



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

ESTUDIO DEL ESTADO ACÚSTICO DE DOS IGLESIAS PATRIMONIALES
DE QUITO (LA CATEDRAL Y LA COMPAÑÍA DE JESÚS)

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniero de Sonido y Acústica.

Profesor guía: Ing. Luis Bravo

Autor: Carlos Aulestia Valencia

2010

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos para un adecuado desarrollo del tema escogido, y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Luis Bravo Moncayo
Ingeniero Acústico
C.C. 1711710606

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Carlos Aulestia Valencia

C.C. 1714965041

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas las personas que facilitaron esta investigación proporcionando apertura e información con altruismo y solidaridad.

Gracias a la Fundación Iglesia La Compañía, al Arquitecto Luis Subía, a Carmen Zurita, su amabilidad y apertura fueron una gran motivación.

Gracias a la ingeniera Magaly Vásquez y la Fundación Iglesia de La Catedral.

Un agradecimiento especial a los colaboradores del FONSAL.

Gracias también a todas las personas que encontré en el camino y colaboraron, participaron o motivaron de alguna manera este andar que al final resultó muy corto. Gracias a mis padres por su dedicación, a Cecy y David Cano por su gran ayuda, a Luis Bravo por su apoyo e interés, a Umberto Berardi, Jon y Josune Leceta Aulestia , a mis hermanas quienes siempre creen en mí y un agradecimiento también especial a la Universidad De Las Américas por el conocimiento invaluable que ahí adquirí.

DEDICATORIA

A la alegría...

A mi familia, a mis verdaderos amigos,
a Nia: este símbolo del cierre de un
ciclo implica el camino que desde hoy
podremos trazar.

Y especialmente a todos quienes se
olvidan de pensar en sí mismos y
trabajan por hacer de la ciencia y el
conocimiento un camino hacia el
bienestar de la humanidad.

RESUMEN

El establecimiento de la cultura europea en medio de las sociedades aborígenes americanas, representó la adquisición de nuevos conocimientos, creencias y costumbres. Particularmente, la religión, fue la visión más fuerte e influyente que el nuevo continente adquirió de España. La fundación de San Francisco de Quito, en 1534, implicó la construcción de una ciudad matizada con aquella enorme influencia recibida de Europa, y su edificación la convirtió en la ciudad más importante en lo religioso, dentro de América Latina. El estilo artístico de la época, las tendencias y la misma cultura indígena, se manifiestan en toda representación artística evidenciable de la Escuela Quiteña.

No obstante, es aún inexplorado el conocimiento que llevó a los constructores a edificar de la manera en que lo hicieron. Los templos católicos coloniales, representan la mayor expresión de arte y arquitectura de esa época, pero a la vez conforman una importante plaza en los espacios de concurrencia pública.

Este trabajo busca consecuentemente, aportar en cuanto al conocimiento del patrimonio sonoro de ciertos templos patrimoniales de Quito, para que así, sea tomado en cuenta y respetado por su valor histórico, tan importante como su misma arquitectura.

ABSTRACT

European culture establishment between American aboriginal societies involved the acquisition of new knowledge, beliefs and customs. Religion was particularly the strongest and the most influent vision the new world acquired from Spain. San Francisco de Quito foundation, in 1534, implied the construction of a city, colored by that huge influence received from Europe and its establishment made it became the most important city for catholic religion in Latin America. The artistic style of that time, the tendencies and even the same indigenous culture, are shown in every artistic expression of *Escuela Quiteña*

Although, is still unexplored the knowledge which lead the constructors to build the way they did. Colonial catholic temples represent the major expression among the art and architecture of the time, but, at the same time they take an important position in public attendance places.

This work, tries consequently, to contribute in knowing the patrimonial sound features of some patrimonial temples of Quito, so that it could be taken in place and respected for its historical worth which is as important as its own architectural characteristics.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. CAPÍTULO I	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.1.1 BREVE HISTORIA DE LOS TEMPLOS SUJETOS A ESTE ESTUDIO	2
1.1.2 REALIDAD LOCAL ACERCA DE LA ACÚSTICA EN LAS IGLESIAS COLONIALES	5
1.2 HIPOTESIS	5
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
2. CAPÍTULO II	7
2.1. MARCO TEÓRICO	7
2.1.1. LA ACÚSTICA EN LA ANTIGÜEDAD	7
2.1.2. GENERALIDADES SOBRE LA ACÚSTICA EN LAS IGLESIAS COLONIALES DE QUITO	9
2.2. GENERALIDADES SOBRE EL PATRIMONIO CULTURAL	12
2.2.1. NOCIONES DE PATRIMONIO CULTURAL	12
2.2.2. LEY DE PATRIMONIO CULTURAL VIGENTE EN EL ECUADOR.	13
2.3. CONCEPTOS Y DEFINICIONES	15
2.3.1. TIEMPO DE REVERBERACIÓN (T60)	15
2.3.2. INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA: %ALCONS Y STI/RASTI. 19	19
2.3.3. CALIDEZ ACÚSTICA (BR) Y BRILLO ACÚSTICO (Br)	23
2.3.4. ÍNDICE DE CLARIDAD DE LA VOZ (C50)	24
2.3.5. ÍNDICE DE CLARIDAD DE MUSICAL (C80)	24
2.3.6. ÍNDICE DE DEFINICIÓN (D50)	25
2.4. GENERALIDADES SOBRE AISLAMIENTO ACÚSTICO	25
2.4.1. RUIDO DE FONDO	26

3. CAPÍTULO III	34
3.1 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LOS ESPACIOS..	34
3.1.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESPACIOS.....	34
3.1.2. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN	42
4. CAPÍTULO IV	46
4.1 METODOLOGÍA	46
4.1.1 METODOLOGÍA DE LA MEDICIÓN	46
4.1.2 PLANIFICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS.....	53
5. CAPÍTULO V	57
5.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	57
5.1.1 DATOS OBTENIDOS Y GRÁFICOS DESCRIPTIVOS.....	57
5.1.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	68
6. CAPÍTULO VI	88
6.1 DESARROLLO DE UN PROGRAMA EN MATLAB, PARA SIMULACIÓN DE FUENTES SONORAS EN ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS	88
6.1.1 RESUMEN.....	88
6.1.2 ASPECTOS TEÓRICOS.....	89
6.1.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROGRAMA DE APLICACIÓN	91
6.1.4 APLICACIONES	102
7. CAPÍTULO VII	103
7.1. CONCLUSIONES	103
7.2. RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXOS	112

INTRODUCCIÓN

En el diseño y acondicionamiento acústico de espacios arquitectónicos, aspectos como la forma, el volumen, y de manera muy particular: la utilidad destinada al recinto, definen no sólo los objetivos acústicos, sino también los elementos y materiales adecuados. Las iglesias, especialmente las coloniales, a pesar de ser sitios destinados al culto religioso resultan un tanto peculiares porque en ellas convive la palabra con la música. Esta particularidad, así como los aspectos arquitectónicos, que para iglesias antiguas, envuelven de cierto misterio al comportamiento del sonido en su interior; las ha convertido en objeto de estudio para integrar y englobar conocimientos para incrementar aquello que hoy se comprende como la Acústica Arquitectónica, según condiciones de forma, época, elementos en las superficies, entre otros.

Este trabajo, recoge los principales parámetros acústicos evaluados en las iglesias de La Compañía De Jesús y La Catedral Metropolitana, ambas ubicadas en el centro histórico de la ciudad de San Francisco de Quito, en Ecuador. Se presenta también un programa básico de simulación espacial para fuentes sonoras el cual puede utilizarse para simular la ejecución de un sonido no sólo en cualquiera de los puntos analizados en las iglesias estudiadas, sino en cualquier recinto del cual se tenga registrada la respuesta al impulso en audio monofónico. Con estos datos se pretende partir hacia la búsqueda del conocimiento de más aspectos intangibles del Patrimonio Cultural, que enriquezcan aquello que se conoce sobre el arte quiteño, pero que también se manifieste como un gran interés por lo científico dentro del área de la Acústica Arquitectónica en el Ecuador. Los estudios aquí analizados, no son más que un punto de partida de un área que debe continuar creciendo, esperando el momento en que se logre explicar todo ese misterio que representa el poder apreciar las formas con los oídos tanto como con los ojos.

1. CAPÍTULO I

1.1 ANTECEDENTES

La importancia que tienen los templos coloniales dentro del Patrimonio Cultural de la ciudad de San Francisco de Quito, han tornado necesario el evaluarlo, pero esta vez, dentro de otros aspectos hasta hoy no tomados en cuenta. Se ve entonces la importancia de considerar a las características acústicas de tales sitios como parte de ese patrimonio que, aunque intangibles, pueden cuantificarse y caracterizarse a partir de estudios y técnicas que permitan extraer datos que describan la calidad y las características de éstos dentro del punto de vista de la acústica y el sonido, y que expresen en cierto nivel, un aporte científico.

1.1.1 BREVE HISTORIA DE LOS TEMPLOS SUJETOS A ESTE ESTUDIO

La historia acerca de la construcción de ambas iglesias inicia en la primera mitad del siglo XVII, período en el que se vivía el estilo barroco, sin embargo, de entre éstas dos, únicamente la Iglesia De La Compañía es la única que cumple esta tendencia, a pesar de ello, se manifiestan alteraciones asociadas las escuelas de arte encargadas de la decoración, las cuales no eran europeas.

Cabe mencionar que la importancia que se daba a la edificación de un templo, motivada por el poder de la religión, permitió la construcción de una gran cantidad de esta clase de recintos en la ciudad de Quito. Los terrenos y el financiamiento para la construcción eran en gran medida apoyados o cedidos por feligreses como herencia hacia las congregaciones religiosas.

Los materiales de construcción solían obtenerse de canteras cercanas ubicadas en el volcán Pichincha y las cuadrillas de obreros se constituían por indígenas.

1.1.1.1 IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS¹

Las primeras misiones jesuitas llegaron a Quito en 1586 con el fin de fundar en la ciudad, La Compañía. El Cabildo acordó la cesión de las casas aledañas a la iglesia de Santa Bárbara, para la vivienda de los jesuitas, éstos a su vez se involucraron en la consecución de un sitio para la apertura de un colegio, y posteriormente, la fundación de un seminario. La construcción del templo, la expansión del colegio y al mismo tiempo la permuta de las casas para la residencia de la comunidad, se realizó gracias a fieles benefactores.

Tras adquirir el lugar y la licencia para la construcción del templo, se empezaron los trabajos hacia la segunda mitad de 1605, obra que prosiguió con lentitud; a pesar de ello la iglesia se abrió para las celebraciones religiosas.

En 1636, el destacado arquitecto, hermano Marcos Guerra se encargó de la construcción, su experiencia en el reino de Nápoles acarreó testimonios favorables de su obra. El que la obra haya sido concebida por una sola persona, destaca la perfecta unidad de la edificación a pesar de aquellos elementos que fueron construidos posteriormente por otras personas.

La fachada se concluyó el 31 de julio de 1765, pero no fue sino hasta el 12 de abril de 1766 que se ultimaron todos los detalles y el templo quedó terminado. En agosto de 1767, el presidente José Diguja ordena la expulsión de los jesuitas del Ecuador y la iglesia quedó cerrada al culto durante varios años hasta 1781, a pesar de esto, la enseñanza en las unidades educativas jesuitas no se interrumpió. Hacia 1851, se expide un decreto en el que se vuelve a admitir a los jesuitas en el país y les son devueltas sus pertenencias. La comunidad persiste hasta ahora, caracterizándose por la importancia otorgada al cultivo del conocimiento y las artes.

¹ VARGAS, José María, Fr, O.P. Patrimonio Artístico Ecuatoriano, Tercera Edición. Quito, TRAMA Ediciones, 2005, 457p

1.1.1.2 IGLESIA DE LA CATEDRAL METROPOLITANA²

La iglesia de La Catedral ha pasado por numerosas transformaciones, se inició como una primitiva iglesia construida en la primera mitad del siglo XVI, ahí funcionó la primera escuela abierta en Quito, espacio que fue posteriormente reclamado por el primer obispo de la ciudad, Garcí Díaz Arias para fines exclusivamente religiosos. Díaz Arias se mantuvo en convertir la iglesia en una catedral, lo cual logró favorable decisión del rey Felipe II quien mediante cédula apoyaba la construcción de catedrales en lo que era la Audiencia de Lima.

Con el apoyo económico del gobernador, se inicia la construcción de la obra definitiva que reemplazaría a la anterior de adobe y techo de paja. La cantera del Pichincha sirvió como fuente de materiales y la *minga* fue el mecanismo que facilitó el trabajo. Tal voluntad de trabajo comunitario se aprovechó al máximo para conducir y labrar las piedras, hornear los ladrillos y levantar los muros, así, en un lapso de tres años (1562 – 1565) la obra arquitectónica fue construida, luego, se administró la construcción de los altares y la ornamentación interna, el labrado del retablo y el púlpito.

A finales de octubre de 1660, un terremoto hizo necesaria la restauración de La Catedral, lo que se logró pronto, dada a la influencia en el Consejo de Indias, que tenía el entonces obispo. Este proceso se aprovechó de tal manera que se ensanchó la iglesia y construyó la sala capitular y la sacristía. Grandes artistas como Miguel de Santiago, se encargaron de la pintura en el interior.

Un nuevo terremoto en 1797 condujo a una nueva reparación. La construcción del domo se la encargó al arquitecto español Antonio García, con él se introdujo en Quito el neoclasicismo, adoptado para España e Hispanoamérica por Carlos III. García fue requerido en Popayán, de manera que encargó la obra a Manuel Samaniego, el artista más caracterizado entonces. Algunas

² VARGAS, José María, Fr, O.P. Patrimonio Artístico Ecuatoriano, Tercera Edición. Quito, TRAMA Ediciones, 2005, 457p

intervenciones más, aparte de la construcción del domo, se hicieron en la iglesia, esto es algo que acentúa su eclecticismo. La restauración concluyó en 1808, 11 años después de su destrucción.

1.1.2 REALIDAD LOCAL ACERCA DE LA ACÚSTICA EN LAS IGLESIAS COLONIALES

En Quito existen varias iglesias que forman parte de su Patrimonio Cultural. Estos sitios, acogen a cientos de personas tanto para celebraciones religiosas como para visitas turísticas y actividades culturales.

Cada una de estas edificaciones se caracteriza por su forma, su gran tamaño y volumen, lo cual, desde el punto de vista de la acústica, le da ciertas características únicas a cada una de ellas.

1.2 HIPOTESIS

En el caso de los templos patrimoniales, lo sonoro, así como lo visual puede integrarse como parte importante y característica del sitio. La manera como se comporta y percibe el sonido, son muestra de la relación estrecha que mantiene con el diseño de su construcción, por tanto, los parámetros acústicos de estos locales puede considerarse también parte del patrimonio intangible de la ciudad de Quito y son por consiguiente susceptibles de evaluarse y registrarse.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los parámetros acústicos de las iglesias de La Catedral y La Compañía mediante mediciones acústicas *In Situ*, para su consideración como parte intangible del patrimonio, su conservación, apreciación y respeto.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Interpretar mediante herramientas matemáticas y criterios de acústica arquitectónica, los datos obtenidos de las mediciones para evaluar el estado actual de las iglesias de La Compañía y La Catedral en términos técnicos.
- Aportar en términos críticos mediante el análisis de los resultados, la calidad acústica de las iglesias estudiadas, para el conocimiento y la conservación de sus características acústicas como parte del patrimonio integral de Quito DM.
- Realizar un análisis comparativo entre las iglesias de La Compañía y La Catedral a partir de los resultados y de sus características arquitectónicas de manera de establecer similitudes y diferencias que aporten al entendimiento de los recursos técnicos relacionados con la acústica en la época de la colonia.
- Obtener un programa básico para simulación espacial de fuentes sonoras utilizando Matlab para apreciar la calidad sonora de las iglesias estudiadas.

2. CAPÍTULO II

2.1. MARCO TEÓRICO

Los conocimientos de arte durante la época colonial fueron el resultado de la herencia y continua influencia recibidas de aquellos imperios que los cultivaron y transmitieron. El arte colonial quiteño sucede a lo clásico como a otras tendencias y estilos europeos y particularmente españoles en específico como lo mozárabe, lo gótico, lo bizantino, entre otros. De aquí la necesidad de analizar dicho resultado partiendo de un momento en la historia.

2.1.1. LA ACÚSTICA EN LA ANTIGÜEDAD

La acústica como ciencia es una actividad moderna, sustentada tanto con conocimiento adquirido a través de métodos plenamente científicos así como por conocimientos empíricos adquiridos a través de experiencias no menos meritorias y valederas. Sin embargo, la acústica, como práctica es una actividad muy antigua. Los escritos, monumentos, edificaciones e incluso instrumentos musicales –por primitivos que fueran- permiten encontrar datos sobre los conocimientos de la acústica en épocas anteriores. Sin embargo, a partir de la recolección de todo esto, puede concluirse que la acústica es una ciencia que ha dejado muy pocas huellas en la historia.

Para asumir una descripción sistemática de la funcionalidad de las formas y razón de ser de los diversos elementos dentro de las iglesias coloniales (lo cual fue hecho con aplicación del conocimiento hasta entonces vigente, así como códigos propios del estilo y forma cultural que se vivía durante la concepción misma de las edificaciones), debe analizarse precisamente la evolución de la ciencia acústica y su relación con el arte a lo largo del tiempo.

Los primeros estudios conocidos se le adjudican a Pitágoras, quien se concentró en el estudio de la relación que guarda la longitud del cuerpo

vibrante y la altura tonal del sonido que produce, lo que dio origen a la famosa teoría de la música de las esferas (el sonido que producen los planetas en su estado vibratorio).

La acústica adquirió cierta importancia para la civilización griega, donde esta ciencia encontró su camino más notable por medio de las artes escénicas. Las representaciones teatrales no tuvieron gran importancia sino hasta la época de Temístocles, tiempo en el cual se destacó el teatro de Atenas, construido en esa ciudad hacia el 480 A.C, junto con el templo de Baco. Es muy importante notar los elementos arquitectónicos que inciden en la acústica de los locales, es decir, el sitio que se elegía para la construcción, así como las paredes, los asientos, las superficies levantadas sobre los escenarios o en algún sitio del teatro, e incluso las máscaras utilizadas por los actores durante su interpretación.

Los teatros griegos se construían sobre laderas, para así favorecer la observación, evitar sombras acústicas y obtener un bajo ruido de fondo. Por otro lado estaba la dirección que comúnmente tomaría el viento en esos lugares, favoreciendo la recepción del sonido por parte del público. En los escenarios se erguía una pared que actuaba como reflector de la voz emitida por los actores, lo cual funcionaba como refuerzo para el sonido que se dirigía al público, además de evitar las vistas innecesarias de los asistentes hacia la parte posterior del escenario y actuar como muralla aislante de ruido hacia dentro del teatro. Otro detalle muy determinante lo constituyeron los asientos; por ejemplo en el caso del teatro Epidaurus, un teatro con una capacidad para 14 000 personas, en el que los asistentes de la última fila aún pueden escuchar con claridad los diálogos provenientes del escenario. Un estudio reciente, realizado por el Instituto Tecnológico de Georgia determinó que en ese teatro el papel más importante de todos, lo desempeñó el conjunto de asientos ubicados en el recinto la clave consiste en su disposición y material de construcción (la caliza); elementos que hicieron que los asientos funcionaran

como un panel difusor por sobre los 500 Hz, abarcando el rango de la voz humana.³

El arte clásico (de la edad de las civilizaciones griega y romana, aproximadamente entre el siglo VIII A.C. hasta el III D.C.) abarca una gran cantidad de conocimientos y técnicas que fueron influyendo y también transmitiéndose a lo largo del tiempo durante la cronología del arte. La mayor influencia artística en el mundo occidental ha sido la perteneciente al imperio romano, la cual, debido a las ocupaciones por la conquista de Grecia, es más bien el reflejo del contagio cultural que recibiera Roma a pesar de su poderoso dominio.

Hacia la época colonial, específicamente, la manera en la que se construían las edificaciones así como la manera en la que se decoraban éstas, estaba basada en aquellos estándares heredados mayormente por el arte clásico a España (proporciones, detalles, orden de aparición de éstos, entre otros aspectos). La colonia en Quito se ubicó entre los períodos del Renacimiento (S. XV y XVI) y del Barroco (S. XVII hasta la primera mitad del S. XVIII), cada uno con sus propios códigos, pero también con las mismas raíces de la estética occidental; sin embargo. Las iglesias coloniales se caracterizan por ser de construcción Barroca en su mayor parte y por estar igualmente decoradas.

2.1.2. GENERALIDADES SOBRE LA ACÚSTICA EN LAS IGLESIAS COLONIALES DE QUITO

Quito fue, dentro de toda América, la ciudad más importante en lo religioso. España escogió la ciudad para la evangelización.

Es necesario mencionar que hay una fuerte e importante combinación de aspectos propios del mismo Reino de Quito y la recién descubierta América, ya

³<http://www.solociencia.com/arqueologia/07050202.htm>

<http://www.youtube.com/watch?v=H7Td1Jk4zlo>

sea características netamente andinas o incásicas, - como la importancia del sol, la luna y otros astros-, tanto física como iconográficamente, las características de los cuerpos –mestizos- representados en la plástica (lo que acentúa aún más la búsqueda característica de la perfección) y algunos sistemas de representación utilizados para culturizar a la población en aquellos días, además de un notable eclecticismo entre estilos europeos.

La consecución de un buen acondicionamiento acústico respondía principalmente a la correcta elección de los materiales de construcción y de las formas utilizadas para la decoración y la disposición de los ornamentos mismos (retablo, púlpito, altares, coro, y demás). Los materiales más comunes solían ser la piedra, obtenida de las canteras cercanas a las que se ubicaban las recién fundadas ciudades, el yeso, la madera y el pan de oro. Autores de la época justifican la utilización de los materiales y las formas no sólo como el cumplimiento de lo estético acorde a la época, sino también como camino para conseguir equilibrio tonal, brillo y claridad y color en el sonido.

El Barroco, un estilo utilizado por la religión católica para la representación de la grandeza de Dios, destinó toda actividad a lo religioso, sin exceptuar la música, la cual era compuesta mayormente por encargo, de manera que puede suponerse una amplia relación entre el compositor y la sala, que en varios casos era la misma iglesia, entonces las obras musicales eran el resultado de un compromiso entre los parámetros acústicos de la sala y la percepción que el autor tenía de la composición que iba interpretando durante la conducción de las melodías. Todo esto se cumplió también en la época colonial en Quito, como consecuencia de la presencia europea y de su arte en América.

La música siempre ha sido un arte muy importante para la alabanza religiosa y, en la colonia ésta sirvió para acercar a los indígenas a las nuevas creencias que se les iba imponiendo. Esta importancia de la que gozó la música en la religión influyó en el diseño de los templos, de aquí que, cuando la palabra le fue restando importancia a la melodía, como en el caso de los templos

protestantes o en épocas posteriores para la misma religión católica, fue necesario un volumen más pequeño de las construcciones, de manera que no se afecte la inteligibilidad debido a la reverberación.

En la colonia no existían sistemas electroacústicos (microfonía y amplificación), así que para garantizar la escucha de los asistentes a las iglesias era necesario hacer uso de los parámetros acústicos de los templos. Los diseños curvilíneos introducidos en la arquitectura producían varios efectos, algunos de ellos beneficiosos y otros no. Un caso muy analizado es el de las galerías de susurros, el cual es un efecto que se produce por reflexiones en superficies curvas cóncavas o convexas. El efecto se muestra mediante la acústica geométrica a continuación en la figura 2.1:

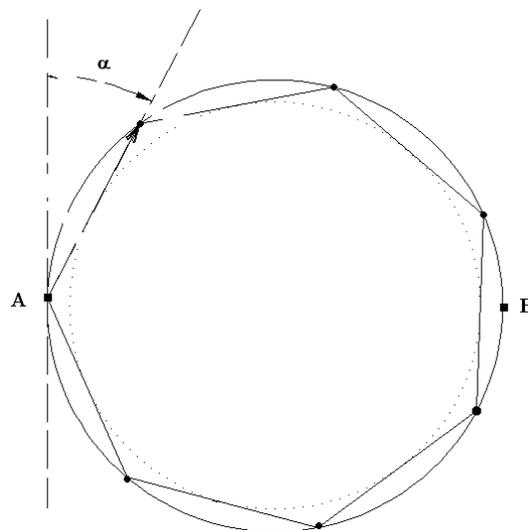


Figura 2.1. – Recorrido del sonido en una galería de susurros.

Elaboración propia.

Puede observarse que un sonido que parta desde un punto en la circunferencia que comprenda el espacio (punto A) con dirección (inclinación α) hacia otro punto sobre la misma, no experimenta un rompimiento del frente de ondas, sino que es reflejado sucesivamente redirigiendo el sonido hacia determinados puntos a lo largo de la superficie ocasionando sombras acústicas en algunas

regiones (punto B) del área encerrada por la circunferencia y puntos de acumulación energética en otros.

La utilización adecuada de este fenómeno era útil para efectos de difusión sonora, aprovechando las reflexiones se podía dar mayor alcance al sonido (hasta alrededor de los 30m según verificaciones en la práctica) y también era posible redireccionarlo. Un ejemplo de la aplicación que tuvo este fenómeno en algunas iglesias fue la confesión: haciendo uso de las galerías de susurros, las personas podían confesarse sin mostrar su rostro, e incluso esto permitía la confesión de personas con enfermedades infectocontagiosas.

Otros elementos arquitectónicos utilizados en las iglesias de La Compañía de Jesús y La Catedral –las cuales son el objeto de este estudio- constituyen el artesanado, las cúpulas y arcos (con un efecto similar al de las galerías de susurros).

