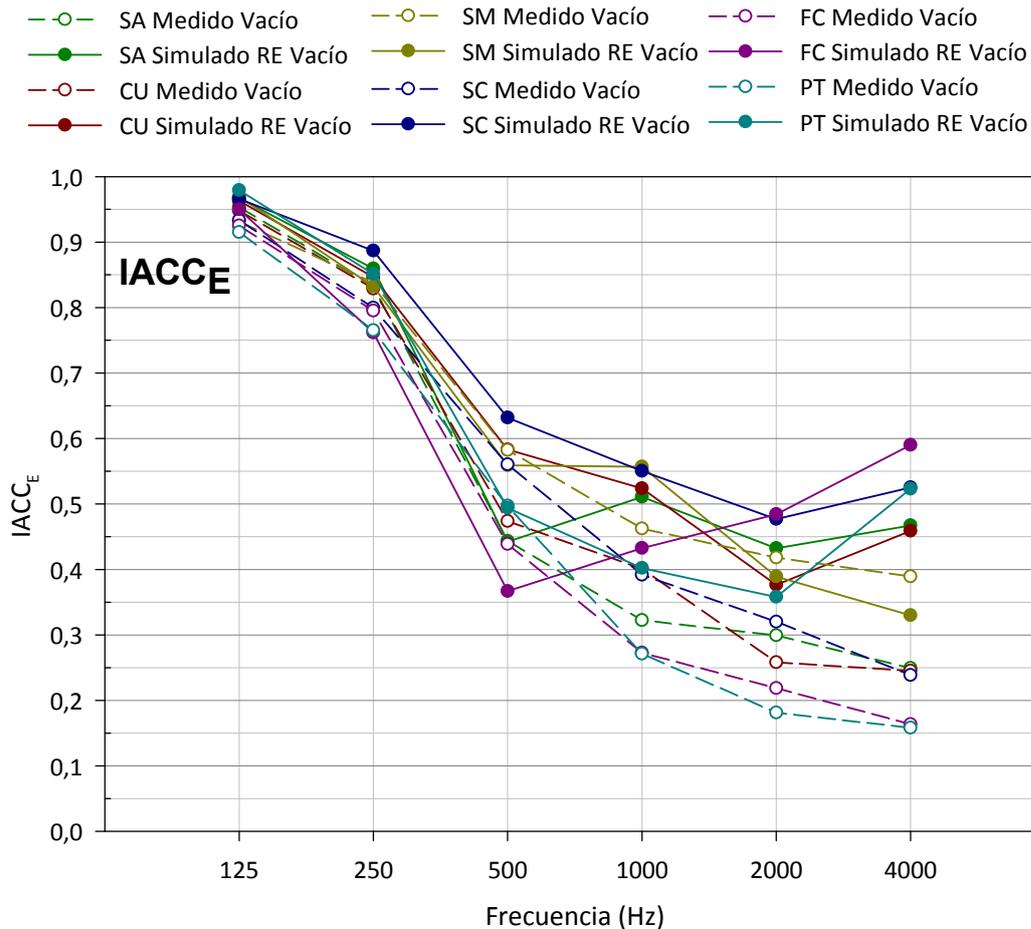


Figura 7.21. Coeficiente de correlación cruzada interaural inicial $IACCE$. Promediado espacial frente a la frecuencia para todas las iglesias. Medición *in situ* y propuesta de rehabilitación acústica (vacío). Fuente 1.

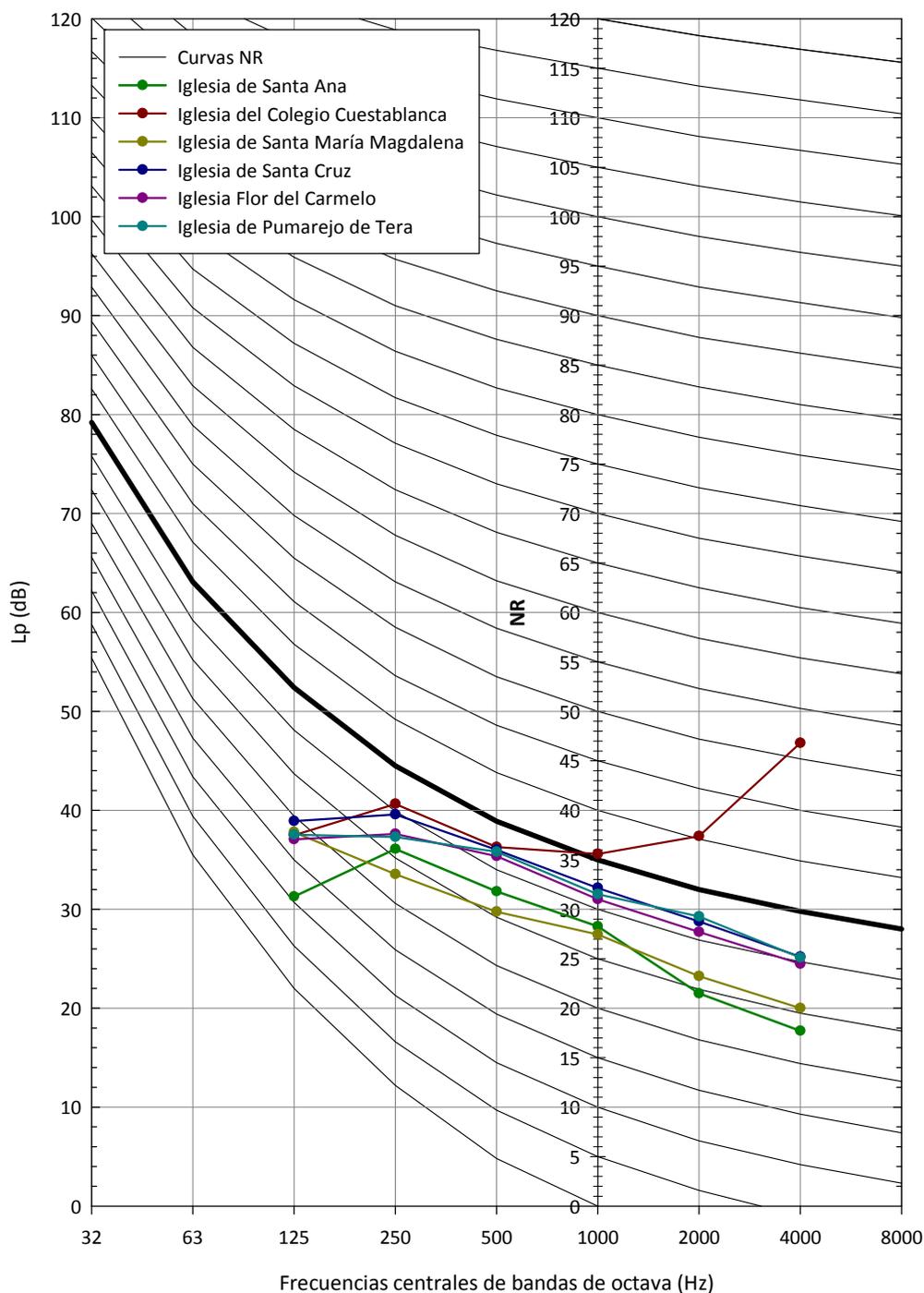
Al contrastar los resultados del $IACCE$ medidos *in situ* con los simulados con las propuestas de mejora (figura 7.21), se observa que todas las iglesias presentan un comportamiento parecido, con coincidencia de valores a bajas frecuencias y diferencias de resultados a medida que ésta aumenta. Este hecho pone de manifiesto que con las propuestas de rehabilitación, las señales percibidas por cada oído presentan diferencias menores que en el estado actual medido, con lo que la información espacial del campo acústico en cada punto de recepción será menor.

En resumen podemos decir que la distribución de resultados y el rango de valores obtenidos en las simulaciones de las propuestas de rehabilitación para J_{LF} e $IACCE$ indican que, en el conjunto de la muestra de iglesias, el oyente sigue manteniendo buenas condiciones de impresión espacial, permaneciendo envuelto en la sensación sonora. La mayor amplitud de la fuente sonora reflejada en los resultados del J_{LF} respecto a los medidos *in situ*, se corrobora con los obtenidos para el $IACCE$, que aunque aumentan ligeramente, sus valores corresponderían a una anchura de fuente entre muy buena, buena y aceptable, según la calificación propuesta por Beranek para auditorios y salas de concierto.

Ruido de fondo

IGLESIA	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
SANTA ANA	31,28	36,06	31,81	28,27	21,49	17,71
CUESTABLANCA	37,49	40,64	36,29	35,59	37,39	46,80
SANTA MARÍA MAGDALENA	37,8	33,6	29,8	27,5	23,2	20,0
SANTA CRUZ	38,91	39,59	36,00	32,16	28,77	25,20
FLOR CARMELO	37,07	37,62	35,38	31,02	27,70	24,49
PUMAREJO DE TERA	37,55	37,31	35,81	31,52	29,27	25,12

Tabla 7.15. Espectro de ruido de fondo registrado (dB) en cada iglesia.



La valoración global del ruido de fondo se realiza en la figura 7.22, donde se han superpuestos los espectros de ruido de fondo medidos en cada iglesia sobre las curvas NR. De su análisis podemos afirmar:

- Todas las iglesias presentan unos registros de ruido de fondo que están por debajo de la curva NR máxima recomendada para los recintos de culto (NR 35), excepto para la iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca.
- Como se comentó en el análisis individual, el espacio de la iglesia de Cuestablanca se encuentra inmersa en un complejo escolar, sin fachada al exterior y situada sobre el comedor del centro, con lo que los niveles de inmisión sonora de los espacios colindantes, tanto horizontal como vertical, es elevado.

- Con la excepción de este último caso, el resto de iglesias presenta unos niveles de ruido de fondo que no afectarán negativamente a la acústica del recinto.
- En general, los cerramientos y particiones de todas las iglesias presentan unos altos índices de aislamiento acústico debido al empleo de soluciones constructivas pesadas. Tras las inspecciones que se realizaron durante las mediciones, los elementos más débiles, desde el punto de vista del aislamiento acústico, que se observaron fueron las puertas de acceso a los recintos y los huecos practicables al exterior, ya que se trata de antiguas carpinterías de poca permeabilidad al aire.

7.2. ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO

Como ha podido observarse en los diferentes análisis de las iglesias, la absorción sonora juega un papel fundamental en el comportamiento acústico de las mismas. Por ello, tras la valoración y comparación de la absorción de cada iglesia, en este apartado se realiza una comparativa global de la absorción sonora de la muestra de iglesias en el estado actual (EA) y tras las propuestas de rehabilitación acústica (RE), tanto para las iglesias vacías como ocupadas.

GRUPO	IGLESIA	ABSORCIÓN SONORA TOTAL A_t (m^2)			
		EA VACÍO	EA OCUP	RE VACÍO	RE OCUP
PT, SM	PT	207,93	284,34	212,02	256,91
	SM	586,67	704,53	700,78	774,95
	MEDIA GRUPO 1	397,30	494,44	456,40	515,93
FC, CU, SA, SC	FC	106,95	238,23	354,13	454,23
	CU P1	120,92	255,02	276,65	372,12
	CU P2			340,65	436,12
	SA	99,63	273,6	338,99	458,78
	SC P1	89,25	230,21	460,39	557,80
	SC P2			408,58	505,99
	MEDIA GRUPO 2	104,49	247,05	363,23	464,17

Tabla 7.16. Absorción sonora total de las superficies de revestimiento de las iglesias (m^2).

Los resultados globales de absorción sonora para los dos grupos de la muestra se muestran en la tabla 7.16. Para las iglesias que actualmente cuentan con revestimientos absorbentes sonoros, las intervenciones planteadas suponen un incremento de la absorción sonora del grupo del 15%, en el caso de las iglesias vacías, y del 4,5%, cuando están ocupadas al 100%.

Para las iglesias construidas con hormigón visto, las propuestas de rehabilitación acústica modifican sustancialmente la absorción sonora global: para las vacías en el estado actual la nueva absorción excede el triple del valor medio del grupo, mientras que cuando se encuentran ocupadas es casi el doble.

Para profundizar sobre los datos anteriores, las gráficas siguientes muestran la absorción sonora de los elementos y materiales de revestimientos más significativos, y que más influencia han tenido en el comportamiento acústico de esta muestra de recintos, es decir, el techo, los bancos y los muros de fondo.

El valor de la absorción sonora de los distintos materiales corresponde al valor promedio (en m^2) entre las banda de octava de 125 Hz y 4000 Hz. Para cada configuración, se aporta la absorción total de estos tres elementos de la sala (A_{t3}) y la superficie total de dichos revestimientos (S_{r3}).

Para el estado actual, con los recintos eclesiales vacíos (figura 7.23), se distinguen, de nuevo, los dos grupos de iglesias: aquellas cuyo revestimiento principal es el hormigón visto, en las que la absorción sonora de los tres elementos considerados es muy pequeña (SA, CU, SC y FC); y las iglesias que contaban con revestimiento absorbente en el techo, cuya absorción sonora destaca en la gráfica (SM y PT). Entre estas dos últimas, mención especial merece el caso de SM ya que, a pesar de tener una superficie de revestimientos muy pareja con la del resto de iglesias (todas excepto PT), solamente el techo aporta más de cinco veces la absorción total de éstas.

Con las iglesias ocupadas al 100% (figura 7.24), y como era de esperar, los valores relativos a los bancos aumentan considerablemente la absorción total gracias a la aportación debida a los fieles. Este aumento es similar, en términos globales, en todas las iglesias de la muestra (excepto en PT).

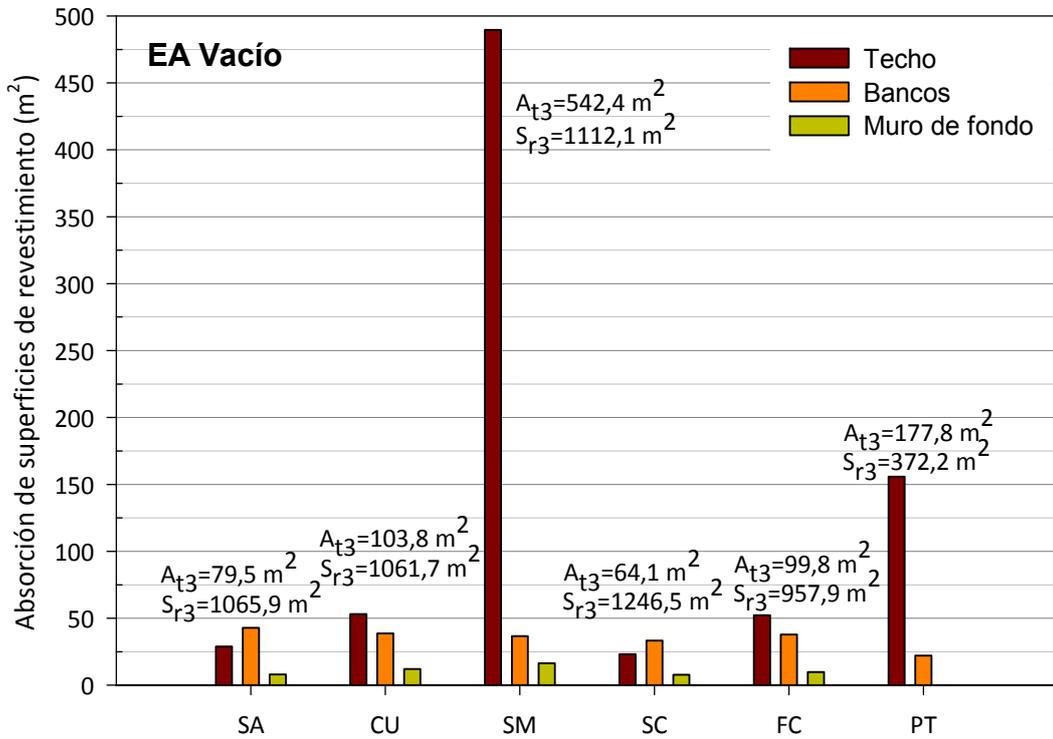


Figura 7.23. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m^2) para todas las iglesias de la muestra. Valores promediados en frecuencia del estado actual (EA) vacío.

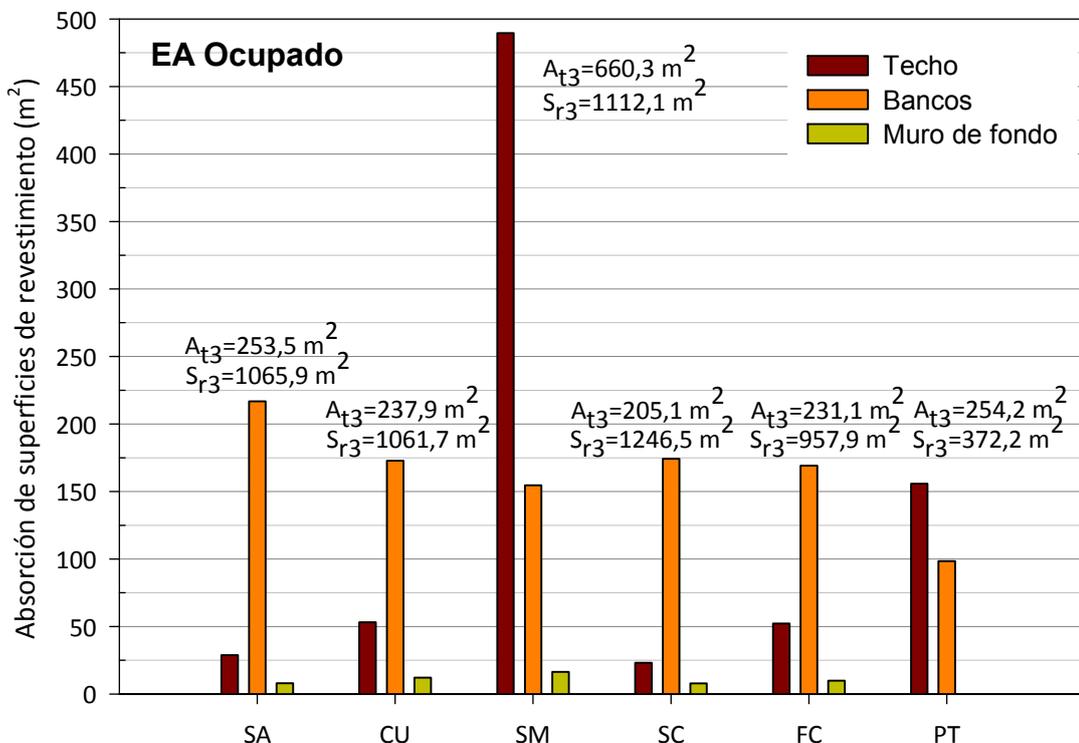


Figura 7.24. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m^2) para todas las iglesias de la muestra. Valores promediados en frecuencia del estado actual (EA) ocupado.

Al comparar los estados actual y rehabilitado con las iglesias vacías (figuras 7.23 y 7.25), se aprecia claramente el aumento de absorción sonora en los tres elementos valorados. La absorción sonora

aportada por los bancos es similar en todos los recintos, con un rango que oscila entre 53,53 m² para la iglesia de Pumarejo (la de menor tamaño) y 96,97 m² en la de Santa Ana. En los recintos cuyo revestimiento principal es el hormigón visto, las propuestas de rehabilitación acústica casi cuadruplican la absorción sonora global de los elementos considerados en este análisis, con las iglesias vacías de fieles. Para las iglesias con revestimientos absorbentes en el techo, el incremento medio es del 14% sobre el global del estado actual.

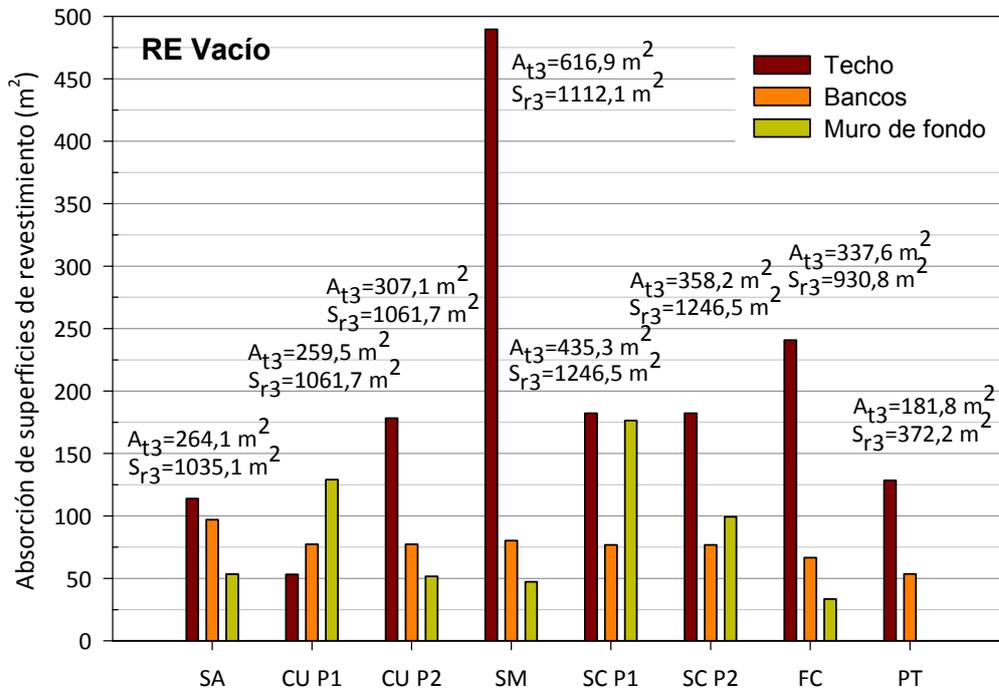


Figura 7.25. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²) para todas las iglesias de la muestra. Valores promediados en frecuencia de la propuesta de rehabilitación acústica (RE) vacío.

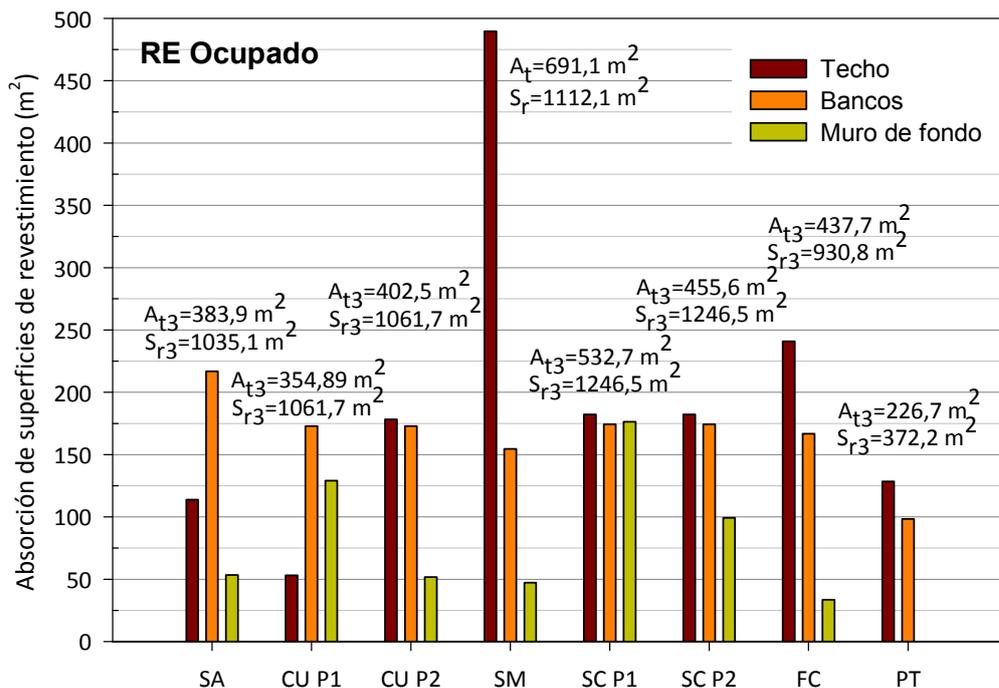


Figura 7.26. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²) para todas las iglesias de la muestra. Valores promediados en frecuencia de la propuesta de rehabilitación acústica (RE) ocupado.

Al comparar los estados actual y rehabilitado con las iglesias ocupadas (figuras 7.24 y 7.26) se observa que, en las iglesias ejecutadas en hormigón visto, la absorción sonora global de los elementos valorados casi se duplica con las propuestas de rehabilitación acústica. Para las dos iglesias restantes (SM y PT) el aumento es mínimo (0,4%), ya que la intervención propuesta en la iglesia de Pumarejo disminuye la absorción sonora para la iglesia ocupada.

Relaciones (Sr/At) y (V/At)

A partir de los valores de absorción sonora de las superficies de revestimiento de cada iglesia, en la tabla 7.17 y en la figura 7.27 se muestran los resultados obtenidos para la relación superficie total de revestimiento y absorción sonora total, Sr/At (m^2/m^2), según las distintas configuraciones y estados de ocupación.

IGLESIA	Relación Sr/At (m^2/m^2)			
	EA VACÍO	EA OCUP	RE VACÍO	RE OCUP
SANTA ANA	20,7	7,5	5,4	4,0
CUESTABLANCA P1	14,3	6,8	6,2	4,6
CUESTABLANCA P2			5,1	4,0
SANTA MARÍA MAGDALENA	4,0	3,3	3,4	3,1
SANTA CRUZ P1	26,2	10,1	5,1	4,2
SANTA CRUZ P2			5,7	4,6
FLOR DEL CARMELO	12,8	5,8	3,8	2,9
PUMAREJO DE TERA	4,2	3,1	4,1	3,4

Tabla 7.17. Relación Sr/At (m^2/m^2) para todas las iglesias de la muestra.

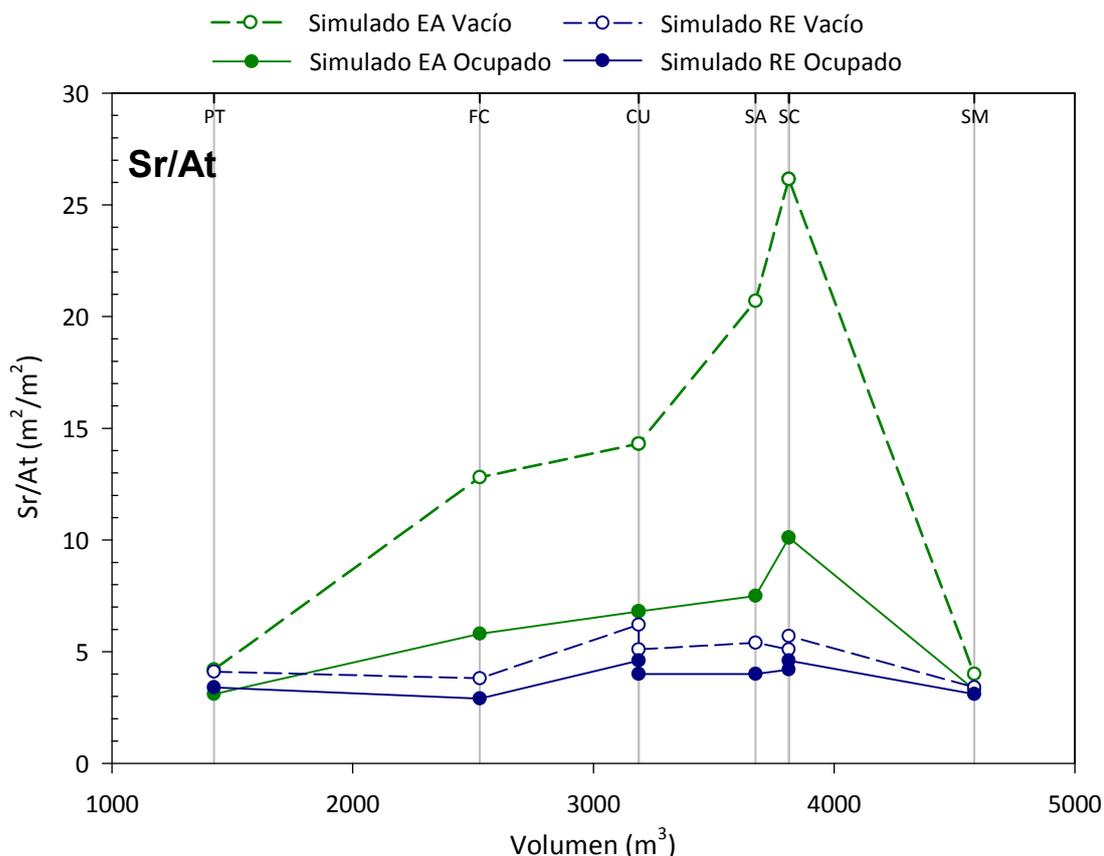


Figura 7.27. Relación Sr/At (m^2/m^2) para todas las iglesias de la muestra.

Para el estado actual, de nuevo se distinguen claramente los dos grupos de iglesias: aquellas cuyo revestimiento principal es el hormigón visto, y su absorción varía sensiblemente entre la configuración vacía y ocupada; y las iglesias que contaban con absorción desde su construcción y en las que ocurre lo contrario.

Con las propuestas de rehabilitación acústica, los valores en todas las iglesias se igualan entre sí, situándose en un rango entre 3,4 y 6,2 m^2/m^2 (valor medio 4,9 m^2/m^2) para las iglesias vacías, y entre 2,9 y 4,6 m^2/m^2 (valor medio 3,9 m^2/m^2) para los recintos ocupados.

En cuanto a la relación volumen y absorción sonora total, V/At (m^3/m^2) mostrada en la tabla 7.18 y en la figura 7.28, salvo en los extremos que representan las dos iglesias con absorbentes en techos (SM y PT), en el estado actual también se obtienen valores muy altos en las iglesias cuyo revestimiento principal es el hormigón visto, con mucha diferenciación entre la configuración vacía y ocupada.

IGLESIA	Relación V/At (m^3/m^2)			
	EA VACÍO	EA OCUP	RE VACÍO	RE OCUP
SANTA ANA	36,9	13,4	10,3	7,6
CUESTABLANCA P1	26,4	12,5	11,5	8,6
CUESTABLANCA P2			9,3	7,3
SANTA MARÍA MAGDALENA	7,4	6,2	6,2	5,6
SANTA CRUZ P1	41,5	16,1	8,1	6,6
SANTA CRUZ P2			9,1	7,3
FLOR DEL CARMELO	23,6	10,6	6,9	5,4
PUMAREJO DE TERA	6,8	5	6,7	5,5

Tabla 7.18. Relación V/At (m^3/m^2) para todas las iglesias de la muestra.

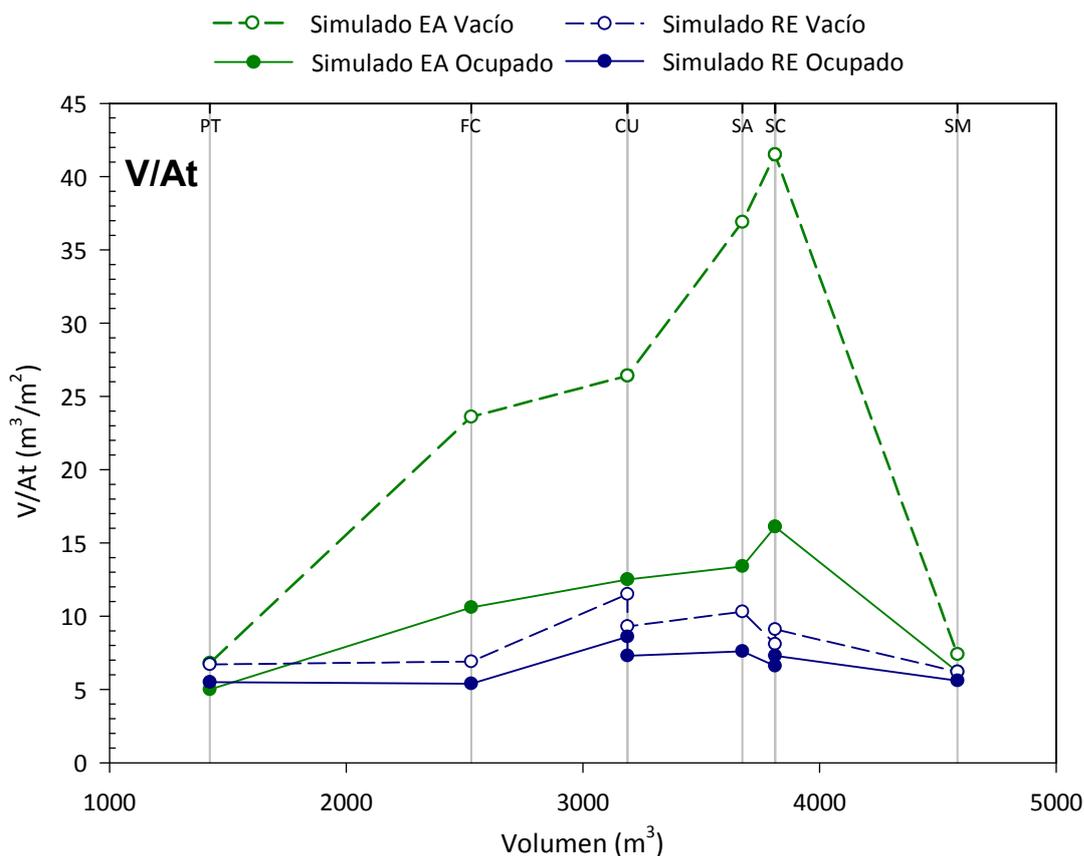


Figura 7.28. Relación V/At (m^3/m^2) para todas las iglesias de la muestra.

Con la propuesta de rehabilitación acústica, los valores disminuyen y se estabilizan en todas las iglesias (salvo en la de Pumarejo de Tera cuando se encuentra ocupada), siendo más parecidos entre sí y situándose en un rango de 6,2 y 11,5 m^3/m^2 (valor medio 8,5 m^3/m^2) para las iglesias vacías, y entre 5,4 y 8,6 m^3/m^2 (valor medio 6,7 m^3/m^2) para los recintos ocupados.

Correlación (Sr-At) y (V-At)

Partiendo de que las propuestas de rehabilitación acústica implementadas en las iglesias mejoran sustancialmente el comportamiento sonoro de estos espacios, en las figuras 7.29 y 7.30 se muestran las correlaciones entre las magnitudes estudiadas en el apartado anterior: Sr (m²) vs At (m²) y V (m³) vs At (m²). En ambas gráficas, y para las hipótesis de iglesia vacía y ocupada, se facilitan las rectas de regresión y los algoritmos que relacionan dichos parámetros, así como los coeficientes de determinación correspondientes.

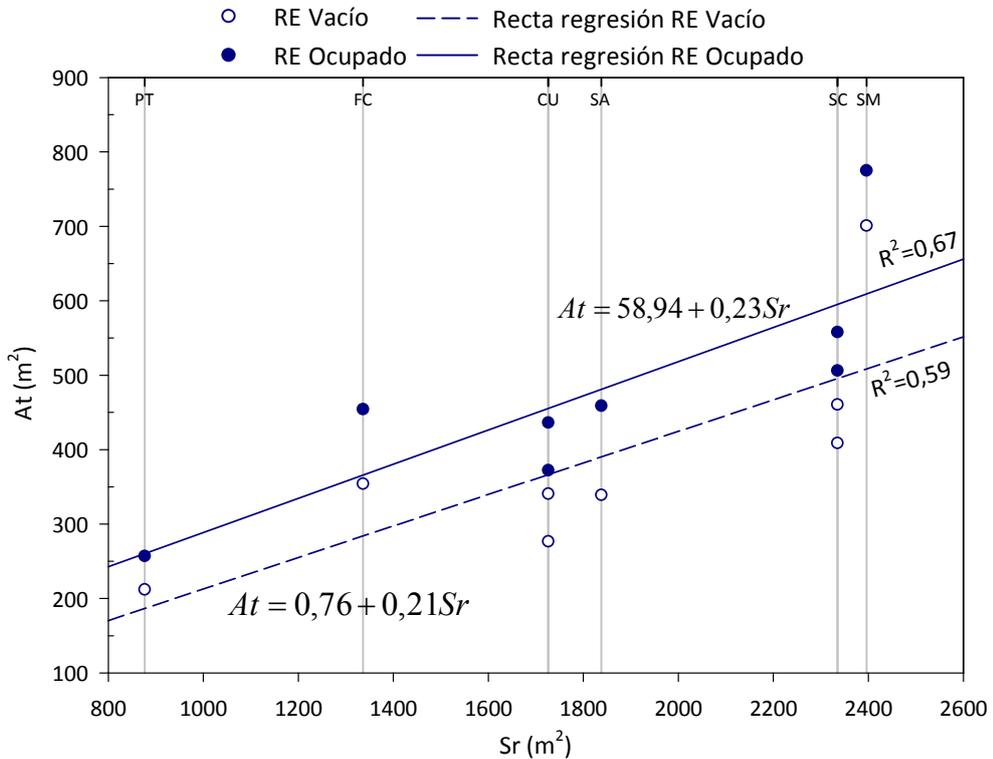


Figura 7.29. Correlación Sr (m²) vs At (m²) para todas las iglesias de la muestra.