2.2. GENERALIDADES SOBRE EL PATRIMONIO CULTURAL

2.2.1. NOCIONES DE PATRIMONIO CULTURAL

El Patrimonio Cultural es el legado de las actividades y creaciones del hombre que ha implantado y desarrollado a lo largo de su historia.

Patrimonio Cultural engloba aspectos tangibles e intangibles, como mecanismo de identificación cultural y social, y camino a la valoración y respeto del ser, constituyéndose además en una fuente de conocimiento acerca de lo que esa sociedad es y representa dentro de la historia.

Es fundamental la protección del Patrimonio Cultural de las naciones, esto se logra mediante varios medios, entre los que figuran los citados a continuación:

- “Identificar, registrar, estudiar, difundir, conservar, restaurar los bienes.

- Elaborar normas legales, leyes y reglamentos encaminados a proteger y preservar los bienes físicos e inmateriales.
- Inventariar y mantener actualizado el registro de los bienes patrimoniales.
- Regular el comercio de bienes culturales”.

(Fuente: VALDEZ, Francisco.2006. Protección del Patrimonio Cultural: Bienes materiales (del Lirismo a la Realidad). En: Seminario: CULTURA Y POLÍTICA EXTERIOR. 3-31).

2.2.2. LEY DE PATRIMONIO CULTURAL VIGENTE EN EL ECUADOR

El Estado ecuatoriano, interesado en la protección y promoción de su patrimonio, crea la Ley de Patrimonio Cultural, cuyo objeto es regir las actividades relacionadas con el manejo de todos lo bienes patrimoniales en el país. En el año de 1978, se crea mediante codificación a la Ley de Patrimonio Cultural, el Instituto de Patrimonio Cultural, el cual está adscrito a la Casa de La Cultura, delegando además las funciones a su directorio, compuesto por los siguientes miembros:

- a. El Ministro de Educación y Cultura o un Delegado suyo para presidirlo;
- b. El Ministro de Defensa Nacional o un Delegado suyo;
- c. El Ministro de Gobierno, Cultos, Policía y Municipalidades o un Delegado suyo;
- d. El Presidente de la Conferencia Episcopal o un Delegado suyo;
- e. El Presidente de la Casa de la Cultura Ecuatoriana o un Delegado suyo;
- f. El Director de Patrimonio Cultural;
- g. El Presidente del Consejo Nacional de Educación Superior, CONESUP o un delegado suyo.
- h. Un secretario propio de este Organismo.
- i. Un Director Nacional, que será nombrado por el Directorio.

(Fuente: Ley de Patrimonio Cultural).

Entre las funciones que se le adjudica, figuran la investigación, conservación y restauración, y la promoción del Patrimonio Cultural.

Se declaran en esta Ley todas las categorías determinantes para que ciertos elementos como objetos, monumentos, monedas, música, y demás, se consideren parte del Patrimonio Cultural del Ecuador.

Es muy notable el hecho de que mediante esta Ley se mencione como parte del Patrimonio a elementos intangibles, es decir aquellos que forman parte de la espiritualidad del hombre (lenguaje, costumbres, música, cuentos, rituales, y toda manifestación en general que los pueblos asumieran como recurrente e identificativa de su cultura).

La ley, asimismo, relaciona con el Patrimonio Cultural a todo objeto no especificado en ella y que represente méritos científicos, artísticos e históricos, y que hayan sido considerados así por el Instituto, sin que aquellos pierdan su derecho a ejercer su dominio sobre tales bienes, siempre y cuando tal ejercicio se enmarque dentro de los límites permitidos por la ley (comercio, transferencia de bienes, cambio de sitio, restauraciones e intervenciones en general).

Con fines de protección de los bienes patrimoniales, el Estado ecuatoriano, mediante esta Ley, otorga beneficios económicos para las personas poseedoras. Así, se exime de impuestos a los bienes muebles, se reduce en un 50% el impuesto predial para los bienes inmuebles en los que se verifique un correcto mantenimiento, se exonera de impuestos aduaneros a quienes introduzcan artículos que sean de interés patrimonial según el Instituto. De igual forma, se genera gran desventaja y se crean grandes sanciones para quienes incumplan la Ley, limitando y regulando la salida de Patrimonio Cultural hacia otros países y suprimiendo los derechos de propiedad a quienes omitieran cualquier artículo aplicable según los fines y que resultara un atentado contra dichos bienes.

De la misma forma con que se busca una regulación para la conservación, se insiste en que ésta no incida en las sociedades limitando tal vez su progreso. Por esta razón se designa al Instituto además, la capacidad de regular las investigaciones que puedan realizarse con cualquier bien patrimonial, estableciendo así, procedimientos para la verificación de la capacidad de intervención que pueda gozar cualquier postulante a investigador, en cuanto a requisitos y condiciones.

2.3. CONCEPTOS Y DEFINICIONES

2.3.1. TIEMPO DE REVERBERACIÓN (T60)

Se define como el tiempo que le toma a un sonido dentro de una sala decaer 60dB después de que la fuente que lo produce ha dejado de emitir. En la figura 2.2 se muestra la curva típica del decaimiento del sonido en una sala, obtenido con un analizador en tiempo real. Puede notarse visualmente el momento en que la fuente deja de emitir y el momento en el que el sonido decae 60dB.

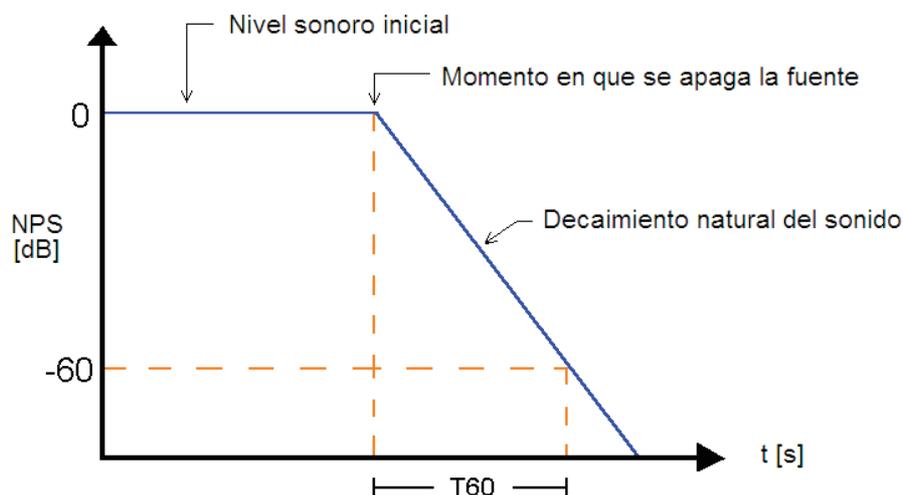


Figura 2.2. – Tiempo de reverberación en una sala. Elaboración propia.

El T60 es un parámetro que sirve para caracterizar mediante varios parámetros acústicos, a los recintos, puede expresarse de manera general (para todas las frecuencias comprendidas dentro de un rango) o de manera específica por

bandas de frecuencia. La manera de calcular el T60 está expresada en la ecuación 2.1:

$$T_{60} = 0.161 \cdot \frac{V}{A_T} \quad (\text{EC. 2.1}) \quad \text{con} \quad A_T = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \alpha_i \quad (\text{EC: 2.2})$$

Donde:

V: volumen de la sala en m³

A_T: Absorción total de la sala en m²Sabine.

S_i: Superficies individuales de la sala (Paredes, techo, puertas, ventanas, etc) en m².

α: Coeficiente de absorción del material de revestimiento, se especifica por bandas de frecuencia.

Como se observa en la fórmula, el T60 depende de la absorción de la sala, es así que alterándola se puede controlar la aparición de reflexiones. Esto tiene amplias aplicaciones en el diseño acústico de recintos ya que una gran cantidad de reflexiones y, por consiguiente un T60 grande, le resta claridad a la recepción del mensaje hablado.

La figura 2.3 ilustra algunos rangos de T60 óptimo para algunos recintos según su volumen. El T60 promedio recomendado para una iglesia se encuentra entre 1.3s y los 2.5s, pudiendo permitirse un tiempo mayor para algunos casos, especialmente cuando se trata de espacios acoplados⁴, debido a la diferencia entre la absorción promedio del volumen principal y los acoplados.

⁴ Espacio Acoplado: Espacio Arquitectónico conformado por varios volúmenes unidos a uno principal. esto es muy común en las iglesias, donde se pueden tener varias naves y capillas en un mismo recinto.

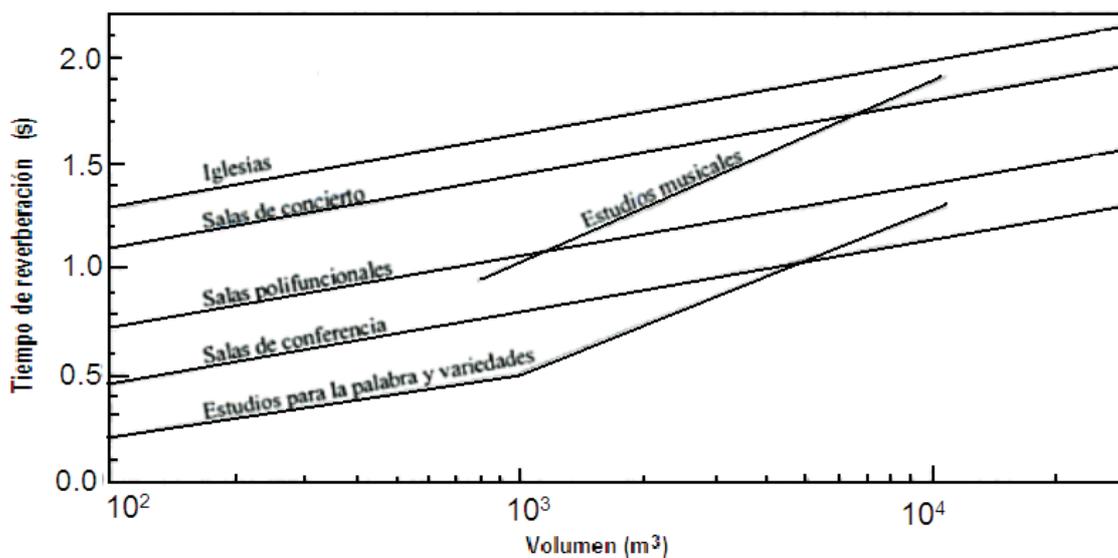


Figura 2.3. – T60 óptimo para algunos recintos en función de su volumen.⁵

Si bien la figura anterior refiere valores óptimos de tiempo de reverberación para recintos de culto religioso, esto no resulta enteramente aplicable para las iglesias aquí estudiadas ya que, siendo recintos con superficies arquitectónicamente más complejas que las habituales, se produce en su interior un sinnúmero de sucesos en cuanto a la respuesta del sonido, difícilmente comparables con aquellos producidos en una tipología más simple. Mediciones llevadas a cabo en iglesias gótico-mudéjares, mezquitas e iglesias italianas pusieron en evidencia la imposibilidad de predecir exactamente ciertos parámetros acústicos mediante las teorías comunes. Lo anterior se atribuye a aspectos como la desproporción que presentan las construcciones la distribución no uniforme de los materiales y especialmente a asuntos ligados directamente con su diseño arquitectónico, como pasillos, capillas, cúpulas, cámaras y todo elemento que pueda influir en la manera en que se distribuye el sonido en el interior de los locales.

⁵ J. J. Sendra, T. Zamarreño, José Algaba, Jaime Navarro. El problema de las condiciones acústicas en las Iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación. Pag 23.

2.3.1.1. TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN UN ESPACIO ACOPLADO

Cuando se produce un sonido en el interior de un espacio principal que se encuentra acoplado a otros, la distribución espacial del recinto como conjunto, manifiesta una repercusión en la transferencia de energía producida, esto se explica porque si una fuente sonora deja de emitir dentro del recinto, tanto en el volumen principal como en los acoplados, el tiempo de decaimiento es el mismo, sin embargo, si el volumen acoplado al principal es más reverberante, la energía del sonido decae más lentamente, provocando una prolongación en el tiempo de reverberación, perceptible en la globalidad del recinto. La figura 2.4 sintetiza el decaimiento del sonido en un espacio con volúmenes acoplados, nótese que la linealidad del decaimiento natural observado en la Figura 2.2 (Tiempo de reverberación en una sala) se pierde, de manera que la determinación del tiempo de reverberación debe hacerse atendiendo la sugerencia de la normativa aplicable al método de evaluación de este parámetro.

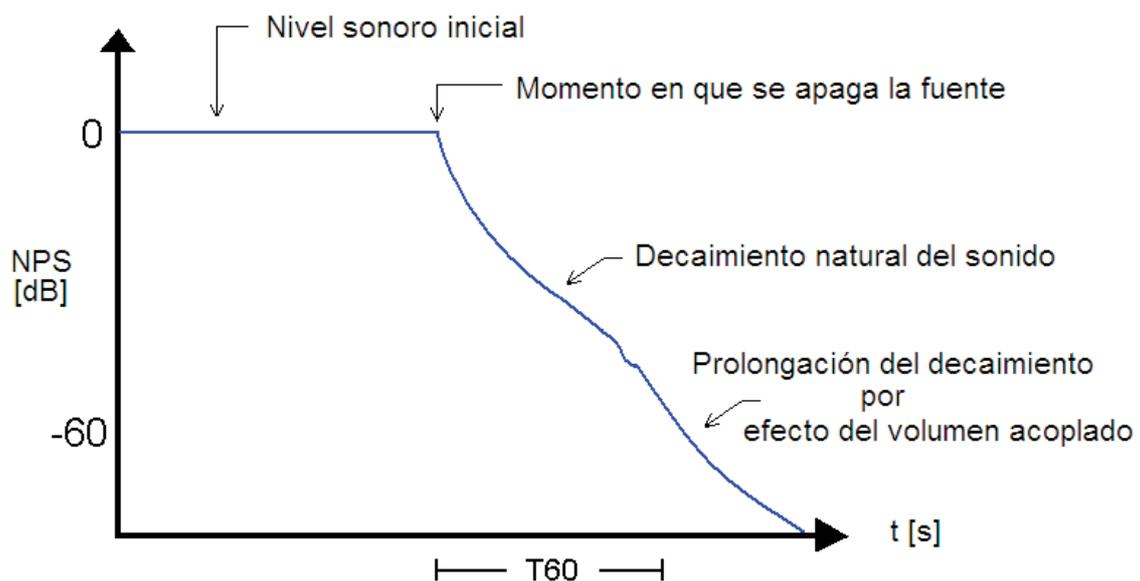


Figura 2.4. – Decaimiento del sonido en un espacio con volúmenes acoplados a uno principal.

Utilizando la ecuación 2.3 se puede construir una curva del T60 óptimo por frecuencias. La tabla 2.1 muestra los criterios para calcular el tiempo de reverberación óptimo.

$$T = f \cdot \mu \cdot i \cdot \sqrt[3]{V} \quad (\text{EC. 2.3})$$

Donde:

- f:** Coeficiente dependiente de la frecuencia.
 μ : Coeficiente asociado a la complejidad de la sala.
i: Coeficiente que depende de si existe o no, apoyo electroacústico en el recinto.
V: Volumen del recinto en m³.

Tabla 2.1. – Parámetros para determinar el tiempo de reverberación óptimo.⁶

Frecuencia [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
f	1.30	1.15	1.00	0.90	0.90	0.90
Uso	Palabra	Música de ópera	Música de cámara	Música sinfónica	Música Wagneriana	Música religiosa
μ	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100
i	con apoyo electroacústico			0.85	sin él	1.00

2.3.2. INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA: %ALCONS Y STI/RASTI

La inteligibilidad de la palabra es un aspecto subjetivo, sin embargo, existe un método analítico para deducirlo de una manera cuantitativa que de una idea más exacta de este parámetro en una sala.

⁶ J. J. Sendra, T. Zamarreño, José Algaba, Jaime Navarro. El problema de las condiciones acústicas en las Iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación. Pag 22.

La comprensión de todo mensaje hablado depende en mayor parte de la manera en la que se perciben las consonantes, ya que éstas ayudan a definir el inicio y el final de las palabras. Una persona emplea menos tiempo en la pronunciación de las consonantes que de las vocales, de manera que el nivel de presión sonora equivalente asociado a éstas también es menor, además, las consonantes poseen un contenido frecuencial ubicado principalmente en altas frecuencias, siendo esta zona del espectro en donde se encuentra el mayor aporte a la inteligibilidad de las palabras. Así, una sala “viva” supondría una pérdida de esto último debido a un traslape temporal del sonido de las vocales sobre el de las consonantes, sin contar con el enmascaramiento que provoca una frecuencia más baja transpuesta sobre otra más alta y con un nivel inferior de presión sonora, como muestra la figura 2.5:

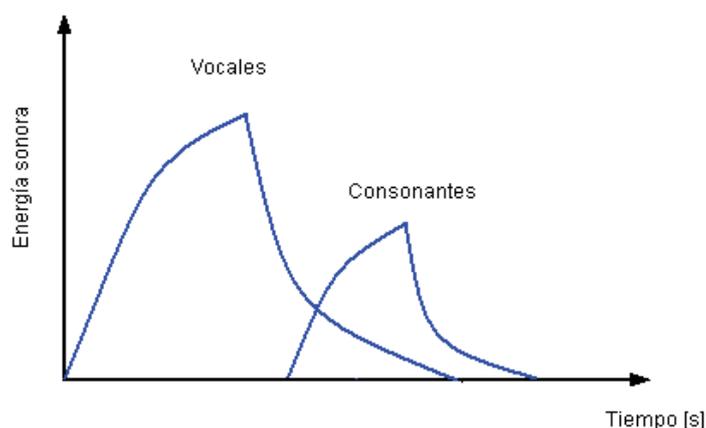


Figura 2.5. - Enmascaramiento de frecuencias.⁷

La estimación de la inteligibilidad de la palabra se desarrolló a partir del estudio de varios recintos para obtener por métodos estadísticos, una ley matemática útil para su evaluación. Asumiendo la pérdida de inteligibilidad causada por un aumento en el T60, se define otro descriptor denominado **Porcentaje de pérdida de la articulación de consonantes (%AL Cons)**, el cual se asocia a la percepción de las consonantes dentro de un recinto.

⁷ CARRIÓN, Antoni. Diseño Acústico de espacios arquitectónicos. Pág. 70.

La ley matemática que rige el cálculo de %ALCons se ilustra a continuación en la figura 2.6 y se establece al relacionar el T60 del punto de prueba y la diferencia entre el NPS de la fuente en campo directo y el de la fuente en campo reverberante. Para cuantificar la inteligibilidad de la palabra se hace uso del descriptor STI/RASTI (*Speech Transmission Index/Rapid Speech Transmission Index*), al relacionar el valor de %ALCons mediante una curva de correspondencia ilustrada en la figura 2.7:

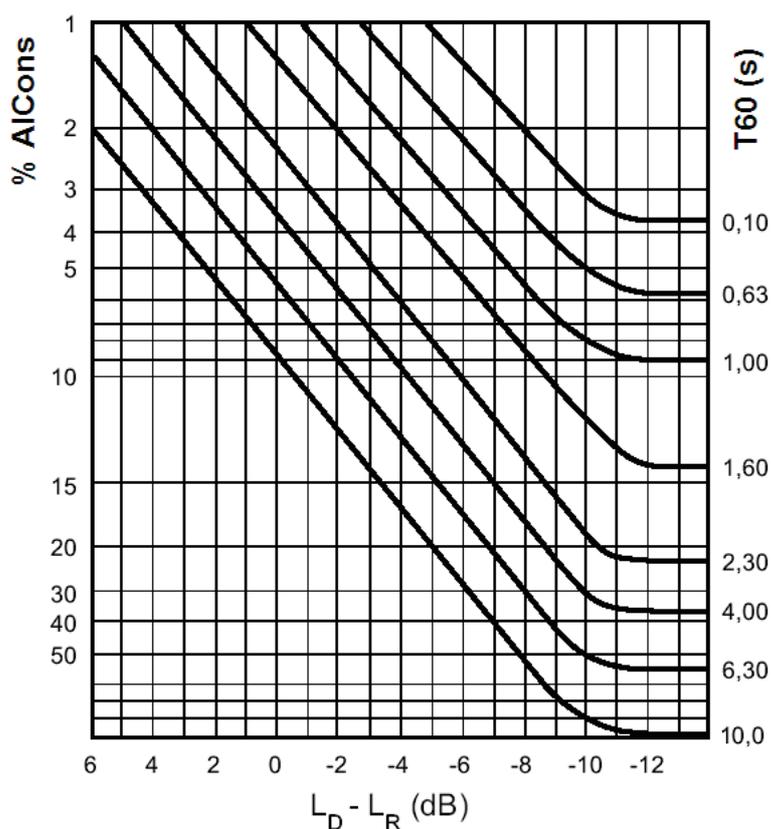


Figura 2.6. - Estimación de la pérdida de articulación de las consonantes⁸

A continuación, en la ecuación 2.3 se muestra la manera de calcular $L_D - L_R$ es:

$$L_D - L_R = 10 \log \left(\frac{Q^* R}{r^2} \right) - 17 \text{ dB} \quad (\text{EC. 2.4}); \quad \text{con:} \quad R = \frac{S_T \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (\text{EC. 2.5})$$

⁸ CARRIÓN, Antoni. Diseño Acústico de espacios arquitectónicos. Pág. 67.

Donde:

Q= Factor de directividad de la fuente sonora. Para la voz humana: $Q=2$ (considerando únicamente la dirección frontal del orador).

R= Constante de la sala (m^2).

r= Distancia desde la fuente sonora hasta el punto de prueba (m^2).

S_T= Superficie total de la sala (m^2).

$\bar{\alpha}$ = Coeficiente de absorción promedio de la sala.

Existe además un parámetro para cuantificar más precisamente la inteligibilidad de la palabra, éste se denomina RASTI, por sus siglas en inglés *Rapid Speech Transmission Index*. El parámetro RASTI mantiene una buena correlación con el parámetro %ALCons; la figura 2.7 concierne a la correspondencia entre ambos parámetros, mediante la curva puede obtenerse uno de ellos a partir del otro. Los valores límite asociados a RASTI se encuentran entre 0 y 1, donde 0 representa inteligibilidad nula y 1 inteligibilidad total.

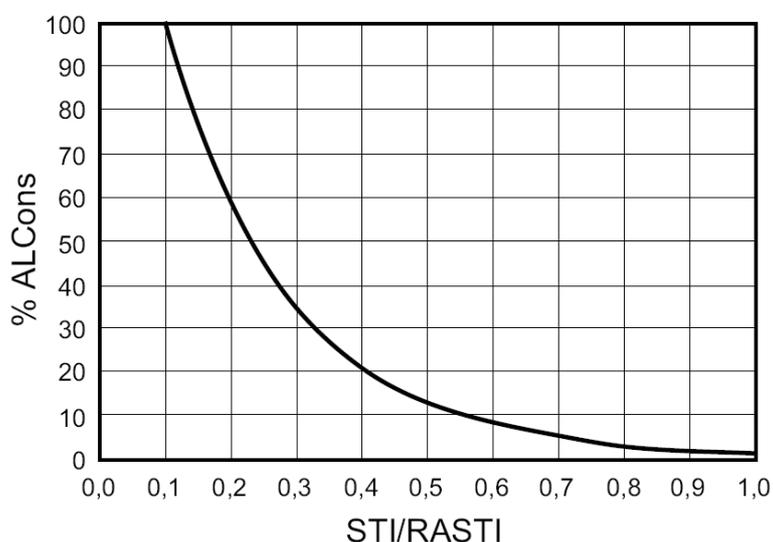


Figura 2.7. - Estimación de la inteligibilidad de la palabra⁹

⁹ CARRIÓN, Antoni. Diseño Acústico de espacios arquitectónicos. Pág. 69.

2.3.3. CALIDEZ ACÚSTICA (BR) Y BRILLO ACÚSTICO (Br)

La calidez acústica (BR por bass ratio) representa la respuesta de la sala en frecuencias graves, si una sala es rica en contenido de frecuencias graves, se dice que la sala es cálida. Esta característica de calidez en una sala determina la suavidad de la música que dentro de ella se percibe durante una ejecución.

La calidez acústica se obtiene aplicando la suma de los T60 en frecuencias bajas (125Hz y 250Hz) y a las bandas medias de 500Hz y 1kHz y dividiendo ambas sumas, como muestra la ecuación 2.6:

$$BR = \frac{T60_{125Hz} + T60_{250Hz}}{T60_{500Hz} + T60_{1000Hz}} \quad (\text{EC. 2.6})$$

Esta relación, para salas ocupadas, según Beranek debe encontrarse dentro de los siguientes valores:

$$\begin{aligned} 1.1 \leq BR \leq 1.25 & \quad Si, T_{60mid} = 2.2s \\ 1.1 \leq BR \leq 1.45 & \quad Si, T_{60mid} = 1.8s \end{aligned}$$

(Fuente: CARRIÓN, Antoni. Diseño Acústico de espacios arquitectónicos.

Pág 225)

Para salas con T60 distintos a los anteriores, la calidez acústica óptima deberá deducirse por interpolación.

Por otro lado, la riqueza en armónicos que posee una sala se denomina **Brillo Acústico**, y mediante este parámetro se puede tener una idea de la claridad del sonido en el interior del recinto. Se puede calcular el Br mediante la relación entre la suma del T60 en frecuencias altas (2kHz y 4kHz) y la suma del T60 en frecuencias medias (500Hz y 1kHz). La recomendación de Beranek para salas ocupadas es la siguiente: $Br \geq 0.87$ (Fuente: CARRIÓN, Antoni. Diseño Acústico de espacios arquitectónicos. Pág 225). Este valor nunca alcanzará a ser mayor a 1 debido a las pérdidas causadas por la absorción del aire, además debe evitarse salas excesivamente brillantes, aspecto que también debe controlarse al colocar sistemas de amplificación en el interior de

la sala. La ecuación 2.7 ilustra el procedimiento para calcular brillo acústico en una sala:

$$Br = \frac{T60_{2000Hz} + T60_{4000Hz}}{T60_{500Hz} + T60_{1000Hz}} \quad (\text{EC. 2.7})$$

2.3.4. ÍNDICE DE CLARIDAD DE LA VOZ (C50)

Este parámetro representa la claridad tonal durante un tiempo de 50ms, y es la relación logarítmica entre la energía que llega a un oyente durante los primeros 50ms de haberse generado el sonido, respecto a la energía que le llega posteriormente. La ecuación 2.8 define la fórmula para calcular el índice de claridad de la voz (C50):

$$C50 = 10 \log \left[\frac{\int_{0.05}^{0.05} p^2 dt}{\int_{0.05}^{\infty} p^2(t) dt} \right] \quad (\text{EC. 2.8})$$

Este parámetro se relaciona con la inteligibilidad de la palabra, mientras mayor valor tiene C50, mayor inteligibilidad de la palabra ofrece el local. Una forma común de promediar este parámetro es ponderarlo en frecuencias para obtener un único valor denominado **Promedio del Habla** o **Speech Average** mediante el uso de la fórmula entregada en la ecuación 2.9:

$$C50_{S.A.} = 0.15 \cdot C50_{500Hz} + 0.25 \cdot C50_{1kHz} + 0.35 \cdot C50_{2kHz} + 0.25 \cdot C50_{4kHz} \quad (\text{EC.2.9})$$

2.3.5. ÍNDICE DE CLARIDAD DE MUSICAL (C80)

Un sonido reflejado que llegue a un oyente durante los primeros 80ms, tiende a enriquecer y reforzar el sonido original. El índice de claridad musical C80, es la relación entre la energía del sonido que llegue dentro de ese período de tiempo respecto a la energía sonora que llegue después de él, como muestra la ecuación 2.10:

$$C80 = \frac{E_{0-80}}{E_{80-\infty}} \sqrt{B} \quad (\text{EC. 2.10})$$

Sin embargo esta relación puede comprimirse a una escala logarítmica, de donde se desprende la ecuación 2.10:

$$C80 = \log \left[\frac{E_{0-80}}{E_{80-\infty}} \right] \sqrt{B} \quad (\text{EC.2.11})$$

La ecuación 2.10 es la forma habitual de expresar su valor y generalmente para las frecuencias de 500Hz, 1kHz y 2kHz, por lo que el valor global de C80 será la media aritmética de los correspondientes a estas frecuencias. Los valores recomendados de C80 según Leo Beranek se ubican entre:

$$\begin{aligned} -4 \leq C80 \leq 0dB &\rightarrow \text{Sala Vacía} \\ -2 \leq C80 \leq 2dB &\rightarrow \text{Sala Ocupada} \end{aligned}$$

(Fuente: CARRIÓN, Antoni. Diseño Acústico de espacios arquitectónicos. Págs 231, 232 .)

2.3.6. ÍNDICE DE DEFINICIÓN (D50)

Este parámetro se relaciona con la claridad de la voz y cuantifica la separación entre frases tanto musicales como habladas. Los parámetros que miden claridad suelen utilizar comparaciones entre el sonido directo y el reflejado. El D50 relaciona la energía reflejada recibida durante los primeros 50ms y el sonido directo respecto a la energía total recibida. Suele expresarse como un porcentaje y se calcula por bandas de octava entre 125Hz y 4kHz. Se espera siempre que este valor supere el 50% ya que mientras más alto sea el valor del índice de definición, mayor inteligibilidad de la palabra presentará el local.

2.4. GENERALIDADES SOBRE AISLAMIENTO ACÚSTICO

Al mismo tiempo que la acústica es la ciencia que estudia las vibraciones desde su generación, pasando por su transmisión y llegando hasta su recepción, el aislamiento acústico es una parte de ésta, que se ubica en la

mitad del camino, enfocándose en la prevención, atenuación o eliminación de las vibraciones, para así evitar que se propaguen y causen molestias tanto auditivas como mecánicas. Las vibraciones percibidas auditivamente se transmiten por vía aérea, mientras que las vibraciones percibidas como vibraciones mecánicas son transmitidas por cuerpos sólidos o estructuras.

En general, para que una vibración se propague, es necesario que exista una conexión a nivel molecular en las estructuras que componen el sistema vibrante, para que así la vibración pueda avanzar de un lugar a otro. Entonces, para aislar dicha transmisión, se debe provocar ya sea una interrupción del camino en aquella vibración mediante el uso de cámaras o, agregar elementos elásticos que absorban la energía de la vibración entre las estructuras. En cualquier caso, el éxito de un buen aislamiento acústico consiste en conseguir un buen desacoplamiento estructural en el sistema para romper con la transmisión vibratoria, sin perjudicar la estabilidad y resistencia del mismo.

El aislamiento acústico es importante por su funcionalidad, su correcta utilización garantiza mantener controlados los efectos negativos del sonido y el ruido. El ruido de fondo condiciona la utilización de locales y viceversa; para locales destinados a la grabación sonora, la radiodifusión, o aplicaciones similares se necesita un nivel de ruido inferior al de locales destinados para oficinas, aulas, fábricas, etc. Existen varios criterios a cumplirse para el diseño de recintos, ajustados a su utilización, normativas, estándares de calidad y metodologías de medición.

2.4.1. RUIDO DE FONDO

Se define como ruido de fondo al nivel de presión sonora presente en el interior de un local cuando todas las fuentes ubicadas dentro de él se encuentran apagadas.

2.4.1.1. CRITERIOS DE RUIDO DE FONDO

Existen varios criterios para la utilización de los recintos según el ruido de fondo. Estos se denominan “Índices de valoración de ruido” y definen curvas a partir de niveles recomendados de ruido de fondo para distintas aplicaciones.

2.4.1.2. CURVAS DE CLASIFICACIÓN NC, NR Y PNC

(**NOTA:** Todas las tablas de criterios de ruido NC (2.1), NR (2.2) y PNC (2.3) fueron obtenidas de la siguiente dirección:

<http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/%282%29%20 Analisis%20espectral/indices%20de%20valoracion%20de%20ruido.htm#Tabla%201>).

Son las gráficas del nivel de ruido recomendado por bandas de frecuencia. La evaluación se realiza por comparación entre el nivel medido (en dB[A]) y el recomendado en las gráficas.

2.4.1.2.1. CURVAS NC (NOISE CRITERIA)

Es un método de evaluación del ruido desarrollado por Leo Beranek. Este método relaciona el espectro de ruido con la influencia que pueda tener en la comunicación hablada, para lo que se toma en cuenta los niveles de sonoridad y los niveles de interferencia en la palabra, definiendo el nivel de ruido máximo que debe poseer el espectro de ruido por banda de frecuencia. Al comparar el espectro de ruido medido con las curvas NC, el valor NC correspondiente es igual a la curva superior más inmediata a la que el espectro medido es tangente.

La tabla 2.1 muestra los valores de caracterización según el criterio NC por bandas de octava. En la figura 2.8, se muestra las curvas correspondientes al criterio NC con su valor NC correspondiente.

Tabla 2.2. - Valores de ruido recomendados por banda de octava según el criterio NC.

Índices de valoración NC								
<i>F</i> [Hz]								
NC	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
15	47	36	29	22	17	14	12	11
20	51	40	33	26	22	19	17	16
25	54	44	37	31	27	24	22	21
30	57	48	41	35	31	29	28	27
35	60	52	45	40	36	34	33	32
40	64	57	50	45	41	39	38	37
45	67	60	54	49	46	44	43	42
50	71	64	58	54	51	49	48	47
55	74	67	62	58	56	54	53	52
60	77	71	67	63	61	59	58	57
65	80	75	71	68	66	64	63	62
70	83	79	75	72	71	70	69	68

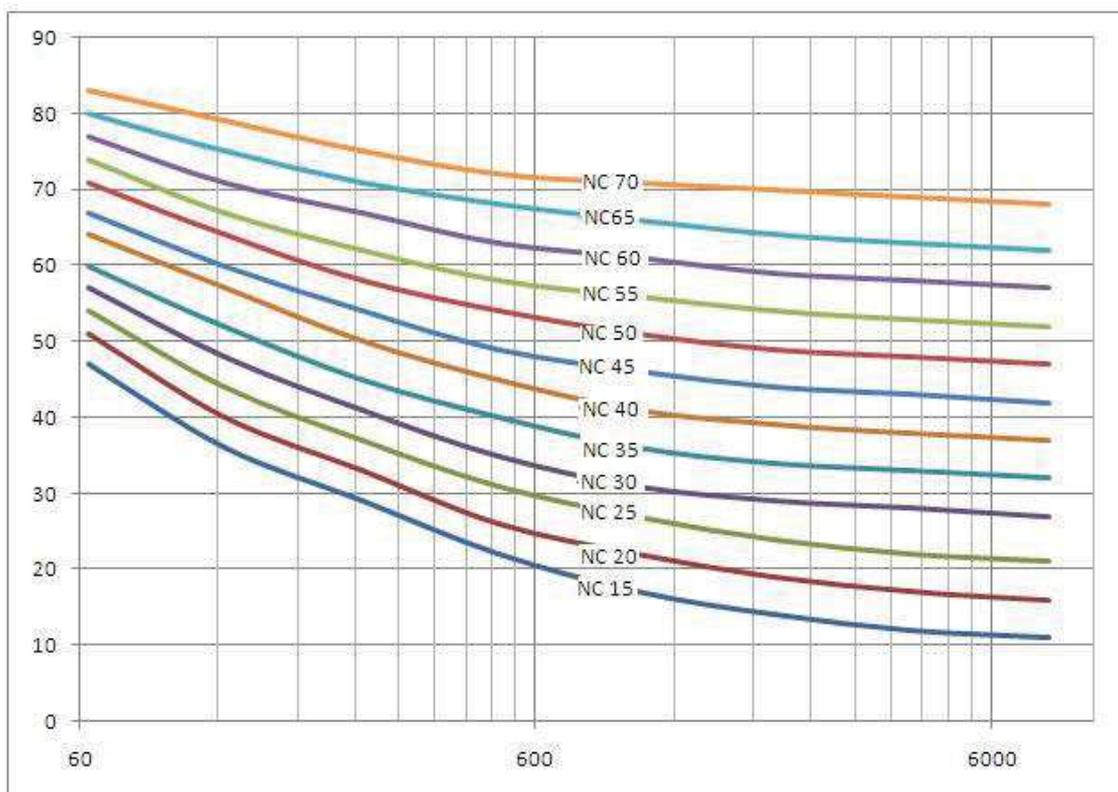


Figura 2.8. - Curvas de caracterización NC. Elaboración Propia

2.4.1.2.2. CURVAS NR (NOISE RATING)

Son similares a las curvas NC, pero en un rango de niveles de presión superiores a ellas, esto es porque las curvas NR, desarrolladas por la Organización Internacional de Estandarización (ISO), fueron diseñadas para abarcar todas las tipologías posibles, masificando su utilización, por esta razón este criterio puede aplicarse al diseño y caracterización tanto de estudios de grabación como de industrias muy ruidosas. De igual manera se adjudica un único valor NR a todo el espectro de ruido medido al compararlo con el grupo de curvas NR.

Los valores recomendados por NR se muestran a continuación en la tabla 2.2. y las gráficas NR se ilustran en la figura 2.7.

Tabla 2.3. - Valores de ruido recomendados por banda de octava
Según el criterio NR

Índices de valoración NR								
f [Hz]								
NR	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	35,5	22	12	4,8	0	-3,5	-6,1	-8
5	39,4	26,3	16,6	9,7	5	1,6	-1	-2,8
10	43,4	30,7	21,3	14,5	10	6,6	4,2	2,3
15	47,3	35	25,9	19,4	15	11,7	9,3	7,4
20	51,3	39,4	30,6	24,3	20	16,8	14,4	12,6
25	55,2	43,7	35,2	29,2	25	21,9	19,5	17,7
30	59,2	48,1	39,9	34	30	26,9	24,7	22,9
35	63,1	52,4	44,5	38,9	35	32	29,8	28
40	67,1	56,8	49,2	43,8	40	37,1	34,9	33,2
45	71	61,1	53,6	48,6	45	42,2	40	38,3
50	75	65,5	58,5	53,5	50	47,2	45,2	43,5
55	78,9	69,8	63,1	58,4	55	52,3	50,3	48,6
60	82,9	74,2	67,8	63,2	60	57,4	55,4	53,8
65	86,8	78,5	72,4	68,1	65	62,5	60,5	58,9
70	90,8	82,9	77,1	73	70	67,5	65,7	64,1
75	94,7	87,2	81,7	77,9	75	72,6	70,8	69,2
80	98,7	91,6	86,4	82,7	80	77,7	75,9	74,4
85	102,6	95,9	91	87,6	85	82,8	81	79,5
90	106,6	100,3	95,7	92,5	90	87,8	86,2	84,7
95	110,5	104,6	100,3	97,3	95	92,9	91,3	89,8
100	114,5	109	105	102,2	100	98	96,4	95
105	118,4	113,3	109,6	107,1	105	103,1	101,5	100,1
110	122,4	117,7	114,3	111,9	110	108,1	106,7	105,3
115	126,3	122	118,9	116,8	115	113,2	111,8	110,4
120	130,3	126,4	123,6	121,7	120	118,3	116,9	115,6
125	134,2	130,7	128,2	126,6	125	123,4	122	120,7
130	138,2	135,1	132,9	131,4	130	128,4	127,2	125,9

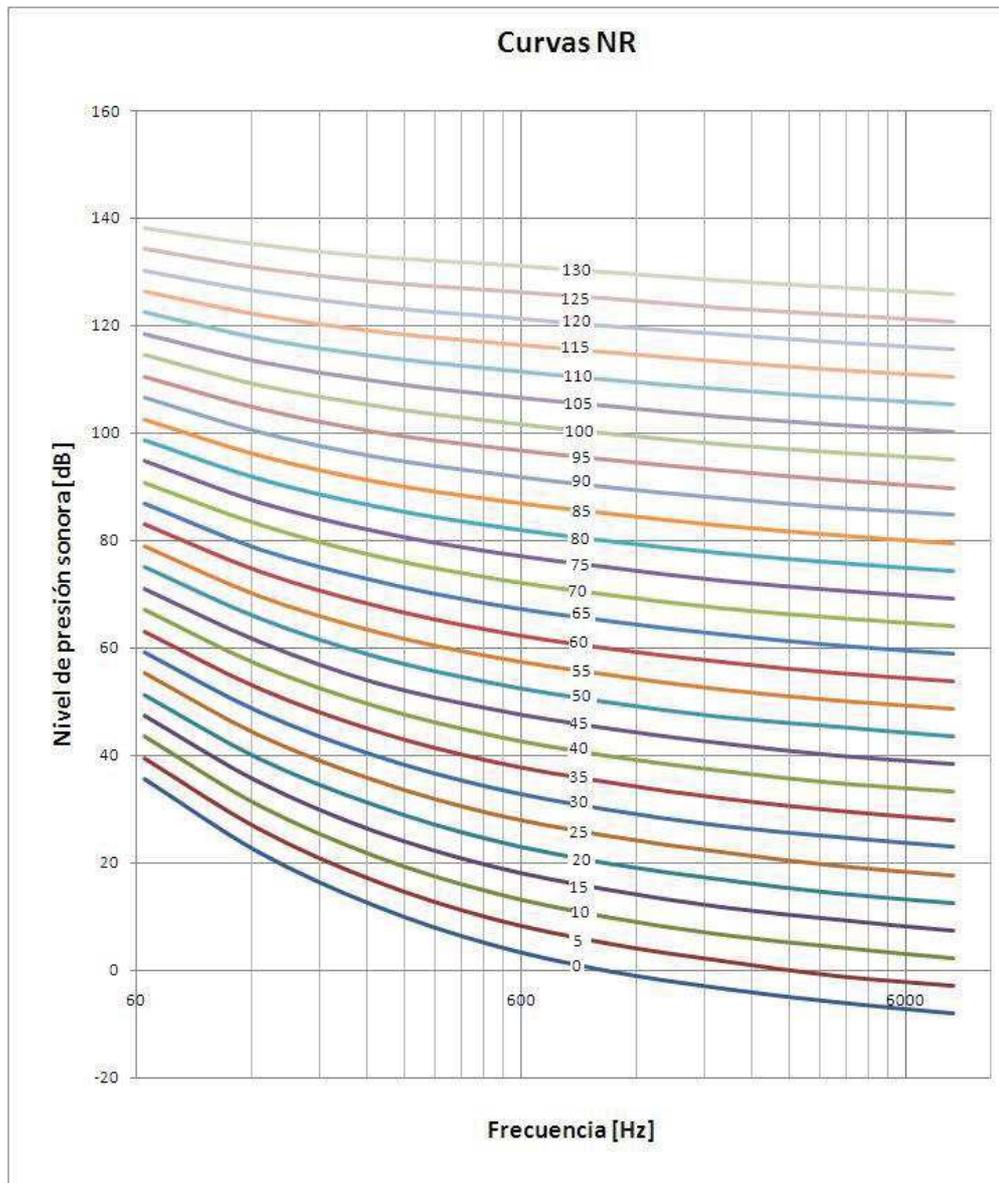


Figura 2.9. - Curvas de caracterización NR. Elaboración Propia.

2.4.1.2.3. CURVAS PNC (PREFERED NOISE CRITERIA)

Son simplemente una modificación y mejora a las curvas NC de Beranek. Implican un cambio en algunos valores en los niveles para ciertas frecuencias y ciertos valores NC.

La tabla 2.3 y la figura 2.8 muestran respectivamente los niveles permitidos y las curvas de caracterización PNC.

Tabla 2.4. - Valores de ruido recomendados por banda de octava según el criterio PNC

Índices de valoración NC								
f [Hz]								
PNC	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
15	43	35	28	21	15	10	8	8
20	46	39	32	26	20	15	13	13
25	49	43	37	31	25	20	18	18
30	52	46	41	35	30	25	23	23
35	55	50	45	40	35	30	28	28
40	59	54	50	45	40	35	33	33
45	63	58	54	50	45	41	38	38
50	66	62	58	54	50	46	43	43
55	70	66	62	59	55	51	48	48
60	73	69	66	63	59	56	53	53
65	76	73	70	67	64	61	58	58

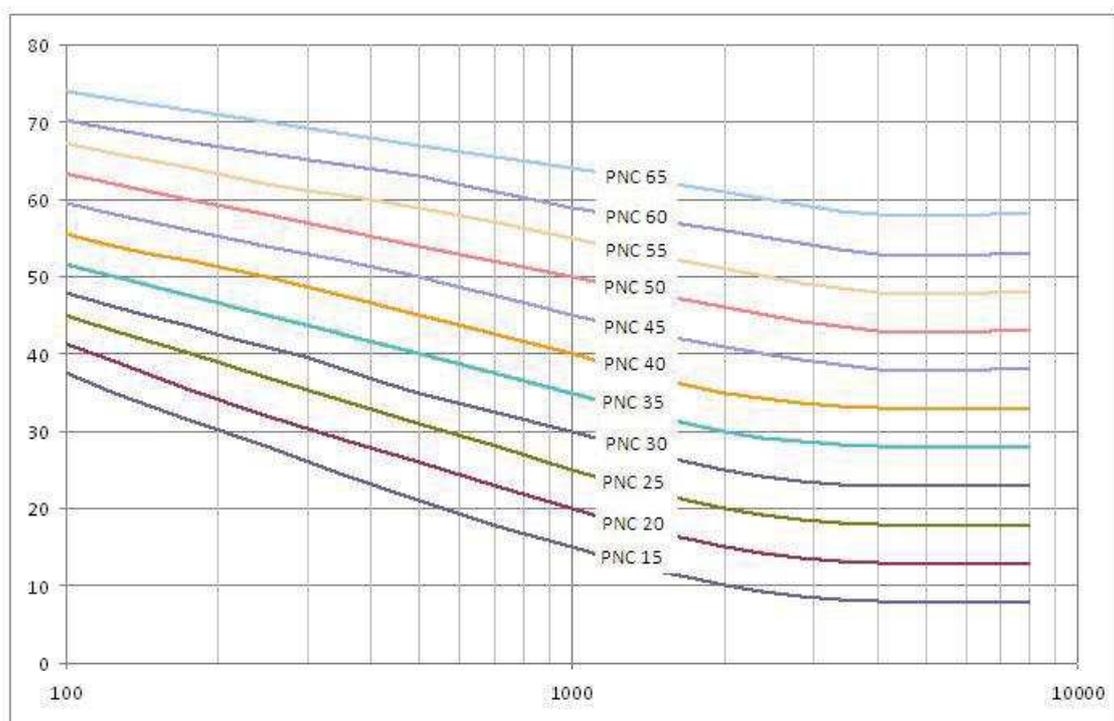


Figura 2.10. - Curvas de caracterización PNC. Elaboración Propia

A continuación, en la tabla 2.4. se ubica algunos recintos tipo según valores recomendados para cada uno de los tres criterios (NC, NR y PNC), por efectos de estudio de este trabajo, se ha resaltado el valor correspondiente a nivel de ruido en iglesias, para una posterior comparación.

Tabla 2.5. - Valores NC, NR y PNC y niveles de ruido recomendados para algunos recintos¹⁰

Tipo de recinto	Índices de ruido			Nivel de ruido	
	NC	NR	PNC	dB	dB (A)
Estudios de radio, televisión	20	30	30	30	25
Salas de música, auditorios	25	25	20	35	25
Teatros	30	25	20	35	40
Hospitales	35	20	40	40	45
Iglesias	30	35	35	40	45
Viviendas, hoteles	35	45	40	45	45
Salas lectura, aulas	35	30	40	40	45
Salas de conferencia pequeñas	30	35	40	45	50
Oficinas, restaurantes	45	45	45	45	50
Bibliotecas	35	40	40	40	45
Cines	35	35	35	35	45

¹⁰ Fuente:

<http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/%282%29%20Análisis%20espectral/indices%20de%20valoracion%20de%20ruido.htm>

3. CAPÍTULO III

3.1 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LOS ESPACIOS

3.1.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESPACIOS

Para establecer una metodología de trabajo y para sustentar cualquier conclusión a partir del análisis de los resultados de las mediciones acústicas efectuadas en los recintos, fue imprescindible llevar a cabo un reconocimiento inicial de los locales que serían estudiados. Tal análisis se llevó a cabo de manera visual, a través de consultas personales a guías e información existente en material bibliográfico; con esto se determinó ciertos aspectos técnicos destacables de las iglesias, como algunos de los materiales con los que se construyeron los templos y los elementos encontrados en su interior.

Dado que el arte quiteño resulta de la convergencia de varios estilos del arte universal y herencias hispanas e indígenas, ambas iglesias poseen ciertos aspectos comunes, como materiales de construcción y elementos decorativos. Este capítulo recoge los factores que se han considerado relevantes en esta tesis, en la descripción de los espacios arquitectónicos estudiados como herramienta para el posterior análisis de los resultados de la experimentación. La figura 3.1 muestra la ubicación de ambas iglesias estudiadas.



Figura 3.1. Croquis general de la ubicación de ambas iglesias en Quito

3.1.1.1. IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS

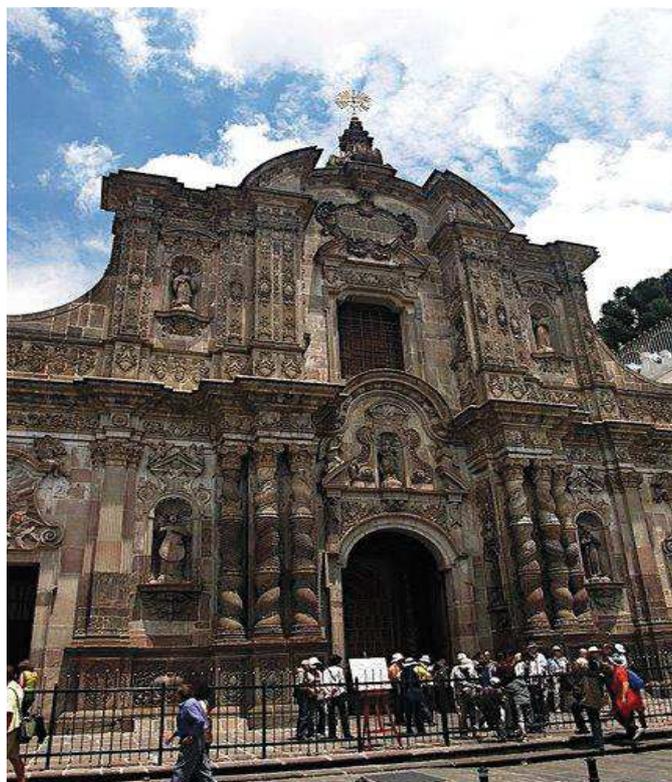


Figura 3.2. - Fachada de la Iglesia De La Compañía De Jesús¹¹

¹¹ <http://www.panoramio.com/photo/7751482>



Figura 3.3. - Ubicación de la Iglesia De La Compañía De Jesús.

Ubicada en la Av. García Moreno y Antonio José de Sucre, diagonal a la plaza de la Iglesia de San Francisco, en el Centro Histórico de Quito. Es una iglesia de forma básicamente rectangular con orientación Este-Oeste, construida entre la segunda mitad del año 1605 y el 12 de abril de 1766 (siglo XVII al XVIII). Está constituida básicamente por el presbiterio, dos transeptos (Norte y sur); éstos tres formando el crucero de la iglesia, la nave central y dos naves laterales (Norte y Sur). Puede considerarse como un sitio multiambiente debido a la cantidad de divisiones que posee, debido a la presencia de arcos y altares que se encuentran formando las naves norte y sur. La distribución de la iglesia, incluyendo sus ambientes múltiples, se concibe de manera muy simétrica.