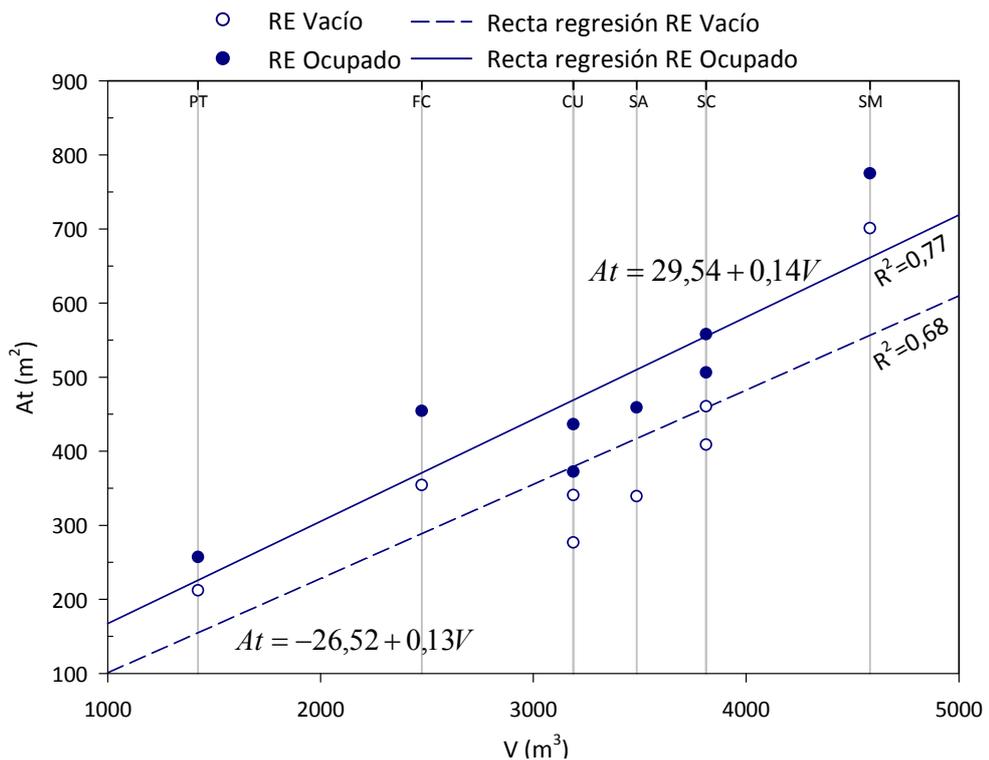


Figura 7.30. Correlación V (m³) vs At (m²) para todas las iglesias de la muestra.

Estas fórmulas, con la aproximación que permite alcanzar el número de puntos estudiados, pueden ser una herramienta útil y sencilla para el proyectista al enfrentarse a recintos religiosos de tipología similar, pues el ajuste de estas variables según esta formulación, han proporcionado resultados adecuados en los principales parámetros que definen el comportamiento acústico de los recintos.

7.3. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y DE AFORO

En este apartado se analizan y comparan las siguientes relaciones geométricas de cada iglesia en su estado actual⁹:

- Volumen / plaza (V/N)
- Volumen / superficie acústica efectiva de audiencia (V/S_A)
- Superficie acústica efectiva de audiencia / plaza (S_A/N)

Los resultados se contrastan con los valores recomendados en los estudios realizados por Haan y Fricke¹⁰, donde se correlacionan estos indicadores según el uso del recinto.

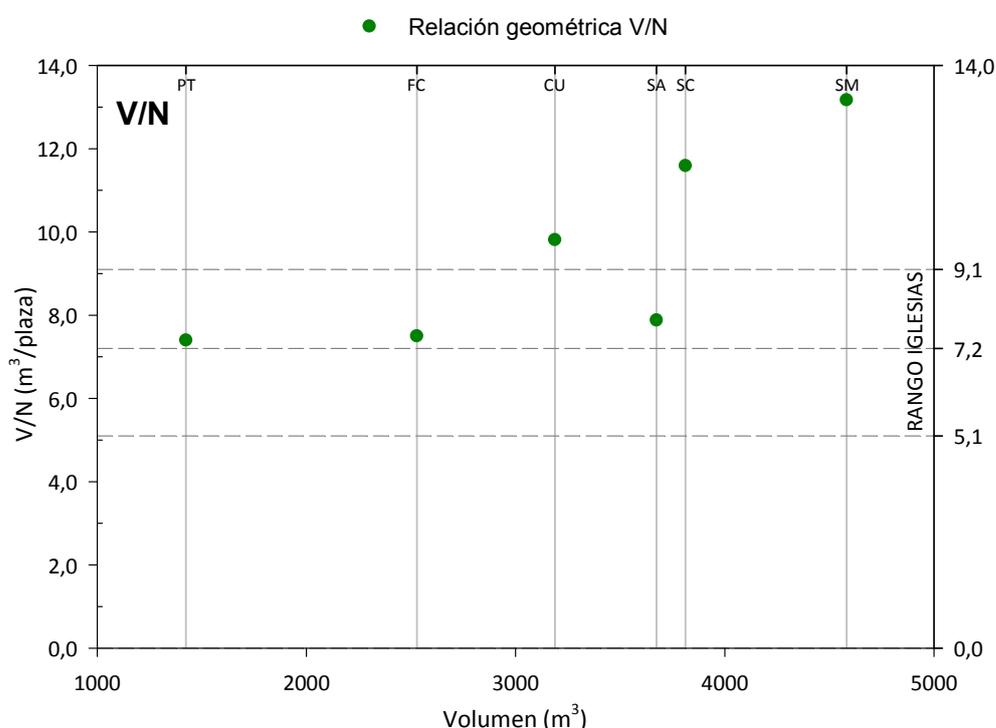


Figura 7.31. Relación geométrica V/N (m³/plaza) para todas las iglesias de la muestra. Estado actual.

En la gráfica de la figura 7.31 se aprecian tres iglesias cuyas relaciones V/N no sólo se encuentran dentro del rango recomendado, sino que sus valores se ajustan al óptimo de 7,2 m³/plaza propio del uso eclesial, (Pumarejo de Tera, Flor del Carmelo y Santa Ana). Por otro lado aparecen otras tres (Cuestablanca, Santa Cruz y Santa María Magdalena) cuyos valores se localizan fuera de este rango, si bien CU está próximo al límite superior. Es de destacar el comportamiento de SM cuyo valor casi duplica el valor medio considerado como óptimo.

Como los citados investigadores no recomiendan datos sobre las relaciones V/S_A y S_A/N para el caso de iglesias, en las gráficas de las figuras 7.32 y 7.33 se comparan los valores de estos indicadores con los propios de locales polifuncionales, por ser el uso más asimilable al religioso.

⁹ Los resultados de estas relaciones geométricas son los mismos para el estado actual y tras las propuestas de rehabilitación acústica, excepto en las iglesias de Santa Ana y Flor del Carmelo, donde las intervenciones propuestas disminuyen ligeramente su volumen, y además en la segunda iglesia, también el aforo. Los valores obtenidos para estas excepciones son muy similares a los del estado actual y originan los mismos comentarios.

¹⁰ Haan, C.H. y Fricke, F.R. (1992). Statistical investigations of geometrical parameters for the acoustic design of auditoria. *Applied Acoustics*, 35, p. 105-127.

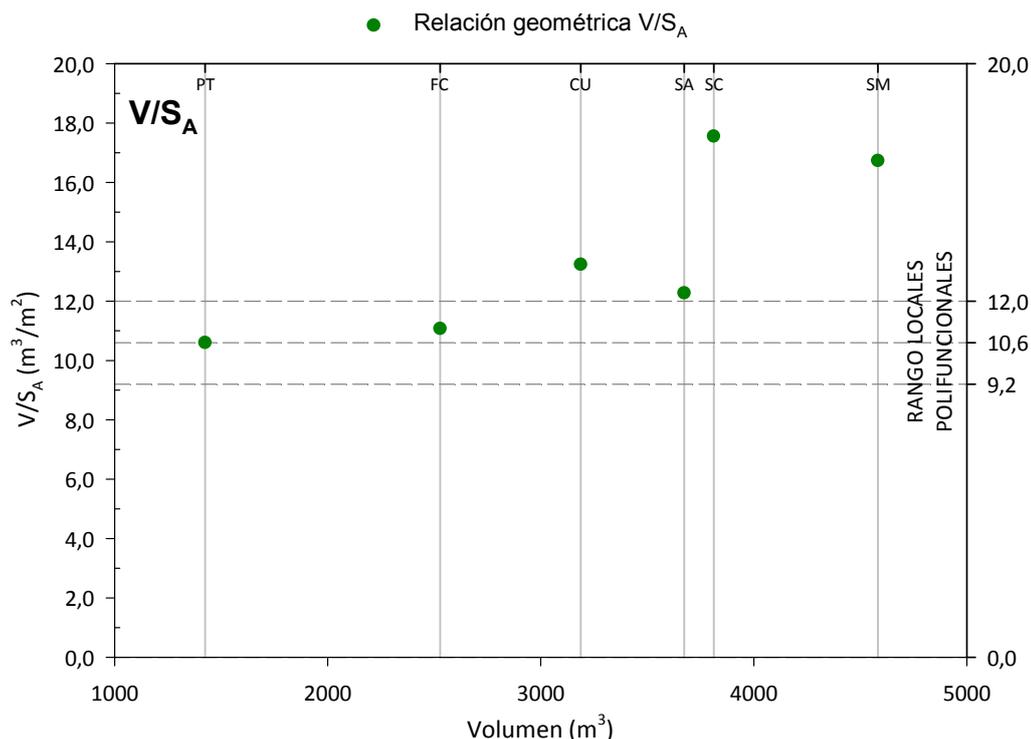


Figura 7.32. Relación geométrica V/S_A (m³/m²) para todas las iglesias de la muestra. Estado actual.

La relación entre el volumen y la superficie acústica efectiva de audiencia (figura 7.32) presenta un comportamiento muy similar al indicador visto anteriormente. En este caso, las iglesias de PT, FC, CU y SA cuyos valores están dentro, o muy próximos, al rango recomendado; y las iglesias de Santa Cruz y Santa María Magdalena cuyos valores se alejan claramente del rango. De nuevo, las iglesias más pequeñas (Pumarejo de Tera y Flor del Carmelo) son las que presentan relaciones próximas o coincidentes con el valor óptimo (10,6 m³/m²).

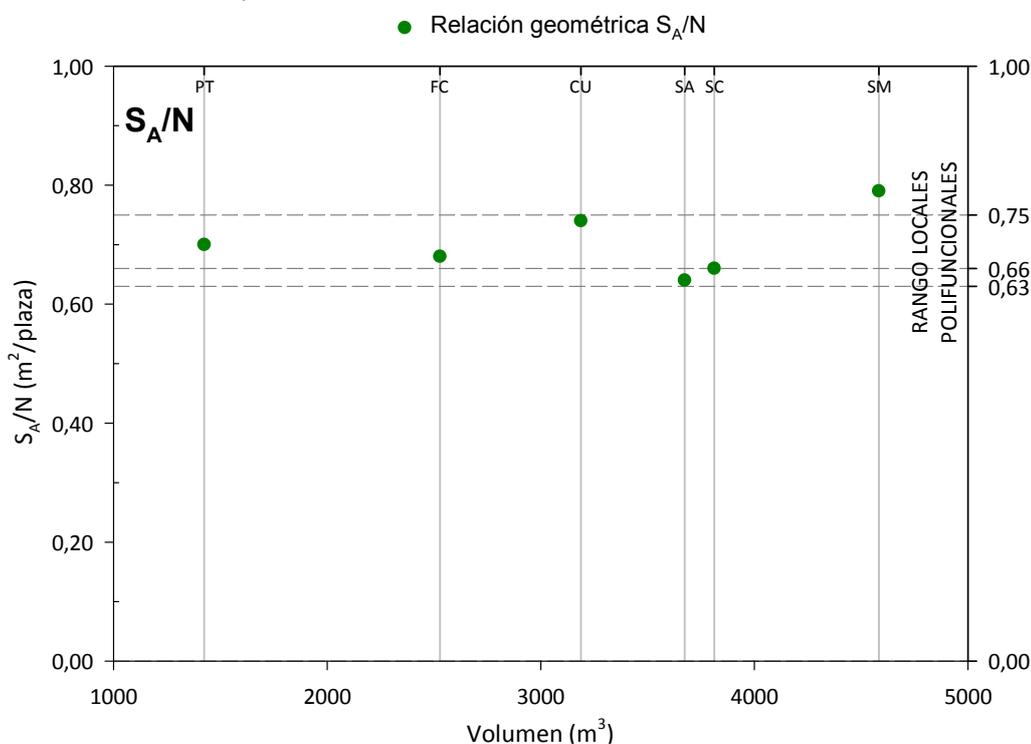


Figura 7.33. Relación geométrica S_A/N (m²/plaza) para todas las iglesias de la muestra. Estado actual.

A diferencia de las anteriores, la relación geométrica entre superficie acústica efectiva de audiencia y el aforo (figura 7.33), presenta valores localizados dentro del rango recomendado para locales

polifuncionales, excepto en el caso de Santa María Magdalena que supera ligeramente el límite superior. Para la iglesia de Santa Cruz el valor coincide con el recomendado ($0,66 \text{ m}^2/\text{plaza}$).

Como conclusión a este apartado, y a la vista de los resultados de las tres gráficas anteriores, podemos afirmar que las cuatro iglesias de mayor volumen (CU, SA, SC y SM) presentan un aforo y una superficie de audiencia efectiva adecuadas, pero un exceso de volumen que debe compensarse con la absorción sonora que se propone añadir con las propuestas de rehabilitación.

7.4. CORRELACIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y TIEMPO DE REVERBERACIÓN

De forma similar a los trabajos de Beranek¹¹ sobre análisis de las condiciones acústicas de un conjunto de salas conciertos, en este apartado se estudia la correspondencia entre algunos de los principales parámetros y atributos acústicos, que pudieran servir de base para proporcionar métodos y algoritmos para su estimación.

Al ser el tiempo de reverberación el indicador acústico más representativo del comportamiento sonoro de una sala, en términos globales, en nuestra muestra de estudio analizaremos la correlación entre el tiempo de reverberación y las relaciones geométricas del apartado anterior. En las figuras 7.34 a 7.36 se representan gráficamente los valores y se aportan las rectas de regresión que relacionan los distintos parámetros, para las hipótesis de estado actual (EA) y propuestas de intervención (RE), con las iglesias ocupadas al 100%. En cada gráfica aparece destacada la franja definida por los tiempos de reverberación óptimos (T_{mid}) para la palabra y la música religiosa propuestos por Knudsen y Harris, para iglesias con volúmenes comprendidos entre 1000 y 5000 m^3 .

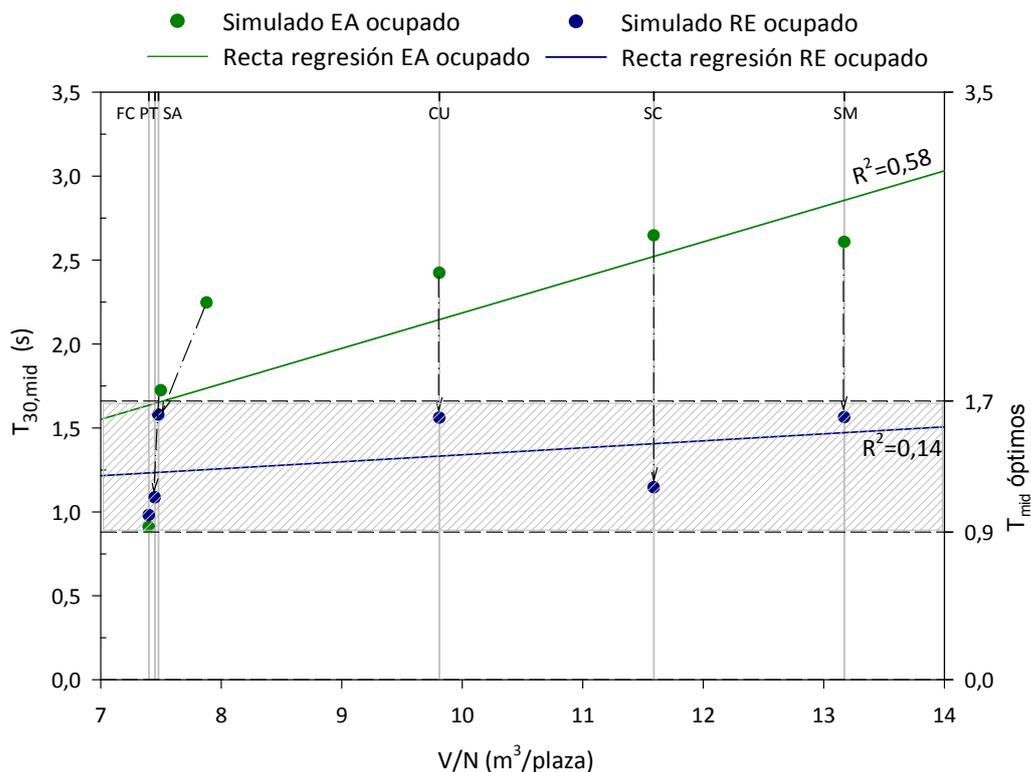


Figura 7.34. Relación entre $T_{30, \text{mid}}$ y el indicador V/N (m^3/plaza) para todas las iglesias de la muestra.

¹¹ Beranek, L. L. (1996). *Concert and opera halls: How they sound*. Nueva York: Acoustical Society of America.

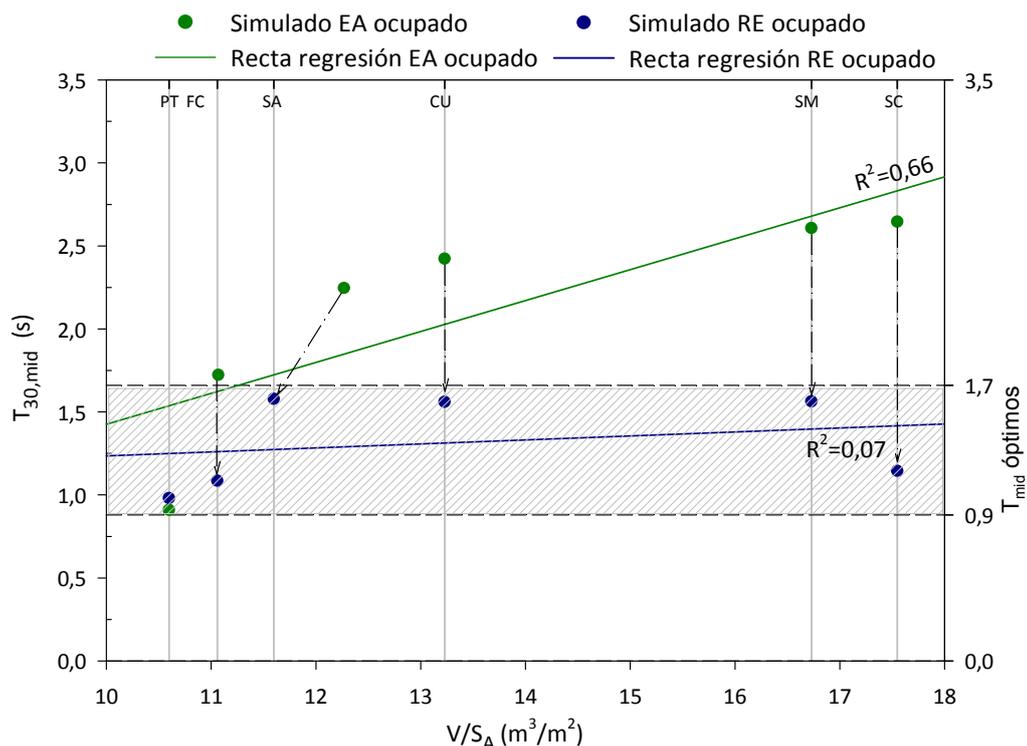


Figura 7.35. Relación entre $T_{30, \text{mid}}$ y el indicador V/S_A (m^3/m^2) para todas las iglesias de la muestra.

Las correlaciones del T_{30} vs V/N y V/S_A (figuras 7.34 y 7.35) evolucionan de forma similar en las dos hipótesis estudiadas. Con los valores del T_{30} del estado actual se generan rectas de regresión de mayor pendiente que las del estado rehabilitado. En las dos configuraciones (EA y RE), las relaciones V/N y V/S_A permanecen constantes en cada iglesia, salvo para Santa Ana y Flor del Carmelo, en las que las actuaciones reducen ligeramente su volumen. La disminución del tiempo de reverberación en cada iglesia (señalada con flechas) y la homogeneidad conseguida en sus resultados al implementar las medidas correctoras, genera rectas de regresión de poca pendiente que se sitúan dentro de la banda óptima de reverberación.

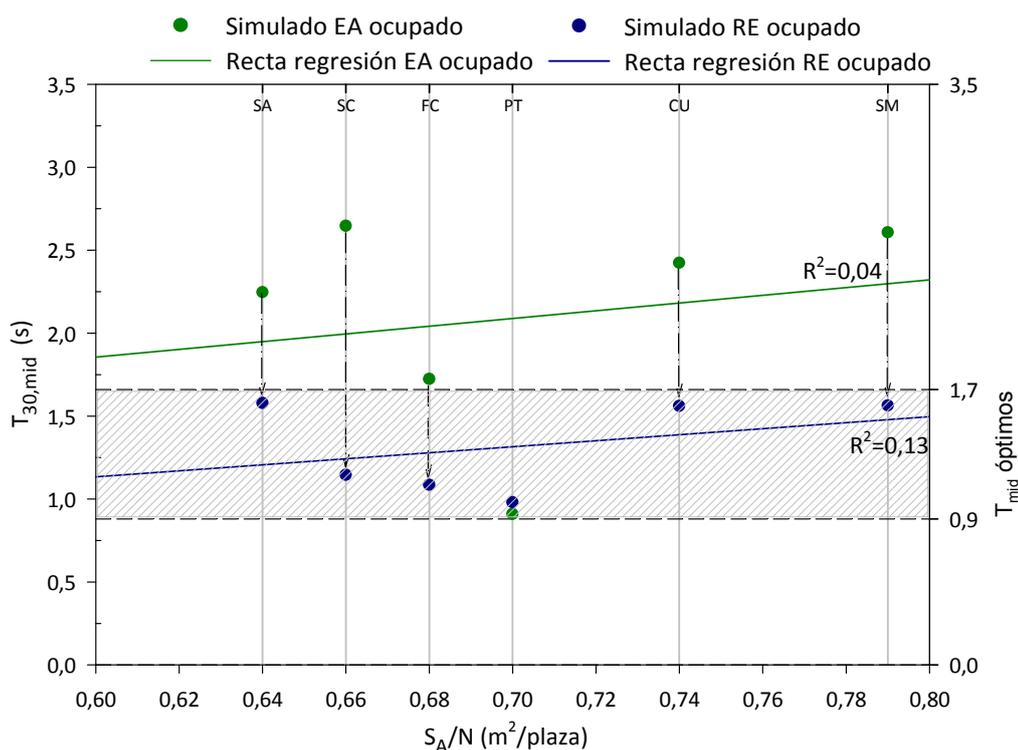


Figura 7.36. Relación entre $T_{30, \text{mid}}$ y el indicador S_A/N (m^2/plaza) para todas las iglesias de la muestra.

A diferencia de los casos anteriores, con la correlación del T_{30} con S_A/N (figura 7.36) se obtienen rectas de regresión de baja y similar pendiente para las dos hipótesis estudiadas. Tras las intervenciones acústicas, la nube de puntos también se sitúa dentro de la banda óptima de reverberación. En las dos hipótesis representadas, la relación S_A/N permanece constante en cada iglesia analizada, incluso en la iglesia Flor del Carmelo que disminuye ligeramente su aforo con la intervención.

Del análisis de las tres figuras anteriores podemos afirmar lo siguiente:

- A diferencia de lo que ocurre en otro tipo de recintos como teatros, salas de concierto o grandes recintos religiosos, las relaciones V/N , V/S_A y S_A/N no son tan determinantes en el tipo de iglesias analizadas, ya que el tiempo de reverberación no muestra una correlación tan clara como en los otros recintos mencionados. Entendemos que esto se debe a que la absorción sonora necesaria para alcanzar unas favorables condiciones acústicas, no se concentra de forma determinante en las zonas de audiencia, sino que existen otros elementos (techos y paredes de fondo, principalmente) que también juegan un papel destacado. Por ello, en este tipo de iglesias asamblearias, la absorción sonora de la zona de bancos es un factor importante pero no suficiente para garantizar unas adecuadas condiciones sonoras, siendo necesario el tratamiento de otras superficies. Este hecho pudimos comprobarlo en la fase de estudio de las propuestas de rehabilitación acústica para las iglesias de Cuestablanca y Santa María Magdalena, donde se pudo corroborar que el aumento de la superficie de bancos apenas tenía repercusión sobre el tiempo de reverberación (ver apartados de *reverberación* en 6.2.3.4 y 6.3.3.4).
- Los valores recomendados por Haan y Fricke, para estas relaciones geométricas, en función del uso del recinto, tienen utilidad cuando la iglesia confía su absorción sonora sólo al público. Recintos con relaciones geométricas inferiores o superiores a las analizadas por estos autores, pueden gozar de buenas condiciones acústicas si ajustan el tiempo de reverberación a los óptimos recomendados con la absorción sonora de los revestimientos.

Por último, señalar que aunque uno de los objetivos de este apartado era determinar algoritmos que relacionen los parámetros indicados empleando los resultados de la muestra de iglesias tras la rehabilitación, las correlaciones obtenidas no han sido determinantes, pues sus coeficientes de determinación eran muy bajos ($R^2 \leq 0,14$).

7.5. EL MODELO ENERGÉTICO μ

En este apartado se presenta un análisis energético del campo sonoro en cada una de las iglesias de la muestra utilizando el modelo analítico μ , cuyo procedimiento se describe en el punto *Los modelos analíticos* incluido en el apartado A1.6 del anexo A1.

Para este análisis energético se ha procedido al ajuste por regresión del parámetro μ , para cada iglesia y para cada fuente, a partir de los valores de la claridad C_{80} . Con objeto de evaluar la sala, se han admitido los valores promediados a frecuencias medias, tal como propone la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

En la tabla 7.19 presentamos los valores del parámetro μ obtenidos por regresión y los del coeficiente de determinación, para cada iglesia, en la hipótesis vacía de fieles, con cada posición de fuente, en el estado actual (EA) y tras la propuesta de rehabilitación 1 y 2 (RE1 y RE2).

IGLESIA	FUENTE 1					
	μ (EA)	μ (RE1)	μ (RE2)	R^2 (EA)	R^2 (RE1)	R^2 (RE2)
SANTA ANA	0,0844	≈ 0	--	0,83	0,92	--
CUESTABLANCA	0,0081	0,0256	≈ 0	0,90	0,94	0,67
S.M. MAGDALENA	≈ 0	≈ 0	--	*	*	--
SANTA CRUZ	0,1628	0,0252	0,0133	0,95	0,97	0,98
FLOR DEL CARMELO	0,1209	≈ 0	--	0,92	0,93	--
PUMAREJO DE TERA	≈ 0	≈ 0	--	0,37	0,56	--
	FUENTE 2					
	μ (EA)	μ (RE1)	μ (RE2)	R^2 (EA)	R^2 (RE1)	R^2 (RE2)
SANTA ANA	0,0628	≈ 0	--	0,88	0,77	--
CUESTABLANCA	0,0889	≈ 0	≈ 0	0,65	0,63	*
S.M. MAGDALENA	≈ 0	≈ 0	--	*	*	--
SANTA CRUZ	0,2006	0,0208	0,0075	0,92	0,89	0,84
PUMAREJO DE TERA	0,0021	0,0228	--	0,52	0,93	--
	FUENTE 3					
	μ (EA)	μ (RE1)	μ (RE2)	R^2 (EA)	R^2 (RE1)	R^2 (RE2)
SANTA CRUZ	0,1368	0,0031	0,0129	0,88	0,80	0,82

* Estimación de valores de μ negativos.

Tabla 7.19. Valores del parámetro μ y del coeficiente de determinación.

A modo de ejemplo, en la figura 7.37, se representa, para cada iglesia de la muestra, la regresión sobre los valores de C_{80} medidos *in situ* (EA) para obtener el parámetro μ , con la fuente en posición 1.

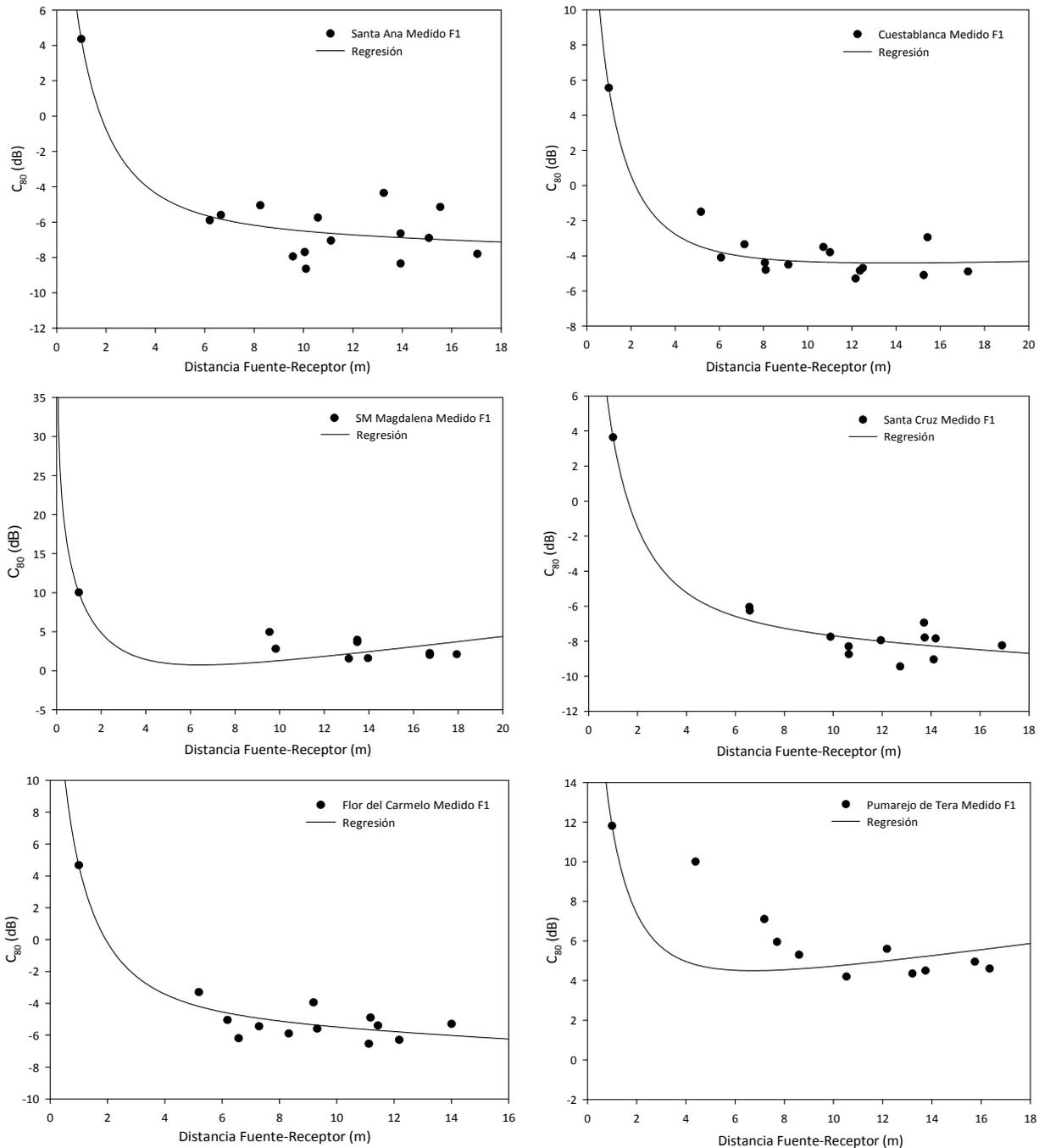


Figura 7.37. Regresión sobre los valores de C_{80} para obtener el parámetro μ . Estado actual vacío (medición *in situ*), fuente 1.

Respecto a las distintas posiciones de la fuente sonora en las iglesias (altar, ambón u órgano) podemos afirmar que el modelo energético depende de la ubicación de la fuente, pues se observan importantes variaciones del parámetro μ . Un ejemplo de este caso es la iglesia de Cuestablanca, donde pasamos de un modelo donde la energía temprana presenta muy poca atenuación en los primeros 80 ms con la fuente localizada en el altar, a una atenuación el doble de la propuesta en el modelo de Barron cuando la fuente se encuentra en el órgano. Este cambio de posición es drástico pues pasamos de tener la fuente según el eje transversal (corto) al eje longitudinal (largo). En el primer caso, la fuente está situada cerca de la pared del altar, muy reflectante, logrando que las reflexiones tempranas del primer orden lleven la energía en este intervalo temporal en la dirección delante-atrás. El motor de cálculo TUCT permite corroborar este hecho mediante el trazado de rayos. En las siguientes figuras presentamos dos capturas para dos intervalos temporales para la banda de octava de 1000 Hz. En la primera (figura 7.38) podemos ver el frente de ondas esférico en los

primeros 40 ms, a punto de incidir sobre la pared del fondo, y posteriormente la situación del frente de ondas, transcurridos los primeros 80 ms (figura 7.39).

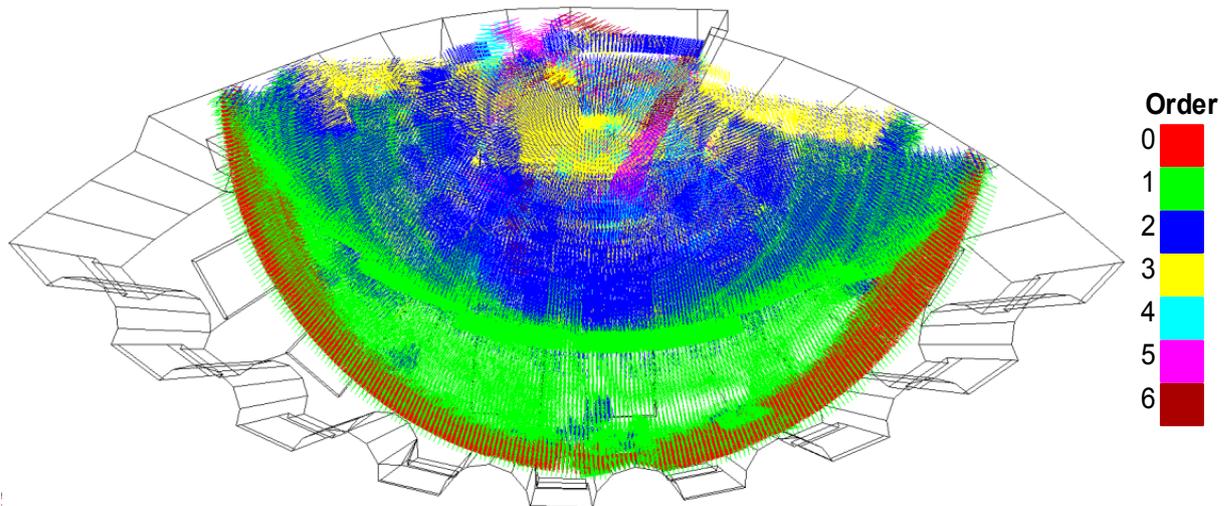


Figura 7.38. Trazado de rayos sonoros en el modelo informático de la iglesia de Cuestablanca. Trascurridos primeros 40 ms, frecuencia de 1000 Hz, fuente 1. Colores según orden de reflexión.