Entre los materiales utilizados predominan la piedra y la madera. Los muros, arcos, columnas y la bóveda (todos estos de piedra) se encuentran recargados de elementos decorativos labrados o sobrepuestos. El retablo principal está hecho de madera de cedro, tallada y recubierta con pan de oro al igual que casi todos los elementos decorativos dentro del templo. En la bóveda se distingue la yesería cubierta de pan de oro. Ciertas superficies poseen pintura de color.

El piso es de madera maciza de varias coloraciones y betas formando patrones de ornamentación. Además, existe gran cantidad de obras de arte, entre lienzos y esculturas distribuidos alrededor del templo.

Las figuras 3.4; 3.5; 3.6 y 3.7 ilustran algunas vistas del interior del templo. La imagen de la figura 3.7 muestra el órgano de tubos de la iglesia, ubicado en el coro alto, desde donde se efectuó también mediciones de los parámetros acústicos de la iglesia.



Figura 3.4. - Parte del retablo y la cúpula del presbiterio de la Iglesia De La Compañía De Jesús. ¹²

¹² <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=512910>



Figura 3.5. - Vista general desde la nave central de la Iglesia De La Compañía De Jesús. ¹³



Figura 3.6. - Vista de la balaustrada de la nave central de La Compañía De Jesús. ¹⁴

¹³ <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=512910>

¹⁴ <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=512910>

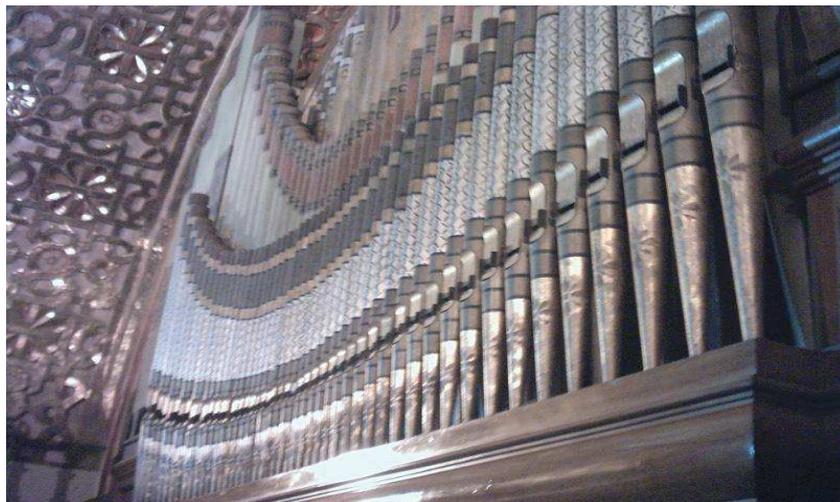


Figura 3.7. - Órgano de la Iglesia De La Compañía De Jesús.

Resumiendo, ninguna superficie en la iglesia, especialmente en su interior, se encuentra libre de decoración. Todas las superficies poseen algún relieve o figura, esto es corroborado también al tomar en cuenta las características del estilo barroco, estilo del que La Compañía es la máxima representante en Quito.

3.1.1.2. IGLESIA DE LA CATEDRAL METROPOLITANA DE QUITO



Figura 3.8. - Fachada de la Catedral Metropolitana de Quito. ¹⁵

¹⁵ <http://www.skyscraperlife.com/city-versus-city/23487-vs-iglesias.html>



Figura 3.9. - Ubicación de la Iglesia de La Catedral Metropolitana de Quito

Esta iglesia se encuentra ubicada entre las avenidas García Moreno y Venezuela, junto a la Plaza De La Independencia, en el Centro Histórico de Quito. La construcción de la iglesia completa se remonta a los siglos XVII y XVIII. Su orientación es Oeste – Este, ya que debido a la presencia de una quebrada, su entrada principal tuvo que establecerse por la Av. García Moreno y no por la Plaza De La Independencia como es común en las catedrales de América Latina. Debido a su ubicación, el ruido de fondo en el interior de la iglesia es distinguidamente elevado.

La forma básica de la iglesia en su interior es rectangular, sin embargo, el altar mayor es de forma semicircular. Mantiene además una construcción multiambiente con la ubicación de pequeñas capillas en su interior y mausoleos en una zona ubicada detrás del presbiterio. Se compone de tres naves: una central y dos laterales, el crucero es muy amplio y ocupado por un pequeño conjunto de sillería que constituye el coro bajo de la iglesia.



Figura 3.10. - Crucero y coro bajo de La Catedral Metropolitana de Quito.¹⁶



Figura 3.11. - Presbiterio de La Catedral Metropolitana de Quito.¹⁷

¹⁶ http://www.elcomercio.com/noticiaEC.asp?id_noticia=77141&id_seccion=49

¹⁷ <http://www.edufuturo.com/educacion.php?c=1746>

La construcción se caracteriza por la utilización de materiales como la piedra y la madera, es muy destacable el artesonado mudéjar¹⁸ de madera vista en el techo. En general, la Iglesia no se centra en un solo estilo artístico. Aquí, predomina más la roca plana, dando lugar a ciertas superficies libres de relieves y decoración en general

3.1.2. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN

Los puntos de medición fueron planificados en base a planos, pero seleccionados *In Situ* y por simetría de los recintos, pensando también en las posibles influencias de elementos arquitectónicos distribuidos dentro ellas. Todas las mediciones fueron tomadas, con el micrófono ubicado a 1.50m del suelo y a por lo menos 2m de las paredes, muros y columnas.

La medición en ambas iglesias se llevó a cabo con una fuente ubicada en el altar del presbiterio y con una fuente en el órgano del templo, no simultáneamente. El número de puntos de medición no es el mismo para ambas iglesias, esto se debe principalmente a las dimensiones de los templos y a la complejidad de su forma de acuerdo con el criterio que se asumió para la ubicación de éstos. Por otro lado, la cantidad de puntos de medición con fuente en el altar, no es la misma que para la medición con fuente en el órgano. Es necesario aclarar que para medir este tipo de parámetros con la fuente ubicada en el altar se tomó la mayor cantidad de puntos relevantes posible, esto es porque, al evaluar el sonido proveniente del altar y en dirección hacia las naves, se espera conocer la respuesta del recinto ante la voz humana, por ser este tipo de fuentes, el más común en ese área de las iglesias, lo cual demanda mayor análisis por la importancia que tiene la escucha de la palabra.

¹⁸ El Arte Mudéjar es un estilo artístico que aparece como consecuencia de la influencia que recibieron los cristianos hispanos de los prisioneros musulmanes entre los siglos XII y XVI en el proceso llamado "Reconquista". El mudéjar, es un fenómeno exclusivamente hispano.

Ya que el oído humano no se muestra muy exigente ante sonidos que no necesitan el mismo nivel de procesamiento en el cerebro, ni inteligibilidad como en el caso de las frases musicales, el número de puntos para la medición de parámetros acústicos con la fuente ubicada en el órgano de la iglesia, puede reducirse a solamente los más relevantes para este caso, basándose también en el mismo criterio para establecer los puntos para el caso de la medición con fuente en el altar. Las figuras 3.12 y 3.13 indican la ubicación de los puntos de medición tanto para el proceso llevado a cabo con fuente en el altar como con fuente en el órgano de las iglesias.

Símbolos utilizados:

-  Punto de ubicación del micrófono de medición con fuente en el altar.
-  Punto de ubicación del micrófono de medición con fuente en el coro.
-  Punto de ubicación del sonómetro para evaluación de ruido de fondo.
-  Fuente sonora.

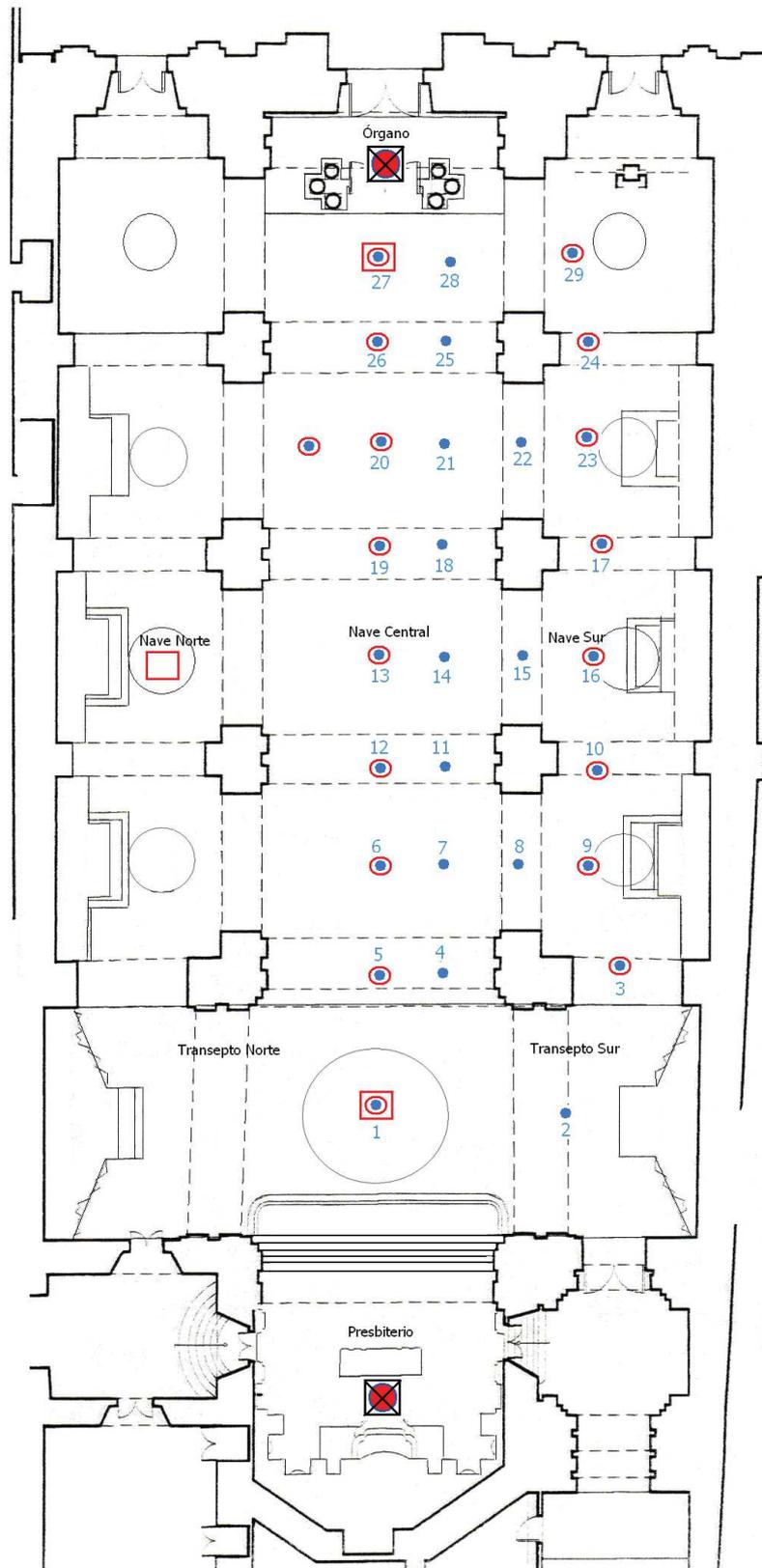


Figura 3.12. - Ubicación de los puntos de medición en la Iglesia De La Compañía De Jesús.

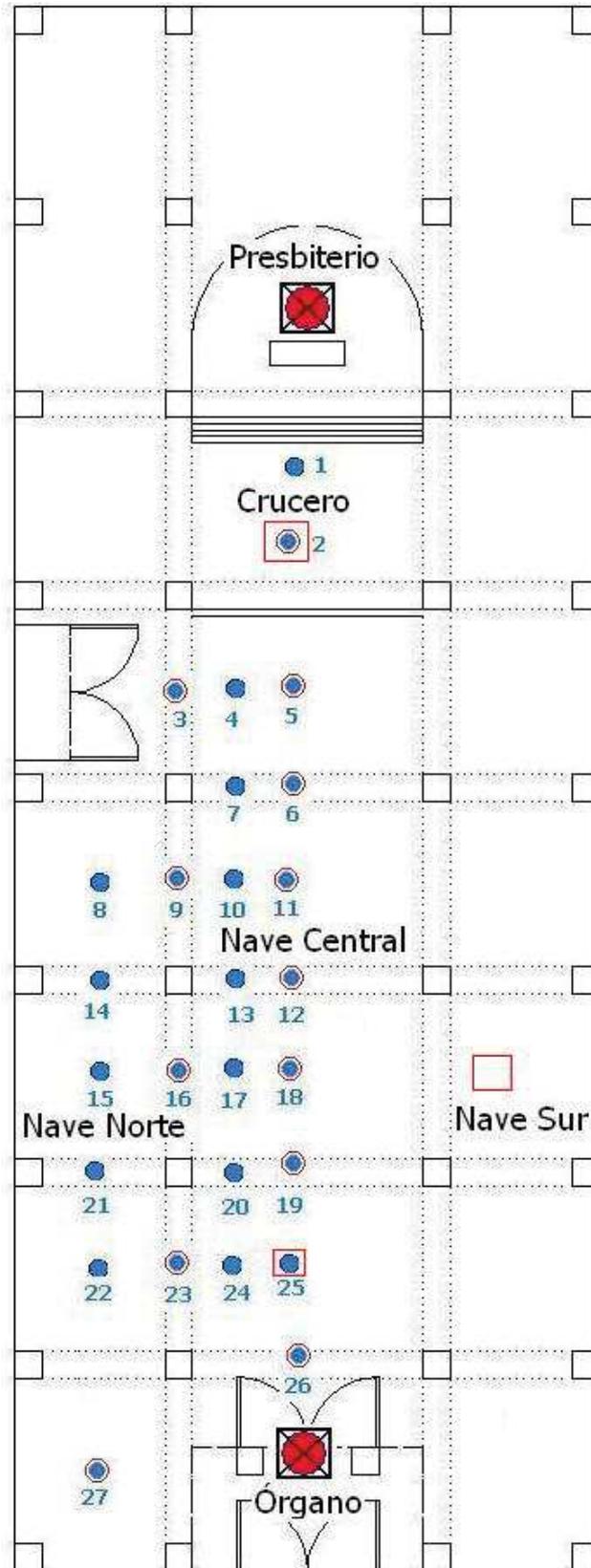


Figura 3.13. - Ubicación de los puntos de medición en La Catedral Metropolitana

4. CAPÍTULO IV

4.1 METODOLOGÍA

4.1.1 METODOLOGÍA DE LA MEDICIÓN

El método utilizado durante la fase experimental de esta tesis, fue el de mediciones acústicas utilizando *sweeps* o barridos de frecuencias. Este método se diferencia de los tradicionales por la rapidez que ofrece para determinar los datos de interés en un recinto. El sistema fue desarrollado por Angelo Farina, quien hacia el año 2000 presentó una nueva forma de medir funciones de transferencia utilizando *sweeps* y, posteriormente, una comparación entre el método de medición utilizando *sweeps* y MLS (*Maximal Length Signal*)

Los métodos tradicionales de medición de parámetros acústicos están definidos según la normativa ISO 140 para mediciones acústicas, pero la aparición del método de medición de parámetros acústicos por barrido de frecuencias hizo necesario generar una nueva normativa, la ISO/FDIS18233.

El procedimiento fue llevado a cabo de manera muy estricta y meticulosa, realizando suficientes tomas como las que define la normativa y basado en las recomendaciones textuales de otros profesionales y que han aplicado el método en proyectos similares.

El sistema de medición utilizado se denomina *Aurora Plugin* y la forma cómo opera consiste en un análisis de la respuesta al impulso de la sala. De esta manera el *software* compara la señal de entrada que es el barrido generado por éste (Barrido blanco)¹⁹, y que incluye a todas las frecuencias de interés dentro de la medición (por bandas de octava desde 31.5Hz hasta 16kHz). El barrido

¹⁹ Barrido blanco, de manera similar a ruido blanco, denominado así porque las frecuencias de interés son generadas todas al mismo nivel.

es reproducido por un sistema de altavoces y la respuesta es grabada por medio de un micrófono especial para mediciones, a través de un *software* para grabación sonora, el cual registra la señal de salida del sistema (la respuesta de la sala en cada una de las frecuencias del barrido). Mediante procesos matemáticos, el programa convierte a este barrido en una señal de impulso, la cual intrínsecamente incluirá ya, tales frecuencias de interés. El impulso ahora generado, pasa a ser la respuesta de impulso del sistema (sala), completándose todos los datos necesarios para realizar una comparación matemática entre la señal de entrada al sistema y la respuesta de impulso (IR) de éste; esto se logra mediante la aplicación de una convolución matemática entre la señal y ambas señales, con lo cual es posible reconstruir el sistema completo permitiendo conocer los parámetros acústicos que lo caracterizan de acuerdo con su respuesta impulsional.

El número de mediciones según la normativa, debe ser de mínimo tres por cada punto o por cada frecuencia evaluada. Mientras mayor sea el número de tomas, mayor será el coeficiente de repetitividad o correlación “*r*”, es decir, aumenta la probabilidad de que el resultado promedio se vuelva a repetir en otra experiencia, lo cual disminuye la incertidumbre de los resultados. En este estudio se llevó a cabo tres mediciones por cada punto establecido, y todos los resultados se promediaron tanto para cada punto como para la globalidad de la sala para obtener un valor general de cada parámetro. Unos pocos valores fueron imposibles de ser determinados por el sistema, así que éstos no fueron incluidos en el promedio, en tal caso, la división incluyó el número de valores que sí pudieron determinarse.

Si se deseara determinar el T60 de un recinto mediante la observación de la curva de respuesta del sonido grabado en computadora, se deberá medir la pendiente en decibeles comenzando 5dB por debajo del nivel inicial (en el cual la fuente sonora se apaga). El T60 es el triple del tiempo en que se verifica que el sonido ha decaído 20dB más a partir de los primeros 5dB inferiores a cuando la fuente dejó de emitir, esto es porque no suele ser tan fácil de determinar el

decaimiento de 60dB de manera visual, ni tampoco alcanzar este rango dinámico en todas las frecuencias, por lo que se recurre al denominado T20 y a este valor se lo multiplica por tres. Cuando la curva de respuesta no es lineal de manera que el T60 no pueda encontrarse multiplicando por tres al valor de T20, la normativa sugiere el trazado de una línea recta de tendencia apropiada para todos los puntos de inflexión y sobre ésta, medir la pendiente en decibeles para encontrar el decaimiento ya sea de 20dB, 30dB o mínimo 10dB y a partir de éstos, el T60. Mediante el programa puede asignarse el filtraje apropiado de la señal convolucionada para encontrar directamente el T60, sin embargo, es necesario un nivel de señal bastante alto como para que el nivel de la señal se mantenga algo más de 60dB sobre el nivel de ruido de fondo en todo el espectro de frecuencias, esto no siempre es posible, por lo que aún así conviene obtenerlo a partir del valor de T20 o de T30. Se sugiere que para evaluar T20 la señal debe mantenerse al menos 35dB sobre el nivel de ruido y 45dB si se trata de T30.

Las figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5, muestran una comparación entre el sistema de medición utilizado (*Aurora Plugin*) y otros sistemas de medición que funcionan de la misma manera²⁰. Las diferencias más elevada se presenta en general en bajas frecuencias para todos los parámetros acústicos tomados en cuenta. Esto puede deberse a la precisión de los filtros de señal programados para cada sistema, la dificultad de operación de los equipos en bajas frecuencias y otros asuntos más directamente relacionados con los algoritmos de programación en los sistemas. Sin embargo, la correlación entre los datos es lo suficientemente buena como para considerar válidos a los resultados obtenidos con *Aurora Plugin*.

²⁰ Gráficas obtenidas del proyecto “Sistema de Medición de Parámetros Acústicos utilizando Sweeps”. Universidad Pérez Rosales – Chile. Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5.

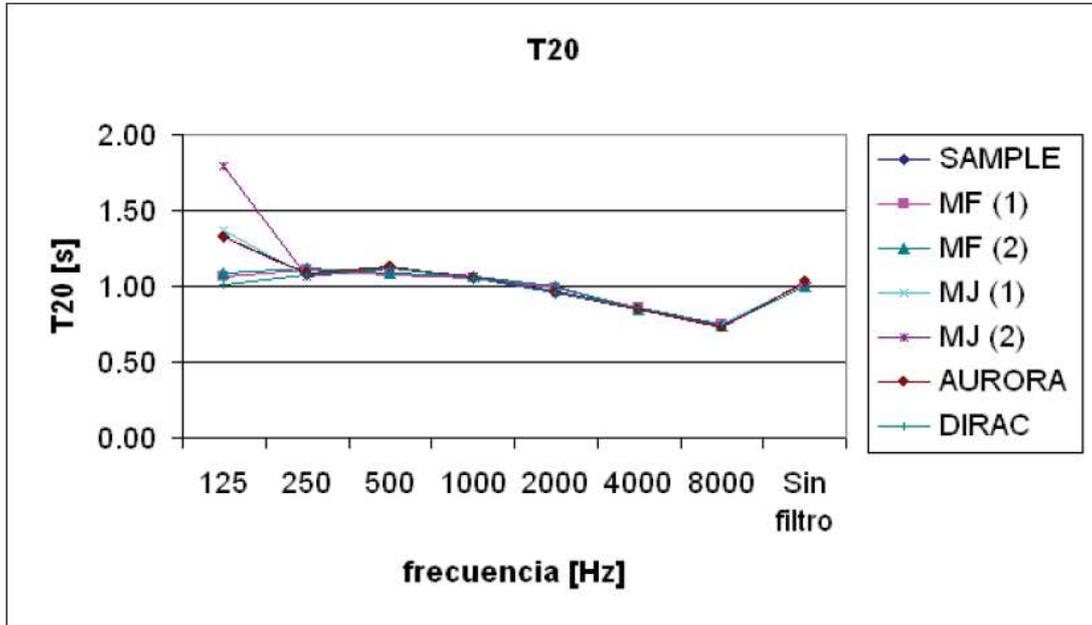


Figura 4.1. - Comparación de Aurora Plugin respecto a otros sistemas similares en la medición del tiempo de decaimiento T20.

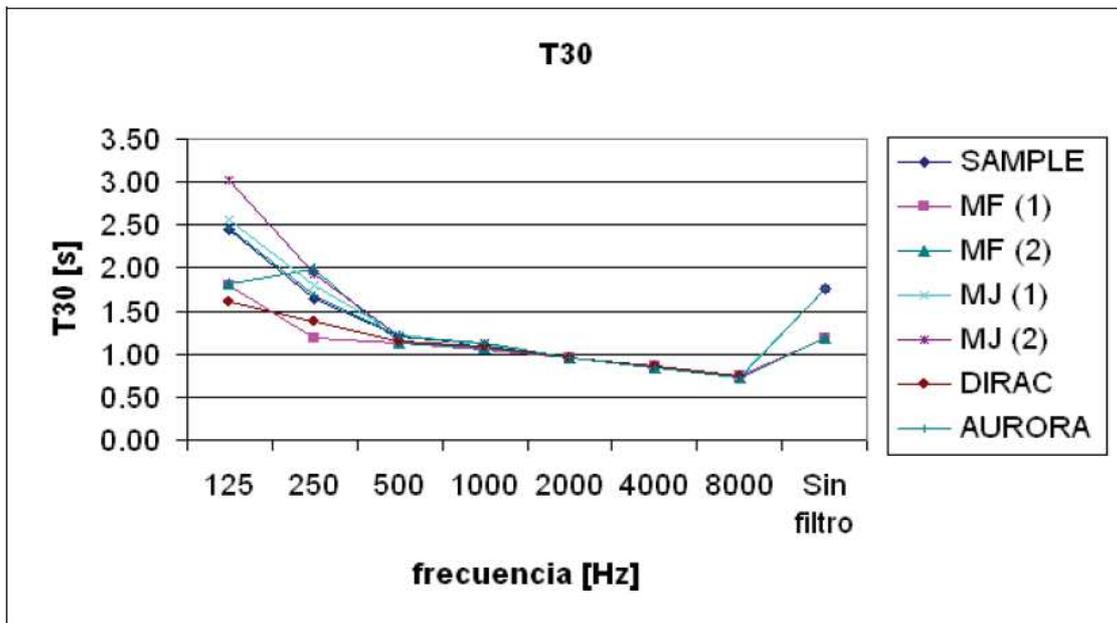


Figura 4.2. - Comparación de Aurora Plugin respecto a otros sistemas similares en la medición del tiempo de decaimiento T30.

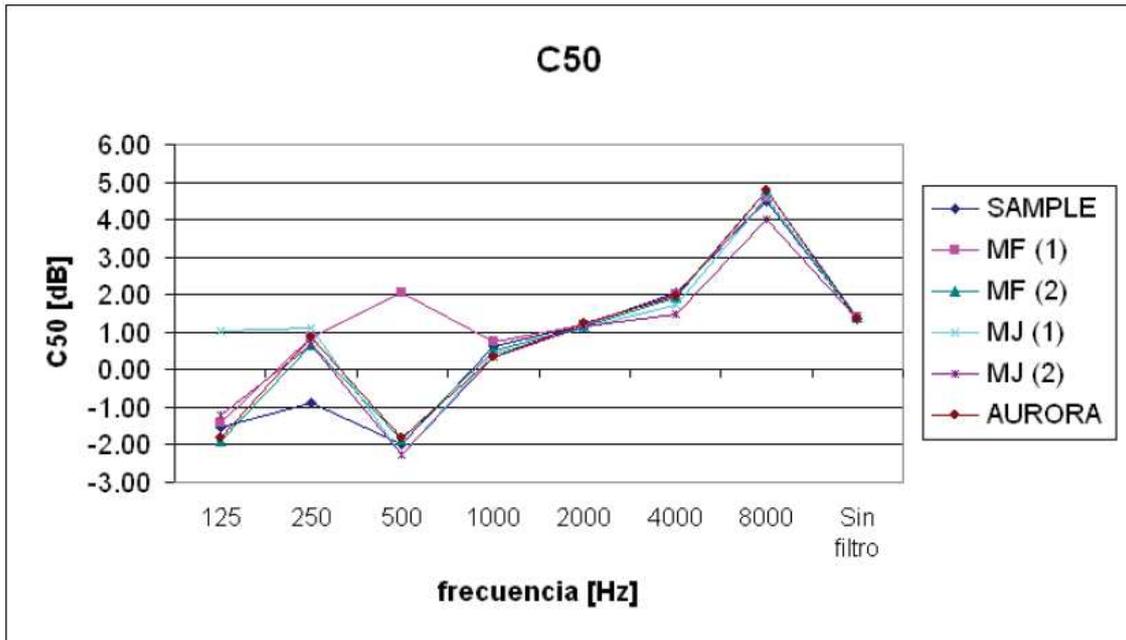


Figura 4.3. - Comparación de Aurora Plugin respecto a otros sistemas similares en la medición del índice de claridad C50.