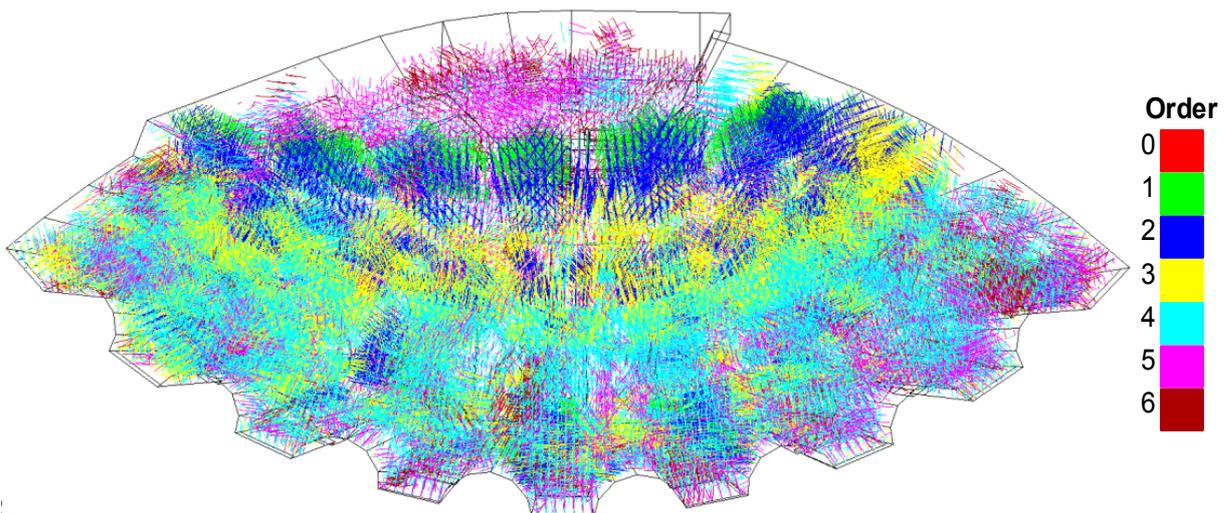


Figura 7.39. Trazado de rayos sonoros en el modelo informático de la iglesia de Cuestablanca. Trascurridos primeros 80 ms, frecuencia de 1000 Hz, fuente 1. Colores según orden de reflexión.

Sin embargo, cuando la fuente se sitúa junto al órgano, al ser este de madera y, por tanto, más absorbente que el hormigón, disminuye la energía de las primeras reflexiones, y el resto de la energía evoluciona con una direccionalidad cercana a la perpendicular al eje de simetría. En la figura 7.40 presentamos el frente de ondas cuando han transcurrido los primeros 80 ms.

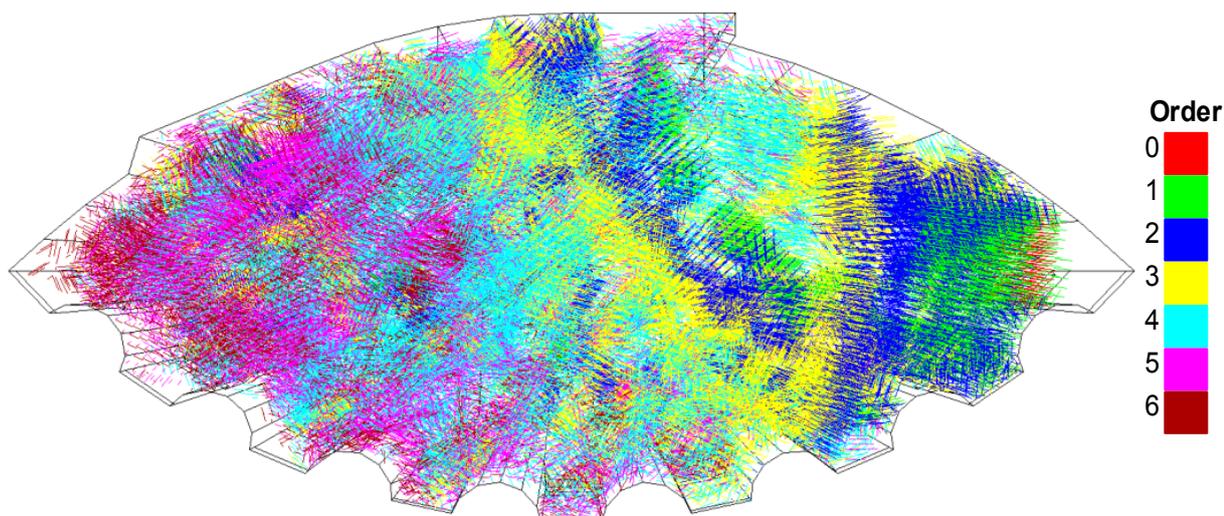


Figura 7.40. Trazado de rayos sonoros en el modelo informático de la iglesia de Cuestablanca. Trascurridos primeros 80 ms, frecuencia de 1000 Hz, fuente 2. Colores según orden de reflexión.

La iglesia de Santa Ana, con una tipología similar a la iglesia de Cuestablanca, presenta un comportamiento parecido, con leves diferencias que pueden atribuirse a la existencia del lucernario que absorbe una parte de la energía asociada al sonido directo y las primeras reflexiones cuando la fuente está situada junto al altar. En la figura 7.41 podemos ver que en los primeros 40 ms, mientras el sonido directo está llegando a las paredes del fondo, en el altar y lucernario están teniendo lugar reflexiones de sexto orden.

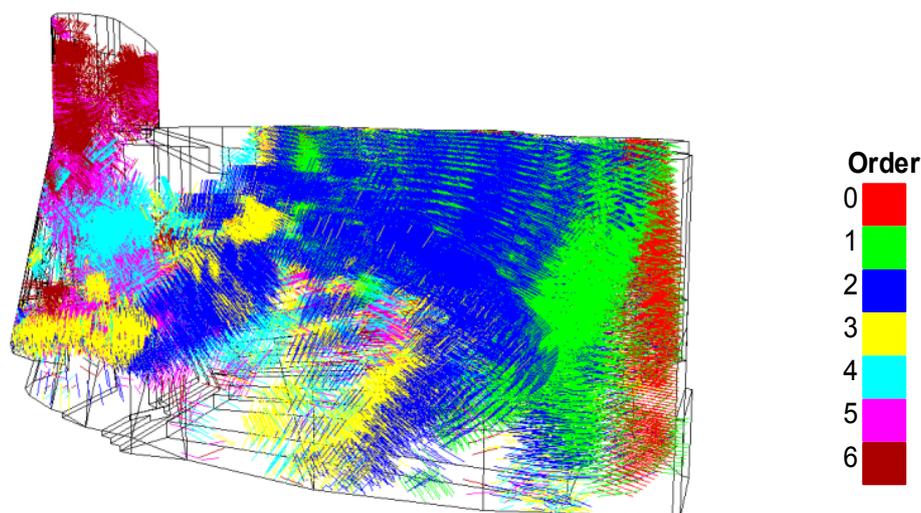


Figura 7.41. Trazado de rayos sonoros en el modelo informático de la iglesia de Santa Ana. Trascurridos primeros 40 ms, frecuencia de 1000 Hz, fuente 1. Colores según orden de reflexión.

Comentarios aparte merecen las iglesias de Pumarejo de Tera y Santa María Magdalena. En ambos casos, no se aprecia una clara atenuación de la energía con la distancia. En Pumarejo, el techo absorbente y el pequeño volumen del recinto explican este hecho. Más difícil explicación tiene la iglesia de Santa María Magdalena, que se ha destacado por presentar un comportamiento acústico singular, difícil de analizar con las herramientas de simulación.

Según los trabajos de Berardi *et al.*¹², se podría asignar al parámetro μ un único valor por defecto, común a todas las iglesias. Ese valor de μ sería 0,08 (tabla 7.20). Sin embargo, nuestros estudios realizados para las iglesias postconciliares de M. Fisac no corroboran este hecho. El carácter direccional de las primeras reflexiones, junto con la ubicación de la fuente y las posiciones de los

¹² Berardi, U., Cirillo, E. y Martellotta, F. (2009). A comparative analysis of acoustic energy models for churches. *Journal of Acoustic Society of America*, 126(4), p. 1838–1849.

receptores en estas iglesias tan abiertas por su carácter asambleario, provoca diferentes comportamientos energéticos que hacen inviable la caracterización mediante un único parámetro μ .

Características	μ
Valor de referencia para una iglesia	0,08
Elementos difusores (decoraciones, pequeños pilares y techo)	+0,08
Volúmenes adicionales entre el emisor y el receptor	+0,08
Difusores adicionales (grandes pilares o capillas a lo largo de las paredes)	+0,08
Bóvedas altas o cúpulas en tambor	+0,08

Tabla 7.20. Valor del parámetro μ para las iglesias de la muestra, según aportación de Berardi *et al.*

En la figura 7.42 podemos ver los valores promedios de la claridad frente a la distancia, para todas las iglesias, tras las propuestas de rehabilitación, sin presencia de congregación y para la fuente F1.

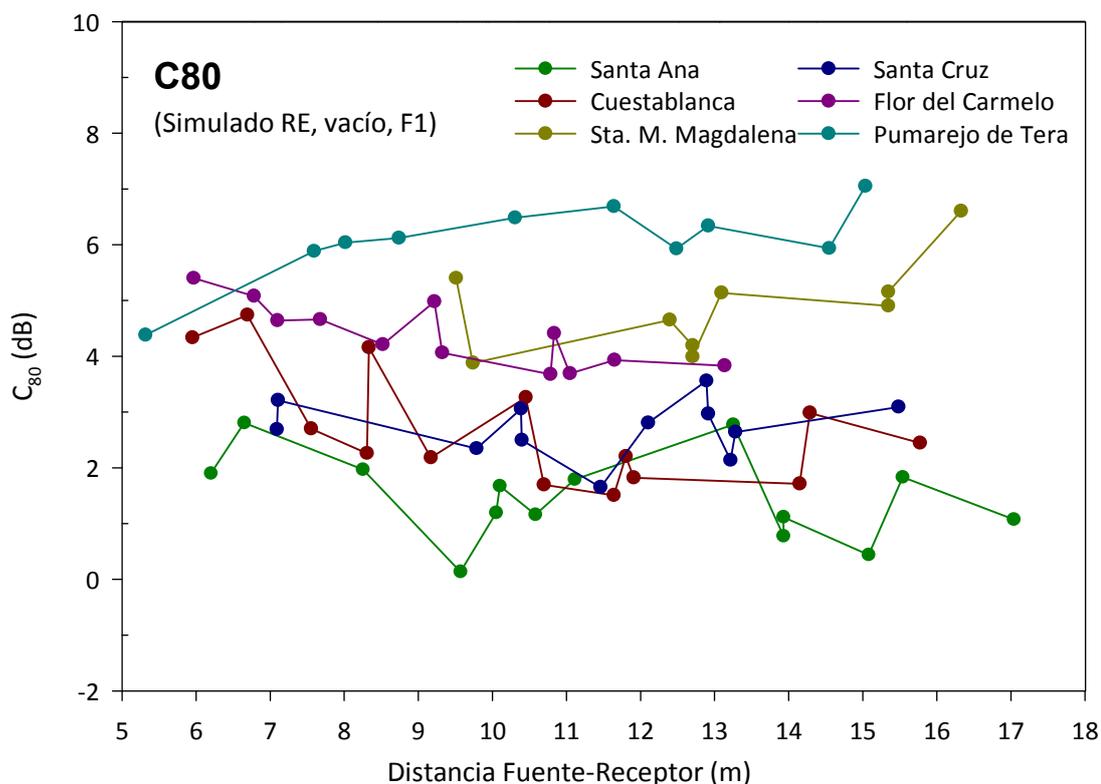


Figura 7.42. Claridad musical C_{80} (dB). Promediado espectral frente a la distancia fuente-receptor para todas las iglesias. Propuesta de rehabilitación acústica, configuración vacío. Fuente 1.

Los modelos energéticos se basan en la caída de la energía acústica conforme aumenta la distancia fuente receptor, que implica, en el caso de la claridad, una disminución en los valores de la misma a medida que aumentamos dicha distancia. Analizando la figura 7.42, la tabla 7.19 y las tablas relativas a absorción de cada iglesia aportadas en el capítulo 6, podemos inferir que, en la totalidad de las iglesias, donde ha habido un aumento de la absorción sonora, esta caída es despreciable. En algunos casos, tal como se refrenda en los mapas del C_{80} mostrados en el citado capítulo, incluso supone un incremento del parámetro con la distancia.

Dicho incremento también se refleja en las gráficas de la figura 7.43, donde se representa, para cada iglesia de la muestra, la regresión sobre los valores de C_{80} para obtener el parámetro μ , correspondiente a la propuesta de rehabilitación acústica 1 (RE1) con la fuente en posición 1.

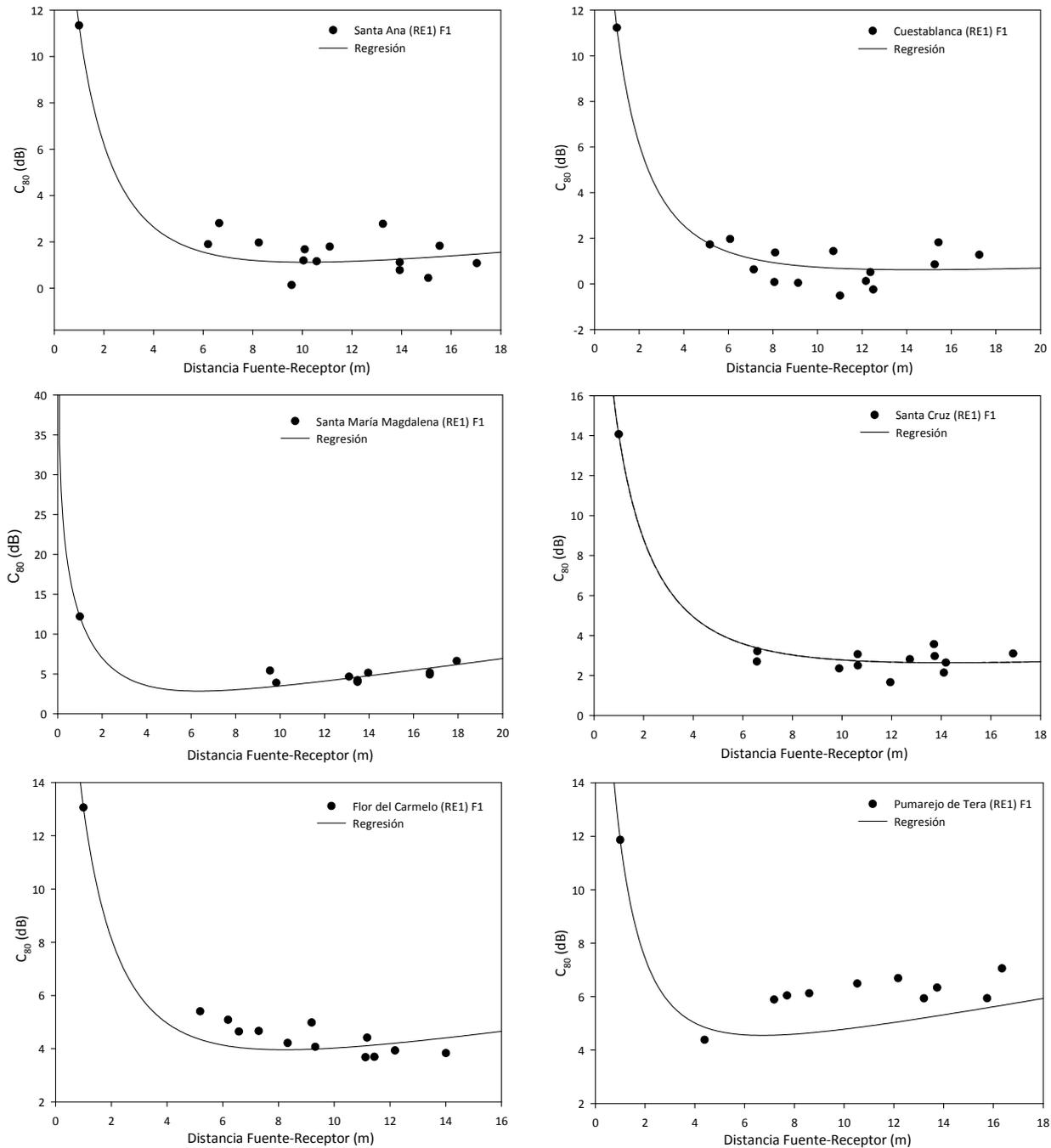


Figura 7.43. Regresión sobre los valores de C_{80} para obtener el parámetro μ . Propuestas de rehabilitación acústica 1 (vacío), fuente 1.

8

CONCLUSIONES

En los capítulos anteriores se han mencionado algunas conclusiones parciales derivadas de los aspectos acústicos analizados en las diferentes fases del presente trabajo de investigación.

En este capítulo se recogen las conclusiones obtenidas y aportadas por esta tesis doctoral sobre el sonido en la arquitectura religiosa de M. Fisac posterior al Concilio Vaticano II y las propuestas de rehabilitación acústica presentadas para las iglesias de la muestra.

1. En la arquitectura postconciliar de Fisac de la década de los sesenta (iglesias de Santa Ana, Cuestablanca, Santa María Magdalena y Santa Cruz) se hace patente la preocupación del autor por las cuestiones acústicas, aunque como él era consciente, sobre todo en las iglesias ejecutadas con hormigón visto, existía una falta de absorción sonora que, en general, daba lugar a un mal comportamiento acústico. Combinando su intuición y talante investigador, logra alcanzar unos objetivos acústicos acordes a los limitados medios de los que dispuso para la construcción de estos espacios eclesiales. La consecución de estos propósitos, desde el punto de vista de la distribución sonora, fueron logrados utilizando una de las pocas herramientas que disponía como arquitecto: el dominio y control de la geometría y formas arquitectónicas, sin perder la finalidad de construir espacios de alto valor arquitectónico.

Sus aportaciones religiosas de la década de los ochenta (iglesias Flor del Carmelo y Pumarejo de Tera) reflejan la primacía de diversos aspectos, como la fidelidad al programa, el carácter asambleario de las celebraciones, las posibilidades plásticas del hormigón visto o la adecuación al lugar, frente a aspectos de índole acústicos.

2. Con la construcción de las iglesias de Santa M. Magdalena y Pumarejo de Tera hay un punto de inflexión en su arquitectura religiosa, desde el punto de vista sonoro, ya que utiliza materiales específicos de absorción acústica, concretamente en el techo de las mismas. Aunque la bibliografía publicada sobre estas iglesias no hace referencia a las propiedades acústicas de estos elementos, pensamos que Fisac, consciente de su importancia, los empleó con la intención de que contribuyeran a la calidad acústica de ambos recintos, si bien en el caso de S.M. Magdalena no se alcanzaron las condiciones más deseables.
3. Las medidas acústicas experimentales llevadas a cabo *in situ* en las iglesias nos han permitido evaluar y caracterizar su comportamiento sonoro atendiendo a dos grupos diferenciados: a) iglesias cuyo revestimiento interior principal es el hormigón visto; y, b) iglesias con muros de fábrica o mampostería y panel absorbente en el techo.

Para el primer grupo, el carácter asambleario de las plantas, la abertura de las paredes laterales y la forma de las paredes de fondo, casi siempre formada por los *muros dispersivos*, dieron lugar a salas difusas, con distribución sonora muy homogénea y buena impresión espacial. Sin embargo, la carencia de absorción sonora originó tiempos de reverberación muy superiores a los óptimos recomendados y, consecuentemente, una deficiente inteligibilidad para la palabra y claridad musical.

El segundo grupo lo forman dos casos singulares: Santa M. Magdalena y Pumarejo de Tera. Los resultados de la medición acústica de la primera reflejan que se trata de un recinto difuso, con distribución sonora homogénea y aceptable impresión espacial, inteligibilidad para la palabra y

claridad musical. Sin embargo, las diferencias obtenidas entre los parámetros objetivos y subjetivos relativos a la reverberación, revelan un singular comportamiento sonoro de esta iglesia, que puede atribuirse a la inclinación del techo y al revestimiento empleado en el mismo, a las formas geométricas que configuran el espacio y a su volumen.

La iglesia de Pumarejo de Tera es la única de las estudiadas que posee buenas condiciones acústicas en origen. En su construcción, los límites urbanísticos y la falta de recursos, llevaron a Fisac a diseñar una iglesia más pequeña que sus predecesoras y emplear materiales tradicionales del lugar. Esto último, en combinación con el empleo de revestimientos absorbentes, dieron lugar a un recinto con adecuada acústica.

4. Las medidas acústicas de las iglesias con planta asamblearia reflejan que, en general, la posición de la fuente en el altar, ambón u órgano, no conlleva diferencias significativas en los parámetros acústicos promediados espacialmente. Los resultados de las magnitudes acústicas relacionadas con la reverberación son claramente indiferentes a la posición de la fuente; no obstante, los parámetros relacionados con la inteligibilidad de la palabra y la claridad del sonido percibida, suelen presentar resultados algo mejores para la fuente situada en el ambón o en el órgano (salvo en la iglesia de Pumarejo de Tera). Los resultados relativos al nivel sonoro subjetivo son independientes de la posición de la fuente, mientras que, como es de esperar, en los relacionados con la impresión espacial sí se pone de manifiesto esta dependencia.
5. Las propuestas de rehabilitación acústica presentadas para las distintas iglesias consiguen corregir las deficiencias acústicas detectadas en cada una de ellas, apoyándose en un conjunto de actuaciones, totalmente reversibles, orientadas en su mayoría a la introducción de revestimientos absorbentes o reflectantes sonoros, según los casos, dispuestos estratégicamente desde el punto de vista acústico y arquitectónico. Las medidas correctoras respetan los aspectos espaciales, formales y materiales con que el arquitecto concibió cada proyecto, siendo compatibles con el grado de protección arquitectónico de la iglesia.

Las actuaciones disminuyen los elevados tiempos de reverberación existentes, ajustándolos a los considerados como óptimos para los usos de palabra y música religiosa, mejoran la inteligibilidad de la palabra y la claridad musical, reducen la energía de las reflexiones tardías en los distintos puntos de recepción, al tiempo que mantienen la buena distribución sonora e impresión espacial existentes.

6. Para cuantificar el efecto que las medidas correctoras tienen en el comportamiento global del tiempo de reverberación de la muestra, remitimos a las tablas 7.2 y 7.3, donde se aporta el promedio espacial y temporal de los valores del $T_{30, \text{mid}}$ para las configuraciones estudiadas, en cada templo y los dos grupos de iglesias que distinguimos en la muestra:
 - El primero, constituido por aquellas iglesias proyectadas por Fisac con tratamientos absorbentes (PT y SM),
 - Y el segundo, formado por las iglesias cuyo revestimiento interior principal es el hormigón visto (FC, CU, SA y SC).

Para el primer grupo, las propuestas de rehabilitación disminuyen el tiempo de reverberación medio global del estado actual, un 29,1% con las iglesias vacías, y un 26,6% cuando las ocupan los fieles.

En el segundo grupo de iglesias, la reducción de los tiempos de reverberación medios globales es aún mayor: sin la presencia de fieles, disminuye un 72% y, con ellos, desciende un 41% sobre los valores obtenidos para el estado actual.

7. Aunque las propuestas de rehabilitación acústica mejoran la inteligibilidad de la palabra en todas las iglesias, el empleo adicional de un adecuado sistema de apoyo electroacústico, en combinación con las medidas correctoras, mejora los resultados y la calificación subjetiva de la inteligibilidad, sobre todo en las zonas de bancos más alejadas de la fuente sonora, resultando una distribución más homogénea.
8. Los resultados globales de absorción sonora para los dos grupos de la muestra, especificados en la tabla 7.16, indican que en las iglesias que actualmente cuentan con revestimientos absorbentes sonoros, las intervenciones planteadas suponen un incremento de la absorción sonora del grupo del 15%, en el caso de las iglesias vacías, y del 4,5%, cuando están ocupadas al 100%.

Sin embargo, en las iglesias construidas con hormigón visto, las propuestas de rehabilitación acústica modifican sustancialmente la absorción sonora global: para las vacías en el estado actual la nueva absorción excede el triple del valor medio del grupo, mientras que cuando se encuentran ocupadas es casi el doble.

9. Por un lado, la visualización de los rayos sonoros en las simulaciones informáticas y, por otro, los análisis individuales y de conjunto sobre la absorción sonora de las iglesias, corroboran el papel fundamental del techo y de los muros de fondo (tal y como Fisac intuía), sobre la acústica en este tipo de iglesias con disposición asamblearia. Las actuaciones sobre dichos elementos constructivos, junto con la aportación en las zonas de audiencia vacía, han sido las más efectivas y las que más han repercutido en la mejora acústica de estos recintos.
10. Los estudios realizados sobre los *muros dispersivos* de formas curvas convexas (iglesias de Santa Ana, Cuestablanca y Santa Cruz) reflejan que los fundamentos acústicos de Fisac sobre dichos elementos, en cuanto a distribución sonora, eran correctos. Sin embargo, la falta de absorción sonora de los materiales empleados en su construcción, daba lugar a las carencias acústicas que se pusieron de manifiesto en el análisis de las condiciones sonoras actuales. Por contra, los *muros dispersivos* quebrados y con aristas vivas (iglesia de Santa María Magdalena), no se han observado tan efectivos para dispersar las ondas sonoras, como los de trazado curvo.
11. A diferencia de lo que ocurre en otro tipo de espacios como salas de concierto, teatros o iglesias de mayor volumen, en las iglesias estudiadas la absorción de las zonas de audiencia es un factor importante pero no suficiente para garantizar unas adecuadas condiciones sonoras, siendo necesario el tratamiento de otras superficies (especialmente techo y paredes de fondo).
12. A pesar de lo anterior, el empleo de mobiliario absorbente en las zonas de audiencia (como se hace en recintos de otros usos) se considera básico dada su repercusión en el comportamiento sonoro de la iglesia vacía, y además permite que la acústica del templo no quede condicionada a su grado de ocupación, presentando similares condiciones con los servicios religiosos casi vacíos o totalmente ocupados.
13. Con las limitaciones de esta investigación en cuanto a la extensión de la muestra, con las propuestas de rehabilitación acústica se han obtenido unos rangos para las relaciones S_r/A_t y V/A_t que podrían considerarse como orientativos a la hora del diseño, pues se han obtenido a partir de comportamientos sonoros que se han demostrado válidos en las iglesias analizadas (tabla 8.1).

RELACIÓN GEOMÉTRICA	ESTADO	RANGO		VALOR MEDIO
		Mín.	Máx.	
Sr/At (m ² /m ²)	Vacío	3,4	6,2	4,8
	Ocupado	2,9	4,6	3,8
V/At (m ³ /m ²)	Vacío	6,1	11,5	8,4
	Ocupado	5,1	8,6	6,7

Tabla 8.1. Rango de valores para las relaciones geométricas Sr/At (m²/m²) y V/At (m³/m²) en la muestra de iglesias.

A partir de los resultados anteriores, se proponen algoritmos que correlacionan absorción sonora total At (m²), superficie total de revestimiento Sr (m²) y volumen V (m³). Se pretende que estas ecuaciones sean una herramienta útil y sencilla para tener un control básico de las condiciones acústicas en las primeras fases de proyecto de este tipo de recintos.

14. A diferencia de lo que ocurre en otro tipo de recintos como teatros, salas de concierto o grandes recintos religiosos, las relaciones V/N, V/S_A y S_A/N no son tan determinantes en el tipo de iglesias analizadas, ya que el tiempo de reverberación no muestra una dependencia tan clara con dichas relaciones geométricas.
15. Según lo anterior, los valores recomendados por Haan y Fricke para las relaciones geométricas V/N, V/S_A y S_A/N en función del uso del recinto, tienen utilidad cuando éste confía gran parte de su absorción sonora al público. Recintos con relaciones geométricas inferiores o superiores a las analizadas por estos autores, pueden gozar de buenas condiciones acústicas si ajustan el tiempo de reverberación a los óptimos recomendados con la absorción sonora de los revestimientos.
16. El carácter asambleario y la planta en forma de abanico de estas iglesias, en comparación con otras de planta longitudinal, hace que presenten un comportamiento energético propio que depende de la posición de la fuente y de la dirección de emisión (longitudinal o transversal). Este singular comportamiento hacen inviable la caracterización mediante un único parámetro μ , siendo necesario especificar diferentes valores del parámetro para cada posición de fuente. Curiosamente, este hecho coincide con la intención del Concilio Vaticano II que sugería evitar la unidireccionalidad de la liturgia preconiliar.

Por otra parte, el aumento de absorción sonora de las propuestas de rehabilitación provoca que los valores objetivos de la claridad no presenten caídas significativas cuando aumenta la distancia fuente receptor. Esto provoca que los valores del parámetro μ tiendan a cero, por lo que la energía acústica en el interior de los recintos se aproxima al modelo difuso.

17. Con este trabajo se aportan soluciones a un problema funcional cotidiano de muchas de estas iglesias. La aplicación de un método experimental contrastado nos permite afirmar que la implementación de las propuestas de rehabilitación acústica mejorarían las condiciones sonoras de las iglesias durante las celebraciones litúrgicas.
18. Con el análisis realizado sobre los aspectos subjetivos del oyente y sus parámetros acústicos asociados, se aportan a los arquitectos y especialistas en acústica conocimientos y herramientas para la optimización de la calidad acústica, tanto en los proyectos eclesiales de nueva planta como en intervenciones de rehabilitación.

9

RESUMEN

El presente trabajo de investigación realiza un estudio de las condiciones acústicas actuales de las iglesias construidas por Miguel Fisac, con posterioridad al Concilio Vaticano II. Por la importancia que este evento religioso otorgó a la liturgia de la palabra, la acústica será una constante que Fisac tratará de resolver en su arquitectura eclesial postconciliar. A partir de las condiciones sonoras existentes de todas sus iglesias posteriores al año 1965, y que siguen manteniendo uso cultural, se realizan propuestas de rehabilitación acústica y se valoran las condiciones sonoras previsibles en las mismas.

El trabajo comienza con un recorrido histórico de la iglesia cristiana, desde su origen en tiempos de Jesucristo hasta la segunda mitad del siglo XX, analizando su arquitectura, la relación de ésta con la liturgia y realizando consideraciones generales sobre su acústica. A continuación, se analizan los principales aspectos de la reforma litúrgica del Concilio Vaticano II y su repercusión en el proyecto arquitectónico de las iglesias.

Las consideraciones generales de la arquitectura y la trayectoria profesional de Miguel Fisac constituyen el preámbulo para el estudio de sus intervenciones religiosas, realizadas tanto antes como después del concilio.

Con el objeto de enmarcar en contexto este trabajo de investigación, se presentan algunos de los estudios acústicos más relevantes, realizados en recintos de culto de diversas ciudades europeas y de oriente próximo, destacando la labor científica desarrollada en esta materia, por grupos y proyectos de investigación específicos.

El estudio empírico comienza con la especificación de los objetivos de la investigación y la justificación de la elección de la muestra de estudio (las seis iglesias postconciliares de Fisac en uso actualmente), continuando con la descripción del método del trabajo de investigación, el cual persigue los siguientes propósitos: a) el análisis y valoración sonora actual de cada iglesia, a partir de las mediciones acústicas realizadas *in situ*; b) elaboración de un modelo informático que reproduzca el campo sonoro actual con suficiente aproximación y fiabilidad; c) realizar propuestas de rehabilitación acústica que mejoren las condiciones sonoras en el interior de cada iglesia, comprobando la idoneidad de las mismas, mediante la simulación acústica del modelo eclesial con las correcciones propuestas; y, d) el análisis y valoración sonora global de la muestra de iglesias.

Finalmente, se aportan una serie de conclusiones acerca del comportamiento acústico de los recintos eclesiales postconciliares de Fisac, tanto en el estado actual como tras las intervenciones propuestas.

Además, más allá del propio ámbito de estudio, la investigación intenta facilitar a los arquitectos y especialistas en la materia, conocimientos y herramientas para la optimización de la calidad acústica de las iglesias, tanto en los proyectos de nueva planta como en las intervenciones de rehabilitación.

Este trabajo de investigación se enmarca dentro de la línea de investigación experimental sobre acústicas de salas, que vienen desarrollando los grupos de investigación de acústica aplicada adscritos al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla.

10

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIBROS

1. **Ackerman, J. S. (1987).** *Palladio*. Madrid: Xarait.
2. **Alberdi, R. y Sousa, A. L. (1996).** *Miguel Fisac: Obra en Madrid, exposición organizada por el Área de Cultura de la Fundación COAM, noviembre - diciembre de 1996*. Madrid: Pronaos.
3. **Alberti, L. B. (1485).** *De Re Aedificatoria*, libro VII.
4. **Angulo, I. D. (1983).** *Arquitectura mudéjar sevillana de los siglos XIII, XIV y XV*. Sevilla: Ayuntamiento de Sevilla.
5. **Arau, H. (1999).** *ABC de la acústica arquitectónica*. Barcelona: CEAC.
6. **Argan, G. C. (1973).** *La tipología arquitectónica*. Buenos Aires: Nueva Visión.
7. **Arques, F. y Fisac, M. (1996).** *Miguel Fisac*. Madrid: Pronaos.
8. **Asensio-Wandosell, C. (2004).** *Fisac: Ensamblaje con vacíos (Assembly with voids), 1959-68*. Madrid: Rueda.
9. **Barron, M. (1993).** *Auditorium acoustics and architectural design*. Londres: E. & F.N. Spon.
10. **Beranek, L. L. (1993).** *Acoustics* (2 Ed.). Nueva York: Acoustical Society of America.
11. **Beranek, L. L. (1996).** *Concert and opera halls: How they sound*. Nueva York: Acoustical Society of America.
12. **Bergamo, M. y del Prete, M. (1997).** *Espacios celebrativos: Estudio para una arquitectura de las iglesias a partir del Concilio Vaticano II*. Bilbao: Ega.
13. **Cabañas, N., y Asensio-Wandosell, C. (2006).** *Fisac*. Ciudad Real: Fundación Miguel Fisac.
14. **Carrión, A. (1998).** *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Edicions UPC.
15. **Chueca, F. (1985).** *Historia de la Arquitectura Occidental. Tomo VI: Barroco en España*. Madrid: Dossat.
16. **Chueca, F. (1986).** *Historia de la Arquitectura Occidental*. Madrid: Dossat.
17. **Chueca, F. (1989).** *Historia de la Arquitectura Occidental*. Madrid: Dossat.
18. **Chueca, F. (2005).** *Historia de la Arquitectura Occidental. Neoclasicismo*. Madrid: Dossat.
19. **Cirillo, E. y Martellotta, F. (2006).** *Worship, acoustics and architecture*. Brentwood, Essex: Multi-Science Publishing CO. LTD.

20. **Conturie, L. (1995).** *L'acoustique dans les batiments. Théorie et applications.* Paris: Éditions Eyrolles.
21. **Cortés, J. A. (2001).** *Miguel Fisac, el último pionero.* Valladolid: Colegio Oficial de Arquitectos de Castilla y León Este.
22. **Cox, T. J. y D'Antonio, P. (2004).** *Acoustic absorbers and diffusers. Theory, design and application.* London: Spon.
23. **Cremer, L., Müller, H. A. y Schultz, T. J. (1982).** *Principles and applications of room acoustics. Vol. 1.* Londres: Applied Science Publishers.
24. **Delgado, E. (2006).** *Entre el suelo y el cielo: Arte y Arquitectura sacra en España, 1939-1975* (1 Ed.). Madrid: Fundación Institución Educativa SEK.
25. **Delgado, E. (2007).** *Santa Ana de Moratalaz, 1965-1971. Miguel Fisac.* Almería: Colegio de Arquitectos.
26. **Dirección General de Arquitectura y Ministerio de la Gobernación. (1953).** *Manifiesto de la alhambra.* Madrid: Autor.
27. **Egan, M. D. (1972).** *Concepts in architectural acoustics.* Nueva York: McGraw-Hill.
28. **Egan, M. D. (1988).** *Architectural acoustics.* Nueva York: McGraw-Hill.
29. **Farnés, P. (1989).** *Construir y adaptar las iglesias: orientaciones doctrinales y sugerencias prácticas sobre el espacio celebrativo, según el espíritu del Concilio Vaticano II.* Barcelona: Regina.
30. **Fernández Arenas, A. (1963).** *Iglesias nuevas en España.* Barcelona: Polígrafa.
31. **Fernández Cobián, E. (2005).** *El espacio sagrado en la arquitectura española contemporánea.* Santiago de Compostela: Colegio Oficial de Arquitectos de Galicia.
32. **Fernández Cobián, E. (2009).** *Arquitecturas de lo sagrado: memoria y proyecto.* La Coruña: Netbiblo.
33. **Fisac, M. (1989).** *Miguel Fisac.* Almería: Colegio Oficial de Arquitectos de Andalucía Oriental.
34. **Fisac, M. (2003).** *Miguel Fisac.* Sevilla: Secretariado de Recursos Audiovisuales y Nuevas Tecnologías.
35. **Fisac, M. (2007).** *Carta a mis sobrinos: estudiantes de Arquitectura (Letter to my nephews: Architecture students).* Ciudad Real: Fundación Miguel Fisac.
36. **Fisac, M. y Cánovas, A. (1997).** *Fisac: Medalla de Oro de la Arquitectura 1994.* Madrid: Ministerio de Fomento y Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España.
37. **Fisac, M. y González Blanco, F. (2007).** *Huesos varios.* Madrid: Fundación COAM.
38. **Fisac, M. y Sánchez Lampreave, R. (2009).** *Miguel Fisac: Premio nacional de arquitectura 2002.* Bilbao: Ministerio de Vivienda, Secretaría General Técnica, Servicio de Publicaciones.