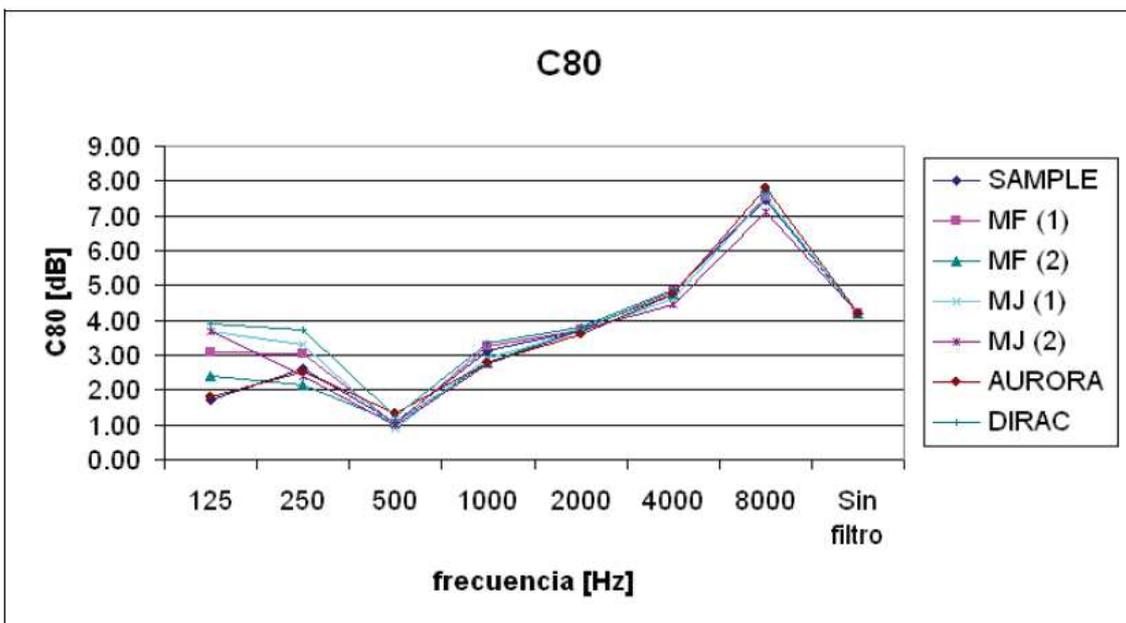


Figura 4.4. - Comparación de Aurora Plugin respecto a otros sistemas similares en la medición del índice de claridad C80.

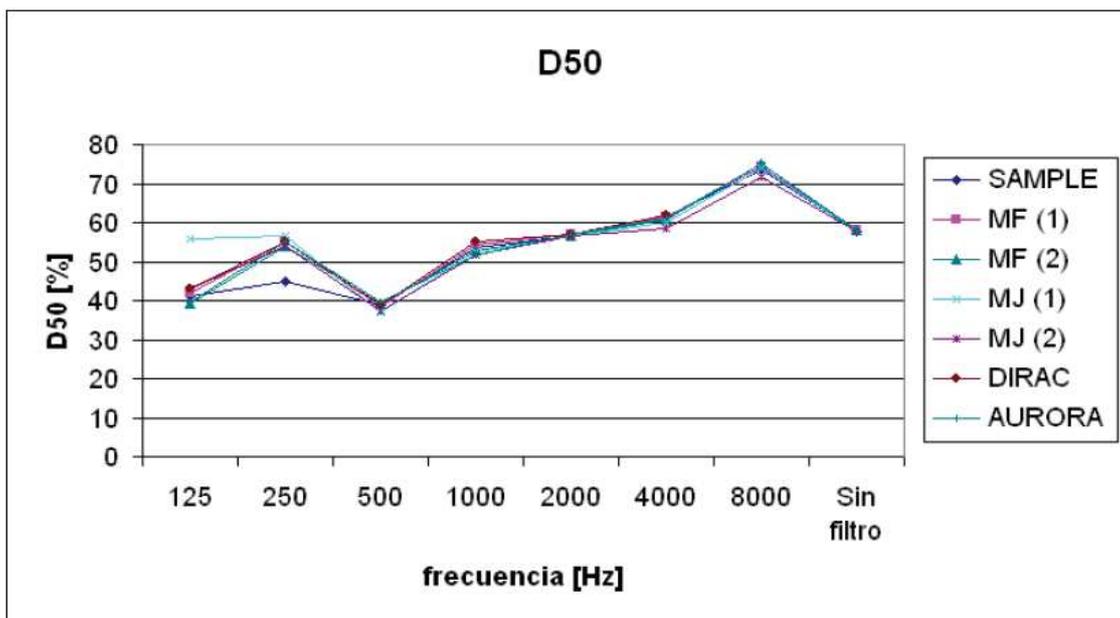


Figura 4.5. - Comparación de Aurora Plugin respecto a otros sistemas similares en la medición del índice de definición D50.

En general, se observa que los datos guardan mayor relación entre todos los sistemas a partir de la banda de 500Hz, para frecuencias menores, la fidelidad de los resultados resulta difícil de identificar, a pesar de que los filtros y algoritmos implementados por los diseñadores de los sistemas, cumplen las normas correspondientes para funcionamiento. Queda entonces al criterio de quien efectúa las mediciones, la discriminación de datos así como la utilización de diferentes sistemas de medición.

4.1.1.1. MEDICIÓN DEL RUIDO DE FONDO

El ruido de fondo se midió utilizando un sonómetro marca 01dB modelo Solo 40207 clase 2 dentro de los recintos en tres puntos distintos durante diez minutos. Adicionalmente, se midió el ruido de fondo en los exteriores de los locales con el mismo equipo y la misma metodología. La comparación de estos datos tiene por objeto cuantificar la atenuación que ofrecen los muros al ruido en el exterior de las iglesias, además de su respectiva ubicación dentro de los criterios NC, NR y PNC. En las figuras 4.6 y 4.7 se ilustra la medición del ruido de fondo en el exterior de la Iglesia De La Compañía De Jesús.



Figura 4.6. - Medición del ruido de fondo fuera de La Compañía De Jesús.



Figura 4.7. - Medición de parámetros acústicos dentro de La Catedral (I).



Figura 4.8. - Medición de parámetros acústicos dentro de La Catedral (II).

4.1.2 PLANIFICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS

Una vez identificados los espacios, se obtuvo una idea sobre la manera de proceder con las mediciones correspondientes, así por ejemplo, se determinó la ubicación más adecuada del sistema de medición (de acuerdo a las posibilidades de obtener energía eléctrica), cantidad de cable necesario para las conexiones, horario para las mediciones según la disponibilidad y políticas administrativas de cada iglesia, además de factores netamente técnicos como los relacionados a la operación misma del sistema, entre otros factores.

La tabla 4.1 resume algunos datos informativos sobre las iglesias estudiadas: Datos sobre la cantidad de puntos, el período en el que fueron construidas y el volumen aproximado de los recintos.

Tabla 4.1. - Resumen informativo de las iglesias estudiadas

Iglesia	Encargado (a)	Construcción	Cantidad de puntos		Volumen aprox.
			Altar	Órgano	
La Compañía	Arq. Luis Subía	Siglos XVII - XVIII	29	12	14679.03 m ³
	Arq. Diego Santander				
La Catedral	Ing. Magaly Vázquez	Siglos XVII - XVIII	27	12	15407.52 m ³

Conforme el proceso de medición se llevaba a cabo, se manifestaron ciertas dificultades e inquietudes nuevas, principalmente que tenían que ver con las autorizaciones otorgadas, previas solicitudes que requerían la utilización del local en horas en las que no existiera concurrencia de turistas ni de otro tipo de fuentes sonoras que alteren la adquisición de datos dentro de los recintos. Tal petición tuvo favorable acogida por parte de la administración de la Iglesia De La Compañía De Jesús, permitiendo que el proceso se lleve a cabo de manera ágil y en las condiciones más adecuadas. En el caso de la Iglesia de La Catedral Metropolitana, ciertos conflictos al respecto no permitieron el desempeño ciento por ciento apegado a la normativa, a pesar de eso, la obtención de datos mediante las mediciones se llevó a cabo de la manera más estricta posible. Así que, para garantizar la veracidad de los resultados se incrementó el número de tomas por punto de medición con el fin de discriminar los datos menos dispersos respecto a la media aritmética, y descartando aquellos que se encontraban demasiado lejos del resto.

Los procedimientos, desde la medición para la obtención de datos hasta la interpretación de los mismos, fue conducida lo más apegada a la norma ISO

3382 para que así el nivel de la señal sea tomado muy por encima del nivel de ruido de fondo, y los datos presenten el mayor índice de correlación.

La evaluación del ruido de fondo se realizó en cambio en un menor número de puntos de medición (cuatro en el interior de los locales y uno por fuera, frente a la puerta de entrada principal) y conforme a lo descrito en el apartado 4.1.1.1. (Medición del Ruido de Fondo). Con los datos obtenidos se efectuó el respectivo promedio de niveles mediante relación logarítmica entre los valores extraídos del sonómetro. Con estos valores se evaluó la atenuación de los muros ante el ruido del exterior, pero también se los utilizó para verificar el cumplimiento de lo establecido según los criterios de caracterización de ruido NC, NR y PNC para el caso particular de las iglesias. En el **Capítulo V**, en el apartado **5.1. Análisis de los resultados** se inquiriere sobre los procedimientos aquí planteados.

4.1.2.1 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

- Computadora portátil.
- Altavoz RCF Art 300 A.
- Interfaz M-Audio Firewire 410.
- Cable Firewire.
- Micrófono de medición dBx RTA-M.
- Sonómetro marca 01dB modelo Solo 40207 clase 2.
- Stand para micrófono.
- Stand para altavoz.
- Stand para sonómetro.
- Cable para micrófono >50m de longitud.
- Extensiones eléctricas
- Planos de la localidad

Otros:

- Cinta adhesiva.

- Cinta aislante.
- Estilete.
- Destornilladores.
- Alicates y pinzas.
- Cautín.
- Estaño.
- Pasta para soldar.

4.1.2.2 ESQUEMAS Y CONEXIONES

El esquema de conexiones se muestra en la figura 4.9. Todas las mediciones, en las dos iglesias, se realizaron siguiendo el esquema presentado. La ubicación del altavoz y del micrófono se describe en el Cap. III en el apartado **Ubicación de los puntos de medición.**



Figura 4.9. - Esquema de conexiones de los elementos del sistema de medición.

5. CAPÍTULO V

5.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1.1 DATOS OBTENIDOS Y GRÁFICOS DESCRIPTIVOS

5.1.1.1 IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS

La Tabla 5.1. y la figura 5.1 recogen los datos medidos de ruido de fondo en el exterior e interior de la Iglesia De La Compañía, la tabla 5.2 en cambio, muestra el nivel de ruido resultante en el interior obtenido como promedio logarítmico de los niveles en **ponderación A** medidos en cada uno de los puntos establecidos dentro de la iglesia, la atenuación que ofrece la construcción respecto al ruido de fondo en el exterior de la iglesia, se observa en la misma tabla de manera simple como una diferencia de nivel (ΔL).

Los promedios de los niveles de ruido de fondo fueron obtenidos aplicando la ecuación 5.1, definida para encontrar promedios energéticos, esta fórmula se utilizó ya que todas las tomas tienen igual duración de tiempo:

$$\langle L \rangle = 10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{NPS_i}{10}} \right] \quad (\text{EC. 5.1})$$

Donde:

n: Número de mediciones tomadas.

NPS_i: Nivel de presión sonora correspondiente a cada medición.

Tabla 5.1. - Ruido de fondo medido en la Iglesia de La Compañía de Jesús.

Afuera		Dentro de la iglesia					
f	NPS [dB(A)]	f	NPS [dB(A)]	f	NPS [dB(A)]	f	NPS [dB(A)]
63,0	48,5	63,0	17,6	63,0	18,0	63,0	50,6
125,0	56,9	125,0	21,8	125,0	26,9	125,0	57,4
250,0	60,6	250,0	25,1	250,0	32,5	250,0	63,2
500,0	60,8	500,0	27,3	500,0	36,9	500,0	63,5
1000,0	62,0	1000,0	28,7	1000,0	38,7	1000,0	68,3
2000,0	57,1	2000,0	20,5	2000,0	31,6	2000,0	66,3
4000,0	50,7	4000,0	16,0	4000,0	28,3	4000,0	53,2
8000,0	42,4	8000,0	11,1	8000,0	12,4	8000,0	43,3
Leq	67,1		33,0		42,2		72,1

La tercera columna de niveles evaluados dentro de la iglesia ha sido omitida debido a que éstos son superiores a los valores medidos en el exterior de la iglesia, aspecto que puede atribuirse a que no se trata de un ruido constante y a que los valores de la columna corresponden a un punto cercano a la puerta de acceso, puerta que por tener grandes hendijas, no ofrece el aislamiento adecuado del ruido externo hacia el interior del templo.

Tabla 5.2. - Ruido de fondo global en el interior de la Iglesia de La Compañía de Jesús y atenuación de nivel ofrecida por los muros.

NPS Promedio		ΔL
f	NPS [dB(A)]	[dB(A)]
63,0	17,8	30,7
125,0	25,0	31,9
250,0	30,2	30,4
500,0	34,3	26,4
1000,0	36,1	25,9
2000,0	28,9	28,2
4000,0	25,5	25,1
8000,0	11,8	30,6
	39,7	27,4

A continuación, en la tabla 5.3 se compara los niveles de ruido por bandas de octava para la iglesia De La Compañía De Jesús, respecto a los criterios de ruido NC, NR y PNC, recomendados, especificados en la tabla 2.4. De manera gráfica, la misma comparación se ilustra en la figura 5.1. De ambas ilustraciones se puede verificar que el nivel de ruido de fondo en la iglesia es aceptable dentro de casi todo el rango de frecuencias evaluado.

Tabla 5.3. - Comparación del ruido de fondo de la Iglesia de La Compañía de Jesús respecto a las curvas de clasificación NC, NR y PNC.

Valores Recomendados	Clasificación	Índice	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	NC	30	57	48	41	35	31	29	28	27
	NR	35	63,1	52,4	44,5	38,9	35	32	29,8	28
	PNC	35	55	50	45	40	35	30	28	28
Valor medido [dB(A)]			17,8	25,0	30,2	26,4	25,9	28,2	25,1	30,6

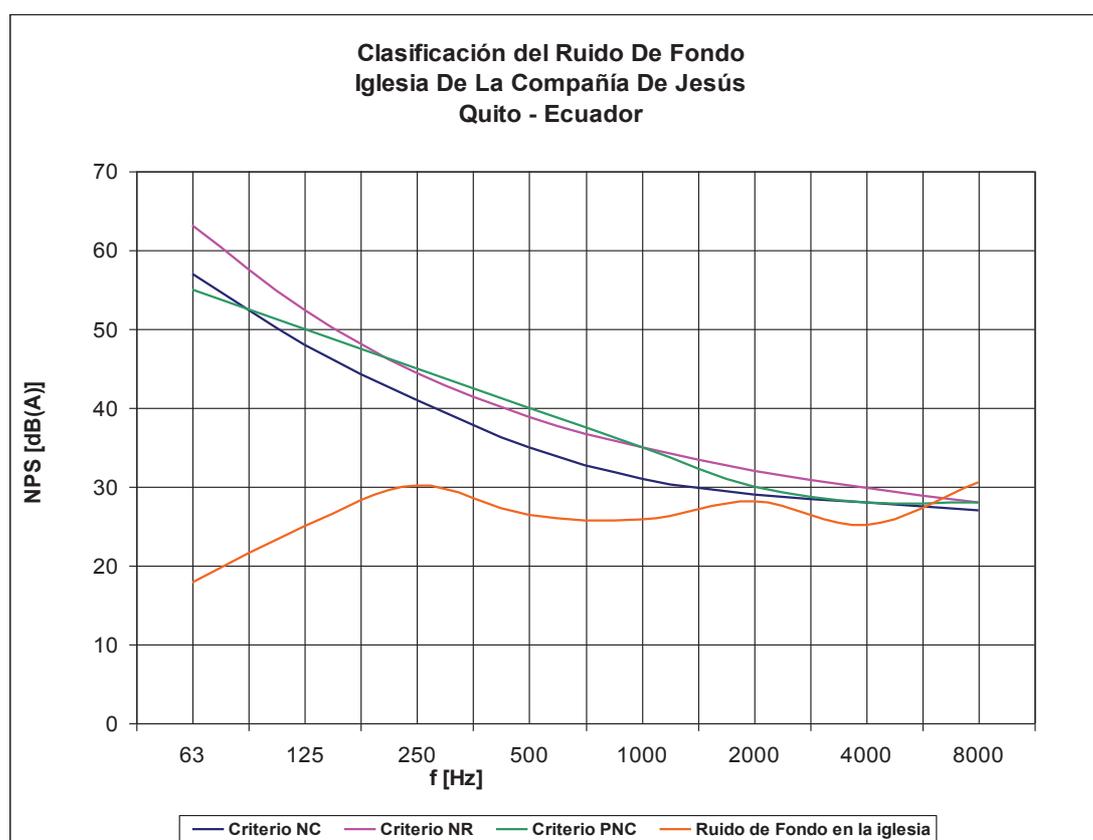


Figura 5.1. - Comparación del ruido de fondo de la Iglesia de La Compañía de Jesús respecto a las curvas de clasificación NC, NR y PNC

A continuación se presenta las gráficas de los parámetros acústicos obtenidos durante las mediciones *In Situ* tanto con la fuente en el altar como en el coro alto de la iglesia, y una tabla de resumen para cada caso (Anexo 4). Más adelante, en el apartado de **Análisis de los resultados**, se profundizará en la interpretación de los datos representados en las figuras, incluida la diferencia entre la respuesta en el coro y en el altar.

Las figura 5.2 representa el gráfico del tiempo de reverberación en la Iglesia de La Compañía para frecuencias por banda de octava, es notorio el rompimiento de la tendencia de la gráfica en frecuencias medias, llegando a ser incluso superior que algunas frecuencias bajas que es donde comúnmente se presenta un T60 elevado. A partir de los valores de T60, se puede calcular el T60mid, la calidez (BR) y el brillo acústico (Br) (expresados también en el Anexo 4).

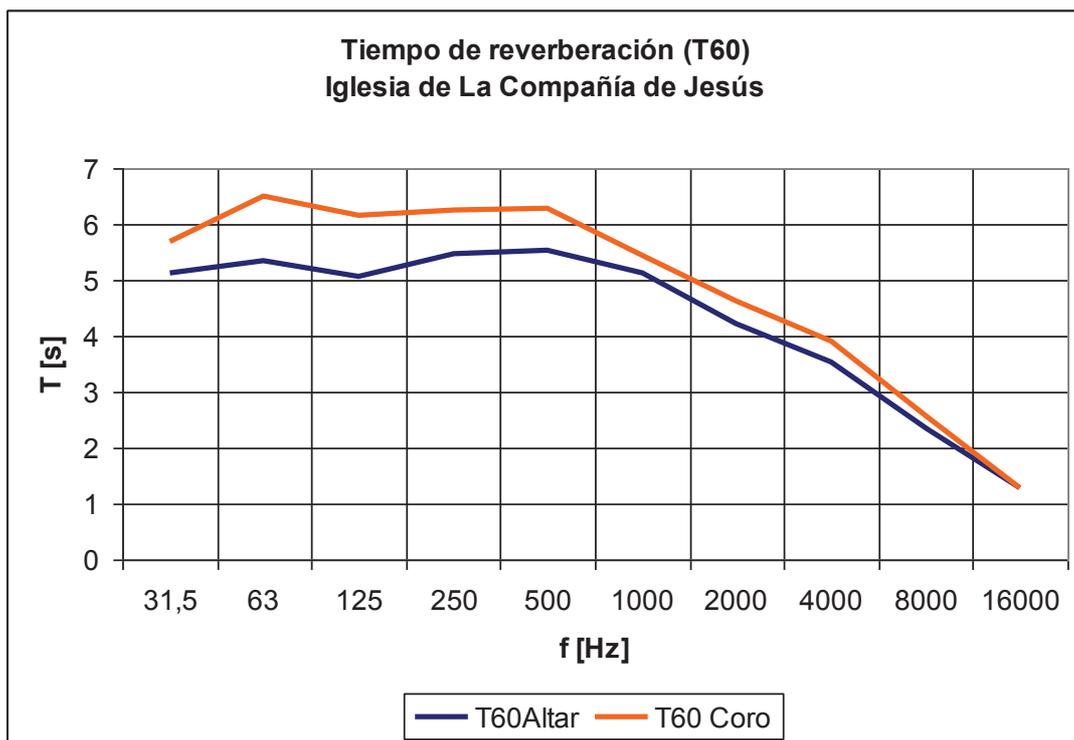


Figura 5.2. - Tiempo de reverberación en la Iglesia de La Compañía

La figura 5.3 es la representación gráfica del índice de claridad de la voz (C50). No existen valores óptimos generalizados para este parámetro, sin embargo, se puede deducir la eficiencia del recinto en la claridad de la voz y la

inteligibilidad de la palabra, ya que mientras más alto es su valor, se espera una mayor inteligibilidad de la palabra.

Observación:

Por definición, los índices de claridad tanto de la voz (C50) como de la música (C80) relacionan una cantidad de energía durante un período inicial respecto a la que llega después de ese período. Si se entiende que la energía en el campo reverberante provoca un incremento de la energía posterior a la del período correspondiente (50ms para C50 y 80ms para C80), se puede deducir que a medida que el nivel en el campo reverberante disminuye, el valor de los índices de claridad aumenta.

En el caso práctico, el tiempo de reverberación disminuye a medida que la frecuencia aumenta, y con éste parámetro, también el nivel del campo reverberante; por este asunto, el valor de los índices de claridad experimentan también una subida a medida que se avanza en frecuencia.

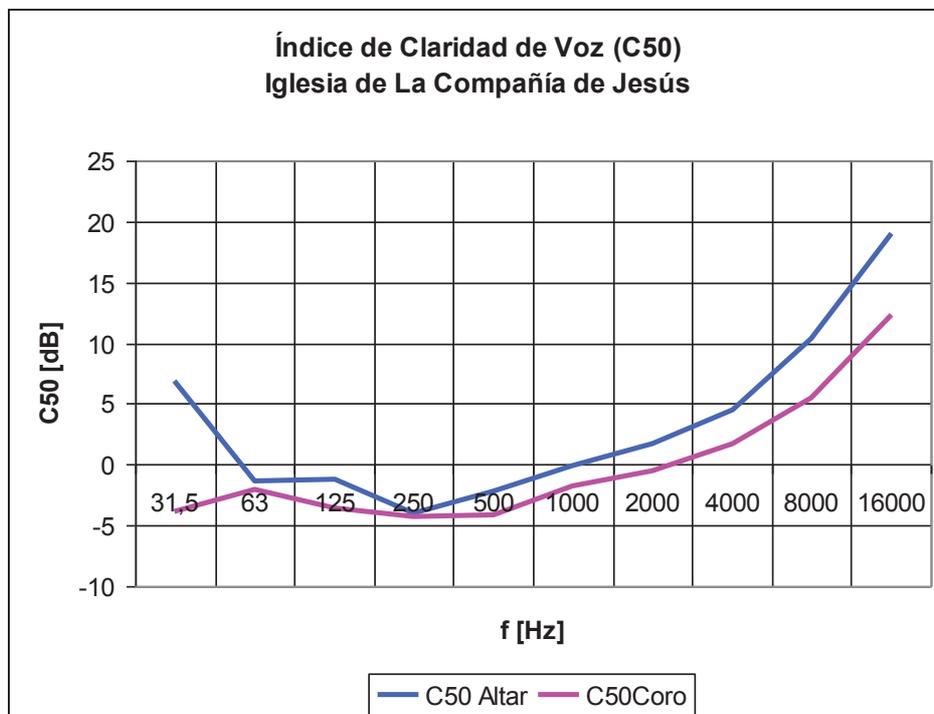


Figura 5.3. - Índice de claridad de la voz C50 en la iglesia de La Compañía.

Los valores numéricos pertenecientes al índice de claridad C50 se encuentran expresados en el Anexo 4, utilizando dichos valores se puede calcular el promedio ponderado C50 o *SPEECH AVERAGE* mediante la ecuación 2.8 descrita en el Capítulo II, el valor correspondiente a C50_{S.A.}, se encuentra también dentro del mismo anexo.

La figura 5.4 representa la distribución del índice de claridad musical por bandas de octava. Para verificar los valores asociados al gráfico, referirse al Anexo 4.