39. **Flores, P. (1990).** *Manual de acústica, ruido y vibraciones* (3 Ed.). Barcelona: Ediciones GYC.
40. **Forsyth, M. (1985).** *Buildings for music: The architect, the musician and the listener from the seventeenth century to the present day.* Cambridge: Cambridge University Press.
41. **Gade, A. C. (1989).** *Acoustical survey of eleven European concert halls: a basis for discussion of halls in Denmark.* Copenague: The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark.
42. **Galindo, M. (2011).** *La acústica de las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla. Un modelo de la energía acústica.* Berlín: Editorial Académica Española.
43. **Gil, P. (1999).** *El templo del siglo XX.* Barcelona: Ediciones del Serbal.
44. **Giménez, A. y Monzonis, C. (2007).** *Vicens Ramos: Veinte años (twenty years).* Valencia: Pencil.
45. **Jouhaneau, J. (1997).** *Acoustique des salles et sonorisation.* Paris: Technique & Documentation.
46. **Jungmann, J. A. (1951).** *El sacrificio de la Misa: Tratado histórico-litúrgico.* Madrid: Herder.
47. **Kidder, G. E. (1964).** *The new churches of Europe (Las nuevas iglesias de Europa).* London: The Architectural Press.
48. **Kleiner, M., Klepper, D. L. y Torres, R. R. (2010).** *Worship space acoustics.* Ft. Lauderdale, FL: J. Ross.
49. **Knudsen, V. O. y Harris, C. M. (1988).** *Acoustical designing in architecture.* New York: Acoustical Society of America.
50. **Krautheimer, R. (2000).** *Arquitectura paleocristiana y bizantina* (6 Ed.). Madrid: Ediciones Cátedra.
51. **Kuttruff, H. (1991).** *Room acoustics* (3 Ed.). Londres: Elsevier Science Publishers LTD.
52. **León, A. L., Sendra, J. J., Navarro, J. y Zamarreño, T. (2007).** *Acústica y rehabilitación en teatros de Andalucía.* Sevilla: Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla; Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía.
53. **Llinares, J. y Llopis, A. (1987).** *Acústica arquitectónica.* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
54. **López García, V. (1970).** *Acústica.* Madrid: Index.
55. **Meisser, M. (1973).** *Acústica de los edificios.* Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A.
56. **Mestre, V. y García Sencherms, A. (1983).** *Curso de acústica en Arquitectura.* Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
57. **Morales, F. (1960).** *Arquitectura religiosa de Miguel Fisac.* Madrid: Librería Europa.
58. **Morales, M. C. (1979).** *La arquitectura de Miguel Fisac.* Ciudad Real: Colegio de Arquitectos.

59. **Nácar E. y Colunga A. (Eds.) (1974).** *Nuevo testamento*. Madrid: La Editorial Católica, S.A.
60. **Norberg-Shulz, C. (1989).** *Arquitectura barroca*. Madrid: Aguilar.
61. **Pemjean, E. (2010).** *Miguel Fisac: La madera en la iglesia de san Pedro Mártir y en el colegio de la Asunción*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
62. **Pérez de Arce, R. (2000).** *Guillermo Jullian: Obra abierta*. Santiago de Chile: Ediciones ARQ.
63. **Pérez Miñana, J. (1969).** *Compendio práctico de acústica*. Barcelona: Labor, S.A.
64. **Ramírez, J. A. (1996).** *Cómo escribir sobre arte y arquitectura*. Barcelona: Serbal.
65. **Recuero, M. (1992).** *Acústica arquitectónica. Soluciones prácticas*. Madrid: Paraninfo, S.A.
66. **Recuero, M. y Gil, C. (1993).** *Acústica arquitectónica (2 Ed.)*. Madrid: Izquierdo, S.A.
67. **Sendra, J. J. y Navarro, J. (1997).** *La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias del paleocristiano al tardobarroco*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.
68. **Sendra, J.J. y Navarro, J. (2000).** La acústica de las iglesias medievales. En A. Graciani (Ed.), *La técnica de la arquitectura medieval* (p. 325-346). Sevilla: Secretariado de Publicaciones Universidad de Sevilla y WIT Press.
69. **Sendra, J. J., Navarro, J. y Zamarreño, T. (1999).** *La acústica de las iglesias gótico-mudéjares de Sevilla*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.
70. **Sendra, J. J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (1997).** An analytical model for evaluating the sound field in Gothic-Mudejar churches. En C.A. Brevia, J. Kenny y R. D. Ciskowski (Eds.), *Computational acoustics and its environmental applications II* (p. 139-148). Southampton: Computational Mechanics Publications.
71. **Sendra, J. J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (1999).** Acoustics in churches. En J.J. Sendra (Ed.), *Computational Acoustics in Architecture* (p. 133-177). Southampton: WIT Press.
72. **Sendra, J. J., Zamarreño, T., Navarro, J. y Algaba, J. (1997).** *El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: Principios y propuestas para la rehabilitación*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.
73. **Suárez, R., Sendra, J. J. y Navarro, J. (2003).** A proposal to improve the acoustics in Fernandina churches. The example of Magdalena church in Córdoba. En C.A. Brevia (Ed.), *Modelling experimental measurements in acoustics, vol III* (p. 85-94). Southampton: WIT Press.
74. **Urrutia, A. (2002).** *Arquitectura española contemporánea: Documentos, escritos, testimonios inéditos*. Madrid: COAM.
75. **Villalobos, D. (2008).** *La mirada de Fisac: Catálogo de la exposición*. Valladolid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid.
76. **Vorländer, M. (2008).** *Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Berlín: Springer-Verlag.

77. **Weisse, K. (1956).** *Acústica de los locales*. Barcelona: Gustavo Gili, S.A.
78. **Wittkower, R. (1968).** *La arquitectura en la edad del humanismo*. Buenos Aires: Nueva Visión.
79. **Wittkower, R. (1979).** *Sobre la arquitectura en la edad del humanismo: Ensayos y escritos*. Barcelona: Gustavo Gili.
80. **Wundram, M. y Pape, T. (1990).** *Andrea Palladio, 1508-1580: Arquitecto entre el Renacimiento y el Barroco*. Colonia: Benedikt Taschen.
81. **Zevi, B. (1979).** *Saber ver la arquitectura*. Barcelona: Poseidón.

REVISTAS Y ACTAS DE CONGRESOS

82. **Álvarez, L., Alonso, A., Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2011).** *Initial acoustic model to simulate the sound field of the cathedral of Seville*. International Seminar on Virtual Acoustics, ISVA 2011, Valencia, noviembre.
83. **Álvarez, L., Alonso, A., Zamarreño, T., Girón, S. y Galindo, M. (2011).** *Virtual acoustics of the cathedral of Málaga (Spain)*. Forum Acusticum Aalborg 2011, junio.
84. **Anderson, J. y Bratos-Anderson, J. S. (1999).** *St. Paul's Cathedral London, as a concert hall*. 6th International Congress on Sound and Vibration, Copenague, julio.
85. **Berardi, U., Cirillo, E. y Martellotta, F. (2008).** *Predicting energy-based acoustic parameters in churches: An attempt to generalize the μ -model*. Acústica 2008, Coimbra, octubre.
86. **Carvalho, A. (1994).** *Objective acoustical analysis of room acoustic measurements in Portuguese catholic churches*. Noise-Con'94, Fort Lauderdale, Florida, mayo.
87. **Carvalho, A. (1994).** *Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches*. Ph. D. Dissertation, University of Florida.
88. **Carvalho, A. (1994).** *Relationships between subjective and objective acoustical measures in churches*. Ph. D. Dissertation, University of Florida.
89. **Carvalho, A. (1994).** *BACH, a new binaural room acoustical measure*. Proceeding of the 128th Acoustical Society of America Meeting, Austin, Texas, diciembre.
90. **Carvalho, A. (1995).** *The use of the Sabine and Eyring reverberation time equations to churches*. 129th Meeting of the Acoustical Society of America, Washington DC, mayo-junio.
91. **Carvalho, A. (1995).** *BACH, a new binaural parameter*. Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics, Tondheim, Noruega. Vol. 2, p. 409-412, junio.
92. **Carvalho, A. y Cruz, M. (2011).** *Igrejas modernas com problemas acústicos o caso da igreja Nossa Senhora da Conceição (Porto)*. Tecniaústica 2011, Cáceres, octubre.
93. **Carvalho, A. y Lencastre, M. (1999).** *How does RASTI change with sound reinforcement systems in churches?* 6th International Congress on Sound and Vibration, Copenhagen, julio.

94. **Carvalho, A. y Loureiro, J. (2008).** *Metodologia multi-critério para análise da qualidade acústica em igrejas.* Acústica 2008, Coimbra, octubre.
95. **Carvalho, A. y Pino, J. (2011).** *Estudo acústico de bancos de igreja.* Tecniacústica 2011, Cáceres, octubre.
96. **Carvalho, A. y Silva, P. (2009).** *Caracterização acústica da megaigreja da Santíssima Trindade - Fátima.* Teniacústica 2009, Cádiz, septiembre.
97. **Carvalho, A. y Nascimento, B. (2011).** *Acoustical characterization of the underground chapels of the new Holy Trinity church in the Fatima shrine, Portugal.* Forum Acusticum, Aalborg, junio.
98. **Carvalho, A. y Freitas, C. (2011).** *Acoustical characterization of the central mosque of Lisbon.* Forum Acusticum, Aalborg, junio.
99. **Cervera, O., Moya, A., Querol, L. Planells, A., Pérez, C. y Montell, R. (2012).** *Técnicas de modelado tridimensional y su aplicación en la auralización de espacios.* Acústica 2012, Évora, octubre.
100. **Christoffer, A., Weitze, C., Lynge, C., Rindel, J. H. y Gade, A. C. (2001).** *Computer simulation of the acoustics of mosques and Byzantine churches.* 17th International Congress on Acoustics, ICA 2001, Roma, septiembre.
101. **Cirillo, E. y Martellotta, F. (2002).** *On the measurement of binaural acoustic parameters in some Romanesque churches.* Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.
102. **Cunico, E. O. y Soares, P. F. (2004).** *Churches acoustic investigation.* Acústica 2004, Guimarães, septiembre.
103. **Desarnaulds, V. y Carvalho, A. (2001).** *Analysis of reverberation time values in churches according to country and architectural style.* The 8th International Congress on Sound and Vibration, Hong Kong, julio.
104. **Desarnaulds, V. y Carvalho, A. (2002).** *Liturgical conditions of catholic and reformed celebrations and their relationship with architectural and acoustical characteristics of churches.* Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.
105. **Díaz del Campo, R. (2005).** *Hormigón y fe: Las iglesias de Miguel Fisac.* Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Cádiz, 27-29 de enero de 2005. Madrid: Instituto Juan de Herrera, SEdHC, Arquitectos de Cádiz, COAAT Cádiz.
106. **Díaz, C. y Pedrero, A. (2006).** *La acústica de la iglesia del monasterio de Santo Domingo de Silos y su adecuación a la práctica del canto gregoriano.* Tecniacústica Gandía 2006, octubre.
107. **Díaz, C., Pedrero, A., Navacerrada, M. A. y Carro, C. (2008).** *Las características acústicas de las iglesias prerrománicas hispanas.* Acústica 2008, Coimbra, octubre.
108. **Espinosa, D., Zamarreño, T. y Girón, S. (2009).** *Caracterización acústica de la antigua capilla de Mora de Cádiz.* Tecniacústica 2009, Cádiz, septiembre.
109. **Fernández, M., Recuero, M. y Cruz, D. (2002).** *Church acoustics.* Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

110. Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2002). *Comparative study of various techniques to measure speech intelligibility*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.
111. Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2002). *Measured acoustic parameters versus predicted ones in two Mudejar-Gothic churches*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.
112. Galindo, M., Zamarreño, T., Girón, S., Sendra, J. J. y Navarro, J. (1999). *Simulated acoustics field in Mudejar-Gothic churches*. 137th Meeting of the ASA and 2nd Convention of the EAA: Forum Acusticum, Berlín, febrero.
113. Galindo, M., Zamarreño, T., Sendra, J. J. y Navarro, J. (1998). *La acústica de espacios religiosos jesuitas y manuelinos en Lisboa*. Tecnicústica 1998, Lisboa, septiembre.
114. Galindo, M., Zamarreño, T., Sendra, J. J. y Navarro, J. (1998). *La inteligibilidad en las iglesias gótico-mudéjares*. Tecnicústica 1998, Lisboa, septiembre.
115. Giménez, A., Cibrián, R., Segura, J., Cerdá, S., Barba, A., Montell, R., Lacatis, R., Romero, J., Miralles, J.L., Fernández, M., y Navasquillo, J. (2011). *A review of room acoustics: from objective measures to virtualization and subjective evaluation*. International Seminar on Virtual Acoustics, ISVA 2011, Valencia, noviembre.
116. Karabiber, Z. A. (2000). *A new approach to an ancient subject: CAHRISMA project*. 7th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch, Julio.
117. Keet, W. d. V. (1968). *The influence of early lateral reflections on spatial impression*. 6th International Congress on Acoustics. Tokio.
118. León, A. y León, J. (2001). *Los índices de cualificación acústica en la rehabilitación de teatros: Su cálculo por programas de simulación por ordenador*. Tecnicústica 2001, La Rioja, octubre.
119. Magrini, A. y Ricciardi, P. (2001). *On the distribution of acoustical parameters: Comparison between experimental results in historical Christian churches and theoretical models*. 17th International Congress on Acoustics, ICA 2001, Roma, septiembre.
120. Magrini, A. y Ricciardi, P. (2002). *Coupling effects in Christian churches: Preliminary analysis based on a simple theoretical model and some experimental results*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.
121. Marsilio, M., Prodi, N. y Pompoli, R. (2001). *On the effect of floor inside mosques*. 17th International Congress on Acoustics, ICA 2001, Roma, septiembre.
122. Mateus, D., Santos, P., Calejo, R. y Abrantes, V. (2008). *Avaliação dos parâmetros de qualidade sonora nas capelas da Reconciliação no edifício da nova igreja do Santuário de Fátima*. Acústica 2008, Coimbra, octubre.
123. Meyer, J. (2002). *Acoustics of Gothic churches*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.
124. Mijic, M. (2001). *Serbian orthodox church – an acoustical view*. 17th International Congress on Acoustics, ICA 2001, Roma, septiembre.
125. Mijic, M. y Sumarac-Pavlovic, D. (2002). *Acoustic resonators in Serbian orthodox churches*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.

126. **Montell, R., Segura, J., Vera, L., Barba, A., Giménez, A., Fernández, M., Cibrián, R., Cerdá, S. y Romero, J. (2009).** *Sistemas de auralización y sonido 3D para su aplicación en entornos virtuales de edificios del patrimonio histórico-arquitectónico.* *Teniacústica 2009*, Cádiz, septiembre.
127. **Montell, R., Segura, J., Planells, A., Barba, A., Cerdá, S., Cibrián, R., Lacatis, R. y Giménez, A. (2011).** *Simulación acústica de auditorios y edificios patrimoniales. Integración con entornos de realidad virtual.* *International Seminar on Virtual Acoustics, ISVA 2011*, Valencia, noviembre.
128. **Montell, R., Giménez, A., Cerdá, S., Segura, J., Cibrián, R. y Barba, A. (2012).** *Influencia de la localización de la fuente sonora en los parámetros acústicos en la catedral metropolitana de Valencia.* *Acústica 2012*, Évora, octubre.
129. **Muñoz, S., Sendra, J. J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (2004).** *Resultados de la corrección acústica de un recinto eclesial tras su rehabilitación como espacio escénico.* *Acústica 2004*, Guimarães, septiembre.
130. **Navarro, J. y Sendra, J.J. (1996).** La iglesia como lugar de la música. En A. Casas, S. Huerta, E. Rabasa y R. Aroca (Eds.). *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Madrid, 19-21 de septiembre de 1996* (p. 381-387). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
131. **Pedrero, A., Pollow, M., Dietrich, P., Behler, G., Vorländer, M., Díaz, C. y Díaz, A. (2012).** *Mozarabic chant anechoic recordings for auralization purposes.* *Acústica 2012*, Évora, octubre.
132. **Planells, A., Montell, R., Segura, J., Barba, A., Cerdá, S., Cibrián, R., Lacatis, R. y Giménez, A. (2011).** *Elaboración de modelos para el estudio acústico en entornos virtuales.* *International Seminar on Virtual Acoustics, ISVA 2011*, Valencia, noviembre.
133. **Prodi, N., Marsilio, M. y Pompoli, R. (2001).** *On the prediction of reverberation time and strength in mosques.* 17th *International Congress on Acoustics, ICA 2001*, Roma, septiembre.
134. **Rico, B., León, Á. L., Sendra, J. J., Navarro, J. y Zamarreño, T. (2010).** *The acoustic rehabilitation of the renaissance church of La Anunciación in Seville.* *Internoise 2010 Noise and Sustainability*, Lisboa, junio.
135. **Romero, A., Segura, J. y Navarro, E. (2011).** *Análisis de la policoralidad en espacios sacros.* *International Seminar on Virtual Acoustics, ISVA 2011*, Valencia, noviembre.
136. **Ruiz, R., Díaz, A., Pedrero, A. y Díaz, C. (2012).** *Revestimientos fijos y configurables en la acústica de las catedrales.* *Acústica 2012*, Évora, octubre.
137. **Sendra, J. J. y Navarro, J. (1996).** El Concilio de Trento y las condiciones acústicas en las iglesias. En A. Casas, S. Huerta, E. Rabasa y R. Aroca (Eds.). *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Madrid, 19-21 de septiembre de 1996* (p. 485-490). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
138. **Sendra, J. J. y Navarro, J. (1998).** *Análisis acústico de los tipos eclesiales.* *Teniacústica 1998*. Lisboa, septiembre.
139. **Sendra, J. J., Navarro, J., Zamarreño, T. y León, A. L. (1998).** *Propuestas para la rehabilitación acústica de iglesias: El ejemplo de la iglesia de S. Francisco de Baeza.* *IV*

- Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación, La Habana, julio.
140. **Sendra, J. J. y Zamarreño, T. (1995).** *El campo sonoro en las iglesias gótico-mudéjares con cubierta de madera: Aplicación del modelo de Barron*. Tecniacústica 1995, La Coruña, octubre.
141. **Sendra, J. J., Zamarreño, T., Galindo, M., León, A., Ramírez, C. y Alonso, A. (2011).** *Acoustic rehabilitation of the former royal tobacco factory, headquarters of the University of Seville: A global assessment*. Forum Acusticum Aalborg, Dinamarca, junio.
142. **Sendra, J. J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (2000).** *The acoustic correction in churches in the rehabilitation projects with a new use*. 7th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch, julio.
143. **Sendra, J. J., Zamarreño, T., Navarro, J. y Algaba J. (1998).** *Metodología de análisis acústico en iglesias: Casos prácticos*. Tecniacústica 1998, Lisboa, septiembre.
144. **Sendra, J.J., Zamarreño, T., Navarro, J., Girón, S. y Galindo, M. (2001).** *Acoustical behaviour in Mudejar-Gothic churches*. 17th International Congress on Acoustics, ICA 2001, Roma, septiembre.
145. **Suárez, R., Sendra, J. J. y Navarro, J. (2002).** *Acoustical rehabilitation project of the Santa María de la Mota church, in Montoro (Córdoba)*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.
146. **Suárez, R., Sendra, J. J., Navarro, J. y León, A. L. (2004).** *La acústica en iglesias medievales de la mesta: Propuestas de corrección acústica de la iglesia de Santiago en Dos Torres (Córdoba)*. Acústica 2004, Guimarães, Septiembre.
147. **Sumarac-Pavlovic, D. y Mijic, M. (2002).** *Relation between sound field properties and architectural design in Serbian churches*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.
148. **Weitze, C. A., Rindel, J. H., Christensen, C. L. y Gade, A. C. (2002).** *The acoustical history of Hagia Sophia revived through computer simulation*. Forum Acusticum Sevilla 2002, septiembre.
149. **Zamarreño, T. (2011).** *Acústica y patrimonio*. Tecniacústica 2011, Cáceres, octubre.
150. **Zamarreño, T., Algaba, J., Nieves, F. J. y Galindo, M. (1995).** *Aspectos acústicos en la rehabilitación del salón de plenos del parlamento andaluz. Viabilidad de una simulación por ordenador*. Tecniacústica 1995, La Coruña, octubre.
151. **Zamarreño, T., Galindo, M., Sendra, J. J. y Girón, S. (1998).** *La inteligibilidad en las iglesias gótico-mudéjares*. Tecniacústica 1998, Lisboa, septiembre.
152. **Zamarreño, T., Sendra, J. J., Nieves, F., Navarro, J., Algaba, J. y León, Á. L. (1996).** *Rehabilitación acústica de la iglesia del Carmen de Vélez-Málaga*. Tecniacústica 1996, Barcelona, octubre.

ARTÍCULOS DE REVISTAS Y COMUNICACIONES

153. **Abdelazeed, M. K., Hammad, R. N. y Mustafa, A. A. (1991).** Acoustics of King Abdullah mosque. *Journal of Acoustical Society of America*, 90 (3), p. 1441-1445.
154. **Adel, A. A. (2003).** Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia. *Journal of Acoustical Society of America*, 113 (3), p. 1505-1517.
155. **Ara, A. (2007).** Pablo serrano: El anhelo de un unitario. *Archivo Español de Arte*, 80 (320), p. 411-422.
156. **Barron, M. y Lee, L-J. (1998).** Energy relations in concert auditoriums. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84 (2), p. 618-628.
157. **Beraneck, L. L. (1960).** Audience and seat absorption in large halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, 32, p. 661-670.
158. **Berardi, U. (2011).** Predicción de las variaciones espaciales en la acústica de diferentes tipológicas de iglesias. *Revista de Acústica*, 42 (3 y 4), p. 8-16.
159. **Berardi, U., Cirillo, E. y Martellotta, F. (2009).** A comparative analysis of acoustic energy models for churches. *Journal of Acoustical Society of America*, 126 (4), p. 1838-1849.
160. **Bibby, C. y Hodgson, M. (2011).** Characterization and improvement of absorption and scattering by profiled architectural surfaces without specialized test facilities. *Applied Acoustics*, 72, p. 889-898.
161. **Blanco Agüeira, S. (2011).** La arquitectura religiosa europea en el marco de la modernidad. *Boletín Académico. Revista de Investigación y Arquitectura Contemporánea. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidade da Coruña*, 1, p. 18-26.
162. **Bork, I. (2005).** Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation - part II: Calculations. *Acta Acustica united with Acustica*, 91 (4), p. 753-763.
163. **Bradley, J. S. (1992).** Predicting the absorption of pew cushions. *Journal of Acoustical Society of America*, 92 (4), p. 2470.
164. **Budzynski, G. (2011).** Sacral sound-engineering. *Archives of Acoustics*, 36 (2), p. 199-224.
165. **Bueno, A.M., León, A.L., y Galindo, M. (2012).** Acoustic rehabilitation of the church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid. *Archives of Acoustics*, 37 (4), p. 435-446.
166. **Búrdalo, S. (2003).** Pasión por la Arquitectura. *Revista del Ministerio de Fomento*, 523, p. 32-37.
167. **Carvalho, A. (1999).** Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches. *Applied Acoustics*, 58, p. 33-49.
168. **Carvalho, A., Morgado, A. y Henrique, L. (1997).** Relationships between subjective and objective acoustical measures in churches. *Journal of the Building Acoustics*, 4 (1), p. 1-20.
169. **Carvalho, A. y Silva, P. (2010).** Sound, noise and speech at the 9000-seat Holy Trinity church in Fatima, Portugal. *Archives of Acoustics*, 35 (2), p. 145-156.

170. **Cirillo, E. y Martellotta, F. (2002)**. Acoustics of Apulian-Romanesque churches: an experimental survey. *Building Acoustics*, 9 (4), p. 271-288.
171. **Cirillo, E. y Martellotta, F. (2002)**. An improved model to predict energy-based acoustic parameters in Apulian-Romanesque churches. *Applied Acoustics*, 64, p. 1-23.
172. **Cirillo, E. y Martellotta, F. (2003)**. Acoustics of Apulian-Romanesque churches: correlations between architectural and acoustical parameters. *Building Acoustics*, 10 (1), p. 55-76.
173. **Cirillo, E. y Martellotta, F. (2005)**. Sound propagation and energy relations in churches. *Journal of Acoustical Society of America*, 118, p. 232-248.
174. **Delgado Orusco, E. (1997)**. Arquitectura sacra en España, 1939-1975: Una modernidad inédita. *Arquitectura: Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM)*, 311, p. 11-16.
175. **Delgado Orusco, E. (1997)**. Arquitectura sacra española, 1939-1970: Quién es quién. *Arquitectura: Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM)*, 311, p. 22-31.
176. **Delgado Orusco, E. (1997)**. La orden dominicana y las artes: conversaciones con el padre Coello de Portugal, O.P. *Arquitectura: Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM)*, 311, p. 32-34.
177. **Delgado Orusco, E. (1997)**. Selección de espacios sacros españoles, 1939-1975. *Arquitectura: Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM)*, 311, p. 35-46.
178. **Delgado Orusco, E. (1998)**. La arquitectura y obra religiosa de Javier Carvajal. *Ars Sacra: Revista de Patrimonio Cultural, Archivos, Artes Plásticas, Arquitectura, Museos y Música*, 8, p. 9-19.
179. **Delgado Orusco, E. (1998)**. Nueva escultura religiosa en España: conversaciones con Javier Viver. *Ars Sacra: Revista de Patrimonio Cultural, Archivos, Artes Plásticas, Arquitectura, Museos y Música*, 7, p. 105-109.
180. **Delgado Orusco, E. (2006)**. Entre el suelo y el cielo. Notas para una cartografía de la Arquitectura y el arte sacro contemporáneo. *Aisthesis: Revista Chilena de Investigaciones Estéticas*, 39, p. 26-48.
181. **Desarnaulds, V., Bossoney, S. y Eggenschwiler, K. (1998)**. Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen. *Fortschritte Der Akustik DAGA*, 98, p. 710-711.
182. **Desarnaulds, V., Carvalho, A. y Monay, G. (2002)**. Church acoustics and the influence of occupancy. *Building Acoustics*, 9 (1), p. 29-47.
183. **Dols, H. (1998)**. Dos iglesias antes y después de un concilio. *Ars Sacra: Revista de Patrimonio Cultural, Archivos, Artes Plásticas, Arquitectura, Museos y Música*, 7, p. 41-46.
184. **Fearn, R. W. (1975)**. Reverberation in Spanish, English and French churches. *Journal of Sound and Vibration*, 43 (3), p. 562-567.
185. **Fernández Galiano, L. (1998)**. Sagrada forma. *Arquitectura Viva*, 58, p. 3.
186. **Fernández Galiano, L., Frampton, K. y Mostafavi, M. (2003)**. Miguel Fisac. *Arquitectura Viva*, 101, p. 1-115.

187. **Fisac, M. (1954).** Iglesia en Valladolid. *Informes de la Construcción*, 66, p. 148-149.
188. **Fisac, M., Labrada, A., Laorga, L., Rojo, R., Herrero, M. y Fernández, C. (1955).** Sesión crítica de Arquitectura dedicada la iglesia de los PP dominicos de Valladolid. *Revista Nacional de Arquitectura*, 157, p. 10-19.
189. **Fisac, M. (1957).** Buscando un nuevo arte sacro. *Trahe Nos*, 12.
190. **Fisac, M. (1958).** Las nuevas parroquias de Vitoria. *Revista Nacional de Arquitectura*, 196, p. 1-15.
191. **Fisac, M. (1960).** Teologado de san Pedro mártir de los PP dominicos en Madrid. *Arquitectura*, 17, p. 10.
192. **Fisac, M. (1965).** Notas sobre mi arquitectura religiosa. *Hogar y Arquitectura: Revista Bimestral de la Obra Sindical del Hogar*, 57, p. 46-48.
193. **Fisac, M. (1967).** Algunas consideraciones sobre el espacio arquitectónico sagrado. *Atlántida: Revista del Pensamiento Actual*, 29-30, p. 528-530.
194. **Fisac, M. (1972).** Dos iglesias-España. *Informes de la Construcción*, 25 (241), p. 35-44.
195. **Fisac, M. (1981).** Asplund en el recuerdo. *Quaderns d' Arquitectura i Urbanisme*, 147, p. 33.
196. **Fisac, M. (1988).** Una ojeada al panorama arquitectónico actual. *Informes de la Construcción*, 40 (398), p. 69-72.
197. **Fisac, M. (2006).** Iglesia de Santa Cruz. *Formas de Arquitectura y Arte*, 13, p. 40-43.
198. **Fullaondo, J. D. (1969).** Miguel Fisac 1: Años experimentales. *Nueva Forma*, 39, p. 3-64.
199. **Galiana, M., Llinares, C. y Page, A. (2012).** Subjective evaluation of music hall acoustics: Response of expert and non-expert users. *Building and Environment*, 58, p. 1-13.
200. **Galindo, M., Girón, S. y Zamarreño, T. (2008).** Correlations of the acoustic field of Mudéjar-Gothic churches. *Building Acoustics*, 15 (3), p. 175-196.
201. **Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (1999).** Clarity and definition in Mudéjar-Gothic churches. *Building Acoustics*, 6 (1), p. 1-16.
202. **Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2000).** Speech intelligibility in Mudéjar-Gothic churches. *Acta Acustica united with Acustica*, 86, p. 381-384.
203. **Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2005).** Acoustic analysis in Mudéjar-Gothic churches: experimental results. *Journal of Acoustical Society of America*, 117 (5), p. 2873-2888.
204. **Galindo, M., Zamarreño, T. y Girón, S. (2009).** Acoustic simulations of Mudéjar-Gothic churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126 (3), p. 1207-1218.
205. **García, F. (2006).** El simbolismo en las iglesias de Miguel Fisac. *Informes de la Construcción*, 58 (503), p. 19-32.

206. **Garrido, J.A., Zamarreño, T. y Girón, S. (2012).** Virtual models for the prediction of acoustic fields of Manuel de Falla Auditorium in Granada, Spain. *Applied Acoustics*, 73(9), p. 921-935.
207. **Gil, P. (1998).** El culto a la modernidad. Templos del siglo XX. *Arquitectura Viva*, 58, p. 17-22.
208. **Giménez, A., Cibrián, R., Girón, S., Zamarreño, T., Sendra, J.J., Vela, A y Daumal, F. (2011).** Questionnaire Survey to Qualify the Acoustics of Spanish Concert Halls. *Acta Acustica united with Acustica*, 97(6), p. 949-967.
209. **Girón, S., Galindo, M. y Zamarreño, T. (2008).** Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches. *Journal of Sound and Vibration*, 315, p. 1125-1142.
210. **Girón, S., Zamarreño, T. y Bustamante, P. (2012).** Objective measures of spatial effects in Spanish concert hall. *Archives of Acoustics*, 37 (4), p. 529-547.
211. **González Amezqueta, A. (1965).** Las iglesias de Fisac. *Hogar y Arquitectura: Revista Bimestral de la Obra Sindical del Hogar*, 57, p. 49.
212. **Haan, C. H. y Fricke, F. R. (1992).** Statistical investigations of geometrical parameters for the acoustic design of auditoria. *Applied Acoustics*, 35, p. 105-127.
213. **Hammad, R. N. (1990).** RASTI measurements of mosques in Amman, Jordan. *Applied Acoustics*, 30, p. 335-345.
214. **Hee Kim, Y., Suk Jang, H. y Yong Jeon, J. (2011).** Characterizing diffusive surfaces using scattering and diffusion coefficients. *Applied Acoustics*, 72, p. 899-905.
215. **Hogar y Arquitectura (1965).** Tres nuevas iglesias de Fisac: Iglesia parroquial en Canfrac (Huesca), complejo parroquial de Santa Ana en Moratalaz, Madrid, iglesia parroquial en Punta Umbría (Huelva). *Hogar y Arquitectura: Revista Bimestral de la Obra Sindical del Hogar*, 57, p. 54-59.
216. **Houtgast, T. y Steeneken, H. J. M. (1971).** Evaluation of speech transmission channels by using artificial signals. *Acustica*, 25, p. 355-367.
217. **Hougast, T. y Steeneken, H. J. M. (1973).** The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility. *Acustica*, 28, p. 66-73.
218. **Hougast, T. y Steeneken, H. J. M. (1985).** A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *Journal of the Acoustical Society of America*, 77 (3), p. 1069-1077.
219. **Illán, M. (2001).** La poética del espacio: El último proyecto de Miguel Fisac. *Laboratorio de Arte*, 14, p. 405-412.
220. **Isasi, J. (1998).** Experiencias religiosas. Iglesia y vanguardia en la España de posguerra. *Arquitectura Viva*, 58, p. 23-32.
221. **Keibs, L. y Kuhl, W. (1959).** Akustics der Thomaskirche in Leipzig. *Acustica*, 9, p. 365-370.
222. **Kleiner, M. A. (1989).** New way of measuring lateral energy fractions. *Applied Acoustics*, 27, p. 321.

223. **Kosala, K. (2011).** A single number index to assess selected acoustic parameters in churches with redundant information. *Archives of Acoustics*, 36 (3), p. 545-560.
224. **Kürer, K. (1969).** Zur gewinnung von eizahlkriterien bei impulsmessungen in der raumakustik. *Acustica*, 21, p. 370.
225. **Lacatis, R., Cerdá, S., Giménez, A. y Romero, J. (2011).** Comparación de los parámetros acústicos obtenidos mediante dos programas de simulación con modelos geométricos de diferente complejidad de una sala. *Revista de Acústica*, 42, (1 y 2), p. 33-42.
226. **Lewers, T.H. y Anderson, J. (1984).** Some acoustical properties of St. Paul's cathedral, London. *Journal of Sound and Vibration*, 92 (2), p. 285-297.
227. **López Menchero, A. V. y Fisac, M. (2003).** Entrevista a Miguel Fisac, arquitecto. *Formas de Arquitectura y Arte*, 5, p. 16-20.
228. **Lottermoser, W. (1952).** Nachhallzeiten in Barckkirchen. *Acustica*, 2, p. 109-111.
229. **Magrini, A. y Magnani, L. (2005).** Models of the influence of coupled spaces in Christian churches. *Journal of Building Acoustics*, 12 (2), p. 115-142.
230. **Magrini, A. y Ricciardi, P. (2002).** An experimental study of acoustical parameters in churches. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 7 (3), p. 177-183.
231. **Magrini, A. y Ricciardi, P. (2003).** Churches as auditoria: Analysis of acoustical parameters for a better understanding of sound quality. *Journal of Building Acoustics*, 10 (2), p. 135-157.
232. **Marshall, L. G. (1994).** An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. *Journal of the Acoustical Society of America*, 96 (4), p. 2251-2261.
233. **Martellotta, F. (2008).** Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches. *Journal of Sound and Vibration*, 317 (1-2), p. 378-399.
234. **Martellotta, F. (2009).** A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches (L). *Journal of Acoustical Society of America*, 125 (3), p. 1281-1284.
235. **Martellotta, F. (2009).** Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's basilica in Rome. *Journal of Acoustical Society of America*, 126 (3), p. 1175-1186.
236. **Martellotta, F. (2010).** The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *Journal of Acoustical Society of America*, 128, p. 654-663.
237. **Martellotta, F. y Cirillo, E. (2009).** Experimental studies of sound absorption by church pews. *Applied Acoustics*, 70, p. 441-449.
238. **Martellotta, F., D'Alba, M. y Della Crociata, S. (2011).** Laboratory measurement of sound absorption of occupied pews and standing audiences. *Applied Acoustics*, 72, p. 341-349.
239. **Mei, H. y Kang, J. (2012).** An experimental study of the sound field in a large atrium. *Building and Environment*, 58, p. 91-102.

240. **Morales, J. (1996).** A propósito de Miguel Fisac. *Boletín de Arte*, 17, p. 75-92.
241. **Müller, S. y Massarani, P. (2001).** Transfer-function measurement with sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49, p. 443-471.
242. **Navarro, J., Sendra, J. J. y Muñoz, S. (2009).** The Western Latin church as a place for music and preaching: an acoustic assessment. *Applied Acoustics*, 70 (6), p. 781-789.
243. **Parkin, P.H. y Taylor, J.H. (1952).** Speech reinforcement in St. Paul's Cathedral-experimental system using line-source loudspeakers and time delays. *Wireless World*, 58, p. 54-57.
244. **Parkin, P.H. y Taylor, J.H. (1952).** Speech reinforcement in St. Paul's cathedral-details of the equipment and results of tests. *Wireless World*, 58, p. 109-111.
245. **Prodi, N. y Marsilio, M. (2005).** On the effect of domed ceiling in worship spaces: A scale model study of a mosque. *Journal of Building Acoustics*, 12 (2), p. 117-133.
246. **Queiroz de Sant'Ana, D. y Trombetta, P. H. (2011).** Acoustic evaluation of a contemporary church based on in situ measurements of reverberation time, definition, and computer-predicted speech transmission index. *Building and Environment*, 46, p. 511-517.
247. **Raes, A. C. y Sacerdote, G. (1953).** Measurement of the acoustical properties of two Roman basilicas. *Journal of the Acoustical Society of America*, 25 (5), p. 935-961.
248. **Recuero, M. y Gil, C. (1987).** Experimental study of the acoustics in the church of the monastery of Santo Domingo de Silos. *Acústica*, 62, p. 241-248.
249. **Romero, Á., Navarro, E. A. y Segura, J. (2010).** Estudio y rehabilitación acústica de la iglesia Sant Agustí de Vinaròs (Castelló). *Revista de Acústica*, 41 (1 y 2), p. 28-43.
250. **Romero-Faus, J., Giménez-Pérez, A., Marín-Sanchís, A. y Sanchís-Sabater, A. (1999).** Restoration by means of sound reinforcement of a church of the Renaissance. *Journal of Acoustical Society of America*, 105(2), p. 1044-1044.
251. **Sánchez Alvarez-Insúa, A. (2006).** Miguel Fisac Serna (1913-2006) o la modernización de la arquitectura española. *Anales del Instituto de Estudios Madrileños*, 46, p. 1051-1054.
252. **Schader, S., Schubert, G. y Lüscher, E. (1981).** Akustische Gesichtspunkte bei der Gestaltung von Sakralräumen. *Detail*, 4/81, p. 478-482.
253. **Schmidt, A. M. y Kirkegaard, P. H. (2005).** From architectural acoustics to acoustical architecture using computer simulation. *Journal of Building Acoustics*, 12 (2), p. 85-98.
254. **Schroeder, M. R. (1965).** New method of measuring reverberation time. *Journal of the Acoustical Society of America*, 37 (6), p. 1187-1188.
255. **Segura, J., Giménez, A., Romero, J. y Cerdá, S. (2011).** A comparison of different techniques for simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume basilica in Valencia, Spain. *Acta Acustica united with Acustica*, 97 (1), p. 155-170.
256. **Sendra, J. J. y Navarro, J. (2001).** Acoustical behaviour in Mudejar-Gothic churches. *Rivista Italiana di Acustica*, 25 (1-3), p. 322.

257. **Sendra, J. J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (1998).** Acoustical behaviour of churches: Mudejar-Gothic churches. *Journal of Acoustical Society of America*, 103 (5), p. 2996.
258. **Shankland, R.S. y Shankland, H.K. (1971).** Acoustic of St. Peter's and Patriarchal Basilicas in Rome. *Journal of the Acoustical Society of America*, 50, p. 389-396.
259. **Sü, Z. y Yilmazer, S. (2008).** The acoustical characteristics of the Kocatepe mosque in Ankara, Turkey. *Architectural Science Review*, 51 (1), p. 21-30.
260. **Suárez, R., Sendra, J.J. y Alonso, A. (2013).** Acoustics, Liturgy and Architecture in the Early Christian Church. From the *domus ecclesiae* to the basilica. *Acta Acustica*, 2(99), p. 292-301.
261. **Suárez, R., Sendra, J. J., Navarro, J. y León, A.L. (2004).** The acoustics of the Cathedral-Mosque of Córdoba. Proposals for architectural intervention. *Acta Acustica united with Acustica*, 90 (2), p. 362-375.
262. **Suárez, R., Sendra, J. J., Navarro, J. y León, A.L. (2005).** The sound of the Cathedral-Mosque of Córdoba. *Journal of Cultural Heritage*, 6 (4), p. 307-312.
263. **Suárez, R., Sendra, J. J., Navarro, J. y León, A.L. (2006).** Espacios acoplados en la Mezquita-Catedral de Córdoba: El sonido de los límites. *Informes de la Construcción*, 58 (501), p. 23-31.
264. **Tzekakis, E. (1971).** Reverberation time of the rotunda of Thessaloniki. *Journal of the Acoustical Society of America*, 57, p. 107-109.
265. **Tzekakis, E. (1979).** Data on the acoustics of the byzantine churches of Thessaloniki. *Acustica*, 43, p. 275-279.
266. **Vicens, I. (1998).** El espíritu de las formas. Arquitectura religiosa y programa litúrgico. *Arquitectura Viva*, 58, p. 30-33.
267. **Vorländer, M. (2013).** Computer simulations in room acoustics: concepts and uncertainties. *Journal of the Acoustical Society of America*, 133(3), p. 1203-1213.
268. **Xiang, M. y Goggans, P. M. (2001).** Evaluation of decay times in coupled spaces: Bayesian parameter estimation. *Journal of Acoustical Society of America*, 110, p. 1415-1424.
269. **Zamarreño, T., Girón, S. y Galindo, M. (2007).** Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches. *Journal of Acoustical Society of America*, 121 (1), p. 234-250.
270. **Zamarreño, T., Girón, S. y Galindo, M. (2008).** Assessing the intelligibility of speech and singing in Mudejar-Gothic churches. *Applied Acoustics*, 69, p. 242-254.

NORMAS

271. **CEI 60268-16:2003.** *Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 16: Evaluación objetiva de la inteligibilidad del habla mediante el índice de transmisión del habla.*
272. **IEC 60268-16:2003.** *Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.*
273. **ISO 3382-1:2009.** *Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces.*
274. **ISO 9613-1:1993.** *Acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.*
275. **UNE-EN 12354-6:2004.** *Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 6: Absorción sonora en espacios cerrados.*
276. **UNE-EN ISO 3382-1:2010.** *Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.*

RECURSOS ELECTRÓNICOS Y DOCUMENTOS EN INTERNET

277. **BASWaphon.**
URL: <http://es.stier-acustica.com/BASWaphon> [Última consulta: 15 abril 2012].
URL: <http://www.baswa.com/> [Última consulta: 15 abril 2012].
278. **CATT-Acoustic.**
URL: <http://www.catt.se> [Última consulta: 18 mayo 2012].
279. **Constitucion Sacrosanctum Concilium sobre la Sagrada Liturgia. (1963).**
URL: http://www.vatican.va/archive/hist_councils/ii_vatican_council/documents/vatii_cons_t_19631204_sacrosanctum-concilium_sp.html [Última consulta: 09 mayo 2011].
280. **Decustik.**
URL: <http://decustik.com/es/productos/paneles-acusticos> [Última consulta: 18 octubre 2012].
281. **Duran audio.**
URL: <http://www.duran-audio.com/index.php?page=intellivox> [Última consulta: 15 octubre 2012].
282. **Fundación Miguel Fisac.**
URL: <http://www.fundacionfisac.org> [Última consulta: 15 enero 2012].
283. **Gustafs.**
URL: http://www.gustafs.com/es/gustafs-panel-system/acstica_439
[Última consulta: 18 septiembre 2012].
284. **Iglesias románicas: La escultura románica.**
URL: <http://www.circuloromanico.com/iglesiasromanicas.php> [Última consulta: 16 mayo 2011].

285. **Instrucción general del Misal Romano.**
URL: http://www.vatican.va/roman_curia/congregations/ccdds/documents/rc_con_ccdds_doc_20030317_ordinamentomessale_sp.html#top [Última consulta: 9 mayo 2011]
286. **Knauf.**
URL: http://www.knaufinsulation.es/files/ki_es/upload/documents/HERAKLITH_FINO.pdf
[Última consulta 30 noviembre 2011]
287. **La acústica de las catedrales: una aportación científica para la recuperación del patrimonio cultural (ACUSCATEMONIO).**
URL: <http://institucional.us.es/acuscate/> [Última consulta: 18 agosto 2012].
288. **Miguels. (2011).** *La iglesia de Santa Ana en Moratalaz de Miguel Fisac, construida en 1966.*
URL: <http://www.espormadrid.es/2009/10/la-iglesia-de-santa-ana-en-moratalaz-de.html>
[Última consulta: 23 enero 2011].
289. **Morset Sound Development.**
URL: <http://www.winmls.com/> [Última consulta: 7 julio 2010].
290. **Patón-Alberto, V. (2011).**
URL: <http://fundacionfisac.org/miguel/biografia> [Última consulta: 28 julio 2011].
291. **Pascual Díez, A. (1991).** *Litúrgico, movimiento.*
URL: <http://www.canalsocial.net/ger/ficha GER.asp?id=11005&cat=religioncristiana>
[Última consulta: 31 mayo 2011].
292. **Programa de investigação. Acústica de igrejas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.**
URL: <http://www.fe.up.pt/~carvalho/igrejas.htm> [Última consulta: 15 agosto 2012].
293. **Riguetti, M. (1956).** *Historia de la liturgia.* Madrid: Editorial Católica (Corrección y adaptación por Carlos Etchevarne, 2002).
URL: http://www.holytrinitymission.org/books/spanish/historia_liturgia_m_righetti_2.htm
[Última consulta: 15 mayo 2013].
294. **Rivero, A. (2011).** *La reforma litúrgica.*
URL: <http://es.catholic.net/conocetufe/423/2214/articulo.php?id=21196>
[Última consulta: 2 junio 2011].
295. **Rockfon.**
URL: <http://productos.rockfon.es/> [Última consulta: 15 octubre 2012].
296. **Sonacoustic.**
URL: <http://www.sonacoustic.com/> [Última consulta: 7 mayo 2012].

MISCELÁNEO

297. **Anderson, J. y Jacobsen, T.** *RASTI measurements in St. Paul's Cathedral, London.* Technical note, Brüel&Kjaer, Dinamarca.
298. **Carvalho, A. (1998).** *A inteligibilidade da palavra em igrejas católicas a través de análises de carácter objetivo e subjectivo.* Tese de Maestrado, Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.

299. **CATT-Acoustic v8.0g. User's Manual. (2007).** *Room Acoustics Prediction and Walkthrough Auralization*. Gothenburg: CATT.
300. **Delgado Orusco, E. (1999).** *Arquitectura sacra española, 1939-1975: de la posguerra al posconcilio*. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid.
301. **Fisac, M. (1969).** *Arquitectura y audición musical* (conferencia impartida por M. Fisac en el Ateneo de Madrid, 4 de diciembre de 1969). Crónica recogida en el diario *ABC*, Madrid, 5 de diciembre de 1969.
302. **Fisac, M. (1969).** *Arquitectura y audición musical* (conferencia impartida por M. Fisac en el Ateneo de Madrid, 4 de diciembre de 1969). Crónica recogida en el diario *Ya*, Madrid, 5 de diciembre de 1969.
303. **Fisac, M. (1969).** *Arquitectura y audición musical* (conferencia impartida por M. Fisac en el Ateneo de Madrid, 4 de diciembre de 1969). Crónica recogida en el diario *Pueblo*, Madrid, 6 de diciembre de 1969.
304. **Fisac, M. (1996).** *El espacio religioso* (conferencia impartida por M. Fisac en E.T.S. de Arquitectura, Universidad de La Coruña, 11 de enero de 1996). [Video/DVD]. Biblioteca de Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla.
305. **Fisac, M. (2003).** *Miguel Fisac* (conferencia impartida por M. Fisac en E.T.S. de Arquitectura, Universidad de Sevilla, 14 de febrero de 2003). [Video/DVD]. Biblioteca de Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla.
306. **Galindo, M. (2003).** *La acústica en espacios religiosos católicos: Iglesias Gótico-Mudéjares*. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura y E.U. Arquitectura Técnica. Universidad de Sevilla.
307. **Garrido, J. A. (2010).** *Modelo de predicción del campo sonoro en el auditorio Manuel de Falla de Granada*. Trabajo Final del Máster en Ingeniería Acústica: Contaminación Acústica. ETS de Ingeniería de la Edificación. Universidad de Granada.
308. **Instrucción "Inter Oecumenici" (1964).** Edición latina: AAS 56 (1964), p. 988-900; EDIL, núms. 199-297. Traducción española: LC, p. 97-138, E 24 (1964), p. 1435-1444.
309. **Jover, J. L. y García Toledano, E. (1984).** *Miguel Fisac*. [DVD]. Biblioteca de Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla.
310. **Martellotta, F. (2001).** *Caratteristiche acustiche delle chiese romaniche in Puglia*. Tesis Doctoral en Física Aplicada. Università degli Studi di Ancona.
311. **Peltonen, T. (1987-2003).** *A multichannel measurement system for room acoustics analysis*. Master's Thesis. Department of Electrical and Communications Engineering. Helsinki University of Technology.
312. **Suárez, R. (2002).** *El sonido del espacio eclesial en Córdoba. El proyecto arquitectónico como procedimiento acústico*. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura. Universidad de Sevilla.

ANEXO 1

CONCEPTOS DE ACÚSTICA DE SALAS

Con carácter informativo, en este anexo se definen los parámetros acústicos utilizados para analizar el comportamiento sonoro de las iglesias estudiadas. La carencia de normativa acústica específica relativa a los recintos de culto nos lleva a tomar como referencia la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010, *Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos*. Los parámetros que define dicha norma tienen su origen en investigaciones acústicas de auditorios y salas de concierto, pero muchos de ellos se han extendido para caracterizar acústicamente otros espacios, como los de culto, pues en ellos tienen lugar, normalmente, cantos y actividades musicales. Para la evaluación de la inteligibilidad del discurso mediante el índice de transmisión de la palabra, se ha empleado las determinaciones de la norma CEI 60268-16:2003. *Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 16: Evaluación objetiva de la inteligibilidad del habla mediante el índice de transmisión del habla*.

Aunque el tiempo de reverberación de un recinto es el indicador fundamental del comportamiento acústico de una sala, otros parámetros como los relativos a los niveles de presión acústica, los cocientes energéticos previos/tardíos, las fracciones de energía lateral, las funciones de intercorrelaciones binaurales y los niveles del ruido de fondo, son necesarios para una evaluación más completa de la calidad acústica de los recintos. Las magnitudes acústicas, que se pueden obtener a partir de las medidas de las respuestas impulsivas¹, están relacionadas con los aspectos subjetivos acústicos de una sala.

Los parámetros acústicos estudiados se estructuran en cinco grupos, atendiendo a los aspectos subjetivos del oyente: reverberación, inteligibilidad de la palabra y claridad musical, nivel sonoro, impresión espacial y ruido de fondo. Asimismo, se detallan los tiempos de reverberación óptimos propuestos por diferentes autores, especialmente aquellos que realizan alguna indicación para espacios religiosos. También se describen otros parámetros de cualificación acústica, modelos analíticos de distribución sonora y relaciones geométricas de los recintos.

A1.1. REVERBERACIÓN

Tiempo de reverberación (T)

El tiempo de reverberación de un recinto, T, es la duración requerida para que la densidad de la energía acústica media en un recinto decrezca en 60 dB una vez que la emisión de la fuente ha cesado.

Se expresa en segundos y se puede evaluar basándose en un rango dinámico inferior a 60 dB y extrapolando a un tiempo de decrecimiento de 60 dB. De esta forma, si T se deriva del tiempo en el que la curva de decrecimiento alcanza primero 5 dB y 25 dB por debajo del nivel inicial, se anota como T₂₀. Si se utilizan valores de decrecimiento entre 5 dB y 35 dB por debajo del nivel inicial, se anota como T₃₀.

La expresión más utilizada para la previsión del tiempo de reverberación, y aceptada como de referencia a nivel internacional, es la denominada ecuación de Sabine, obtenida por el físico americano Wallace Clement Sabine², tras sus investigaciones a finales del siglo XIX.

¹ Respuesta impulsiva: Evolución temporal de la presión acústica observada en un punto de un recinto como resultado de la emisión de un impulso de Dirac en otro punto del recinto.

² Sabine, W. (1922). *Collected papers on acoustics*. Cambridge: Harvard University Press.

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

$$T(s) = 0,161 \frac{V}{A} \quad [A1.1]$$

donde:

V es el volumen del recinto (m^3);

A es la absorción sonora total del recinto (m^2 o sabinio métrico)³.

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

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

Tiempo de reverberación medio y bajo (T_{mid} , T_{low})

La definición del tiempo de reverberación expresa su dependencia de la frecuencia del sonido, pues la absorción sonora de los materiales es diferente para las distintas frecuencias.

Para caracterizar un local con un único valor de T se utiliza T_{mid} que se obtiene de la media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1kHz, es decir:

$$T_{mid}(s) = \frac{T(500 \text{ Hz}) + T(1 \text{ kHz})}{2} \quad [A1.2]$$

A. Carrión⁴ facilita unos márgenes recomendados de T_{mid} para diferentes tipos de salas en el supuesto de que estén ocupadas, siendo para iglesia o catedral (órgano y canto coral) entre 2 y 3 s.

También puede emplearse el T_{low} que se obtiene de la media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 125 Hz y 250 Hz, es decir:

$$T_{low}(s) = \frac{T(125 \text{ Hz}) + T(250 \text{ Hz})}{2} \quad [A1.3]$$

Tiempos de reverberación óptimos

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

La determinación de la curva tonal óptima de un local se fundamenta en apreciaciones experimentales, basadas en la opinión y el gusto de los oyentes, obtenida a partir de ensayos llevados a cabo con campos acústicos artificiales de características controladas y otros realizados en recintos reales mediante encuestas de valoración. Estos ensayos han puesto de manifiesto que el tiempo de reverberación óptimo depende, fundamentalmente, de dos aspectos: las dimensiones del recinto (volumen) y de la función a la que se destine el recinto. Dentro de la función cabe distinguir

³ El sabinio métrico se define como la absorción sonora de una superficie de un metro cuadrado y coeficiente de absorción la unidad.

⁴ Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Ediciones UPC. p.64.

entre el uso para la palabra (sala de conferencias, aula, teatro, etc.) y el uso musical, considerando que cada tipo de obra musical tiene sus propias exigencias, es decir, requieren distintos tiempos de reverberación la música de cámara, la música barroca o el canto gregoriano.

Estas observaciones han permitido elaborar una serie de ábacos y fórmulas empíricas que determinan el tiempo de reverberación óptimo, en función del volumen del local y del uso al que se destine. Suelen referirse al valor medio del tiempo de reverberación T_{mid} o al valor de T a la frecuencia de 500 Hz. Todos los casos presuponen que el tiempo de reverberación es creciente con el volumen del local.

A continuación se detallan varias propuestas correspondientes a diferentes autores y fuentes, la mayoría de las cuales contemplan sugerencias relacionadas con el uso religioso.

Óptimos propuestos por V.O. Knudsen y C.M. Harris⁵ (1950)

Knudsen proporciona los tiempos de reverberación óptimos, a la frecuencia de 500 Hz, para tres usos principales: música, palabra y cine. Dentro del uso musical se distinguen, a su vez, tres casos: música de cámara, concierto y de iglesia.

Las ecuaciones que permiten obtener el T óptimo a la frecuencia de 500 Hz, en función del volumen, son de la forma:

$$T_{opt_{500}} = a + b \cdot \log V \quad [A1.4]$$

donde:

a y b son constantes que dependen del uso;

V es el volumen de la sala (m^3).

Los valores de las citadas constantes se recogen en la tabla A1.1, mientras que los tiempos de reverberación óptimos a la frecuencia de 500 Hz para los distintos usos, se representan en la figura A1.1.

Uso	a	b
Música religiosa	0,5208	0,3345
Promedio para música	0,5336	0,2620
Auditorios	0,4612	0,2295
Música de cámara	0,4761	0,2055
Cine	0,4659	0,1860
Palabra	0,2600	0,1815

Tabla A1.1. Parámetros para tiempos de reverberación óptimos (adaptados de Knudsen y Harris).

⁵ Knudsen, V.O. y Harris, C.M. (1988). *Acoustical Designing in Architecture*. (5 Ed.). Nueva York: Acoustical Society of America. p. 171-174 y 331-341.

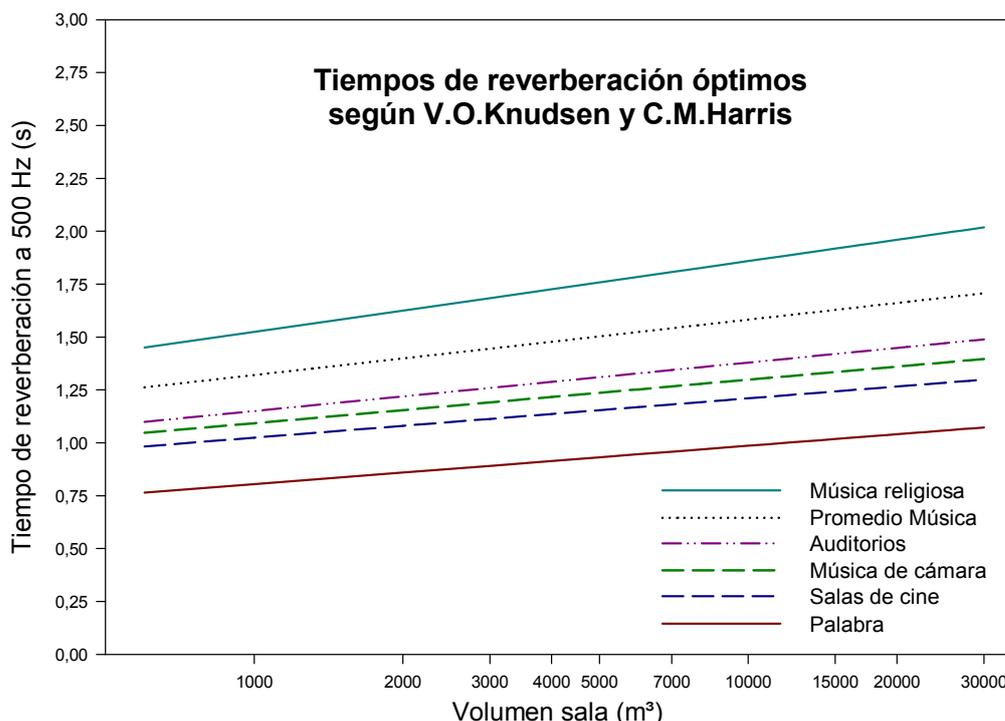


Figura A1.1. Tiempos de reverberación óptimos propuestos por V.O. Knudsen y C.M. Harris.

Para las iglesias propone una gráfica que contempla, en función del volumen, una franja de tiempos óptimos de reverberación para una ocupación de dos tercios de la audiencia. La parte más baja de la banda es apropiada para iglesias cristianas, por la importancia de la palabra hablada; la zona media para iglesias protestantes y sinagogas judías, donde el discurso y la música son igualmente importantes; y, por último, la zona alta de la franja corresponde a catedrales e iglesias católicas, donde la música alcanza gran importancia en la celebración religiosa (figura A1.2).

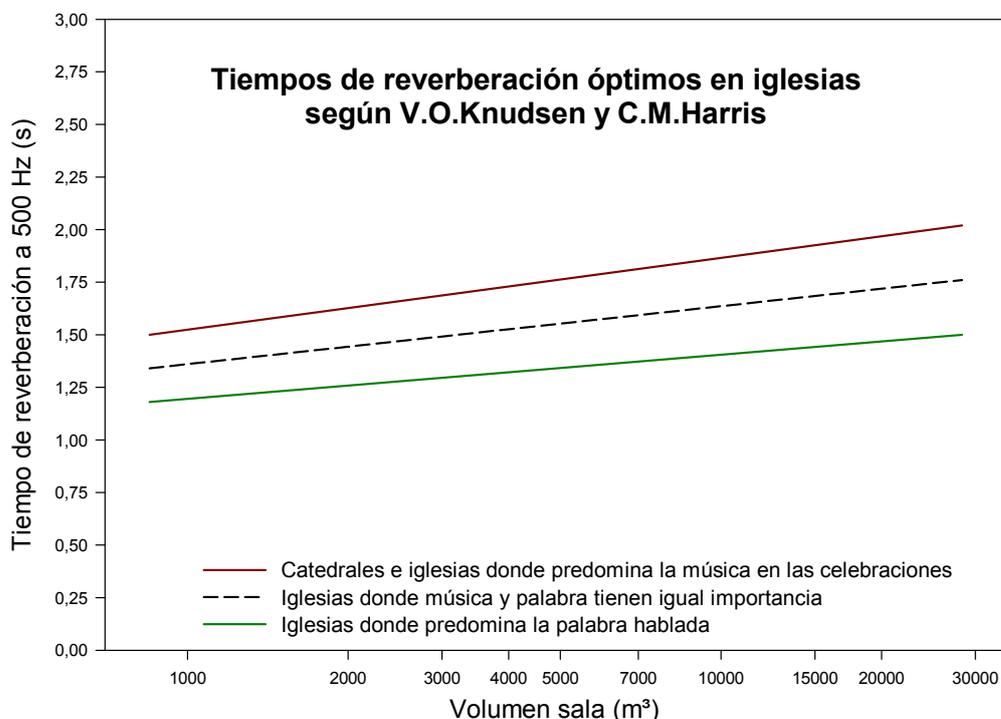


Figura A1.2. Tiempos de reverberación óptimos en iglesias propuestos por V.O. Knudsen y C.M. Harris.

A otras frecuencias, los T se obtienen multiplicando el valor del tiempo de reverberación obtenido a 500 Hz por un coeficiente R que varía con la frecuencia:

$$T_{opt_f} = T_{op_{500}} \cdot R \quad [A1.5]$$

La tabla A1.2 muestra los valores de R:

R	Frecuencia f (Hz)
R = 1	f ≥ 500 Hz
1 < R ≤ 1,52	100 < f ≤ 500

Tabla A1.2. Valores del coeficiente R.

Knudsen admite una desviación del 10% sobre los valores obtenidos.

Óptimos propuestos por Leo. L. Beranek⁶ (1954)

Beranek propone un ábaco donde se resumen los tiempos de reverberación óptimos en función del volumen, a la frecuencia de 500 Hz, para cinco usos distintos:

- iglesia católica, música de órgano;
- sala de conciertos, iglesia protestante, sinagoga;
- ópera, estudio de grabación musical;
- sala de conferencias, teatro;
- estudio de grabación para la palabra.

En la figura A1.3 se muestran los T óptimos proporcionados por este autor para los distintos usos en función del volumen (m³):

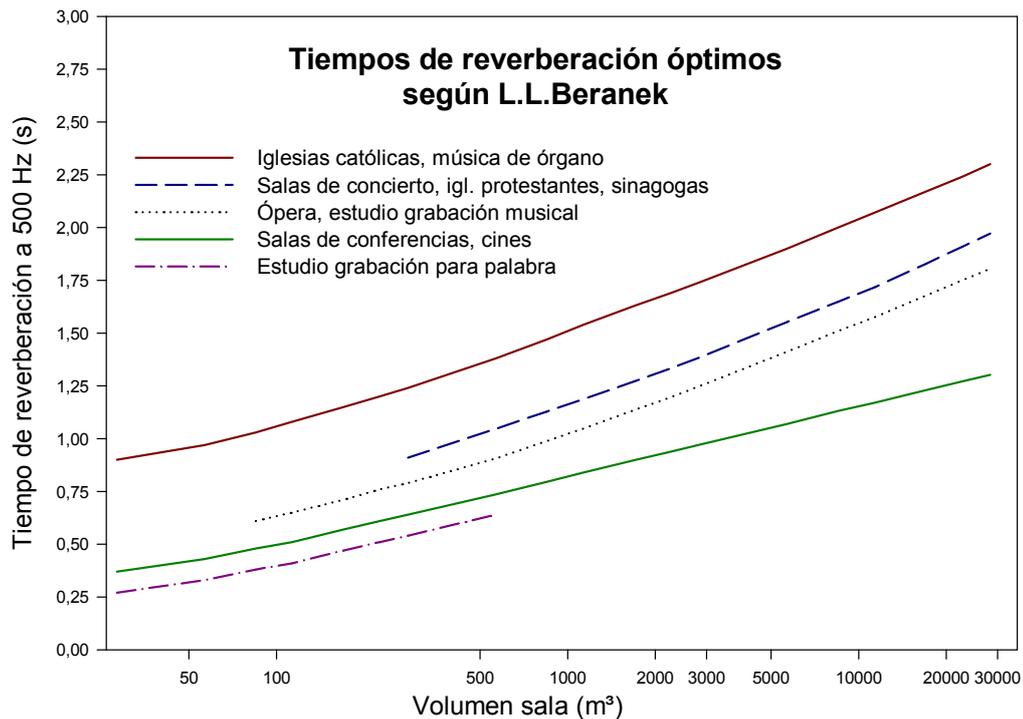


Figura A1.3. Tiempos de reverberación óptimos propuestos por L.L. Beranek.

Para el resto de frecuencias propone una gráfica que muestra los valores del T_{opt} relativos al obtenido para 500 Hz, pero lo limita a estudios y auditorios.

⁶ Beranek, L.L. (1993). *Acoustics*. Nueva York: Acoustical Society of America. p. 425-426.

Óptimos propuestos por L. Conturie⁷ (1955)

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

$$T_{opt_{500}} = K \cdot V^{1/3} \quad [A1.6]$$

donde:

V es el volumen de la sala (m^3);

K es una constante que depende del uso (Tabla A1.3).

Uso del local	K
Iglesia	0,10
Sala de concierto	0,09
Teatro y sala de conferencias	0,075

Tabla A1.3. Valores de la constante K (Conturie).

La figura A1.4 presenta los tiempos de reverberación óptimos a la frecuencia de 500 Hz, correspondientes a los usos de iglesia, sala de concierto y, por último, teatro y sala de conferencias.

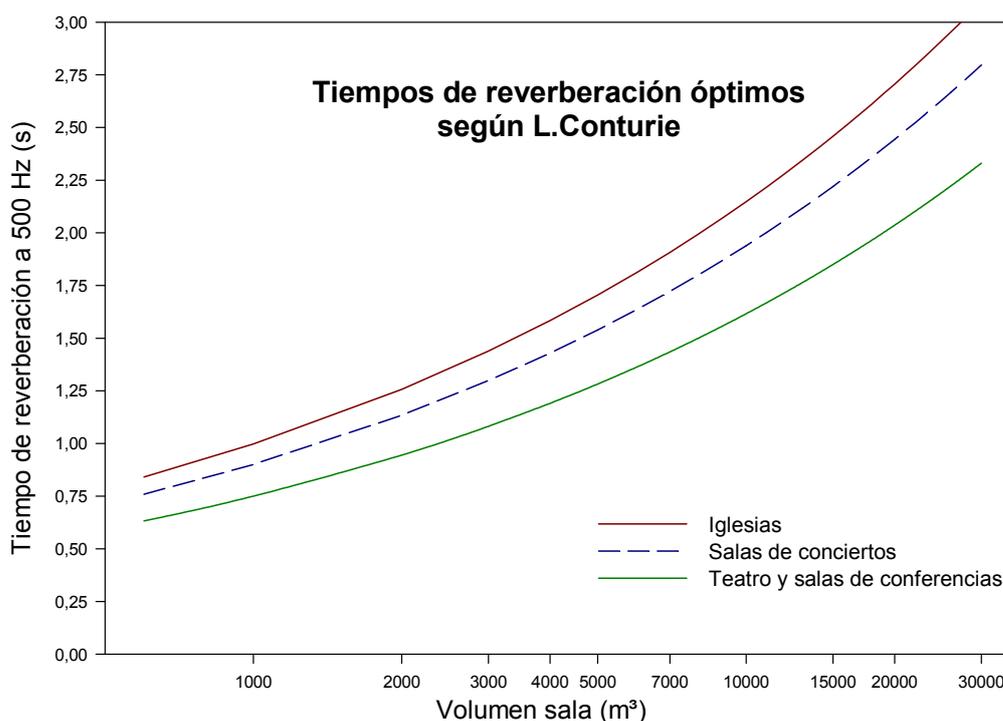


Figura A1.4. Tiempos de reverberación óptimos para 500 Hz propuestos por L. Conturie.

Para determinar el T_{opt} a otras frecuencias, el autor facilita una gráfica para tres volúmenes de salas (300, 3000 y 30000 m^3). Para frecuencias superiores a 500 Hz el tiempo de reverberación óptimo permanece invariable, ya que la corrección por frecuencia se realiza solamente con los sonidos graves.

⁷ Conturie, L. (1955). *L'acoustique dans les batiments. Théorie et applications*. Paris: Éditions Eyrolles. p. 71-74.

Óptimos propuestos por J. Pérez Miñana⁸ (1969)

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

$$T_{opt} = f \cdot u \cdot i \cdot V^{1/3} \quad [A1.7]$$

donde:

f es un coeficiente que depende de la frecuencia;

u es un coeficiente en función del uso;

i es un coeficiente que valora la existencia (o no) de apoyo electroacústico;

V es el volumen del local (m^3).

Los valores de los coeficientes anteriores se muestran en la tabla A1.4:

Coeficiente	Frecuencia en banda de octava					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
f	1,30	1,15	1,00	0,90	0,90	0,90
u	Uso del recinto					
	Palabra	Música de ópera	Música de cámara	Música sinfónica	Música wagneriana	Música religiosa
	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
i	Existencia de apoyo electroacústico					
	Con apoyo electroacústico			Sin apoyo electroacústico		
	0,85			1		

Tabla A1.4. Coeficientes para determinar el tiempo de reverberación óptimo según Pérez Miñana.

Asimismo, en la figura A1.5 se representan los valores de T_{opt} , a la frecuencia de 500 Hz, correspondientes a usos para la palabra, música de cámara y música religiosa.

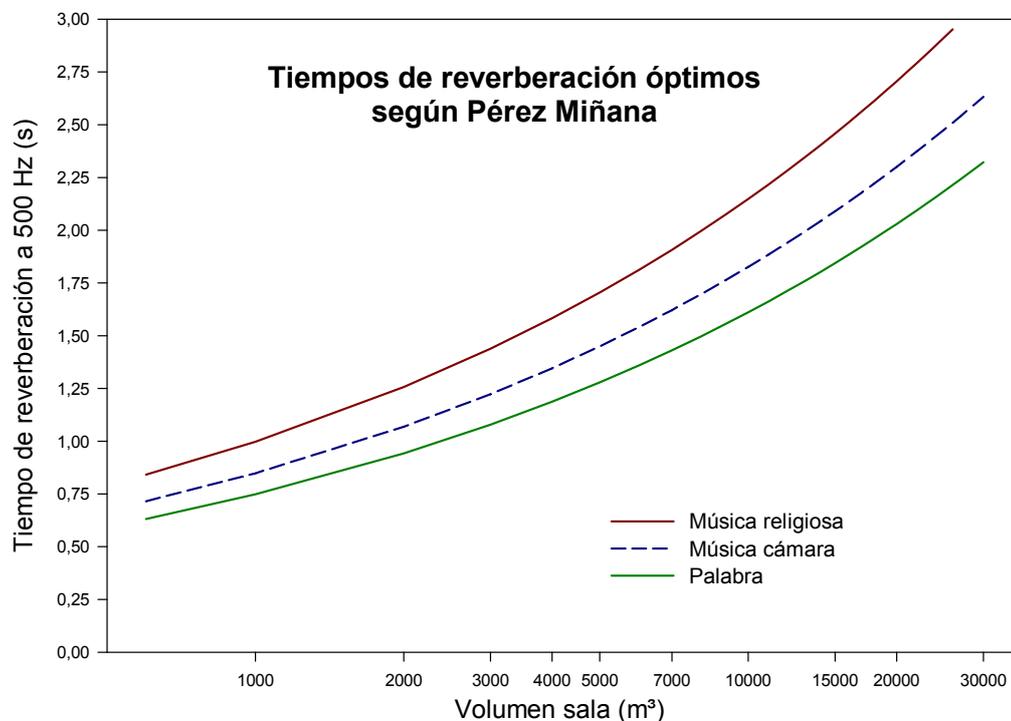


Figura A1.5. Tiempos de reverberación óptimos propuestos por J. Pérez Miñana.

⁸ Pérez Miñana, J. (1969). *Compendio práctico de acústica*. Barcelona: Labor, S.A. p. 319-428.

Óptimos propuestos por L. Cremer⁹ (1978)

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

Las gráficas muestran los tiempos de reverberación medios T_{mid} (bandas de octava de 500 y 1000 Hz). En ellas, los valores máximos se pueden asimilar a salas vacías, mientras que los mínimos corresponden a los T óptimos de los recintos ocupados. Se admite una desviación en los valores de un 10-20%.

La figura A1.6 muestra una adaptación de la propuesta de Cremer para iglesias.