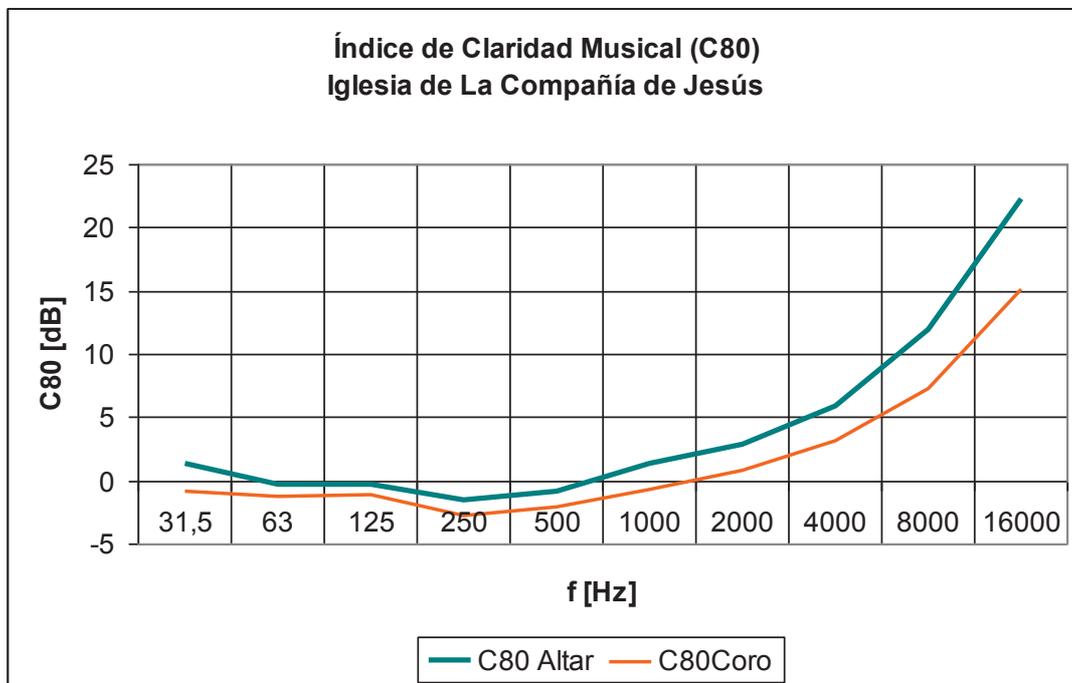


Figura 5.4. - Índice de claridad de musical C80 en la Iglesia de La Compañía.

La representación gráfica del índice de definición D50 se encuentra ilustrada a continuación en la figura 5.5. Puede notarse un aumento en el valor del índice de definición en frecuencias superiores a los 4kHz, sin embargo esto no resulta muy enriquecedor ya que valores por sobre esa frecuencia, tienden a alejarse del rango de la voz, por lo que tal aumento no tiene mayor repercusión en la inteligibilidad de la palabra.

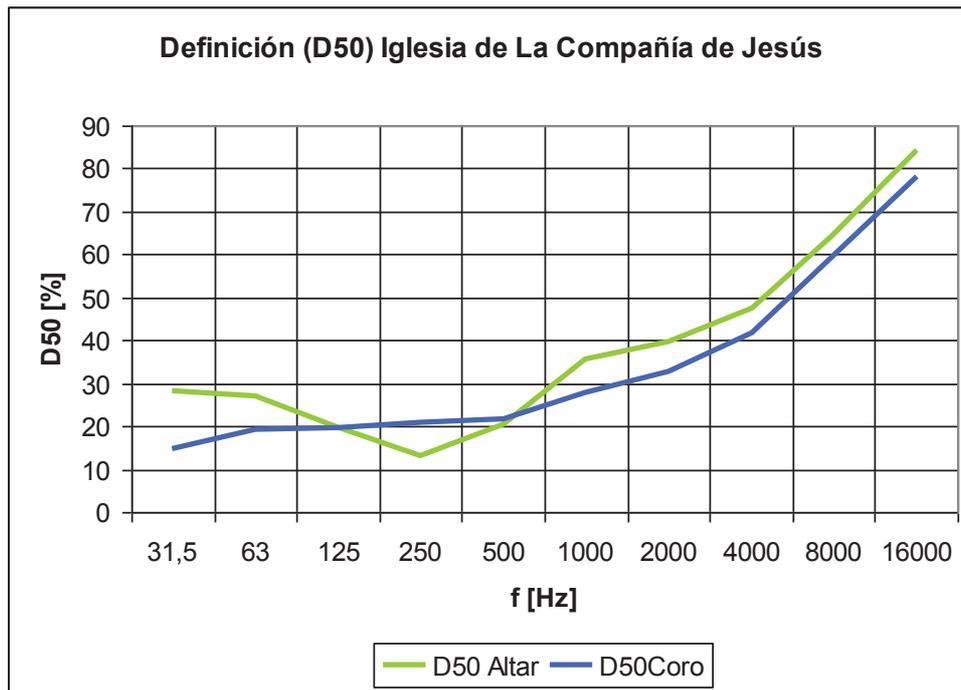


Figura 5.5. - Índice de definición D50 en la Iglesia de La Compañía.

5.1.1.2. CATEDRAL METROPOLITANA

A continuación se presentan los datos de ruido y parámetros acústicos de la Iglesia de La Catedral Metropolitana. La tabla 5.4 contiene los datos de la medición del ruido de fondo en el interior y en el exterior de la iglesia en ponderación A.

Tabla 5.4. - Ruido de fondo medido en la Catedral Metropolitana.

Afuera		Dentro de la iglesia					
f	NPS [dB(A)]	f	NPS [dB(A)]	f	NPS [dB(A)]	f	NPS [dB(A)]
63	45,2	63	25,7	63	24,3	63	25,3
125	48,2	125	28,5	125	27,2	125	28,4
250	49,1	250	35,6	250	31,7	250	31,7
500	54,0	500	38,5	500	36,7	500	32,8
1000	52,8	1000	39,7	1000	36,8	1000	33,3
2000	51,7	2000	34,4	2000	32,3	2000	30,3
4000	48,0	4000	28,3	4000	25,1	4000	24,3
8000	34,7	8000	15,0	8000	14,8	8000	13,6
Leq	59,2		43,9		41,4		39,0

El promedio de los niveles de ruido de fondo en los tres puntos de medición en el interior de la iglesia, así como la atenuación ofrecida por los muros al ruido externo se muestran a continuación en la tabla 5.5:

Tabla 5.5. - Ruido de fondo global en el interior de la Catedral Metropolitana y atenuación de nivel ofrecida por los muros.

NPS Promedio		ΔL
f	[dB(A)]	[dB(A)]
63	25,1	20,1
125	28,1	20,2
250	33,4	15,7
500	36,6	17,4
1000	37,3	15,5
2000	32,7	19,1
4000	26,3	21,7
8000	14,5	20,2
	41,9	28,2

En la tabla 5.8 se indican los valores de ruido de fondo medido en la Iglesia de La Catedral para su comparación con los valores recomendados según los criterios NC, NR y PNC. El índice correspondiente a cada curva, recomendado para iglesias se encuentra especificado en la tabla 2.4.

Tabla 5.8. - Comparación del ruido de fondo de la Catedral Metropolitana respecto a las curvas de clasificación NC, NR y PNC.

Valores Recomendado	Clasif.	Índice	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	NC	30	57	48	41	35	31	29	28	27
	NR	35	63	52	45	39	35	32	30	28
	PNC	35	55	50	45	40	35	30	28	28
	Valor medido [dB(A)]		25,1	28,1	33,4	36,6	37,3	32,7	26,3	14,5

La gráfica correspondiente a la tabla anterior, se muestra en la figura 5.6. Es visible que la curva de ruido evaluada en el interior de la iglesia, corta a todas

las curvas de valoración de ruido recomendadas en rangos de frecuencia comprendidos entre los 500Hz y los 4kHz, coincidiendo con el espectro de la voz humana. Concluyentemente, los niveles de ruido dentro de La Catedral, no cumplen los criterios recomendados.

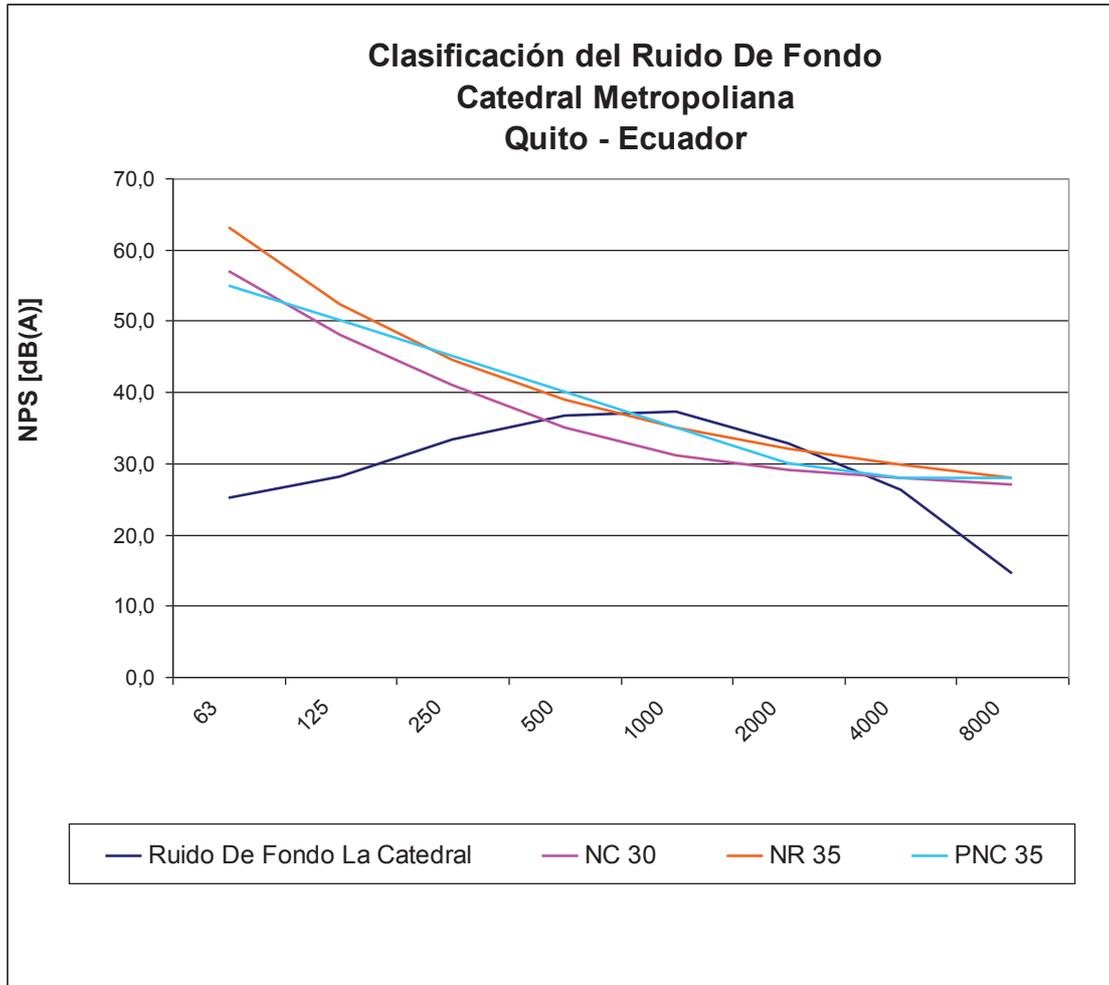


Figura 5.6. - Comparación del ruido de fondo de la Catedral Metropolitana respecto a las curvas de clasificación NC, NR y PNC

A continuación, se muestran las gráficas de tiempo de reverberación dentro de la Iglesia de La Catedral evaluado con fuente en el altar y en el coro. La respuesta no es la misma en el altar que en el coro para ningún parámetro. En el apartado de **Análisis de los Resultados**, se indagará con mayor profundidad sobre todos los parámetros acústicos representados.

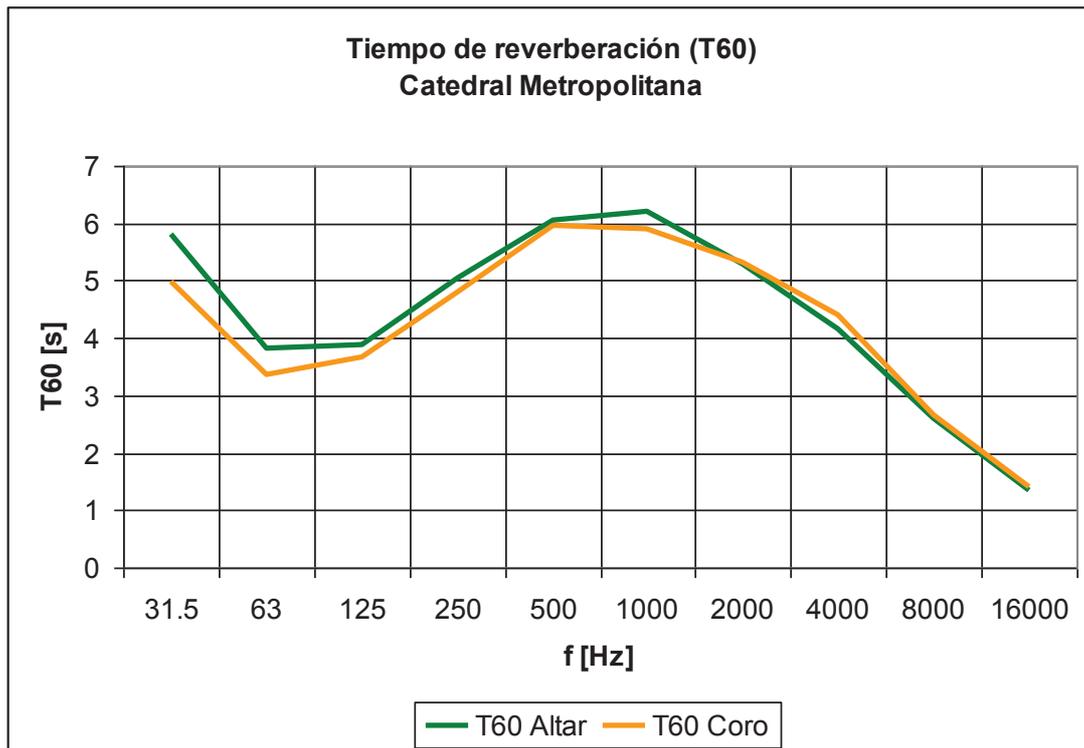


Figura 5.7. - Tiempo de reverberación en la Catedral Metropolitana.

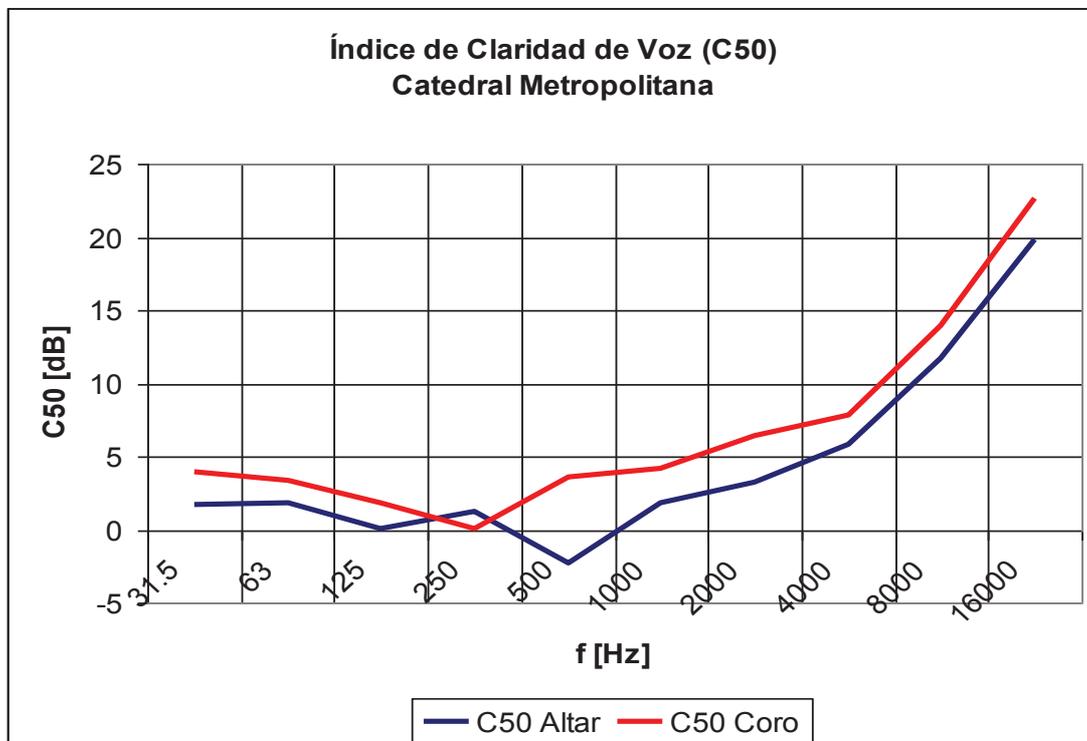


Figura 5.8. - Índice de claridad de la voz C50 en la Catedral Metropolitana.

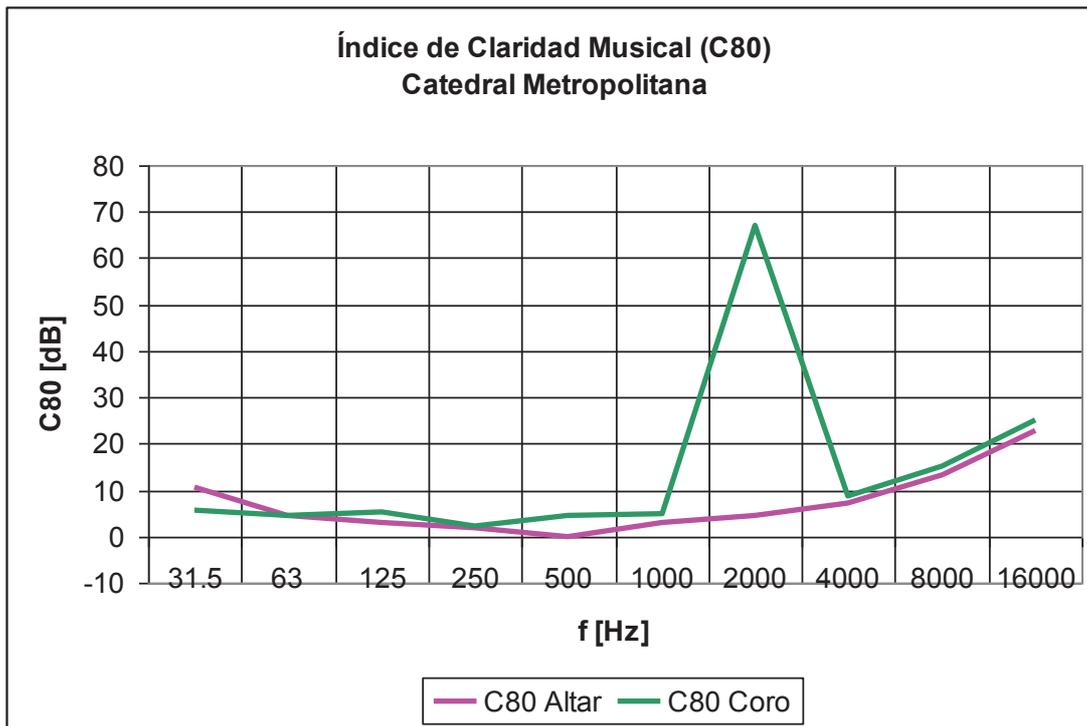


Figura 5.9. - Índice de claridad de musical C80 en la Catedral Metropolitana.

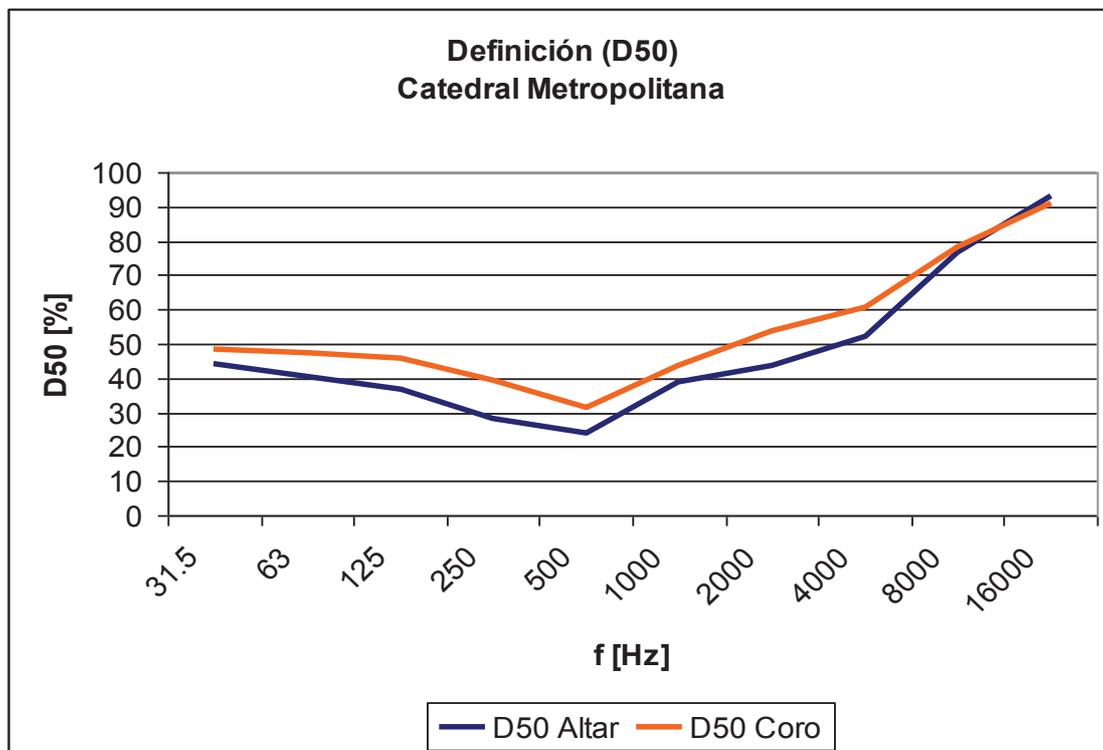


Figura 5.10. - Índice de definición D50 en la Catedral Metropolitana.

5.1.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis y la interpretación de los resultados obtenidos registra su alcance en función de algunos aspectos envueltos tanto en el desarrollo experimental como en lo predictivo. En el apartado 5.1.2.1 se comenta acerca de los factores que intervinieron negativamente en la evaluación de la acústica de las iglesias estudiadas.

5.1.2.1. LIMITANTES DEL ESTUDIO REALIZADO:

El estudio se llevó a cabo de la manera más estricta posible y de la misma forma, la manipulación de los datos obtenidos; no obstante, se presenta un margen de error determinado por algunos elementos, mencionados a continuación:

- La fuente sonora utilizada para la emisión del barrido fue un altavoz RCF ART300, cuya radiación está definida por un patrón polar horizontal y vertical omnidireccional en frecuencias comprendidas entre 200Hz y 1.25kHz, pero que para frecuencias a partir de 1.25kHz se torna progresivamente unidireccional (Anexo 2). La manera más correcta de efectuar este tipo de mediciones acústicas es utilizando una fuente omnidireccional con respuesta plana en las frecuencias de interés, y de ser necesario un *sub-woofer* de apoyo para evaluar la respuesta en frecuencias bajas. El método de medición utilizado evalúa la función de transferencia entre la señal emitida por el altavoz y la sala de prueba, por lo que la respuesta en frecuencia no resulta muy relevante en este caso, siempre que se respete la recomendación de que el rango utilizado no sea tan bajo que no pueda determinarse la caída de 20dB para obtener por lo menos el valor de T20 ($T60=3*T20$).
- El sonómetro que se utilizó no tiene un certificado de calibración actualizado, este paso es muy importante para la adquisición de

medidas completamente fiables. Sin embargo, la sensibilidad del transductor del instrumento de medida fue debidamente ajustado mediante un calibrador apropiado para esto, por otro lado, la falta de certificación no es una importante desventaja ya que el sonómetro se utilizó únicamente para la evaluación del ruido de fondo, parámetro que incide directamente en la evaluación de parámetros acústicos .

- Las condiciones eléctricas de los recintos evaluados no eran las óptimas, siempre es recomendable una debida puesta a tierra de las conexiones a fin de reducir al máximo el ruido eléctrico inducido por polarización de los equipos activos.
- La cantidad de cable utilizado para la conexión del micrófono de medición y el altavoz hacia la interfaz, teniendo como premisa que la resistividad del cobre ($\rho=0.0172\Omega\text{mm}^2/\text{m}$) se vuelve significativa a partir de los 30m y que en el caso de las iglesias estudiadas se alcanzó a superar los 50m, asunto que influye también en la linealidad del sistema.
- Se ha efectuado una comparación entre valores recomendados y valores medidos. Estas recomendaciones fueron obtenidas directamente desde material bibliográfico, pero recomendaciones más exactas podrían hacerse evaluando los recintos mediante modelos energéticos, los cuales analizan tanto la energía directa como la reflejada del sonido dentro de un recinto. Las investigaciones más recientes han dejado como aporte el modelo μ , el cual utiliza coeficientes que contemplan la forma geométrica de los recintos analizados y, que fue definido con la finalidad de abarcar mayores tipologías arquitectónicas.

Conociendo las limitantes, los resultados son analizados de aquí en adelante.