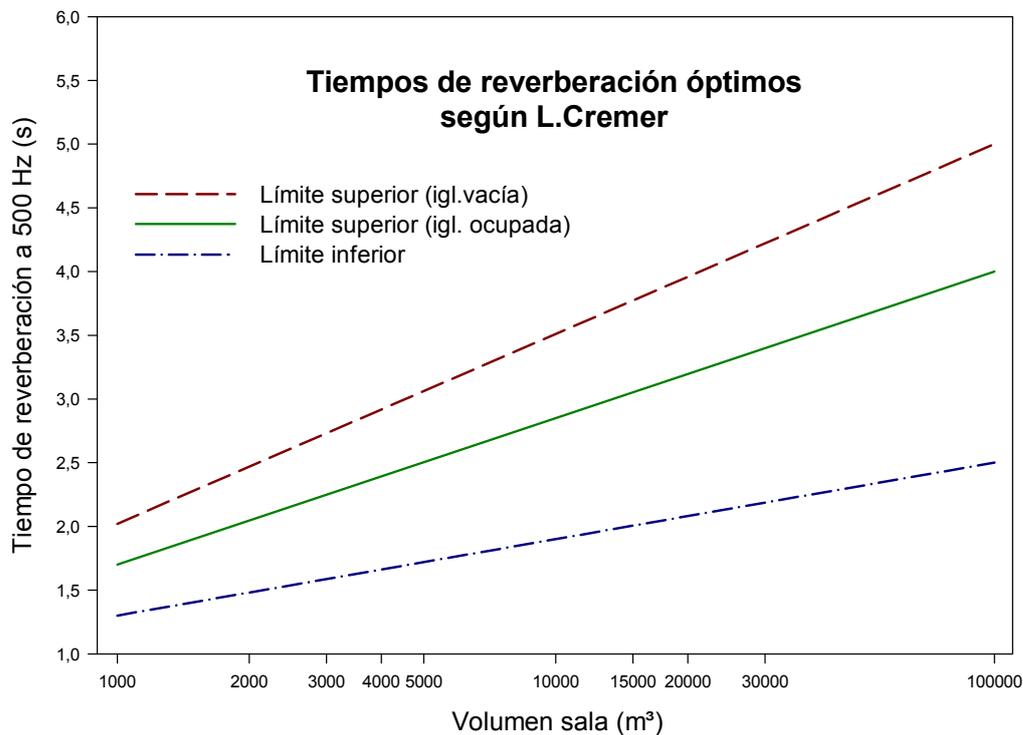


Figura A1.6. Tiempos de reverberación óptimos propuestos por L. Cremer.

Óptimos propuestos por J. Jouhaneau¹⁰ (1997)

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

$$T_{opt} = D \cdot V^{1/3} \quad [A1.8]$$

donde:

V es el volumen de la sala (m^3);

D es una constante que depende del tipo de sala (Tabla A1.5).

⁹ Cremer, L., Müller, H.A. y Schultz, T.J. (1982). *Principles and applications of room acoustics*. Volumen 1. Londres: Applied Science Publishers. p. 610-627.

¹⁰ Jouhaneau, J. (1997). *Acoustique des salles et sonorisation*. Paris: Technique & Documentation. p. 209-213.

TIPO DE SALA	VOLUMEN (m ³)	D (Constante)
Salas de concierto	10.000 a 25.000	0,07
Óperas	7.000 a 20.000	0,06
Auditorios	500 a 4.000	0,06
Cines y teatros	500 a 10.000	0,05
Salas de conferencia	500 a 5.000	0,05
Estudios de grabación	100 a 1.000	0,04

Tabla A1.5. Constante según el tipo de sala y su volumen.

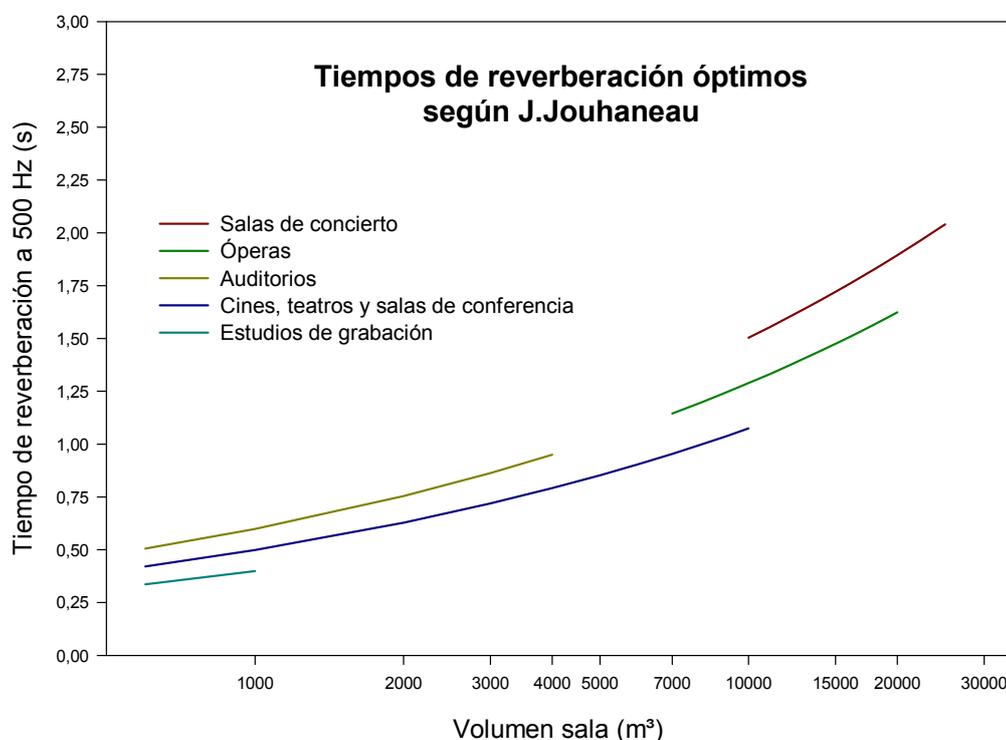


Figura A1.7. Tiempos de reverberación óptimos propuestos por J. Jouhaneau.

Tiempo de reverberación inicial (EDT)

El tiempo de reverberación inicial EDT (*Early Decay Time*) de un recinto es la duración requerida (en segundos) para que la densidad de la energía acústica media en un recinto decrezca en 60 dB una vez que la emisión de la fuente ha cesado, calculado según la pendiente correspondiente a los primeros 10 dB de caída.

El tiempo de reverberación inicial se debe evaluar a partir de la pendiente de las curvas de respuesta impulsiva integrada (con el tiempo de reverberación convencional). La pendiente de la curva de decrecimiento¹¹ se debe determinar a partir de la línea de regresión lineal *con mejor ajuste*, correspondiente a los 10 primeros decibelios del decrecimiento (entre 0 dB y -10 dB).

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

El tiempo de reverberación inicial es subjetivamente más importante y está relacionado con la reverberación percibida, mientras que T está relacionada con las propiedades físicas del auditorio.

¹¹ Curva de decrecimiento: Representación gráfica del decrecimiento del nivel de presión acústica en un recinto en función del tiempo, una vez que la fuente sonora ha cesado de emitir.

Por ello, las salas con unos EDT significativamente menores que los T, resultarán desde un punto de vista subjetivo, más apagadas para la música, pero más inteligibles para la palabra.

La definición del tiempo de reverberación expresa su dependencia de la frecuencia del sonido, pues la absorción sonora de los materiales es diferente para las distintas frecuencias.

Al igual que vimos para T, el EDT_{mid} se obtiene de la media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1kHz, es decir:

$$EDT_{mid}(s) = \frac{EDT(500 \text{ Hz}) + EDT(1 \text{ kHz})}{2} \quad [A1.9]$$

Calidez (BR)

La calidez BR (*Bass Ratio*) es un parámetro que se obtiene a través del T y que representa la riqueza de la sala a bajas frecuencias. Se obtiene como el cociente entre la suma de los T correspondientes a las bandas de frecuencias de 125 Hz y 250 Hz (T_{low}) y la suma de los T correspondientes a las bandas de frecuencias de 500 Hz y 1 kHz (T_{mid}):

$$BR(s) = \frac{T(125 \text{ Hz}) + T(250 \text{ Hz})}{T(500 \text{ Hz}) + T(1 \text{ kHz})} = \frac{T_{low}}{T_{mid}} \quad [A1.10]$$

Brillo (Br)

Al igual que la calidez BR, el brillo de una sala se obtiene a través del T e indica la respuesta de la sala a las altas frecuencias. Se obtiene como el cociente entre la suma de los T correspondientes a las bandas de frecuencias de 2 kHz y 4 kHz (T_{high}) y la suma de los T correspondientes a las bandas de frecuencias de 500 Hz y 1 kHz (T_{mid}):

$$Br(s) = \frac{T(2 \text{ kHz}) + T(4 \text{ kHz})}{T(500 \text{ Hz}) + T(1 \text{ kHz})} = \frac{T_{high}}{T_{mid}} \quad [A1.11]$$

Otros conceptos

Absorción sonora

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

$$E_i = E_r + E_t + E_d \quad [A1.12]$$

donde:

E_i es la energía sonora total incidente;

E_r es la energía sonora reflejada;

E_t es la energía sonora transmitida;

E_d es la energía sonora disipada en el interior del cerramiento (pérdidas de calor + propagación interna).

El valor de $E_t + E_d$ constituye la absorción sonora que presenta el material. Si dividimos la ecuación anterior por E_i tenemos:

$$1 = \alpha + r \quad [A1.13]$$

donde:

$$\alpha = \frac{E_t + E_d}{E_i} \quad [A1.14]$$

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad [A1.15]$$

por lo que:

α es el coeficiente de absorción;

r es el coeficiente de reflexión.

Luego el coeficiente de absorción α se define como la relación entre la energía absorbida por un material y la energía incidente sobre el mismo, mientras que el coeficiente de reflexión r se define como la relación entre la energía reflejada por un material y la energía incidente sobre el mismo. Por tanto, la reflexión y la absorción son valores complementarios y, como consecuencia, los materiales absorbentes son poco aislantes.

Los valores del coeficiente de absorción α están comprendidos entre 0 (para un material totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total). El valor de α está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia.

La unidad de absorción es el sabinio métrico y corresponde a una absorción de 1 m² de ventana abierta.

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

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 \dots \alpha_n S_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad [A1.16]$$

donde:

α_i es el coeficiente de absorción de cada material;

S_i es la superficie de cada material.

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

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{S_t} \quad [A1.17]$$

donde:

A es la absorción total del recinto;

$S_t = S_1 + S_2 + \dots + S_n$ es la superficie total del recinto.

Difusión sonora

Se dice que un elemento es difusor cuando la energía acústica que incide sobre sus superficies delimitadoras se dispersa, de forma uniforme y en múltiples direcciones.

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

En la simulación acústica se suele introducir un coeficiente (δ) definido empíricamente como:

$$\delta = \frac{\text{Energía reflejada en direcciones no especulares}}{\text{Energía total reflejada}} \quad [A1.18]$$

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

Como este coeficiente contiene información de cuánta energía se difunde, pero no de cómo se reparte en las diferentes direcciones no especulares, se suele aceptar la ley de Lambert, en la que se supone que la energía difusa se distribuye uniformemente en todas direcciones.

Absorción del aire

Además de la absorción sonora en las superficies interiores de una sala, la propagación de una onda por el aire somete a las moléculas del mismo a una agitación. Por otra parte, la onda tendrá que vencer la viscosidad propia del aire como fluido, la cual depende de la humedad relativa del mismo.

Estos fenómenos provocan una disipación de la energía sonora y, por consiguiente, una absorción de la misma.

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

$$A_a = 4mV \quad [A1.19]$$

donde:

m es la constante de atenuación del sonido en el aire (m^{-1});

V es el volumen del recinto (m^3).

La determinación de m puede realizarse mediante métodos normalizados recogidos en normas internacionales¹² o europeas con adaptación nacional¹³, o bien, con otros métodos aproximados propuestos por diferentes autores.

Según Cremer¹⁴ la constante de atenuación del sonido se puede determinar mediante la expresión:

$$m = \frac{[1 - (\vartheta - 20) \cdot 0,04] \cdot f^2}{\phi} \cdot 17 \cdot 10^{-9} \quad [A1.20]$$

donde:

ϑ es la temperatura del aire ($^{\circ}C$);

f es la frecuencia central de la banda de octava (Hz);

ϕ es la humedad relativa del aire (%).

La absorción producida por el aire crece con la frecuencia y con el volumen del recinto. Solamente es significativa en recintos de grandes dimensiones (directamente proporcional al volumen) y para frecuencias relativamente altas (≥ 2000 Hz) y con porcentajes bajos de humedad relativa (del orden de un 10 a un 30%).

La fórmula de Sabine corregida, al tener en cuenta la absorción debida al aire, queda como sigue:

$$T(s) = 0,161 \frac{V}{A + 4mV} \quad [A1.21]$$

Curva tonal

Para una descripción más detallada de la reverberación de un recinto, suelen representarse los valores de T (en bandas de octava o 1/3 de octava) frente a las frecuencias centrales de las bandas en eje logarítmico. A la curva que une estos puntos se le denomina curva tonal de la sala (figura A1.8). En acústica arquitectónica, se suelen emplear las bandas de octava centradas en las frecuencias de

¹² ISO 9613-1:1993. *Acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.*

¹³ UNE-EN 12354-6:2004. *Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 6: Absorción sonora en espacios cerrados.*

¹⁴ Cremer, L., Müller, H.A. y Schultz, T.J. (1955). Opus cit. p. 213.

125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz, pues cubren la mayor parte del espectro audible (sonidos graves, medios y agudos).

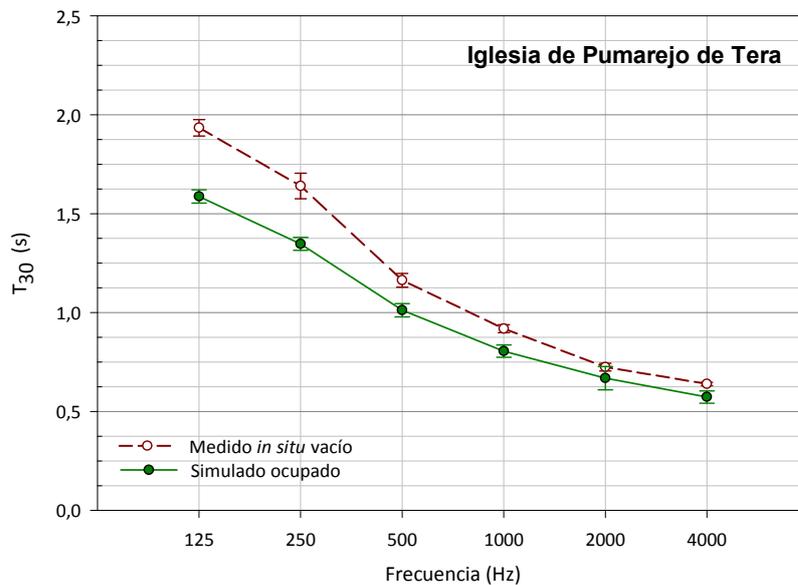


Figura A1.8. Curvas tonales de una iglesia.

Espacios acoplados

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

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

En estos casos, el análisis estadístico del tiempo de reverberación no es aplicable, ya que la prolongación del sonido, cuando cesa la fuente sonora, no tiene el mismo valor en el volumen principal que en los acoplados. El cálculo del tiempo de reverberación en espacios acoplados, según Knudsen¹⁵ puede determinarse mediante el siguiente método empírico:

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

$$\text{Si } P \leq 2 \cdot H \rightarrow T = 0,161 \cdot \frac{V_1 + V_2}{A_1 + A_2} \quad [\text{A1.22}]$$

donde:

V_1 y V_2 son los volúmenes del espacio principal y del acoplado, respectivamente;
 A_1 y A_2 son las absorciones sonoras de ambos espacios.

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

¹⁵ Knudsen, V.O. y Harris, C.M. (1988). Opus cit. p. 177.

$$\text{Si } P > 2 \cdot H \rightarrow T_1 = 0,161 \cdot \frac{V_1}{A_1 + A'} \text{ y } T_2 = 0,161 \cdot \frac{V_2}{A_2 + A'} \quad [\text{A1.23}]$$

donde:

A' es la absorción virtual de la superficie de separación de los espacios acoplados, y cuyos coeficientes de absorción se muestran en la tabla A1.6.

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

Tabla A1.6. Valores del coeficiente de absorción de la superficie virtual.

A1.2. INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA Y CLARIDAD MUSICAL

Por inteligibilidad se entiende la capacidad de entendimiento de las palabras pronunciadas por un interlocutor, a través de un determinado canal de transmisión, por ejemplo una sala. Se trata pues de un concepto de difícil evaluación.

La claridad musical indica el grado de separación entre los sonidos individuales que integran una composición musical.

En los recintos eclesiales, donde los fieles se reúnen para las celebraciones litúrgicas y escuchar la Palabra de Dios, la inteligibilidad del discurso y la claridad del sonido percibida resultan de vital importancia. Para su cuantificación utilizaremos distintos parámetros acústicos recogidos en la norma de referencia, UNE-EN ISO 3382-1:2010, basados en una relación entre energía inicial y final, que se corresponden con la respuesta subjetiva de los oyentes para caracterizar los diferentes aspectos de la acústica de la sala. Además, utilizaremos el índice STI (*Speech Transmission Index*), que se basa en el análisis de la *función de transferencia de modulación*, o su versión simplificada RASTI.

La relación entre las energías acústicas precoces y tardías se puede calcular para un límite temporal precoz de 50 ms o de 80 ms, dependiendo de si los resultados se refieren a las condiciones de las salas de conferencia o de conciertos, respectivamente, utilizando la ecuación:

$$C_{t_e}(\text{dB}) = 10 \log \frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{A1.24}]$$

donde:

C_{t_e} es el índice precoz/tardío;

t_e es el límite temporal de 50 ms o 80 ms (C_{50} se define como la claridad para la palabra y C_{80} como la claridad musical);

$p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición.

Claridad musical (C_{80})

La claridad musical C_{80} se establece cuando el límite t_e corresponde a los 80 ms para el instante de separación entre la energía inicial y final medido desde la llegada del sonido directo. Un alto valor de C_{80} significa que la energía sonora inicial es muy superior a la final, dando la impresión de un sonido muy claro. Por tanto, durante los primeros 80 ms se producen muchas más reflexiones tempranas, que provienen de paramentos cercanos al oyente, que reflexiones generales debidas a las restantes superficies de la sala. Cuando esto sucede, normalmente el EDT será mucho más pequeño que el tiempo de reverberación medio del recinto.

Se expresa en (dB) y su expresión es la siguiente:

$$C_{80}(dB) = 10 \log \frac{\int_0^{0,080} p^2(t) dt}{\int_{0,080}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [A1.25]$$

Cuando las energías sonoras tempranas y reverberadas son iguales, C_{80} es igual a 0.

Normalmente se utiliza el valor medio ponderado de la claridad, expresado como $C_{80}(3)$:

$$C_{80}(3) = \frac{C_{80}(500 \text{ Hz}) + C_{80}(1 \text{ kHz}) + C_{80}(2 \text{ kHz})}{3} \quad [A1.26]$$

Los valores recomendados de C_{80} y $C_{80}(3)$, según distintos autores, se recogen en la tabla A1.7:

Autores	Hipótesis	Intervalo recomendado (dB)
L.L. Beranek ¹⁶	Sala vacía	$-4 \leq C_{80}(3) \leq 0$
L.G. Marshall ¹⁷	Sala ocupada	$-2 \leq C_{80}(3) \leq +2$
M.Barron ¹⁸	Sala ocupada	$-2 \leq C_{80} \leq +2$
H.Arau ¹⁹	Concierto. Sala ocupada	$-2 \leq C_{80} \leq +4$
	Ópera. Sala ocupada	$2 \leq C_{80} \leq +6$
	Teatro. Sala ocupada	$C_{80} \geq +6$

Tabla A1.7. Valores óptimos para la claridad musical C_{80} y $C_{80}(3)$.

L. Gerald Marshall²⁰ establece los valores del índice de claridad musical, mostrados en la figura A1.9, según su adecuación a distintos tipos de música.

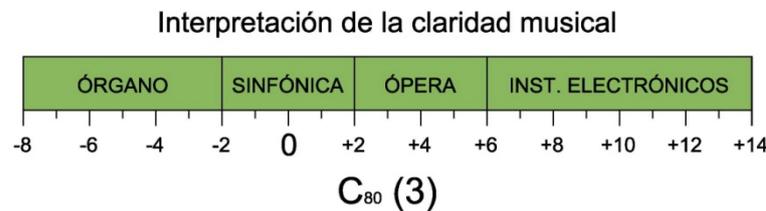


Figura A1.9. Valoración de la claridad musical $C_{80}(3)$ según L. G. Marshall.

Claridad para la palabra (C_{50})

La claridad para la palabra C_{50} se establece cuando el límite t_e corresponde a los 50 ms para el instante de separación entre la energía inicial y final medido desde la llegada del sonido directo. Se expresa en (dB) y su expresión es la siguiente:

$$C_{50}(dB) = 10 \log \frac{\int_0^{0,050} p^2(t) dt}{\int_{0,050}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [A1.27]$$

De forma similar a la claridad musical, normalmente se utiliza el valor medio ponderado del C_{50} (*speech average*), C_{50AV} :

¹⁶ Beranek, L.L. (1996). *Concert and opera halls: how they sound*. Nueva York: Acoustical Society of America. p. 555.

¹⁷ Marshall, L.G. (1994). An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96 (4), p. 2251-2261.

¹⁸ Barron, M. (1993). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Londres: E & FN Spon and imprint of Chapman & Hall. p. 61.

¹⁹ Arau, H. (1999). *ABC de la acústica arquitectónica*. Barcelona: CEAC. p. 266.

²⁰ Marshall, L.G. (1994). Opus cit.

$$C_{50}(\text{speech average}) = 0.15 \cdot C_{50}(500 \text{ Hz}) + 0.25 \cdot C_{50}(1 \text{ kHz}) \\ + 0.35 \cdot C_{50}(2 \text{ kHz}) + 0.25 \cdot C_{50}(4 \text{ kHz}) \quad [\text{A1.28}]$$

Para una sala ocupada, el valor recomendado del $C_{50}(\text{speech average})$, según A. Carrión²¹ debe ser:

$$C_{50}(\text{speech average}) > 2 \text{ dB}$$

Cuanto mayor sea su valor, mejor será la inteligibilidad y la sonoridad en el punto de estudio.

Asimismo, L. Gerald Marshall²² propone la gráfica de la figura A1.10 para la interpretación de los valores de $C_{50}(\text{speech average})$.



Figura A1.10. Valoración de la claridad de la voz C_{50} según L. G. Marshall.

Definición (D_{50})

La relación entre la energía acústica precoz y la energía acústica total se utiliza para definir las condiciones de la palabra, según la ecuación:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,050} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{A1.29}]$$

Por tanto, la definición es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye sonido directo y primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo (energía inicial y final).

Es un valor adimensional que a veces se expresa en tanto por ciento. Un valor bajo implica que la energía sonora reflejada, que se produce dentro de los 50 primeros ms, es pequeña, en relación a la energía sonora reflejada total que alcanza a un punto de la sala. Ésta se percibirá con falta de intimidad, lo que suele ocurrir en el caso de elevados tiempos de reverberación. Cuanto mayor sea su valor, mejor será la inteligibilidad y la sonoridad en el punto de estudio.

La relación entre la definición D_{50} y la claridad de la voz C_{50} , para cualquier banda de frecuencia, es la siguiente:

$$C_{50}(\text{dB}) = 10 \text{Log} \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \quad [\text{A1.30}]$$

Ambos parámetros son muy sensibles a la posición del receptor en el interior del recinto, por lo que pequeñas variaciones de situación pueden provocar grandes variaciones de éstos.

Como veremos más adelante, existe una clara correlación entre estos parámetros energéticos relacionados con la inteligibilidad (C_{50} y D_{50}) y los índices STI y RASTI.

²¹ Carrión, A. (1998). Opus cit. p. 184.

²² Marshall, L.G. (1994). Opus cit.

Tiempo central (T_s)

El tiempo central, T_s , se define como el tiempo del centro de gravedad de la respuesta impulsiva cuadrática, mediante la expresión:

$$T_s(ms) = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [A1.31]$$

T_s evita el recurrir a una división discreta de la respuesta impulsiva en períodos precoz y tardío.

Este parámetro indica la nitidez del sonido en puntos específicos de la sala y tiene gran relación con el EDT. Cuanto mayor sea T_s , menor será la nitidez. En el caso de campo difuso (caída puramente exponencial), su valor se puede expresar en función de T , siendo $T_s = T/13,6$.

Índice de transmisión de la voz (STI)

El índice STI (*Speech Transmission Index*), definido por Houtgast y Steeneken²³, permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra entre los valores 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima), con objeto de evaluar la calidad del canal de transmisión (recinto). Su uso está contrastado por numerosas pruebas de inteligibilidad subjetivas.

El STI se calcula a partir de la función de transferencia de la modulación (MTF), que representa el factor de reducción del índice de modulación m de la voz, frente a la frecuencia de modulación F_m , debido a la existencia de reverberación y de ruido de fondo en una sala.

El proceso de cálculo del STI, según Houtgast y Steeneken, sigue los siguientes pasos:

- Cálculo o medida de la reducción de los índices de modulación $m(F_0, F_m)$, siendo F_0 las frecuencias centrales de las bandas de octava (comprendidas entre 125 y 8000 Hz) y F_m las frecuencias de modulación (comprendidas entre 0,63 y 12,5 Hz). Por tanto, se evalúa la función de transferencia de modulación $m(F_0, F_m)$ para cada una de las 14 frecuencias de modulación, F_m , y para las 7 octavas comprendidas entre 125 y 8000 Hz, es decir, un total de 98 valores de MTF.

Su expresión es la siguiente:

$$m(F_0, F_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F_m T}{13,8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-S/N(F_0)}{10}}} \quad [A1.32]$$

donde:

T es el valor del T (o ETD) para la banda de octava centrada a la frecuencia F_0 .

$S/N(F_0)$ es la relación señal/ruido para la banda de octava centrada a la frecuencia F_0 .

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

$$(S/N)_{ap}(F_0, F_m) = 10 \cdot \log \frac{m(F_0, F_m)}{1 - m(F_0, F_m)} \quad [A1.33]$$

Los 98 valores medidos se truncan de forma que todos ellos estén comprendidos entre +15 dB y -15dB.

²³ Houtgast, T. y Steeneken, H.J.M. (1973). The Modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility. *Acustica*, 28, p. 66-73.

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

$$\overline{(S/N)}_{ap}(F_0) = \frac{\sum_{F_m} (S/N)_{ap}(F_0, F_m)}{14} \quad [A1.34]$$

- d. Cálculo de la señal/ruido aparente media global.

$$\begin{aligned} \overline{(S/N)}_{ap} = & 0,010 \overline{(S/N)}_{ap 125 \text{ Hz}} + 0,042 \overline{(S/N)}_{ap 250 \text{ Hz}} + \\ & 0,129 \overline{(S/N)}_{ap 500 \text{ Hz}} + 0,200 \overline{(S/N)}_{ap 1 \text{ kHz}} + \\ & + 0,312 \overline{(S/N)}_{ap 2 \text{ kHz}} + 0,250 \overline{(S/N)}_{ap 4 \text{ kHz}} + 0,057 \overline{(S/N)}_{ap 8 \text{ kHz}} \end{aligned} \quad [A1.35]$$

- e. Cálculo del índice STI mediante la siguiente expresión:

$$STI = \frac{\overline{(S/N)}_{ap} + 15}{30} \quad [A1.36]$$

En la figura A1.11 se muestra la evolución del índice STI, medido en una iglesia, en relación a la distancia a la fuente.

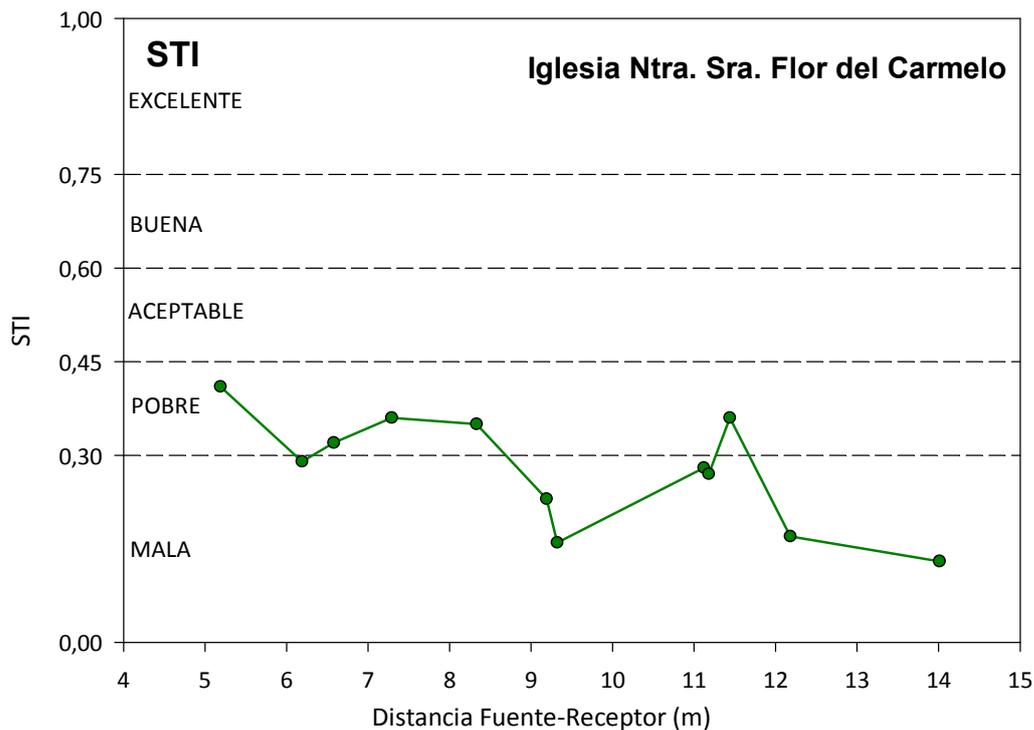


Figura A1.11. Variación del índice STI en función de la distancia a la fuente.

Índice RASTI

El índice RASTI²⁴ (*Rapid Speech Transmission Index*) es un método simplificado, desarrollado a partir del índice STI. El cálculo de ambos parámetros es parecido, si bien, en el cálculo del índice RASTI el análisis se restringe a las bandas de octava de 500 y 2000 Hz, y el número de frecuencias de modulación se reduce de 14 a 9 (4 en la banda de 500 Hz y 5 en la de 2000 Hz).

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

²⁴ Hougast, T. y Steeneken, H. J. M. (1985). A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77 (3), p. 1069-1077.

$$\overline{(S/N)}_{ap} = \frac{\sum_{F_0, F_m} (S/N)_{ap}(F_0, F_m)}{9} \quad [A1.37]$$

A partir de la evaluación de la inteligibilidad con el índice STI o RASTI en distintos puntos de una sala, se pueden trazar los mapas de inteligibilidad en las zonas de audiencia. La representación de estos índices puede ser en forma de mapas, como el de la figura A1.12, o mediante las curvas ISO, es decir, contornos que unen puntos con el mismo valor del índice.

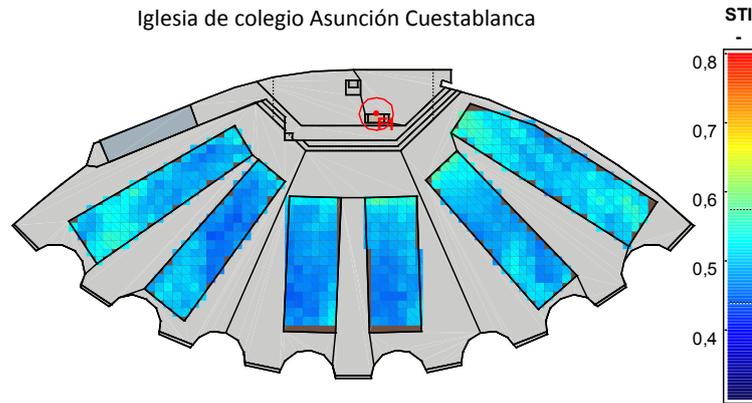


Figura A1.12. Mapa del índice STI de una iglesia.

Asimismo, la figura A1.13 muestra la escala cualitativa para valorar la inteligibilidad de un recinto, a partir de los valores STI o RASTI.

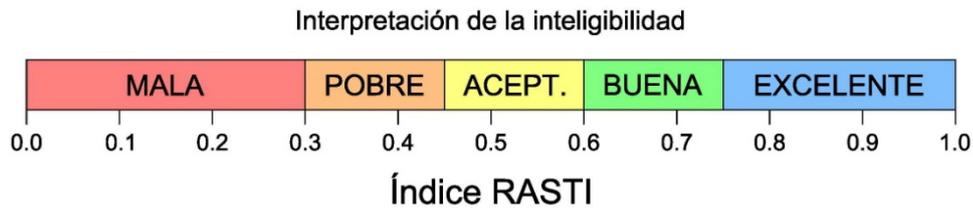


Figura A1.13. Valoración de los índices STI y RASTI.

A1.3. NIVEL SONORO

Fuerza sonora (G)

La fuerza sonora o fuerza acústica, G, es la relación del cociente logarítmico de la energía acústica (presión acústica cuadrática e integrada) de la respuesta impulsiva medida y la respuesta medida en campo libre a una distancia de 10 m de la fuente sonora, según se expresa en las ecuaciones [A1.38] a [A1.40]:

$$G (dB) = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} = L_{pE} - L_{pE,10} \quad [A1.38]$$

donde:

$$L_{pE}(dB) = 10 \text{ Log} \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p^2(t) dt}{p_0^2} \right] \quad [A1.39]$$

y

$$L_{pE,10}(dB) = 10 \text{ Log} \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p_{10}^2(t) dt}{p_0^2} \right] \quad [A1.40]$$

donde:

$p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición;
 $p_{10}(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida a una distancia de 10 m en un campo libre;

p_0 es igual a $20\mu\text{Pa}$;

T_0 es igual a 1 s;

L_{pE} es el nivel de exposición de la presión acústica de $p(t)$;

$L_{pE,10}$ es el nivel de exposición de la presión acústica de $p_{10}(t)$.

En las ecuaciones anteriores, $t=0$ corresponde al inicio del sonido directo, y $t = \infty$ debería corresponder a un tiempo igual o superior al punto donde la curva de decrecimiento ha disminuido en 30 dB.

G también se puede medir utilizando una fuente sonora omnidireccional estacionaria, mediante la ecuación:

$$G = L_p - L_{p,10} \quad [A1.41]$$

donde:

L_p es el nivel de presión acústica medido en cada punto de medición del recinto sometido a ensayo;

$L_{p,10}$ es el nivel de presión acústica medido a una distancia de 10 m en un campo libre.

Normalmente se utiliza el valor medio de las bandas de octava de 500 Hz y 1 kHz:

$$G_{mid}(dB) = \frac{G(500 \text{ Hz}) + G(1 \text{ kHz})}{2} \quad [A1.42]$$

Asimismo, el valor medio a bajas frecuencias, bandas de 125 Hz y 250 Hz, se expresa:

$$G_{low}(dB) = \frac{G(125 \text{ Hz}) + G(250 \text{ Hz})}{2} \quad [A1.43]$$

A1.4. IMPRESIÓN ESPACIAL

Energía acústica lateral tardía (L_J)

La energía acústica lateral tardía o nivel sonoro lateral final, L_J , se define por la expresión:

$$L_J(dB) = 10 \log \left[\frac{\int_{0,080}^{\infty} p_L^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \right] \quad [A1.44]$$

donde:

$p_L(t)$ es la presión acústica instantánea en la respuesta impulsiva medida con un micrófono bidireccional de respuesta en ocho;

$p_{10}(t)$ es la presión acústica instantánea en la respuesta impulsiva medida con un micrófono omnidireccional a una distancia de 10 m en un campo libre.

Se pretende que el cero del micrófono bidireccional de respuesta en ocho apunte al centro de la escena o exactamente a cada posición de la fuente, de manera que este micrófono reaccione ante todo a la energía acústica procedente de las direcciones laterales y que no se vea influido de manera significativa por el sonido directo.

La energía lateral tardía promediada en frecuencia, $L_{J,avg}$, se calcula a partir de la ecuación:

$$L_{J,avg}(dB) = 10 \log \left[0,25 \sum_{i=1}^4 10^{L_{J_i}/10} \right] \quad [A1.45]$$

donde:

L_{J_i} es el valor en la banda de octava i ;

i representa cada una de las cuatro bandas de octava con frecuencias centrales de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz y 1000Hz.

La energía acústica lateral tardía está relacionada con la envolvente o la espacialidad percibida por el oyente en el auditorio.

Fracción de energía lateral precoz (J_{LF})

La fracción de energía, J_{LF} , que llega lateralmente dentro de los 80 ms iniciales, se define por la expresión:

$$J_{LF} = \frac{\int_{0,050}^{0,080} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0,080} p^2(t) dt} \quad [A1.46]$$

$p_L(t)$ es la presión acústica instantánea en la respuesta impulsiva del auditorio medida con un micrófono bidireccional de respuesta en ocho;

$p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición.

Se pretende que el cero del micrófono bidireccional de respuesta en ocho apunte al centro de la escena o exactamente a cada posición de la fuente, de manera que este micrófono reaccione ante todo a la energía acústica procedente de las direcciones laterales y que no se vea influido de manera significativa por el sonido directo.

Dado que la directividad del micrófono bidireccional de respuesta en ocho tiene esencialmente forma de coseno y que los valores de presión están elevados al cuadrado, la fracción de energía lateral obtenida para una reflexión individual varía con el cuadrado del coseno del ángulo de incidencia de la reflexión con respecto al eje de sensibilidad máxima del micrófono.

Como alternativa, se puede utilizar una aproximación con la siguiente ecuación, para la obtención de las fracciones de energía lateral, J_{LFC} , con contribuciones que varían únicamente con el coseno del ángulo, considerada subjetivamente, más precisa²⁵:

$$J_{LFC} = \frac{\int_{0,050}^{0,080} |p_L(t) \cdot p(t)| dt}{\int_0^{0,080} p^2(t) dt} \quad [A1.47]$$

donde

$p_L(t)$ es la presión acústica instantánea en la respuesta impulsiva del auditorio medida con un micrófono bidireccional de respuesta en ocho;

$p(t)$ es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición.

²⁵ Kleiner, M.A. (1989). New way of measuring lateral energy fractions. *App. Acoust.*, 27, p. 321.

Las fracciones de energía lateral están relacionadas con el ancho percibido de la fuente sonora.

Los criterios basados en la correlación interaural están relacionados con la impresión espacial y se describen a continuación.

Normalmente se utiliza el valor medio de las bandas de octava desde 125 Hz a 1 kHz:

$$J_{LF4} = \frac{J_{LF}(125 \text{ Hz}) + J_{LF}(250 \text{ Hz}) + J_{LF}(500 \text{ Hz}) + J_{LF}(1 \text{ KHz})}{4} \quad [\text{A1.48}]$$

Según Carrión²⁶, para una sala vacía, el valor del J_{LF} promediado en frecuencia debe ser:

$$J_{LF4} \geq 0.19$$

Coefficientes de correlación cruzada interaural (IACC)

La función de correlación cruzada interaural normalizada (*inter-aural cross correlation function*, IACF) se define mediante la ecuación:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}} \quad [\text{A1.49}]$$

donde

$p_l(t)$ es la respuesta impulsiva en la entrada del canal auditivo izquierdo;

$p_r(t)$ es la respuesta impulsiva en la entrada del canal auditivo derecho.

Los coeficientes de correlación cruzada interaurales, IACC, vienen dados por la ecuación:

$$IACC_{t_1, t_2} = \text{máx.} |IACF_{t_1, t_2}| \quad \text{para } -1\text{ms} < \tau < +1\text{ms} \quad [\text{A1.50}]$$

Los usos de los IACC todavía no se han aceptado de manera uniforme. Como en el caso de J_{LF} y J_{LFC} , el uso de IACC y su aplicabilidad subjetiva siguen siendo objeto de discusión e investigación. Asimismo, se han propuesto diferentes enfoques con respecto a la elección de los límites temporales t_1 y t_2 y el filtrado en frecuencias de las señales²⁷.

La forma más general de los IACC se define por $t_1=0$ y $t_2=\infty$ (en acústica de salas, tiempo del orden del tiempo de reverberación) y por una banda de frecuencia ancha. Como en el caso de las mediciones monoaurales, los IACC se miden generalmente en bandas de octava que van desde los 125 Hz hasta los 4000 Hz. Por ser las bandas más representativas de este coeficiente las de 500, 1000 y 2000 Hz, también se suele determinar un coeficiente de correlación cruzada interaural medio $IACC_3$:

$$IACC_3 = \frac{IACC(500 \text{ Hz}) + IACC(1 \text{ kHz}) + IACC(2 \text{ kHz})}{3} \quad [\text{A1.51}]$$

Los IACC se pueden medir para describir la desemejanza de la llegada de la señal en los dos oídos, tanto para las reflexiones tempranas ($t_1=0$ y $t_2=0,08\text{s}$) reflejada en el $IACC_E$ (early), como para el sonido reverberante ($t_1=0,08$ y $t_2=\text{un tiempo superior al tiempo de reverberación de la sala}$), expresada por el $IACC_L$ (late). La respuesta completa viene definida por el $IACC_A$ ($t_1=0$ y $t_2=1\text{s}$).

²⁶ Carrión, A. (1998). Opus cit. p. 234.

²⁷ Keet, W. de V. (1968). *The influence of early lateral reflections on spatial impression*. 6th International Congress on Acoustics. Tokio.

La correlación cruzada entre las respuestas impulsivas calculadas/medidas en ambos oídos, es un indicativo del grado de similitud existente entre ambas señales. Cuando las señales de ambos oídos son iguales, el coeficiente de correlación cruzada inter-aural $IACC=1$. Por el contrario, si las respuestas son totalmente distintas el $IACC=0$. El umbral diferencial (JND) de los IACC se estima en 0,075.

En las siguientes tablas se indican los valores medios de $IACC_{E3}$ y $IACC_{L3}$ y su correspondencia con la categoría acústica, propuestos por Beranek²⁸, para salas de concierto vacías:

$IACC_{E3}$		CATEGORÍA ACÚSTICA DE LAS SALAS
VALOR MEDIO	RANGO	
0,34	0,38 - 0,29	Excelente
0,45	0,54 - 0,39	Muy buena
0,59	0,59 - 0,56	Aceptable/buena

Tabla A1.8. Correspondencia entre valores de $IACC_{E3}$ en salas de concierto vacías y la categoría acústica, según Beranek.

$IACC_{L3}$		CATEGORÍA ACÚSTICA DE LAS SALAS
VALOR MEDIO	RANGO	
0,12	0,10 - 0,16	Excelente
0,13	0,12 - 0,22	Muy buena/excelente
0,15	0,12 - 0,28	Buena

Tabla A1.9. Correspondencia entre valores de $IACC_{L3}$ en salas de concierto vacías y la categoría acústica, según Beranek.

Para Carrión²⁹, la fiabilidad de la clasificación de la tabla A1.19 es estadísticamente baja, puesto que los valores medidos en un conjunto de salas pertenecientes a tres categorías diferentes son muy parecidos entre sí. Además, las diferencias entre los valores medios son inferiores al valor umbral perceptible (JND).

Para realizar las medidas es conveniente recurrir a una cabeza artificial con pabellones y canales auditivos o utilizar una cabeza real.

A1.5. RANGO TÍPICO SEGÚN NORMA UNE-EN ISO 3382-1:2010

Para los principales parámetros acústicos, descritos hasta el momento, según los aspectos subjetivos del oyente, la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 establece un rango típico de valores, que se especifican en la tabla A1.10.

Aspecto subjetivo del oyente		Parámetro acústico	Unidad	Promediado en frecuencia de número único ^a Hz	Umbral diferencial (Just noticeable difference, JND)	Rango típico ^b
Reverberación		Tiempo de reverberación inicial: EDT	s	500 a 1000	Rel. 5%	1,0 s; 3,0 s
Inteligibilidad de la palabra y claridad musical		Claridad: C_{80}	dB	500 a 1000	1 dB	-5 dB; +5 dB
		Definición: D_{50}	-	500 a 1000	0,05	0,3; 0,7
		Tiempo central: T_s	ms	500 a 1000	10 ms	60 ms; 260 ms
Nivel Sonoro		Fuerza acústica: G	dB	500 a 1000	1 dB	-2 dB; +10 dB
Impresión espacial	Envolvente	Energía acústica lateral tardía: L_l	dB	125 a 1000	Desconocido	-14 dB; +1 dB
	Ancho aparente de la fuente	Energía lateral precoz: J_{LF}, J_{LFC}	-	125 a 1000	0,05	0,05; 0,35

^a El promediado en frecuencia de número único indica la media aritmética para las bandas de octava, excepto para L_l , que se debe promediar energéticamente [A1.65].

^b Valores promediados en frecuencia en posiciones únicas en salas de conciertos y en salas polivalentes vacías hasta 25000 m³.

Tabla A1.10. Aspectos subjetivos del oyente y los correspondientes parámetros acústicos según tabla A.1 de la norma UNE-EN ISO 3382-1.

²⁸ Beranek, L. L. (1996). *Concert and opera halls: How they sound*. Nueva York: Acoustical Society of America. p. 466-473.

²⁹ Carrión, A. (1998). *Opus cit.* p. 237-238.

A1.6. DISTRIBUCIÓN SONORA

La distribución sonora de un local permite detectar el grado de difusión sonora, así como la ubicación de las zonas de máxima concentración y máximas caídas de nivel sonoro; permite, pues, valorar el grado de uniformidad del campo sonoro.

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

Nivel de presión sonora (SPL o L_p)

El nivel de presión sonora se define como 20 veces el logaritmo de la relación entre el valor eficaz de la presión sonora y el valor eficaz de la presión umbral de audición, a 1 kHz:

$$SPL (dB) = 20 \text{ Log } \frac{P_{ef}}{P_{ref}} \quad [A1.52]$$

donde:

P_{ef} es la presión eficaz del sonido en consideración;

P_{ref} es la presión eficaz correspondiente al umbral de audición, a 1 kHz (2×10^{-5} Pa).

La utilización de dicha referencia tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores SPL positivos. La figura A1.14 muestra, como ejemplo, un mapa de distribución sonora de una iglesia.

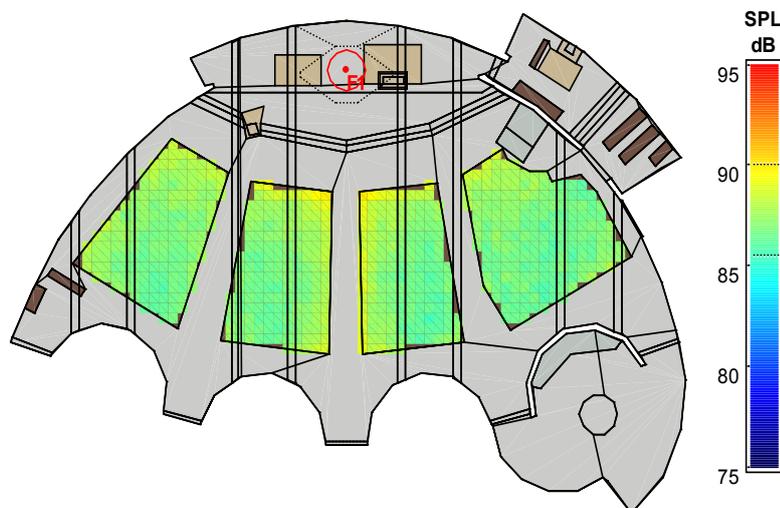


Figura A1.14. Mapa de distribución sonora de la iglesia de Santa Cruz de Oleiros.

Campo directo

Campo sonoro directo, o libre, es el que origina una fuente acústica que emite en un medio homogéneo e isótropo indefinido, libre de contornos.

En campo libre, la energía se debe al sonido directo y es de valor variable, disminuyendo a medida que el receptor se aleja de la fuente. Para una fuente sonora, puntual y omnidireccional, que emite frentes de onda esféricos en un campo sonoro directo, la intensidad sonora en un punto cualquiera será:

$$I_d = \frac{W}{4\pi r^2} \quad [A1.53]$$

donde:

W es la potencia de la fuente sonora (w);
 r es la distancia de la fuente al punto considerado (m).

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

$$L_d = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{W}{4\pi r^2} - 10 \cdot \log I_0 \quad [\text{A1.54}]$$

donde:

I_0 es la intensidad de referencia de valor 10^{-12} w/m².

Con lo anterior:

$$L_d = L_w - 10 \cdot \log(4\pi r^2) \cong L_w - 20 \cdot \log r - 11 \quad (\text{dB}) \quad [\text{A1.55}]$$

siendo:

L_w es el nivel de potencia de la fuente, definido como:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{A1.56}]$$

donde:

W_0 es la potencia sonora de referencia de valor 10^{-12} w.

En el caso de una fuente direccional, las expresiones anteriores quedarían de la siguiente forma:

$$I_d = \frac{Q \cdot W}{4\pi r^2} \quad [\text{A1.57}]$$

$$L_d = L_w + 10 \cdot \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad [\text{A1.58}]$$

donde:

Q es el factor de directividad de la fuente.

Campo directo y campo reverberado

Aplicando exclusivamente las hipótesis de la teoría estadística, la energía sonora en cualquier punto de un recinto es resultado de dos sumandos; el primero corresponde a la energía del sonido directo, de valor variable, según vimos en la ecuación [A1.53]; el segundo, procedente de la energía sonora asociada al sonido indirecto o reflejado en los distintos paramentos del local, y de valor constante.

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

$$I_r = \frac{4W}{R} \quad [\text{A1.59}]$$

donde:

W es la potencia de la fuente sonora (w);
 R es la constante acústica del local de valor:

$$R = \frac{S_t \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad [\text{A1.60}]$$

S_t es la superficie total de la sala (m^2).

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

$$R = \frac{S_t \cdot \beta}{1 - \beta} \quad [\text{A1.61}]$$

donde:

$$\beta = \bar{\alpha} + \frac{4mV}{S_t} \quad [\text{A1.62}]$$

De la misma forma que en el apartado anterior, la intensidad sonora total en un punto será:

$$I_t = I_d + I_r = W \cdot \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad [\text{A1.63}]$$

Y el nivel de presión sonora total:

$$L_t = L_w + 10 \cdot \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad [\text{A1.64}]$$

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

La distancia límite en la que la energía procedente del sonido directo es la misma que la debida al reflejado se denomina distancia o radio crítico D_c , y se obtiene igualando los dos términos de la ecuación [A1.63], es decir:

$$D_c = \sqrt{\frac{R}{16\pi}} \quad [\text{A1.65}]$$

Si la fuente no es omnidireccional, la distancia o radio crítico vale:

$$D_c = \sqrt{\frac{Q \cdot R}{16\pi}} \quad [\text{A1.66}]$$

donde:

Q es el factor de directividad.

Los modelos energéticos

La energía acústica en el interior de un recinto ha sido estudiada desde hace décadas, dando lugar a diversas hipótesis teóricas^{30,31}. La hipótesis clásica se basa en la teoría estadística de propagación del sonido en el interior de un recinto, bajo las premisas de que el campo sonoro es difuso y la absorción está uniformemente distribuida en el mismo. Además supone que la energía reflejada se iniciaba simultáneamente en todos los puntos del recinto en el instante en que se emitía el sonido directo.

Barron y Lee³² desarrollaron una revisión teórica, basada en salas de concierto, que se fundamenta en que los niveles de energía reflejada decaen significativamente con la distancia y no permanecen constantes como predice la teoría clásica. En estos recintos, el campo sonoro no es difuso principalmente porque la absorción se concentra sobre la zona de audiencia. Las expresiones teóricas surgen de admitir que el sonido reflejado no puede llegar antes que el sonido directo.

En la mayoría de los recintos no se cumplen las premisas de la teoría clásica y la distribución de la absorción sonora no tiene por qué estar concentrada en una única zona. Medidas experimentales sobre diferentes recintos han puesto de manifiesto que la energía reflejada decae con la distancia con mayores atenuaciones que las propuestas por Barron y Lee, tal como propusieron Sendra *et al*³³.

Los recintos de culto, y en especial las iglesias, son recintos que no cumplen las premisas de Barron. Cirillo y Martellotta³⁴, por un lado, y Galindo³⁵, por otro, propusieron nuevos modelos teóricos a partir de los estudios realizados sobre iglesias cristianas que explicasen esas mayores atenuaciones. Ambos casos se basan de un estudio más detallado de las reflexiones tempranas a partir del estudio de las caídas obtenidas para la densidad de energía acústica.

Cirillo y Martellotta proponen que la caída lineal empieza después de un cierto tiempo posterior a la llegada del sonido directo, proporcional a la distancia fuente-receptor. La constante de proporcionalidad entre este tiempo de retardo y la distancia fuente-receptor se determina experimentalmente en función de las características acústicas y tipológicas de las iglesias.

Galindo, en su tesis doctoral, propone una caída lineal de las reflexiones tempranas que mantiene la propuesta por Barron y Lee, añadiéndole una atenuación adicional, de forma que la energía acústica puede predecirse a partir de tres parámetros: el tiempo de reverberación, el volumen y un parámetro que, al igual que el modelo propuesto por Cirillo y Martellotta, da cuenta de las características acústicas del recinto. Este parámetro se obtiene a partir de una regresión de los valores de la claridad con la distancia, por ser este un parámetro muy sensible, por definición, a las reflexiones tempranas.

Martellotta propuso un modelo sobre el propuesto por Cirillo y él mismo, que permitía detectar diferentes tramos de caídas lineales cuando se evalúa la densidad de energía acústica³⁶, tal como propone Arau³⁷. Este hecho es frecuente en iglesias y recintos con volúmenes acoplados.

³⁰ Zamarreño, T., Girón, S. y Galindo, M. (2007). Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 121, p. 234–250.

³¹ Berardi, U., Cirillo, E. y Martellotta, F. (2009). A comparative analysis of acoustic energy models for churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 126, p. 1838–1849.

³² Barron, M. y Lee, L. J. (1988). Energy relations in concert auditoriums. I. *J. Acoust. Soc. Am.* 84, p. 618–628.

³³ Sendra, J.J., Zamarreño, T. y Navarro, J. (1997). An analytical model for evaluating the sound field in Gothic-Mudejar churches. En: C. Brebbia *et al.* (ed) *Computational Acoustics and its Environmental Application II* (p. 139-148). Southampton: WIT Press.

³⁴ Cirillo, E. y Martellotta, F. (2005). Sound propagation and energy relations in churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 118, p. 232–248.

³⁵ Galindo, M. (2003). *La acústica en espacios religiosos católicos: iglesias gótico-mudéjares*. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura y E.U. Arquitectura Técnica. Universidad de Sevilla.

³⁶ Martellotta, F. (2009). A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 125 (3), p. 1281-1284.

³⁷ Arau, H. (1988). An improved reverberation formula. *Acustica*, 65, p. 163-180.

Zamarreño *et al.*³⁸ publicaron los resultados de la tesis de Galindo, aportando un modelo teórico junto con las ecuaciones de varios de los principales parámetros de salas monoaurales. El modelo energético conocido como modelo μ se plantea entonces como un modelo general, a pesar de nacer de un estudio tipológico de iglesia.

Berardi *et al.*³⁹ han demostrado la universalidad de ambos modelos teóricos al probarlo en iglesias de diferentes tipologías, proponiendo una clasificación unificada de forma que dichos modelos puedan predecir el comportamiento acústico de un recinto, atendiendo a las características acústicas del mismo. En concreto, en el caso del modelo μ , sugiere una tabla de valores del parámetro μ atendiendo a diversas características acústico-arquitectónicas, que evitaría la necesidad de una medida previa del recinto y su posterior cálculo mediante regresión del parámetro μ . Hay que indicar que esta tabla necesita ampliarse, extendiéndola a la diversidad de recintos y características acústicas de los mismos.

En el capítulo 7 del presente trabajo de investigación, se realiza un análisis energético según el modelo μ , que tiene por ventaja su simplicidad de aplicación. Atendiendo a dicho modelo, la densidad de energía acústica se puede escribir como suma de tres aportaciones, al igual que proponen Barron y Lee: la relacionada con el sonido directo (d), la relacionada con las reflexiones tempranas (e) y las relacionadas con las reflexiones tardías (l). Sus ecuaciones correspondientes son:

$$d = \frac{100}{r^2} \quad [A1.67]$$

$$e = \frac{31200T}{V} e^{-\frac{\mu r}{T}} (1 - e^{-\frac{1.11}{T}}) \quad [A1.68]$$

$$l = \frac{31200T}{V} e^{-\frac{0.04r}{T}} e^{-\frac{1.11}{T}} \quad [A1.69]$$

donde:

- T es el tiempo de reverberación del recinto;
- V es el volumen;
- r es la distancia fuente receptor.

A1.7. RUIDO DE FONDO

Con independencia de que en una sala el sonido que pretendemos estudiar sea considerado como el principal, existen otros, no deseados, y que denominamos como ruido de fondo. Las fuentes de ruido pueden ser internas o externas. Entre las primeras cabe destacar las instalaciones de los edificios (sistemas de aire acondicionado, redes hidráulicas, etc...). Como fuentes de ruido externas destacan el tráfico rodado, los agentes atmosféricos, las actividades urbanas, etc... Cuando se trata de acondicionar acústicamente un recinto, el objetivo será eliminar o debilitar estas señales hasta el punto que su interferencia con la señal portadora de la información se mantenga en unos niveles aceptables, en función del uso al que se destine el recinto. Para cuantificar la magnitud del ruido de fondo suelen utilizarse diferentes índices. Repasemos a continuación los más comunes:

Indicadores del ruido de fondo

Nivel de presión sonora (L): utiliza la escala lineal, sin aplicar ningún tipo de ponderación, y abarca toda la gama de frecuencias audible. Se expresa en (dB) y su expresión es la siguiente:

³⁸ Zamarreño, T., Girón, S. y Galindo, M. (2007). Opus cit.

³⁹ Berardi, U., Cirillo, E. y Martellotta, F. (2009). Opus cit.

$$L(\text{dB}) = 10 \cdot \log \frac{p_{ef}^2}{p_{ref}^2} \quad [\text{A1.70}]$$

donde:

p_{ef} es el valor eficaz de la presión acústica de medida;

p_{ref} es la presión de referencia según normas internacionales y vale 20 μPa .

Nivel de presión sonora ponderado (L_A): utiliza la red de ponderación A (UNE 21.314/75), para compensar las diferencias de sensibilidad que el oído humano tiene para las distintas frecuencias dentro del campo auditivo. Se expresa en dBA.

La tabla A1.11 presenta las correcciones realizadas al nivel de presión sonora lineal, en las bandas de frecuencia de 1/3 de octava.

Frec. (Hz)	Correc (dB)								
31.5	-39.4	100	-19.1	315	-6.6	1000	0.0	3150	+1.2
40	-34.6	125	-16.1	400	-4.8	1250	+0.6	4000	+1.0
50	-30.2	160	-13.4	500	-3.2	1600	+1.0	5000	+0.5
63	-26.2	200	-10.9	630	-1.9	2000	+1.2	6300	-0.1
80	-22.5	250	-8.6	800	-0.8	2500	+1.3	8000	-1.1

Tabla A1.11. Factores de corrección de la red de ponderación A.

Nivel sonoro continuo equivalente (L_{Aeq}): es el nivel, en dBA, de un hipotético ruido continuo y estacionario correspondiente a la misma cantidad de energía acústica que el ruido real considerado, en un punto determinado, durante un periodo de tiempo T. Su expresión matemática es la siguiente:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_{ref}^2} dt \quad (\text{dBA}) \quad [\text{A1.71}]$$

donde:

$p_A(t)$ es la presión eficaz, con la red de ponderación A;

T es el intervalo de la medida;

p_{ref} es 20 μPa .

Si las medidas del nivel sonoro L_i se efectuasen en intervalos de observación t_i durante los cuales el nivel sonoro es $L_i \pm 2,5$ dBA, la expresión de L_{Aeq} tomaría la forma:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T} \sum t_i 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad [\text{A1.72}]$$

La tabla A1.12 recoge los niveles máximos recomendados de L_{Aeq} , según los posibles usos del recinto.

Uso del recinto	L_{Aeq} (dBA)	NR	NC	PNC
Salas de música	25	25	25	20
Teatros	35	25	30	20
Cines	45	35	35	35
Salas de conferencias	35	35	30	40
Iglesias	40	35	30	35

Tabla A1.12. Valores máximos recomendados para los índices de valoración del ruido.

Niveles percentiles (L_N): indican el nivel, en dBA, que se ha sobrepasado durante el N% del intervalo de medida. Los más utilizados son:

- L_1 y L_{10} : Relacionados con los niveles máximos del ruido;
- L_{50} : Relacionados con los niveles medios del ruido;
- L_{90} y L_{99} : Relacionados con los niveles mínimos del ruido.

Estos índices son comúnmente utilizados para valorar climas de ruido urbano.

Curvas de valoración

Son curvas desarrolladas para valorar los niveles de un espectro de ruido, en bandas de octava, mediante un único número. Se utilizan de forma generalizada para establecer los niveles máximos recomendables en los recintos, dependiendo del destino de uso de los mismos (Tabla A1.12). Las curvas de valoración tienen en cuenta la evolución de la sensibilidad del oído humano en función de la frecuencia. Las más conocidas son las curvas NR (*Noise Reduction*), NC (*Noise Criteria*) y PNC (*Preferred Noise Criteria*).

Las curvas NR están construidas a partir de la banda de frecuencia de 1000 Hz, de modo que, a dicha frecuencia, el valor de las curvas NR coincide con el nivel sonoro en dB. Se utilizan comúnmente y están recogidas por la norma ISO R-1966. En la figura A1.15 se representa el sistema de curvas NR.

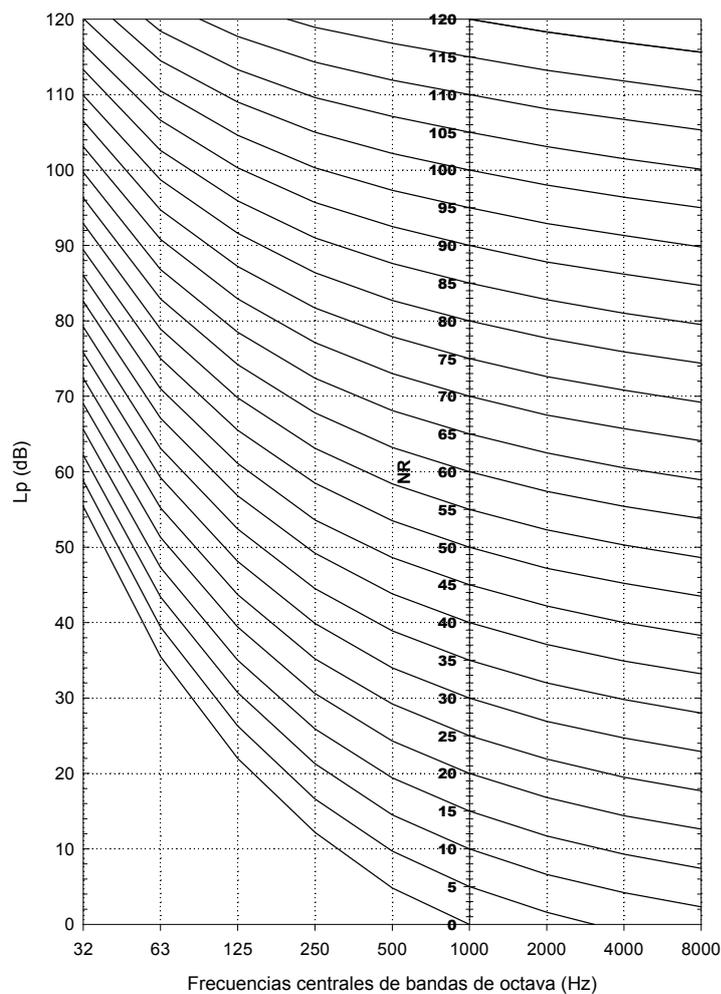


Figura A1.15. Curvas de valoración NR.

Para conocer el valor NR de un ruido de fondo, se superpone el espectro de dicho ruido, medido por bandas de octava, con las curvas NR. El contorno NR más alto que sea alcanzado por el espectro medido, determinará la clasificación NR del ruido.

Las curvas NC, propuestas por L.L. Beranek, son de funcionamiento similar a la curvas NR. Su objetivo es establecer una relación entre el espectro de un ruido y la perturbación que provoca en la comunicación verbal.

Las curvas PNC se elaboran a partir de unas pequeñas modificaciones realizadas a las curvas NC. Recogen los niveles mínimos de ruido deseables y aceptables en salas multifuncionales. Son muy utilizadas para cuantificar la incidencia de los sistemas de acondicionamiento de aire.

Normalmente, se recomienda que en el interior de las iglesias y otros espacios dedicados al culto no se supere la curva NC 25-30 o la NR 30-35.

A1.8. OTROS PARÁMETROS

En acústica arquitectónica se emplean una serie de indicadores, de tipo genérico, que relacionan entre sí magnitudes geométricas de los recintos, y que permiten cualificarlos por comparación con los obtenidos en una amplia muestra representativa de distintos usos, cuya acústica se considera buena. A continuación se definen las estudiadas en este trabajo de investigación:

Relación volumen / plaza (V/N)

La relación volumen / plaza es uno de los puntos de partida para obtener unas buenas condiciones acústicas interiores. En efecto, al ser el T directamente proporcional al volumen e inversamente proporcional a la absorción sonora del mismo, la relación V/N es un claro indicador de esta magnitud, donde:

V es el volumen total del recinto;

N es el número de asientos o capacidad del recinto.

Relación volumen / superficie acústica efectiva de audiencia (V/S_A)

L.L. Beranek propuso usar la relación V/S_A como un parámetro importante en el diseño acústico de salas, siendo:

S_A es la superficie acústica efectiva de audiencia, definida por:

$$S_A = S_a + S_p \quad (m^2) \quad [A1.73]$$

donde:

S_a es la superficie sobre la que se localizan los asientos de la audiencia;

S_p es el área de una banda de 0,5 m (20 in) de ancho alrededor de los asientos. Cuando la audiencia se sienta hasta el borde de una pared, este ancho de pasillo no se considera.

La absorción sonora total de una sala de conciertos aumenta proporcionalmente con la superficie de suelo ocupada por la audiencia, y es casi independiente del número de personas⁴⁰. Es decir, para un mismo aforo, una sala tiene mayor absorción cuanto más distribuida esté la audiencia en superficie.

Según Beranek⁴¹, la absorción debida a las superficies interiores de una sala ocupada, supone, normalmente, un 33% de la absorción total del recinto. Asumiendo este comportamiento, el tiempo de reverberación medio (T_{mid}) del recinto ocupado, puede determinarse mediante la siguiente expresión:

⁴⁰ Beranek, L.L. (1960). Audience and seat absorption in large halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 32, p. 661-670.

⁴¹ Beranek, L.L. (1996). Opus cit. p. 437.

$$T_{mid} \cong 0.14 \cdot \frac{V}{S_t} \quad [A1.74]$$

donde:

V es el volumen del local (m³);

S_t es la superficie acústica efectiva total.

Relación superficie acústica efectiva de audiencia / plaza (S_A/N)

Para la calidad acústica de las salas, la relación superficie acústica efectiva de audiencia / plaza (S_A/N) debe situarse entre 0,60 y 0,65 m²/plaza.

La tabla A1.13 recoge los valores recomendados por Haan y Fricke⁴² para los indicadores descritos en este apartado, en función del destino del recinto.

USO	V/N (m ³ /plaza)		V/S _A (m ³ /m ²)		S _A /N (m ² /plaza)	
	Recomendado	Rango	Recomendado	Rango	Recomendado	Rango
Salas de conciertos	7,8	6,2-10,8	12,2	10,2-14,2	0,59	0,54-0,64
Iglesias	7,2	5,1-9,1	-	-	-	-
Locales polifuncionales	7,1	5,1-8,5	10,6	9,2-12,0	0,66	0,63-0,75
Salas de ópera	5,7	4,5-7,4	8,2	6,9-9,5	0,57	0,52-0,66
Teatros	5,0	4,0-6,0	7,5	6,6-9,4	0,64	0,53-0,75
Cines-teatros	3,5	2,8-5,1	-	-	-	-
Salas de conferencias	3,1	2,3-4,3	-	-	-	-
Salas de música	-	-	7,3	6,5-8,1	0,60	0,50-0,70

Tabla A1.13. Valores recomendados por Haan y Fricke para los indicadores V/N, V/S_A y S_A/N, en función del uso del recinto.

⁴² Haan, C.H. y Fricke, F.R. (1992). Statistical investigations of geometrical parameters for the acoustic design of auditoria. *Applied Acoustics*, 35, p. 105-127.

ANEXO 2

ABSORCIÓN SONORA DE LAS SUPERFICIES DE REVESTIMIENTO. RESULTADOS A FRECUENCIAS BAJAS, MEDIAS Y ALTAS

El presente anexo complementa la información recogida en los apartados 6.X.3.6. *Absorción sonora de las superficies de revestimiento*, de cada iglesia de la muestra. Los resultados facilitados en dichos apartados, correspondientes al valor promedio de absorción sonora de los distintos materiales (en m^2) entre las banda de octava de 125 Hz y 4000 Hz, se desglosan en este anexo, distinguiendo los resultados de absorción a frecuencias bajas, medias y altas.

Para la representación de esta información, se ha adoptado el mismo criterio que muestran las gráficas de absorción sonora del capítulo 6, valorando y cuantificando la evolución de esta magnitud, desde el estado actual (EA) hasta la propuesta de rehabilitación (RE), en las dos hipótesis de ocupación.

Para cada iglesia (y propuesta de rehabilitación acústica), se aportan tres gráficas con los resultados de absorción sonora de los elementos y materiales de revestimientos que más influencia tienen en el comportamiento acústico de la muestra, con la siguiente correspondencia:

- Frecuencias bajas: valor promedio (en m^2) para las banda de octava de 125 Hz y 250 Hz,
- Frecuencias medias: valor promedio (en m^2) para las banda de octava de 500 Hz y 1000 Hz,
- Frecuencias altas: valor promedio (en m^2) para las banda de octava de 2000 Hz y 4000 Hz.

Para cada grupo de frecuencias, se aporta la absorción total de la sala (A_t) y la superficie total de revestimientos (S_r).

IGLESIA DE SANTA ANA DE MORATALAZ

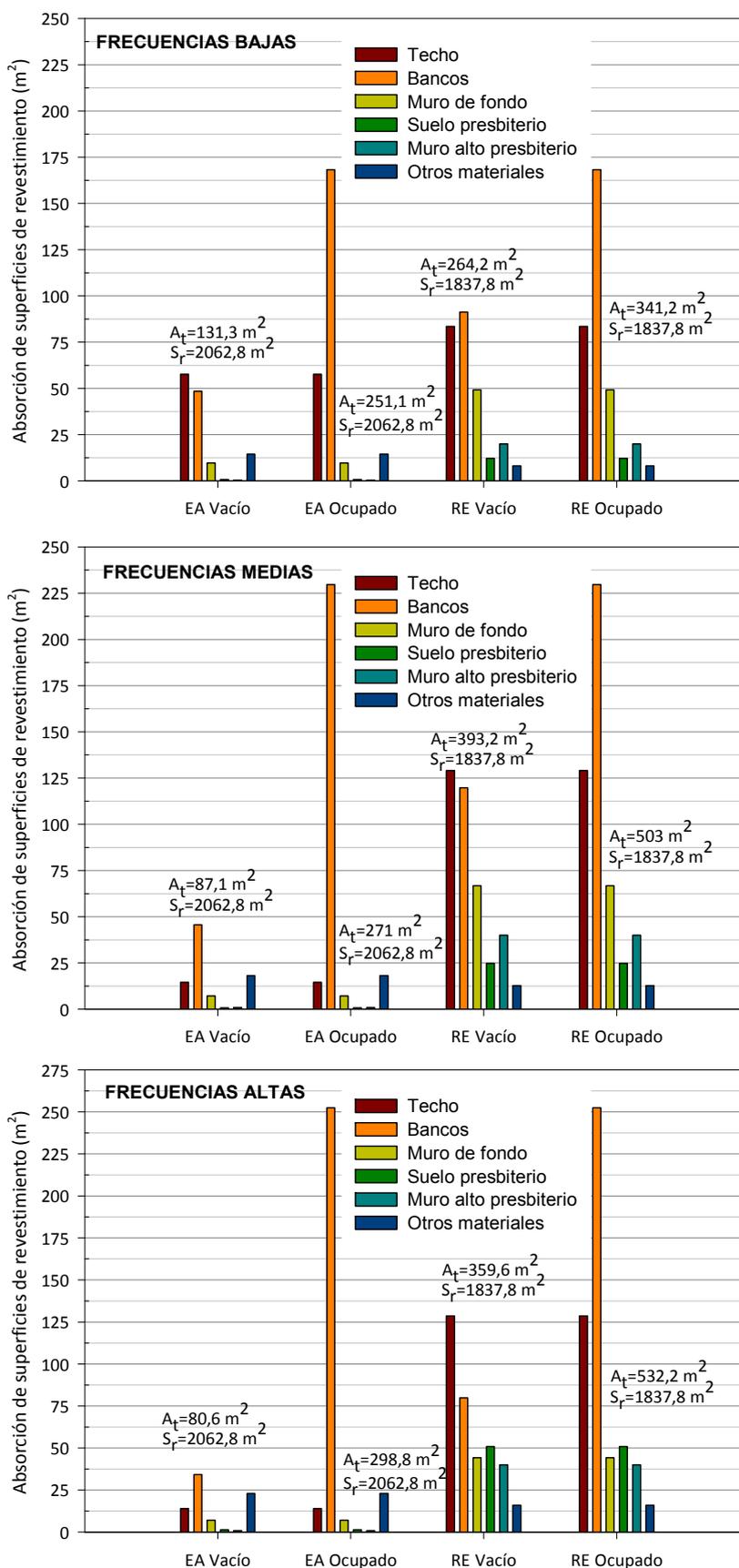


Figura A2.1. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promedio de frecuencias bajas, medias y altas del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia de Santa Ana de Moratalaz.