5.1.2.2. RUIDO DE FONDO:

Si bien el principal objetivo de este trabajo de investigación es la elaboración de un inventario de los parámetros acústicos de los recintos en estudio, como parte de su patrimonio intangible, es pertinente analizar además la situación presente en términos de utilización del suelo respecto a los niveles de ruido ambiental. Las tablas 5.3 (Tabla 5.3. - Comparación del ruido de fondo de la Iglesia de La Compañía de Jesús respecto a las curvas de clasificación NC, NR y PNC.) y 5.8 (Comparación del ruido de fondo de la Catedral Metropolitana respecto a las curvas de clasificación NC, NR y PNC.) y sus correspondientes figuras 5.1 y 5.6 muestran una comparación entre los criterios de ruido de fondo recomendados para iglesias y los niveles evaluados en los sitios. De aquí es evidente que en el caso de la Iglesia de La Catedral Metropolitana, las tres curvas recomendadas son cortadas por la curva de ruido evaluado, lo que significa que el recinto no cumple los niveles de ruido de fondo recomendados por cualquiera de los tres criterios. Esto obedece principalmente al sector donde se encuentran ubicadas (Centro de la ciudad), un sector muy concurrido y rodeado de transporte público y privado, pero donde también la presencia de gente y el tráfico a toda hora del día alcanza a tener incidencia significativa sobre el ruido de fondo evaluado.

Para modificar el ruido de fondo de manera que se cumpla con las recomendaciones, en ambas iglesias sería aconsejable realizar un estudio sobre los elementos que provocan esos niveles de ruido, analizando las posibles fuentes generadoras de ruido y comparándolas con el espectro de frecuencias asociado a las mismas, para que a partir de esos resultados preliminares se pueda decidir sobre los procedimientos más adecuados para el correspondiente aislamiento acústico.

5.1.2.3. TIEMPO DE REVERBERACIÓN (T60)

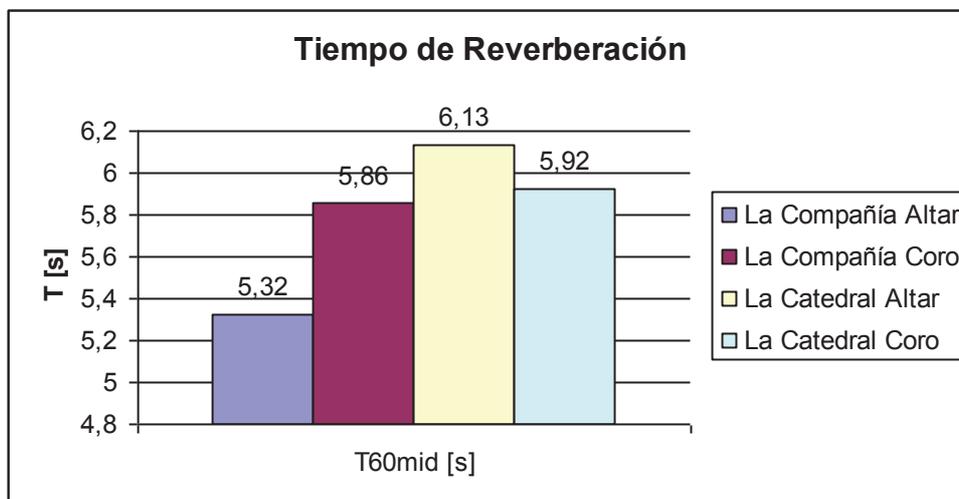


Figura 5.11. Comparación de tiempo de reverberación. La Compañía – La Catedral

En general, ambas iglesias sobrepasan el límite superior de tiempo de reverberación medio (T60mid) óptimo (La Compañía: 5.32s con fuente en el altar y 5.86s con fuente en el coro; La Catedral: 6.13s con fuente en el altar y 5.92s con fuente en el coro), esto, si se toma en cuenta el T60 recomendado según el volumen y utilización del recinto basándose en la figura 2.3, de donde se puede ver que tal valor esperado (<2.5s) es superado por más del doble. A pesar de ello, hacer esta afirmación resulta apresurado, puesto que ambas iglesias están conformadas por volúmenes acoplados a uno principal representado por la nave central.

Utilizando la ecuación 2.3 y los criterios de la tabla 2.1 se puede construir una tabla de T60 óptimo para cada iglesia estudiada. El criterio que se aplicó para encontrar el T60 óptimo para el altar fue el uso de la palabra, al cual le corresponde el valor de $\mu = 0.075$ en la tabla 2.1 y, para el coro, la casilla de música religiosa correspondiente a un $\mu = 0.1$ en la misma tabla. Las tablas 5.9 y 5.10 contienen los valores calculados para ambas iglesias y las figuras 5.11 y 5.12 ilustran los valores calculados en comparación con los valores medidos de tiempo de reverberación.

Tabla 5.9. – Tiempo de reverberación óptimo para aplicaciones en la música (Fuente en el Coro).

Iglesia	Frecuencia [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
La Compañía	T60 óptimo	3.18	2.82	2.45	2.20	2.20	2.20
La Catedral	T60 óptimo	3.23	2.86	2.49	2.24	2.24	2.24

Tabla 5.10. – Tiempo de reverberación óptimo para aplicaciones en la palabra (Fuente en el Altar).

Iglesia	Frecuencia [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
La Compañía	T60 óptimo	2.39	2.11	1.84	1.65	1.65	1.65
La Catedral	T60 óptimo	2.43	2.15	1.87	1.68	1.68	1.68

Para contar con un único descriptor de T60 óptimo, se deberá tomar el gráfico correspondiente al uso de la palabra, ya que esta aplicación exige más compromiso entre la arquitectura y el acondicionamiento acústico, dada la naturaleza del mensaje hablado.

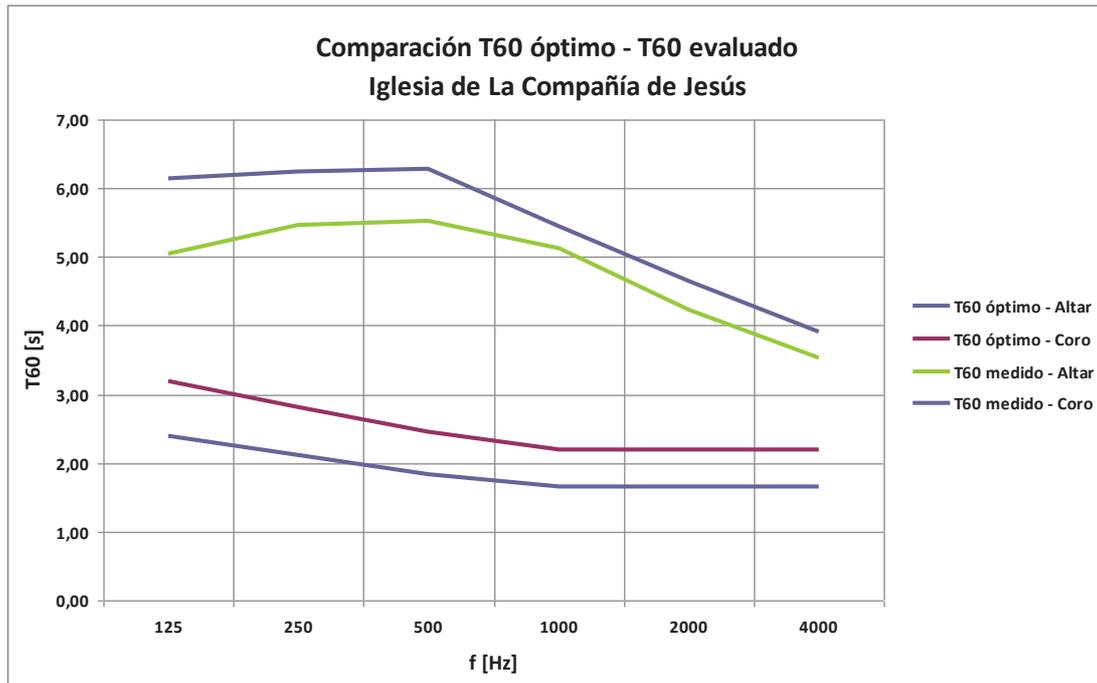


Figura 5.12. – Comparación entre tiempo de reverberación óptimo y medido para la iglesia de La Compañía De Jesús.

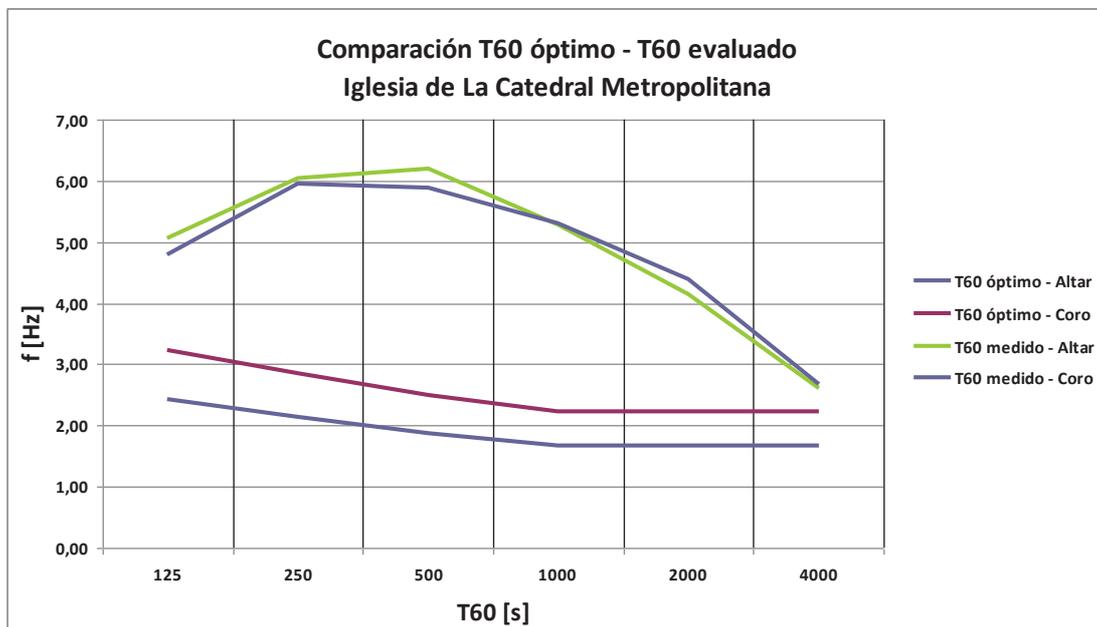


Figura 5.13. – Comparación entre tiempo de reverberación óptimo y medido para la iglesia de La Catedral.

Es evidente el hecho de que el tiempo de reverberación evaluado en las iglesias en estudio no cumple lo recomendado por este criterio, sin embargo en la práctica se discute mucho sobre la aplicabilidad de estas recomendaciones para iglesias con arquitectura compleja. Según recomendaciones de Umberto Berardi²¹, el tiempo de reverberación en una iglesia de gran volumen puede ser adecuado incluso hasta valores cercanos a los 10 segundos, dependiendo de la cantidad de elementos arquitectónicos y decorativos que contengan sus superficies. Por esta razón resulta a veces más versátil la aplicación de la fórmula de Sabine para predecir el tiempo de reverberación y hacer recomendaciones al respecto ya que ésta no contempla restricciones en la uniformidad de la absorción de los materiales sobre las superficies

El estudio del modelo energético μ llegó a determinar que los elementos arquitectónicos que dentro de las iglesias actúan como difusores acústicos, son los principales generadores de reflexiones y por consiguiente, de campo reverberante. Además, la ruptura del frente de ondas hace que la energía de las reflexiones tempranas decaiga. El gran volumen de las iglesias incrementa la cantidad de reflexiones tardías y por consecuencia, el T60. Ya que las reflexiones tempranas disminuyen su energía por efecto de la difusión sonora, el nivel del sonido reverberante se mantiene por encima del nivel del sonido directo, lo cual justifica el elevado tiempo de reverberación medido en las iglesias.

Los estudios de Barron y Lee²² en iglesias encontraron que nunca el sonido reflejado podrá llegar antes que el sonido directo y que el decaimiento del sonido directo es lineal en la mayoría de los pasillos de las iglesias, en tanto que el sonido reflejado decae dependiendo de la distancia del receptor a la fuente. Ya que este retraso aumenta con la complejidad de las superficies donde el sonido se refleja y por la presencia de volúmenes anexos, se

²¹ Umberto Berardi: Autor de varios estudios sobre modelos energéticos para predecir parámetros acústicos en iglesias.

²² Autores de la Teoría Revisada Sobre El Campo Reverberado.

producirá una disminución de la energía de las primeras reflexiones y un incremento en el tiempo de reverberación. Esto se satisface con la sugerencia de algunos investigadores, de elevar el T60 en iglesias para provocar un refuerzo en la intensidad debido a que el volumen del espacio y la coexistencia entre la palabra y la música así lo ameritan, hasta un punto en el que no se llegue a producir enmascaramientos ni efectos desfavorables²³.

A continuación, las tablas 5.11; 5.12; 5.13 y 5.14 detallan la obtención de la absorción en las iglesias, el valor correspondiente a R y L_D-L_R . Utilizando la ecuación 2.3, se llega a determinar que el nivel del sonido reverberante es mayor al del sonido directo ($L_D-L_R < 0$).

²³ J. J. Sendra, T. Zamarreño, José Algaba, Jaime Navarro . El problema de las condiciones acústicas en las Iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación.

Tabla 5.11. - Cálculo de absorción y T60 para una frecuencia de 1kHz.
Iglesia De La Compañía .²⁴

TIEMPO DE REVERBERACIÓN IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS				
Superficie	Material	S	α_{1kHz}	A_{1kHz}
Columnas	Piedra	160,6206	0,02	3,21
Arcos (frontal naves norte y sur)	Piedra	42,539	0,02	0,85
Arcos (debajo naves norte y sur)	Piedra	65,7378	0,02	1,31
Arcos (lateral nave central)	Piedra	108,1021	0,02	2,16
Arcos (debajo nave central)	Piedra	55,8285	0,02	1,12
Paredes del crucero	Piedra	290,25	0,02	5,81
Paredes del presbiterio	Piedra	527,4375	0,02	10,55
Paredes laterales	Piedra	702,792	0,02	14,06
Pared trasera	Piedra	282,6158	0,02	5,65
Bóveda	Piedra	531,2677	0,02	10,63
Yesería de la bóveda	Yeso	371,88739	0,03	11,16
Piso	Madera Plataforma	1245,6672	0,17	211,76
Piso del presbiterio	Madera Plataforma	91,3888	0,03	2,74
Cúpula del presbiterio	Ladrillo revocado y pintado	140	0,05	7,00
Cúpula del crucero	Ladrillo revocado y pintado	333,9552	0,05	16,70
Yesería de la cúpula del crucero	Yeso	166,9776	0,03	5,01
Cúpulas de las naves norte y sur	Ladrillo revocado y pintado	354,7537	0,05	17,74
Sillas	Madera maciza	60,5	-	-
Puerta	Madera maciza	12	0,10	1,20
Retablo	Madera maciza	177,1875	0,10	17,72
Altars menores	Madera maciza	109,92	0,10	10,99
		357,367	AT	[m²Sab]=
				T60 [s] = 6,61

²⁴ Cálculos de volumen y superficie aproximados, ver Anexos 2 y 3.

**Tabla 5.15. - Parámetros para estimación de %ALCons. Iglesia De La
Compañía De Jesús.**

AT	ST	α_m	R	LD-LR
357,36	5292,56	0,07	383,24	-2,13

El T60 medido y el T60 calculado difieren el uno del otro. La diferencia porcentual entre los valores predichos y los medidos se determina por la ecuación 5.3:

$$D(\%) = \left| \frac{T_{\text{experimental}} - T_{\text{Sabine}}}{T_{\text{experimental}}} \right| \cdot 100 \quad (\text{EC. 5.3})$$

Fuente en el altar:

$$D(\%) = \left| \frac{5.32 - 6.61}{5.32} \right| \cdot 100$$

$$D(\%) = \mathbf{24.25\%}$$

Fuente en el coro:

$$D(\%) = \left| \frac{5.86 - 6.61}{5.32} \right| \cdot 100$$

$$D(\%) = \mathbf{14.1\%}$$

**Tabla 5.16. - Cálculo de absorción y T60 para una frecuencia de 1kHz.
Catedral Metropolitana.²⁵**

TIEMPO DE REVERBERACIÓN IGLESIA DE LA CATEDRAL METROPOLITANA				
Superficie	Material	S	$\alpha_{1\text{kHz}}$	$A_{1\text{kHz}}$
Columnas	Piedra	631,04	0,02	12,62
Arcos (frontal naves norte y sur)	Piedra	490,0096	0,02	9,80
Arcos (debajo naves norte y sur)	Piedra	202,9469	0,02	4,06
Arcos (lateral nave central)	Piedra	530,4122	0,02	10,61
Arcos (debajo nave central)	Piedra	338,8679	0,02	6,78
Paredes	Piedra	2173,3425	0,02	43,47
Techo	Piedra	1655,8731	0,02	33,12
Artesonado	Madera maciza	615,51	0,10	61,55
Piso	Madera Plataforma	1289,64	0,17	219,24
	Ladrillo revocado y pintado			
Cúpula		268,8025	0,05	13,44
Sillas	Madera barnizada	198,775	-	-
Puerta	Madera maciza	49	0,10	4,90
Retablo	Madera maciza	220,1275	0,10	22,01

AT [m²Sab]= 441.59

T60 [s] = 5.35

Tabla 5.17. - Parámetros para estimación de %ALCons. Catedral Metropolitana.

AT	ST	α_m	R	LD-LR
441,59	8664,35	0,05	465,31	-1,29

Si de igual manera se procede a calcular la diferencia porcentual entre el valor medido y el predicho, se tiene:

Fuente en el altar:

$$D(\%) = \left| \frac{6.13 - 5.35}{6.13} \right| \cdot 100$$

$$D(\%) = \mathbf{12.72\%}$$

²⁵ Cálculos de volumen y superficie aproximados, ver Anexo 4

Fuente en el coro:

$$D(\%) = \left| \frac{5.92 - 5.35}{5.92} \right| \cdot 100$$

$$D(\%) = \mathbf{9.63\%}$$

De lo anterior se observa que para el caso de la Iglesia de La Compañía los errores porcentuales son grandes en tanto que para el caso de la Iglesia De La Catedral los valores son aceptables. Tales diferencias se deben obviamente, a la diferencia en la complejidad de la arquitectura entre ambas iglesias. La primera mantiene la complejidad característica del estilo barroco, lo cual hace que el área de sus superficies sea mucho más difícil de calcular. Lo contrario ocurre en la iglesia de La Catedral, la cual contiene elementos pertenecientes a varios estilos, entre ellos el mudéjar, pero mantiene una línea más simple en lo arquitectural, en contraposición con la Iglesia de La Compañía.

Por otro lado, se encuentra también la pérdida de precisión al estimar los valores de absorción de los materiales sobre las superficies. Esto se produjo principalmente por la carencia de información acerca de los coeficientes de absorción de los que, por tratarse de materiales no tradicionales como el pan de oro, no pudo ser posible encontrar tal información incluso en bibliografía específica para esto. De esta manera, los valores de absorción calculados excluyen aquella generada por las finísimas pero abundantes capas de pan de oro en los recintos analizados.

A partir de lo anteriormente expuesto se genera además la duda de por qué el T60 difiere si se lo evalúa con una fuente ubicada en el altar a una fuente ubicada en el órgano. Pues la respuesta hace entonces referencia a la disposición de las superficies. Si se toma por ejemplo a la Iglesia De La Compañía, en el altar se encuentra el retablo. Éste es de madera tallada y recubierta por pan de oro en su totalidad. Su cercanía a esta superficie hará que incremente las reflexiones más pronto que si la fuente estuviera a más de 50m de distancia de él, para un mismo oyente ubicado en el punto 2 de la

iglesia. Un detalle más surge estudiando el mismo resultado en la Iglesia De La Catedral, ya que la presencia de la *girola*²⁶ altera la superficie efectiva para una fuente ubicada en el altar, en cuyo caso es menor que para el sonido que partiría desde el coro. No se puede asumir una respuesta ciento por ciento fiable, debido a que este comportamiento sólo puede evaluarse mediante *software* específico para simular el camino del sonido en el recinto. Lo que puede suceder es que la forma semicircular del coro redirija el sonido hacia los puntos más cercanos (puntos 1 y 2 en la figura 3.13), lo cual se percibe como un incremento en las reflexiones tardías, provocando un aumento del campo reverberante, en tanto que una fuente que radía desde el coro hacia el altar y la *girola* encuentra mayor cantidad de superficies, que en esta dirección sí resultan visibles para el frente de ondas, especialmente para bajas frecuencias, las cuales debido a su energía sí llegarían a cubrir completamente el espacio. Es por esto que la disminución se aprecia más considerable en frecuencias por debajo de los 1000Hz; en general el T60 disminuye para todo el espectro, pero es en éste rango en el que lo hace en mayor cantidad.

Analizando la distribución del T60 en el espectro de frecuencias medidas, se nota en ambas iglesias que la incidencia más significativa excluyendo las frecuencias graves, se presenta en el rango ubicado entre los 250Hz y 1250Hz, y resulta ser significativa ya que estas frecuencias coinciden con el rango de la voz, pudiendo incidir directamente con aspectos como la inteligibilidad de la palabra.

Mediante los valores de LD-LR de las tablas 5.12 y 5.14, se deduce gráficamente el **Porcentaje de Pérdida de Articulación de las Consonantes (%AICons)**, los resultados se encuentran visibles en la figura 5.19. Puede observarse que la menor pérdida de articulación de consonantes se presenta en la iglesia de La Compañía: cerca del 6% desde el altar y del 7% desde el coro; en tanto La Catedral registra valores alrededor del 10%.

²⁶ Girola: Corredor ubicado detrás del presbiterio de una iglesia, formado por extensión de las naves laterales.

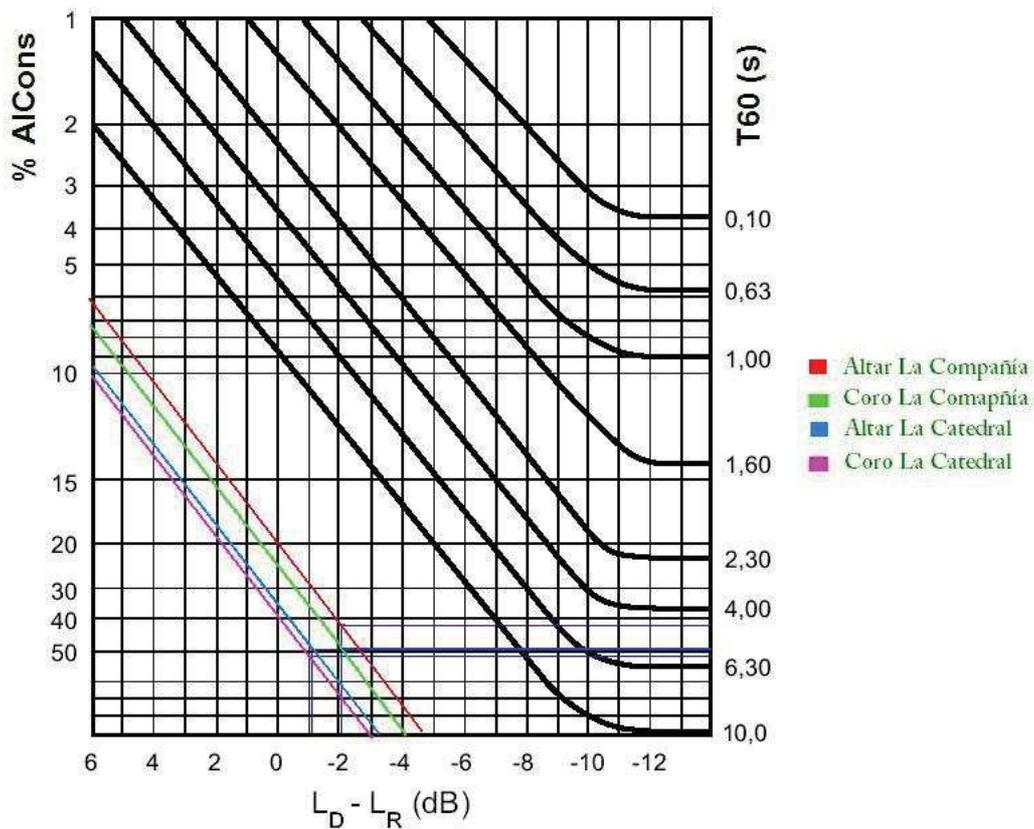


Figura 5.22. – Estimación del Porcentaje de Pérdida de Articulación de consonantes. Iglesias de La Compañía y La Catedral.

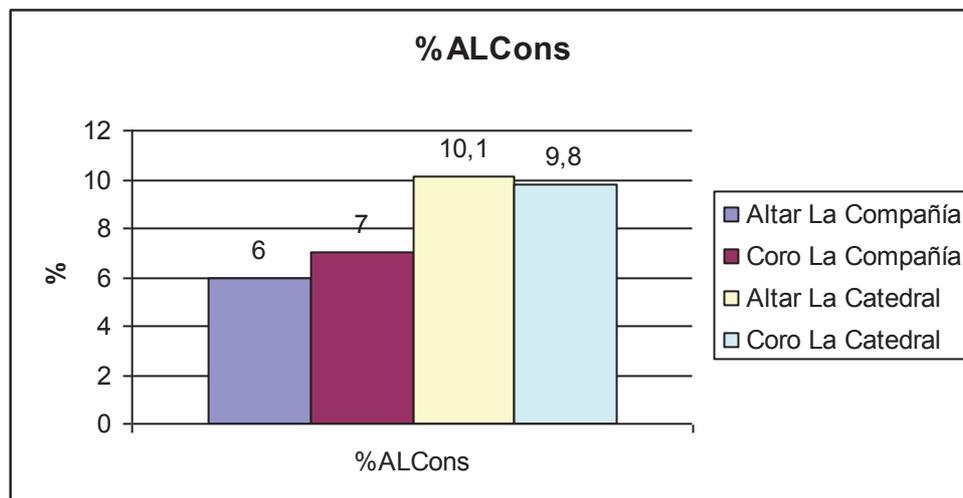


Figura 5.14. Comparación %ALCons. La Compañía – La Catedral.