IGLESIA DEL COLEGIO DE LA ASUCIÓN CUESTABLANCA Propuesta 1

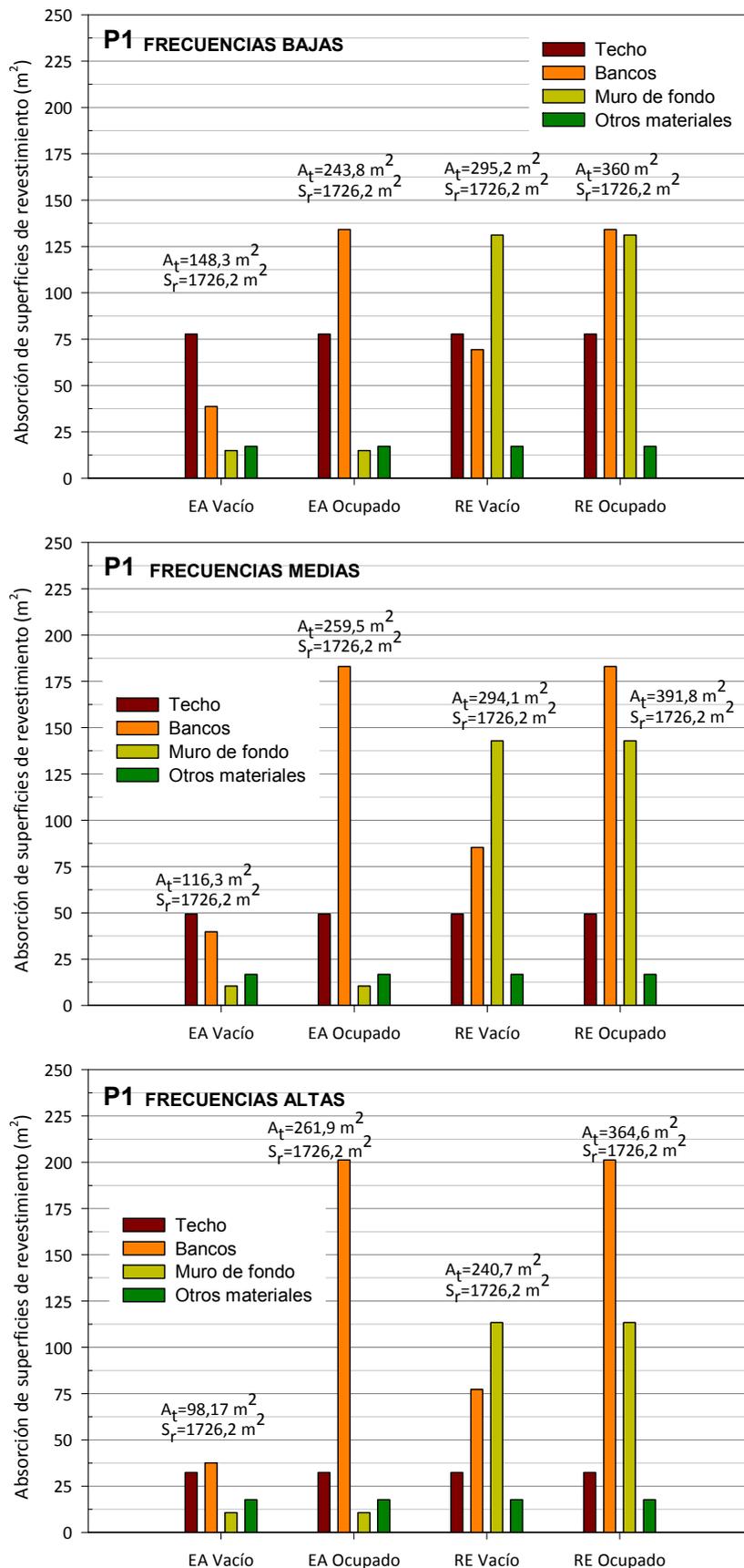


Figura A2.2. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m^2). Valores promedio de frecuencias bajas, medias y altas del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica 1 (RE). Iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca.

IGLESIA DEL COLEGIO DE LA ASUNCIÓN CUESTABLANCA
Propuesta 2

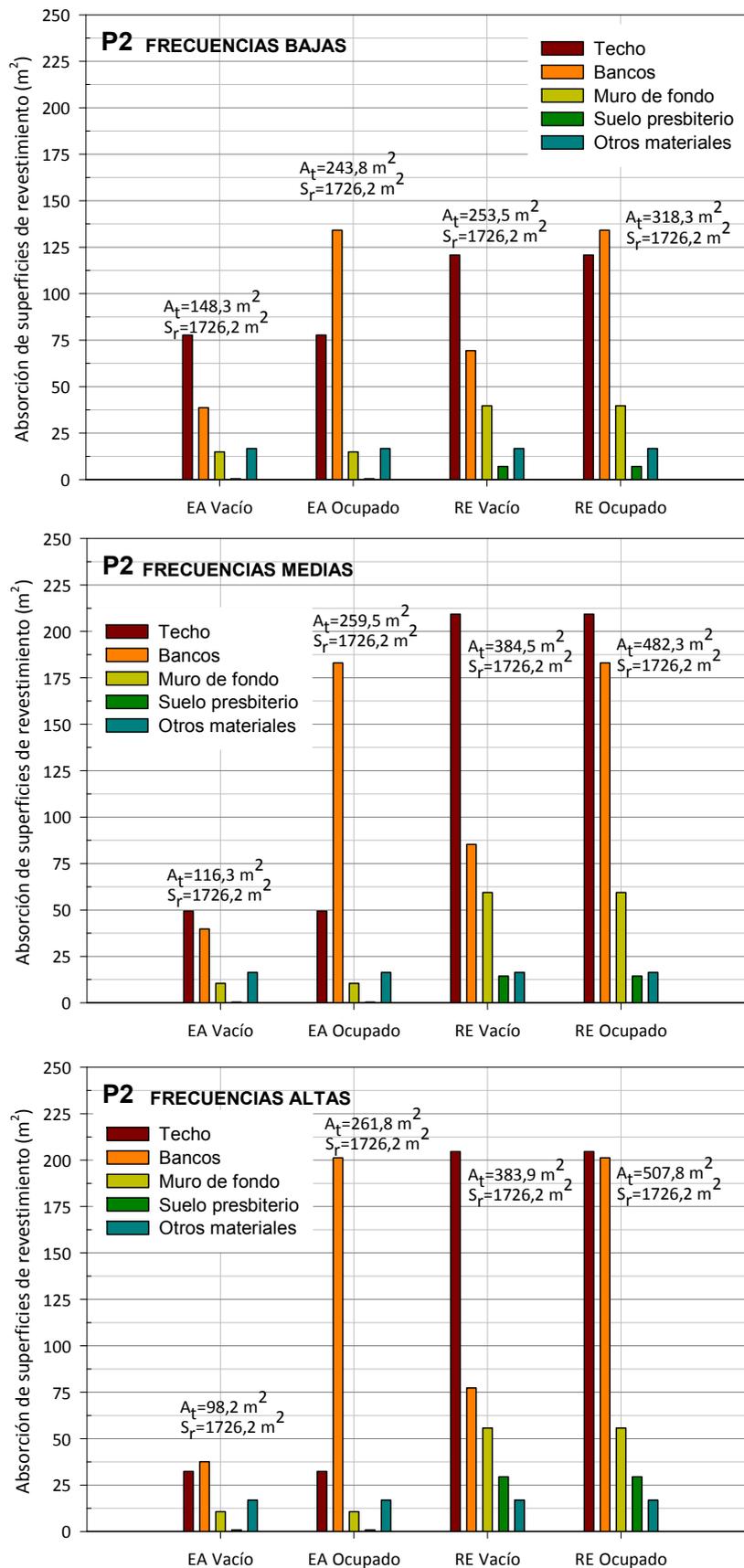


Figura A2.3. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promedio de frecuencias bajas, medias y altas del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica 2 (RE). Iglesia del colegio de la Asunción Cuestablanca.

IGLESIA DE SANTA MARÍA MAGDALENA

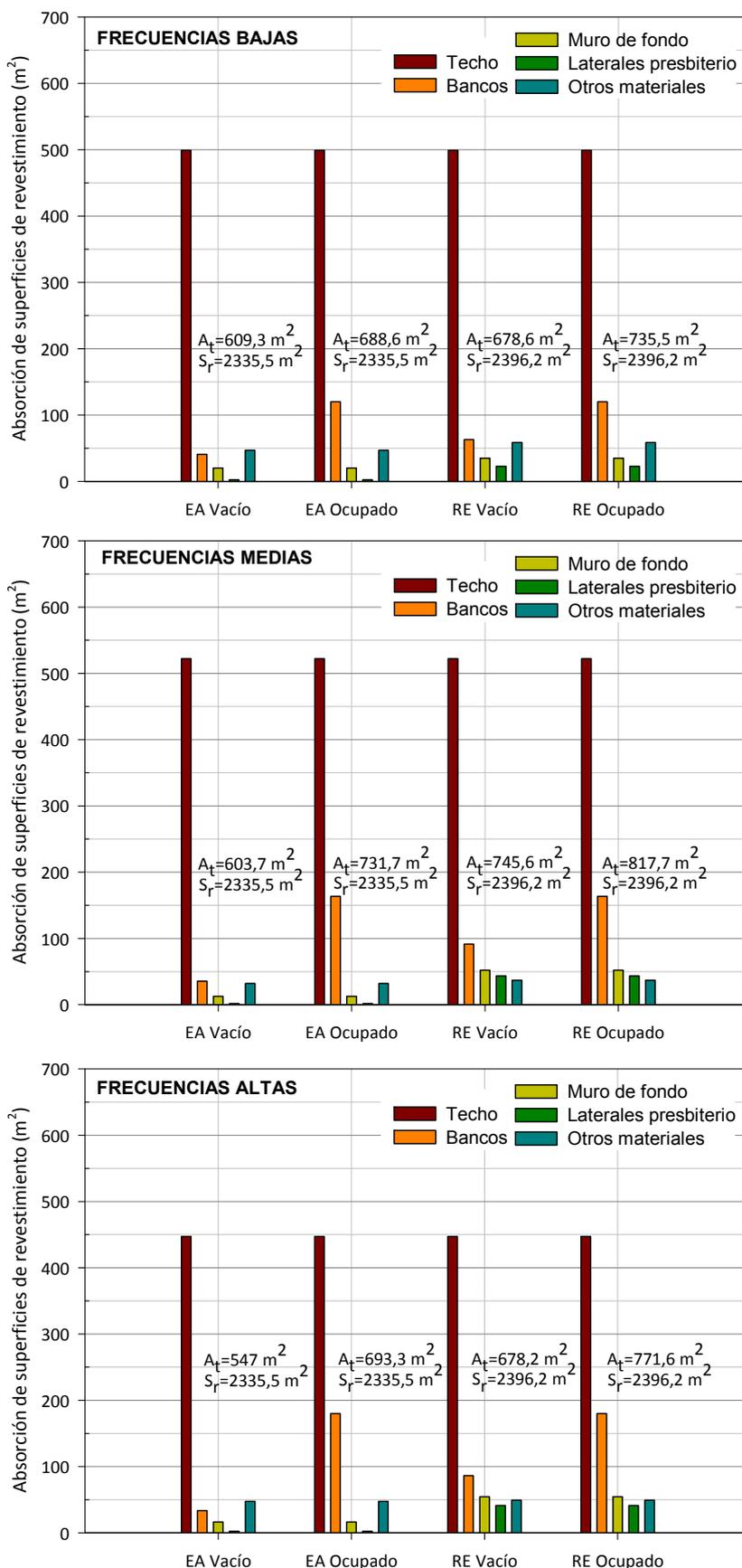


Figura A2.4. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promedio de frecuencias bajas, medias y altas del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia de Santa María Magdalena.

IGLESIA DE SANTA CRUZ DE OLEIROS
Propuesta 1

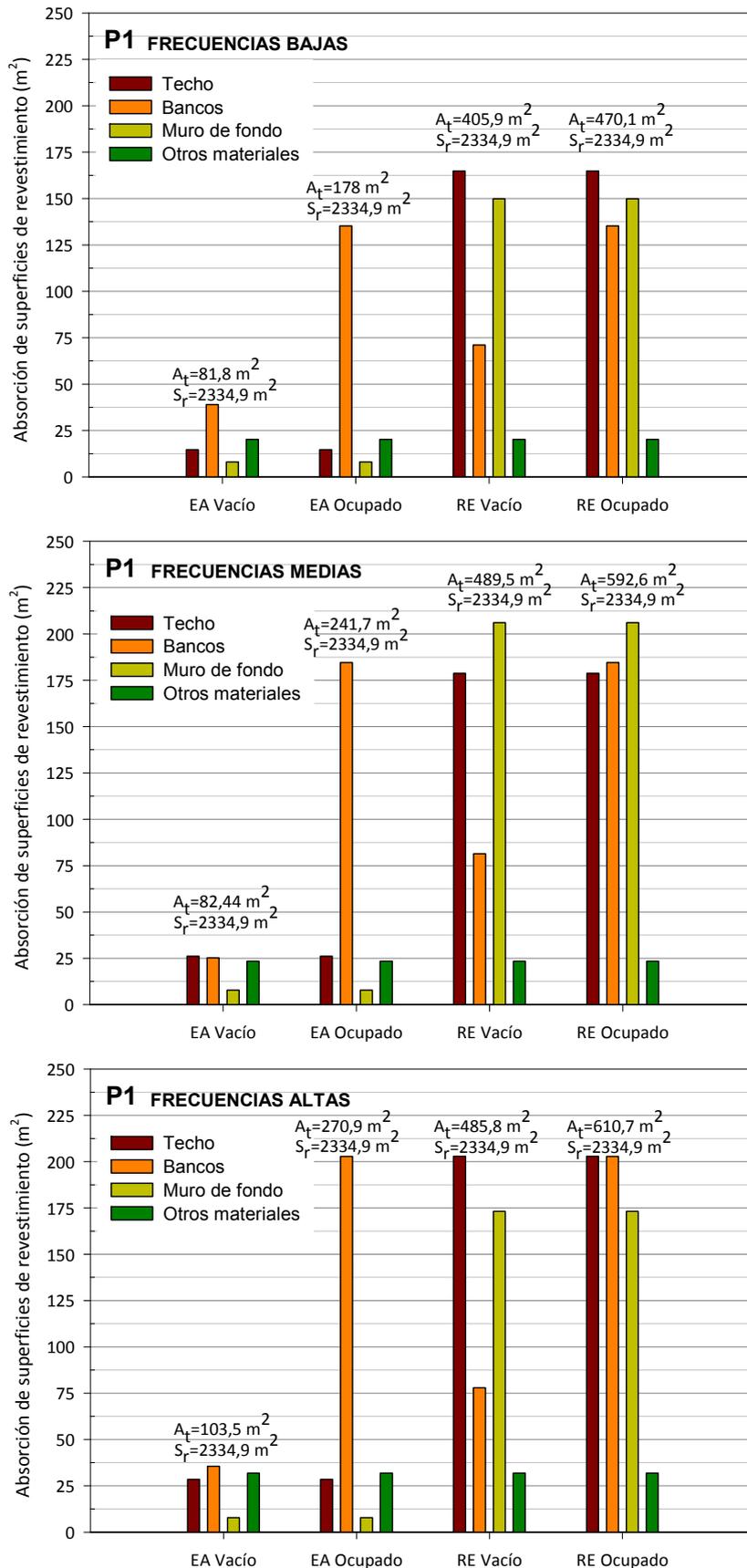


Figura A2.5. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promedio de frecuencias bajas, medias y altas del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica 1 (RE). Iglesia de Santa Cruz de Oleiros.

IGLESIA DE SANTA CRUZ DE OLEIROS Propuesta 2

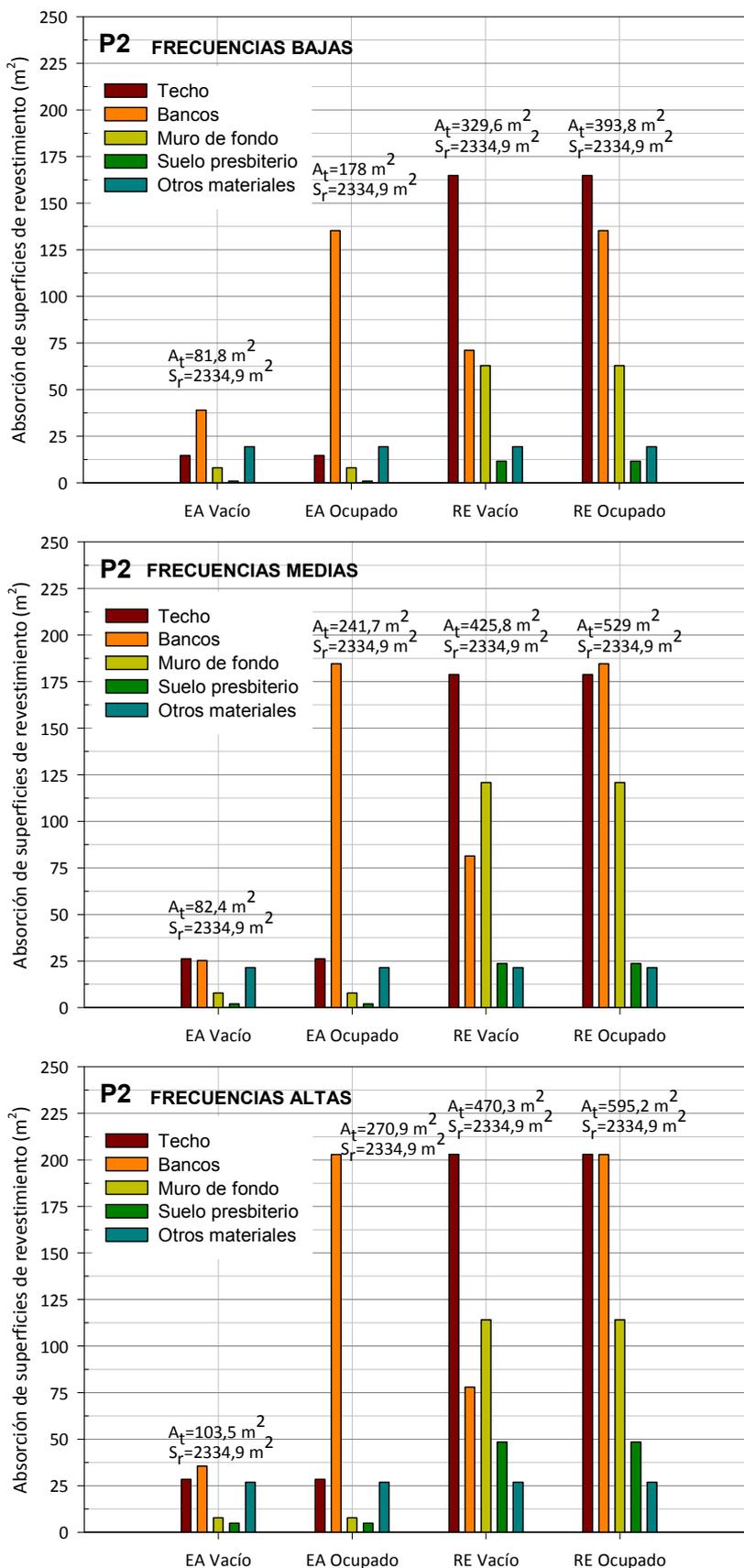


Figura A2.6. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promedios de frecuencias bajas, medias y altas del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica 2 (RE). Iglesia de Santa Cruz de Oleiros.

IGLESIA DE NUESTRA SEÑORA FLOR DEL CARMELO

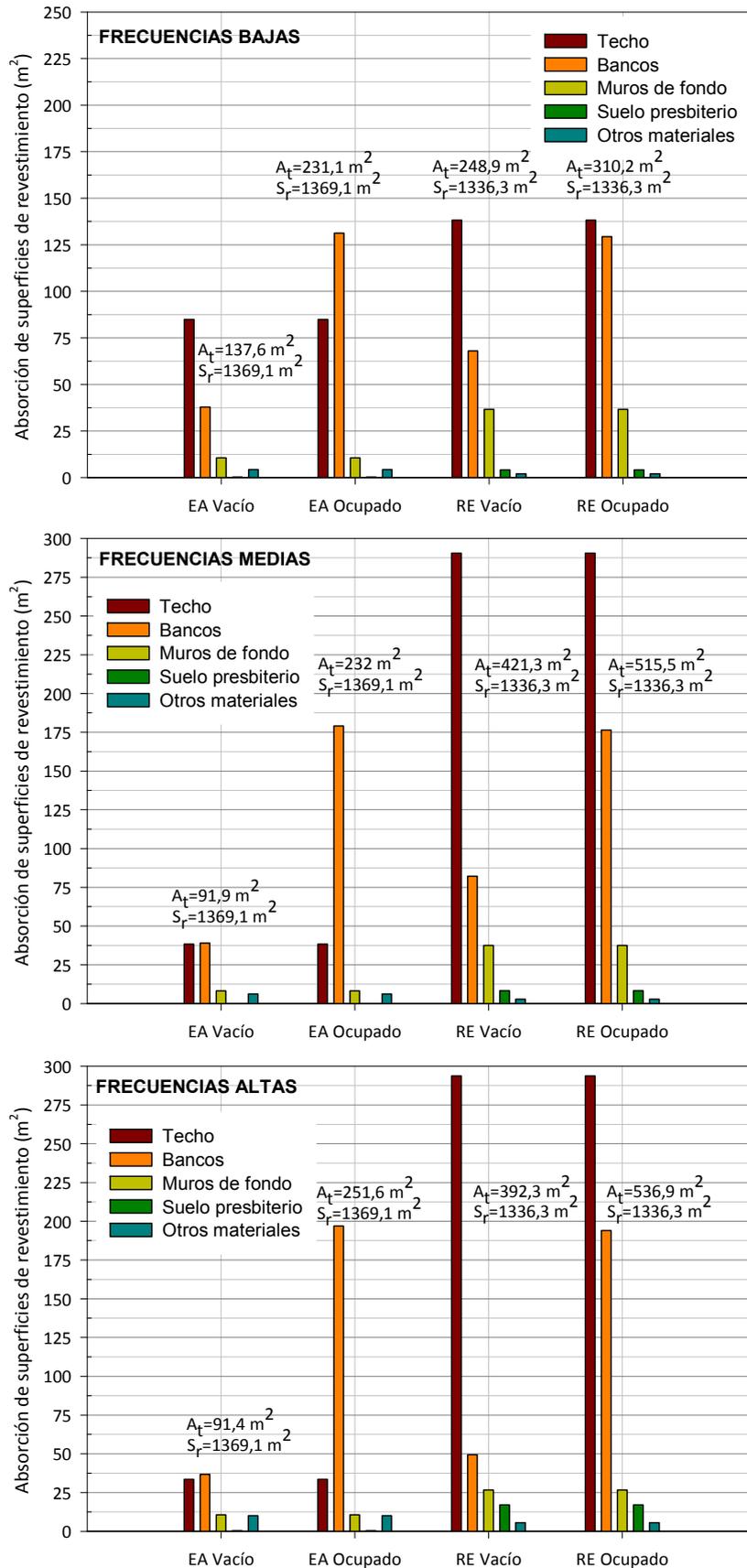


Figura A2.7. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promedio de frecuencias bajas, medias y altas del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia de Nuestra Señora Flor del Carmelo.

IGLESIA DE SANTIAGO. PUMAREJO DE TERA

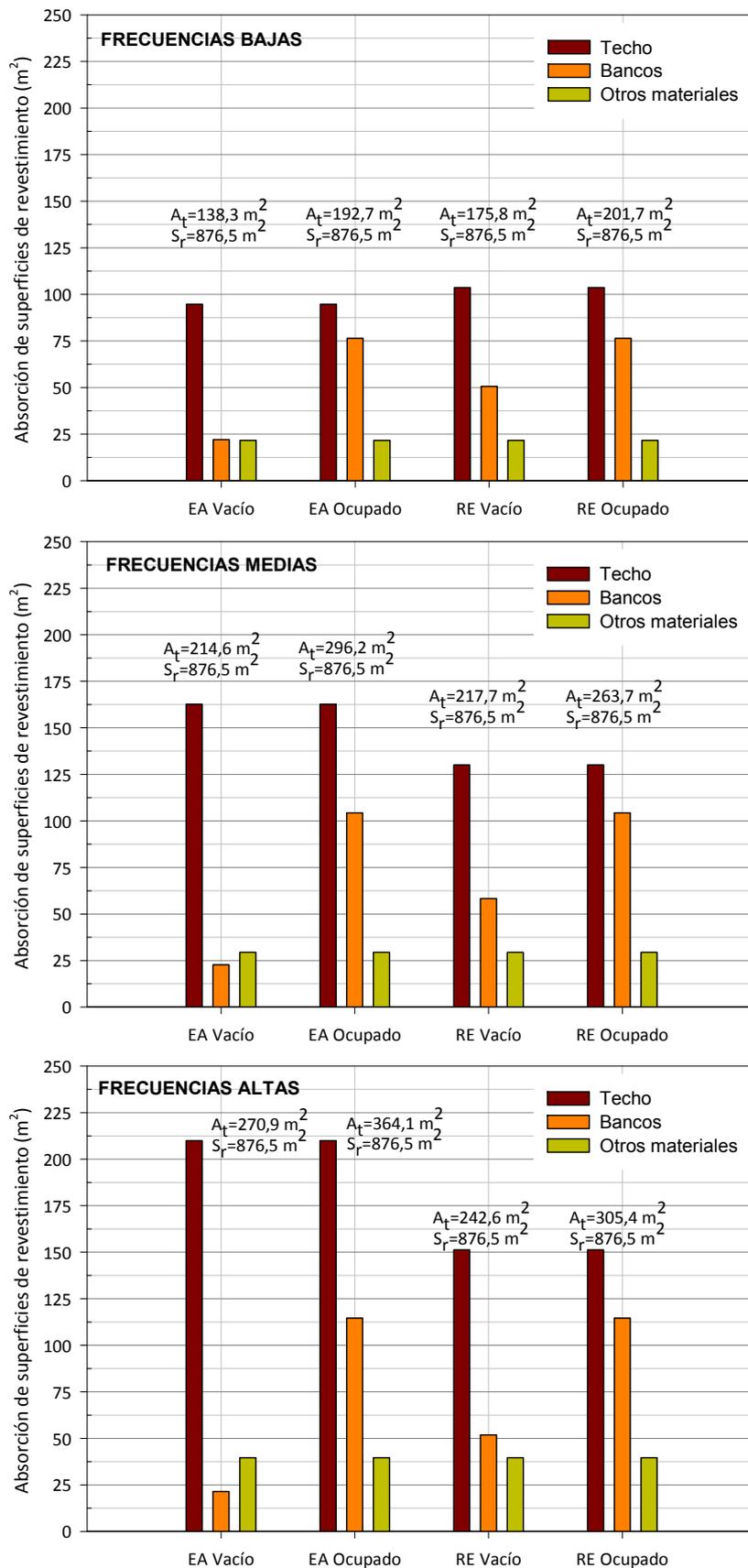


Figura A2.8. Absorción sonora de las superficies de revestimiento (m²). Valores promedios de frecuencias bajas, medias y altas del estado actual (EA) y de la propuesta de rehabilitación acústica (RE). Iglesia de Santiago, Pumarejo de Tera.

ANEXO 3

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN Y DISPERSIÓN SONORA (DVD)

En el DVD adjunto, se presenta un listado de los coeficientes de absorción y dispersión sonora, en bandas de octava, de los materiales empleados en las simulaciones del campo sonoro de las iglesias de la muestra, así como la fuente de donde se han obtenido.

El esquema de presentación es el siguiente:

CÓDIGO DEL MATERIAL = < COEF. ABSORCIÓN (%)> L < COEF. DISPERSIÓN (%)>

C: Categoría del material

D: Descripción breve del material

F: Fuente

Las categorías de materiales se ordenan según nueve apartados:

- (1) Suelos
- (2) Techos
- (3) Revestimientos duros
- (4) Revestimientos de madera
- (5) Puertas
- (6) Ventanas
- (7) Materiales absorbentes
- (8) Bancos de iglesias
- (9) Varios

ANEXO 4

RESULTADOS MEDICIÓN *IN SITU* Y SIMULACIONES INFORMÁTICAS (DVD)

En el DVD adjunto, se facilitan los resultados de los parámetros acústicos medidos *in situ* y los obtenidos con las simulaciones informáticas del estado actual y con las propuestas de rehabilitación acústica.

En el caso de la medición acústica, para cada iglesia, se aportan dos ficheros: el primero contiene los resultados de todos los parámetros acústicos para cada posición de la fuente y, el segundo, corresponde al espectro de ruido de fondo medido.

Los ficheros son los siguientes:

[Resultados Medición *in situ*]

01_Santa Ana.xls
02_Cuestablanca.xls
03_Santa María Magdalena.xls
04_Santa Cruz.xls
05_Flor del Carmelo.xls
06_Pumarejo de Tera.xls

[Ruido de fondo]

01_RF_Santa Ana.txt
02_RF_Cuestablanca.txt
03_RF_Santa María Magdalena.txt
04_RF_Santa Cruz.txt
05_RF_Flor del Carmelo.txt
06_RF_Pumarejo de Tera.txt

Los resultados de las simulaciones del estado actual constan, para cada iglesia, de un fichero por cada posición de la fuente (F1, F2 o F3) y cada hipótesis de ocupación (vacío y ocupado).

Los ficheros son los siguientes:

[Resultados Simulaciones Estado Actual]

[01_Santa Ana_EA]

01_01_Santa Ana_EA_Vacío_Salida F1_HIP_0A.xlsx
01_02_Santa Ana_EA_Ocupado_Salida F1_HIP_0B.xlsx
01_03_Santa Ana_EA_Vacío_Salida F2_HIP_0A.xlsx
01_04_Santa Ana_EA_Ocupado_Salida F2_HIP_0B.xlsx

[02_Cuestablanca_EA]

02_01_Cuestablanca_EA_Vacío_Salida F1_HIP_0A.xlsx
02_02_Cuestablanca_EA_Ocupado_Salida F1_HIP_0B.xlsx
02_03_Cuestablanca_EA_Vacío_Salida F2_HIP_0A.xlsx
02_04_Cuestablanca_EA_Ocupado_Salida F2_HIP_0B.xlsx

[03_Santa María Magdalena_EA]

03_01_SM Magdalena_EA_Vacío_Salida F1_HIP_0A.xlsx
03_02_SM Magdalena_EA_Ocupado_Salida F1_HIP_0B.xlsx

03_03_SM Magdalena_EA_Vacío_Salida F2_HIP_OA.xlsx
 03_04_SM Magdalena_EA_Ocupado_Salida F2_HIP_OB.xlsx

[04_Santa Cruz_EA]

04_01_Santa Cruz_EA_Vacío_Salida F1_HIP_OA.xlsx
 04_02_Santa Cruz_EA_Ocupado_Salida F1_HIP_OB.xlsx
 04_03_Santa Cruz_EA_Vacío_Salida F2_HIP_OA.xlsx
 04_04_Santa Cruz_EA_Ocupado_Salida F2_HIP_OB.xlsx
 04_05_Santa Cruz_EA_Vacío_Salida F3_HIP_OA.xlsx
 04_06_Santa Cruz_EA_Ocupado_Salida F3_HIP_OB.xlsx

[05_Flor del Carmelo_EA]

05_01_Flor del Carmelo_EA_Vacío_Salida F1_HIP_OA.xlsx
 05_02_Flor del Carmelo_EA_Ocupado_Salida F1_HIP_OB.xlsx

[06_Pumarejo de Tera_EA]

06_01_Pumarejo de Tera_EA_Vacío_Salida F1_HIP_OA.xlsx
 06_02_Pumarejo de Tera_EA_Ocupado_Salida F1_HIP_OB.xlsx
 06_03_Pumarejo de Tera_EA_Vacío_Salida F2_HIP_OA.xlsx
 06_04_Pumarejo de Tera_EA_Ocupado_Salida F2_HIP_OB.xlsx

En cuanto a las simulaciones del modelo informático con las propuestas de rehabilitación acústica, para cada iglesia se aportan, normalmente, cuatro ficheros: los dos primeros corresponden a la propuesta para cada hipótesis de ocupación (vacío u ocupado) con la fuente en posición 1; los dos siguientes incluyen además el apoyo electroacústico.

Para las iglesias de Cuestablanca y Santa Cruz, el criterio seguido es el mismo pero los ficheros se duplican: cuatro corresponden a la propuesta 1 (PRA_1) y otros cuatro a la propuesta 2 (PRA_2). Además, para la iglesia de Santa Cruz, se facilitan los cálculos de ambas propuestas de rehabilitación con la fuente F2, posición del emisor empleada para el cálculo del STI.

Los ficheros son los siguientes:

[Resultados Simulaciones Propuestas de Rehabilitación Acústicas]

[01_Santa Ana_PRA]

01_01_Santa Ana_PRA_Vacío_Salida F1_HIP_1A.xlsx
 01_02_Santa Ana_PRA_Ocupado_Salida F1_HIP_1B.xlsx
 01_03_Santa Ana_PRA_Vacío_Salida HIP_2A_AE.xlsx
 01_04_Santa Ana_PRA_Ocupado_Salida HIP_2B_AE.xlsx

[02_Cuestablanca_PRA]

02_01_Cuestablanca_PRA_1_Vacío_Salida F1_HIP_1A.xlsx
 02_02_Cuestablanca_PRA_1_Ocupado_Salida F1_HIP_1B.xlsx
 02_03_Cuestablanca_PRA_2_Vacío_Salida F1_HIP_2A.xlsx
 02_04_Cuestablanca_PRA_2_Ocupado_Salida F1_HIP_2B.xlsx
 02_05_Cuestablanca_PRA_1_Vacío_Salida HIP_3A_AE.xlsx
 02_06_Cuestablanca_PRA_1_Ocupado_Salida HIP_3B_AE.xlsx
 02_07_Cuestablanca_PRA_2_Vacío_Salida HIP_4A_AE.xlsx
 02_08_Cuestablanca_PRA_2_Ocupado_Salida HIP_4B_AE.xlsx

[03_Santa María Magdalena_PRA]

03_01_SM Magdalena_PRA_Vacío_Salida F1_HIP_1A.xlsx
 03_02_SM Magdalena_PRA_Ocupado_Salida F1_HIP_1B.xlsx
 03_03_SM Magdalena_PRA_Vacío_Salida HIP_2A_AE.xlsx

03_04_SM Magdalena_PRA_Ocupado_Salida HIP_2B_AE.xlsx

[04_Santa Cruz_PRA]

04_01_Santa Cruz_PRA_1_Vacío_Salida F1_HIP_1A.xlsx
04_02_Santa Cruz_PRA_1_Ocupado_Salida F1_HIP_1B.xlsx
04_03_Santa Cruz_PRA_2_Vacío_Salida F1_HIP_2A.xlsx
04_04_Santa Cruz_PRA_2_Ocupado_Salida F1_HIP_2B.xlsx
04_05_Santa Cruz_PRA_1_STI_Vacío_Salida F2_HIP_1A.xlsx
04_06_Santa Cruz_PRA_1_STI_Ocupado_Salida F2_HIP_1B.xlsx
04_07_Santa Cruz_PRA_2_STI_Vacío_Salida F2_HIP_2A.xlsx
04_08_Santa Cruz_PRA_2_STI_Ocupado_Salida F2_HIP_2B.xlsx
04_09_Santa Cruz_PRA_1_Vacío_Salida HIP_3A_AE.xlsx
04_10_Santa Cruz_PRA_1_Ocupado_Salida HIP_3B_AE.xlsx
04_11_Santa Cruz_PRA_2_Vacío_Salida HIP_4A_AE.xlsx
04_12_Santa Cruz_PRA_2_Ocupado_Salida HIP_4B_AE.xlsx

[05_Flor del Carmelo_PRA]

05_01_Flor del Carmelo_PRA_Vacío_Salida F1_HIP_1A.xlsx
05_02_Flor del Carmelo_PRA_Ocupado_Salida F1_HIP_1B.xlsx
05_03_Flor del Carmelo_PRA_Vacío_Salida HIP_2A_AE.xlsx
05_04_Flor del Carmelo_PRA_Ocupado_Salida HIP_2B_AE.xlsx

[06_Pumarejo de Tera_PRA]

06_01_Pumarejo_PRA_Vacío_Salida F1_HIP_1A.xlsx
06_02_Pumarejo_PRA_Ocupado_Salida F1_HIP_1B.xlsx
06_03_Pumarejo_PRA_Vacío_Salida HIP_2A_AE.xlsx
06_04_Pumarejo_PRA_Ocupado_Salida HIP_2B_AE.xlsx

DIRECTORES:
Dr. ÁNGEL LUIS LEÓN RODRÍGUEZ
Dr. MIGUEL GALINDO DEL POZO



DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS I
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE SEVILLA