Ninguna de las dos iglesias presenta una pérdida de articulación de consonantes severa, de hecho, ambas se encuentran en un rango muy

aceptable, ya que recomendaciones conocidas aseveran que un 15% representa la máxima pérdida aceptable²⁷. Sin embargo, a partir del 10%, se empiezan a presentar problemas de inteligibilidad, el caso de La Catedral, no es desalentador, puesto que esta iglesia posee un volumen grande y un elevado tiempo de reverberación, y pese a ello, se presenta claridad e inteligibilidad en el mensaje hablado. En la figura 5.15 se ha determinado gráficamente el valor de la inteligibilidad de la palabra:

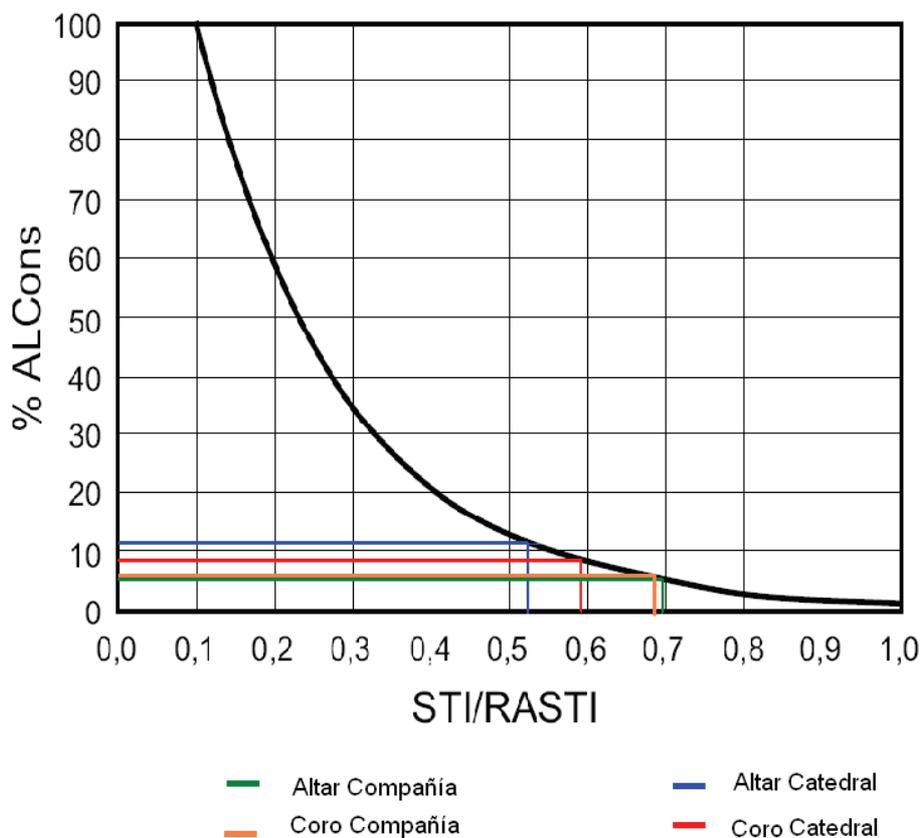


Figura 5.15. Estimación de la inteligibilidad de la palabra.

²⁷ CARRIÓN, Antoni. Diseño Acústico de espacios arquitectónicos. Pág 69

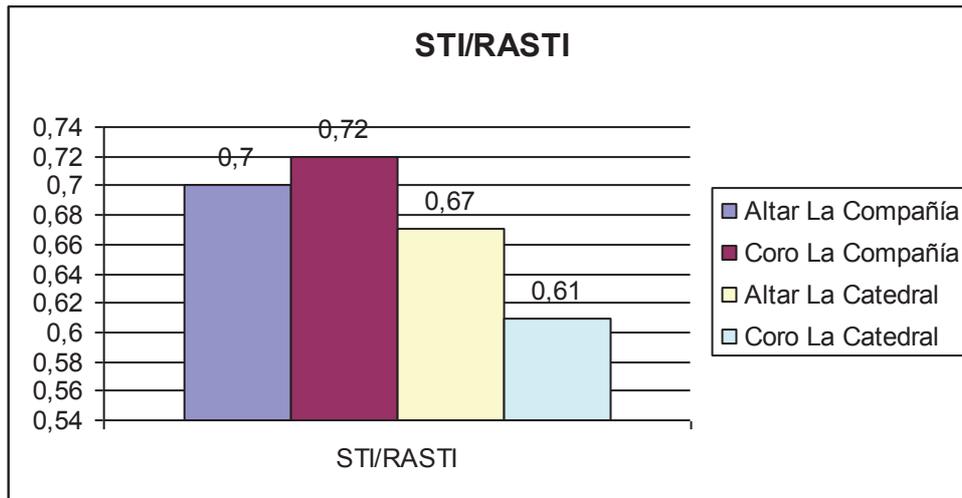


Figura 5.16. Comparación de STI/RASTI. La Compañía – La Catedral

5.1.2.4. ÍNDICES DE CLARIDAD (C50 Y C80) Y DEFINICIÓN (D50)

Los índices de claridad, dan la idea de cómo se escucharía tanto la música como la palabra dentro de los recintos. Como se mencionó en el Capítulo II (apartados 2.3.4.-C50 y 2.3.5.-C80), el C50 se relaciona con la inteligibilidad de la palabra, de manera que mientras más alto sea este valor, mejor capacidades de entendimiento del habla presentará el local. El C80, por su parte da una idea de la claridad con que se percibiría la música en el local y ya que es el resultado de una comparación entre la energía que refuerza el sonido y la que pertenece a las reflexiones, se puede decir también que indica de cierta manera la suavidad del sonido ejecutado por un instrumento.

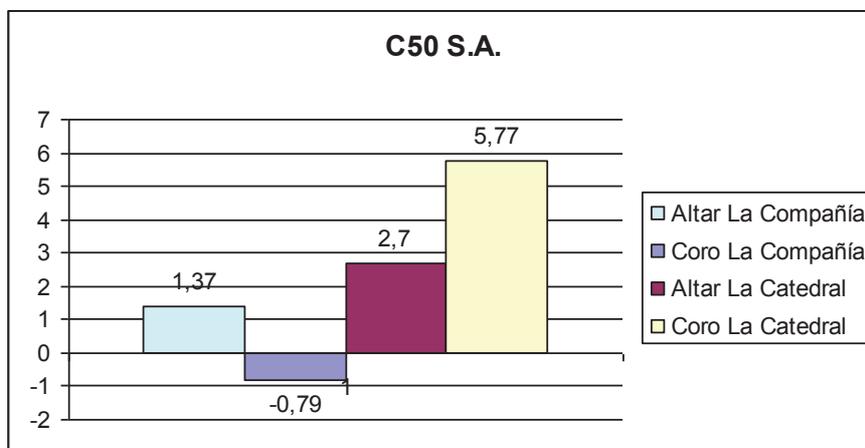


Figura 5.17. Comparación C50 S.A. La Compañía – La Catedral

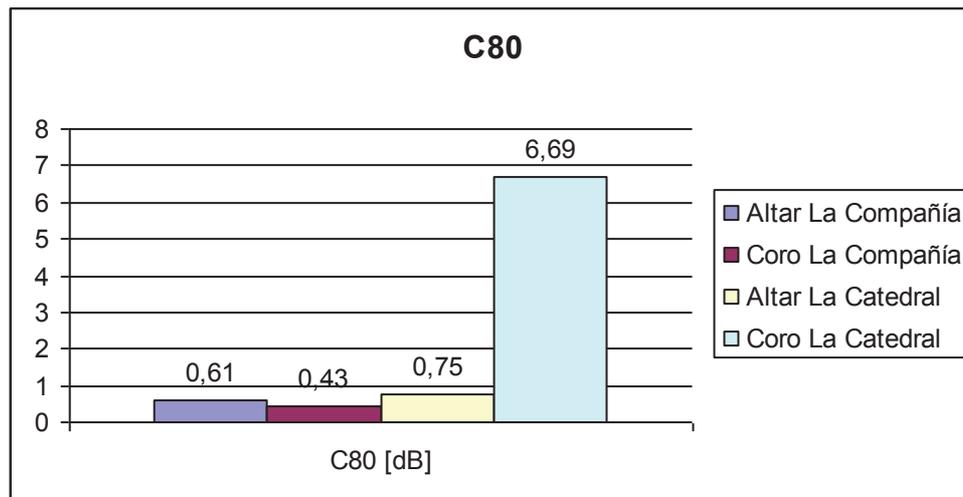


Figura 5.18. Comparación C80. La Compañía – La Catedral.

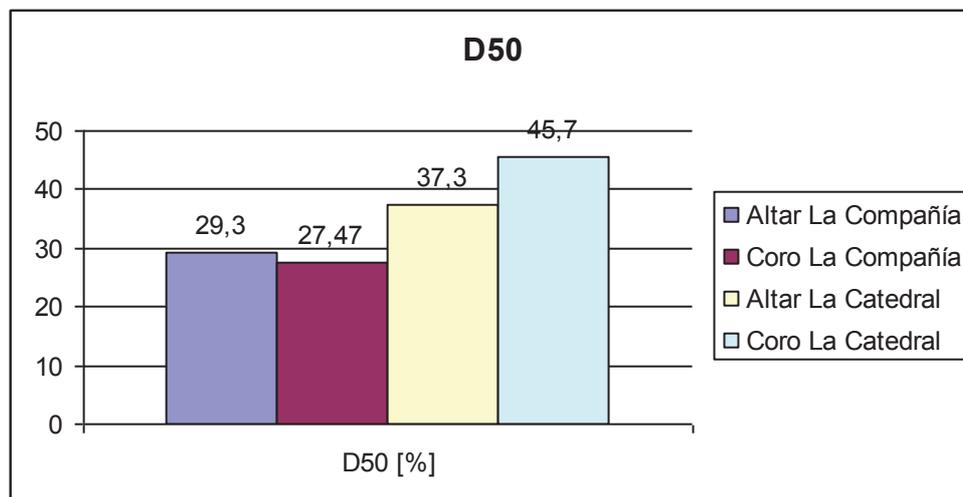


Figura 5.19. Comparación D50. La Compañía – La Catedral.

5.1.2.4.1. IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS

Con base en los resultados, la **Iglesia De La Compañía De Jesús** detalla un $C50(S.A)$ igual a 1.37dB para fuente ubicada en el altar y -0.7899dB para fuente ubicada en el coro. Obviamente, el mayor interés se pone en el parámetro que cuantifica la claridad de la voz desde el altar, ya que es en esa zona en donde se ubicaría una fuente de voz, el valor correspondiente a ese sitio es mayor que cero, lo que implica que existe una mayor energía sonora de los primeros 500ms, la cual enriquece la interpretación del sonido hablado.

Analizando la distribución de este indicador, por bandas de octava, se nota un problema en la claridad tonal para frecuencias graves, mientras que para frecuencias altas, la condición mejora, esto se traduciría en la práctica, en una mejor claridad tonal de voces femeninas que masculinas debido a su contenido espectral, a pesar de eso, el problema con las voces graves no representaría una pérdida severa de inteligibilidad, ya que las frecuencias medias altas (superiores a 1kHz), ayudan a definir la interpretación de consonantes. De igual manera, puede observarse que el C80mid es bastante próximo al valor óptimo, pero se evidencia un mejor desempeño del local si la fuente sonora emite desde el coro en donde el valor del C80mid es igual a 0.426321dB, mientras que si la fuente se encontrara emitiendo desde el altar, el índice de claridad musical C80mid aumenta a 0.61dB, valor que tampoco implica mayor alejamiento del recomendado. Sin embargo, a pesar de que la principal fuente musical dentro de la iglesia, esté representada por el órgano, no cabe desprestigiar el valor de este parámetro desde el altar, ya que las celebraciones litúrgicas, así como eventos artísticos particulares o no, utilizan este sector para instalar fuentes sonoras como instrumentos musicales o cantantes.

En cuanto a la definición (D50), sucede que este valor es inferior al 50% recomendado, aspecto que predeciría la dificultad de distinguir la separación entre frases musicales o habladas. La cuantificación de este parámetro no resulta ser la más alentadora, pero a pesar de eso, se debe tomar en cuenta los demás indicadores evaluados, que podrían más bien compensarse entre sí y equilibrar la calidad acústica del recinto.

5.1.2.4.2. IGLESIA DE LA CATEDRAL METROPOLITANA

Los datos asociados a esta iglesia predicen una mejor aplicabilidad del templo en asuntos relacionados a la palabra, esto porque el valor de claridad de la voz C50(S.A.) es de 2.7dB en el altar y 5.77dB en el coro, ambos valores son suficientemente altos como para decir que la voz dentro del recinto posee un

buen equilibrio tonal, a pesar de que la inteligibilidad puede verse menguada dado el elevado tiempo de reverberación que posee la iglesia.

El sonido de la música debe ser suave aunque enérgico en cuanto a presencia; para un instrumentista debe ser fácil de lograr, esto se indica mediante el parámetro de claridad musical C80, que si se lo analiza desde su definición, indica que la energía que llega durante los primeros 80ms es tan alta que le agrega tanta corpulencia al sonido, que podría trasladarlo a incluso a una percepción un tanto agresiva de él. Desde el altar se ha evaluado un valor muy próximo al óptimo recomendado de 0.75dB, pero desde el coro alto, el valor es de 6.69dB, valor bastante elevado teniendo en cuenta que un órgano de tubos posee además un sonido bastante fuerte.

El índice de definición D50 es bastante aceptable desde ambos sitios (altar= 37.3% y coro alto= 45.7%), este indicador junto con el de claridad de la voz, muestran cierta compensación en positivo para el elevado tiempo de reverberación medido, ya que se puede notar que la pérdida de definición en las palabras y en las frases musicales no resulta tan destructivo.

5.1.2.5. OTROS PARÁMETROS

Utilizando los valores de tiempo de reverberación se puede calcular otros parámetros como la calidez y el brillo acústico. Estos valores se detallan en las tablas 5.4 y 5.5 para la iglesia de La Compañía y, 5.9 y 5.10 para la iglesia de La Catedral, tanto para fuente en el altar como para fuente en el coro.

Puede decirse que para la iglesia de La Compañía, estos indicadores se acercan a los recomendados por Beranek, de manera que se puede predecir un balance bastante aceptable en los bajos, pero un sonido no tan claro debido a la pérdida de brillo del sonido causada por la absorción del aire en el interior del recinto.

El sonido en la iglesia de La Catedral en cambio, se percibiría no muy cálido, pero sí un tanto más claro que en La Compañía. La falta de uniformidad en la distribución del tiempo de reverberación, así como el elevado tiempo de decaimiento del sonido en frecuencias medias (ver figura 5.11.) dan esta cualidad subjetiva a la iglesia.

Para ambas iglesias, estos valores se corroboran con los índices de claridad musical (C80) y de la voz (C50). Cabe señalar que todos los parámetros aquí analizados mantienen cierta relación entre ellos, de manera que aspectos no tan positivos de la calidad acústica de los recintos, pueden compensarse con otros que sí lo son, resultando en un equilibrio en cuanto a esto, si se toma en cuenta que lo que se percibe del sonido en un recinto es más bien la globalidad de todos los fenómenos que se producen durante la perturbación vibratoria.

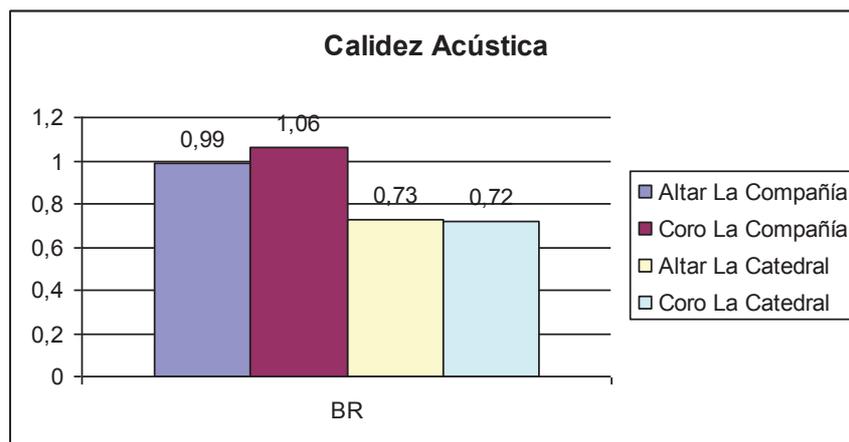


Figura 5.20. Comparación BR. La Compañía – La Catedral

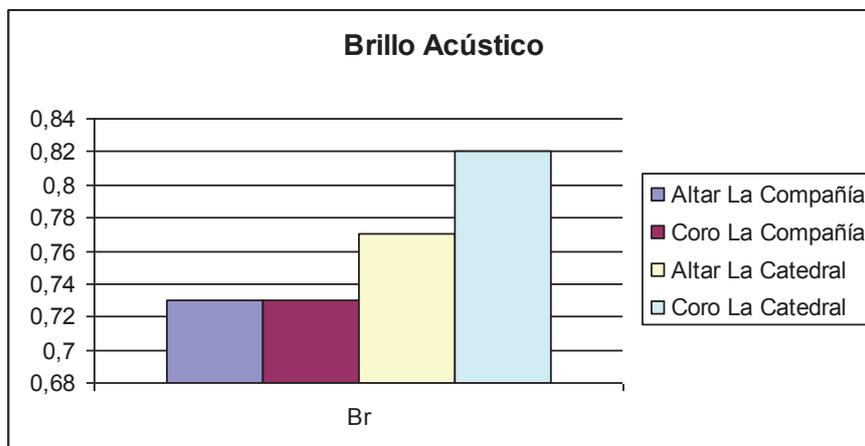


Figura 5.21. Comparación Br. Carlospañía – La Catedral

6. CAPÍTULO VI

6.1 DESARROLLO DE UN PROGRAMA EN MATLAB, PARA SIMULACIÓN DE FUENTES SONORAS EN ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS

6.1.1 RESUMEN

Todo sistema posee su propia respuesta al impulso. Un espacio arquitectónico es también un sistema. En la medida en que los recintos como sistemas no presentan modificaciones (idealmente) con el paso del tiempo, se los puede considerar como sistemas invariantes en el tiempo, con esto pueden “reconstruirse” matemáticamente mediante la convolución.

Para complementar, justificar y dar una aplicación a la información obtenida de las mediciones *in situ* en las iglesias estudiadas, se ha desarrollado un pequeño programa de aplicación consistente en la simulación de posicionamiento de fuentes sonoras en el interior de espacios arquitectónicos utilizando la convolución matemática. Se trata de tomar una señal grabada sin información espacial y filtrarla con la respuesta al impulso de cualquier sala de la que se tenga esa información para así simular el sonido de esa fuente ubicado en cualquier punto de la sala en que se haya tomado la muestra de respuesta impulsional.

La programación ha sido realizada en Matlab 7.4 y se utilizan archivos de audio monofónicos de un instrumento musical y de las respuestas de impulso de las Iglesias de La Compañía de Jesús y de La Catedral, en la ciudad de Quito.

El código de programación se ha realizado utilizando comandos específicos de Matlab para efectuar los procesos entre las señales de audio, pero se puede implementar si se desea, los módulos correspondientes a las operaciones que

involucre el procesamiento, como la convolución, la discretización de las señales, la transformada rápida de Fourier, etcétera.

Las aplicaciones de este proyecto pueden estar inmersas en varios campos de acción, principalmente la acústica y el sonido para la simulación de localización de fuentes sonoras en puntos específicos de espacios arquitectónicos, así como la ubicación del oyente en puntos también específicos.

La principal operación que involucra este proyecto es la convolución matemática, la cual es muy funcional en el área del procesamiento digital de señales debido a la capacidad que genera de reconstruir completamente sistemas que se encuentren en análisis. Los sistemas acústicos son sistemas lineales y no varían en el tiempo, esa es la gran ventaja que estos sistemas presentan para su análisis. Sin embargo, si algo en su interior sufriera un cambio significativo por objeto de alguna obra de mantenimiento, destrucción/reconstrucción, la respuesta impulsional ya no sería la misma.

6.1.2 ASPECTOS TEÓRICOS

Los sonidos que el oído percibe generan una imagen en tres dimensiones de lo que suena, esto sucede porque los sonidos que se escuchan en un instante de tiempo provienen de distintas distancias y direcciones, por lo que llegan al oído en tiempos diferentes.

Durante un evento sonoro se pueden producir los fenómenos sonoros de reflexión, refracción, difracción y absorción, la aglomeración de estos fenómenos da origen a aspectos subjetivos del sonido como por ejemplo la textura. La diferencia con la que llegan las reflexiones al oído crea la sensación de ubicación de la fuente sonora en el espacio. Las ondas que llegan al oído son el resultado de la interacción del sonido original con los miembros del cuerpo humano.

Si de manera natural, estos efectos producen la idea de la ubicación de la fuente sonora y de las características subjetivas del local por medio de características subjetivas del sonido, entonces es posible manipular las características de un sonido para espacializarlo virtualmente mediante la modificación adecuada de su espectro.

El sentido de espacialización de los sonidos está relacionado con los siguientes fenómenos psicoacústicos:

- **TD** (*Interaural Time Difference*): Representa la diferencia de tiempo entre la llegada de un sonido hasta el un oído y el otro. Debido a la distancia aproximada de 20centímetros entre oídos y la velocidad del sonido, ésta está en el orden de los 0.6 milisegundos y su variación depende de la interacción de las ondas con las formas de la cabeza que por difracción desfasan ciertas componentes frecuenciales del sonido
- **IID** (*Interaural Intensity Difference*) o **ILD** (*Interaural Level Difference*): Esto es la diferencia de amplitud entre la señal percibida por cada oído y que se cumple en función de la ley del inverso cuadrático.
- **Efecto Doppler**: Es un efecto que se produce por la diferencia entre velocidades relativas entre una fuente sonora y un oyente cuando estos se mueven, esto produce una compresión y una descompresión de las ondas dando origen a una aparente variación en la altura tonal del sonido original.
- **Reverberación**: Da la idea de la localización espacial de una fuente dentro de un recinto específico.

Respecto a los métodos utilizados para espacializar fuentes, existen tres, listados a continuación:

- **Holofonía o HRTF** (*Head-Related Transfer Function*)
Este método consiste en la grabación utilizando micrófonos ubicados en los lugares correspondientes a los tímpanos de la cabeza de un muñeco conocida como *Dummyhead* de múltiples respuestas impulsionales de

los recintos mediante impulsos generados en varios puntos formando una semiesfera alrededor de la cabeza para luego, con un proceso de convolución, generar una nueva señal que aparente provenir del lugar en el que grabaron las respuestas.

- **Paneo por intensidad**

Este método se basa en la manipulación de las características de amplitud señaladas en el fenómeno IID, es decir incrementando en un lado o en otro la amplitud del sonido original, para esto se utiliza dos altavoces que reproduzcan el sonido, uno a cada lado. El efecto alcanzado a pesar de ser muy bueno, no llega a ser tan real como el de holofonía puesto que no efectúa manipulaciones en el tiempo de llegada hacia uno u otro altavoz.

- **Ambisonics:**

Este método utiliza cuatro micrófonos para la grabación de la señal: uno en un punto central y otros tres en cada eje de las tres dimensiones, estas señales grabadas se codifican y luego decodifican manteniendo la fase de la grabación para luego ser reproducido.

6.1.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROGRAMA DE APLICACIÓN

El proyecto, que consiste en la simulación de espacios acústicos se realizó como una aplicación GUI de Matlab 7.4, la cual es una herramienta para la programación de interfaces gráficas. Esta herramienta es accesible desde el menú **File** de Matlab y, seleccionando la opción **New: GUI**.

El primer paso es diseñar la interfaz, tomando en cuenta los botones que se necesitará añadir, las funciones que éstos tendrán y la disposición de los mismos en el espacio de la interfaz. Acerca de la programación de la interfaz no cabe mayor enunciación, ya que el principal objetivo de este apartado es la programación del proceso de audio, así que, esta parte se abordará de manera sencilla y muy brevemente.

El programa desarrollado en Matlab utiliza principalmente los comandos **wavread**, para la lectura de los archivos de audio y **conv** para la parte más importante del procesamiento. El comando **wavread** convierte al archivo de audio en una matriz de datos que pueden incluir el nombre del audio como variable, la frecuencia de muestreo, tasa de bits, número de canales (mono o estéreo), entre otros. Es necesario que tanto el archivo con los sonidos de prueba, como el de la respuesta al impulso sean archivos con el mismo formato y el mismo número de canales (monofónicos) para que se pueda operar entre éstos después de ser convertidos en una matriz. La sintaxis es la siguiente:

```
[NV,Fs,nbits] = wavread('Dirección de ubicación del archivo con su nombre y extensión')
```

Donde **NV** representa el nombre de la variable en la que se almacenará el audio, **Fs** representa la frecuencia a la que se encuentra muestreado el audio y **nbits**, la tasa de bits del archivo de audio. El nombre del archivo debe especificarse incluyendo su extensión; Matlab puede leer archivos con extensión **wav** o **au**. Todo lo anterior se interpretaría como que el archivo de audio descrito en el argumento del programa se cargará como una matriz que contendrá como elementos, la variable del nombre del audio asignada por el programador, la frecuencia de muestreo propia del archivo y su tasa de bits.

El segundo comando importante, el comando **conv** es parte esencial del trabajo. Éste realiza la operación de convolución entre las dos señales. El comando resume intrínsecamente los procesos matemáticos que involucra la convolución. Este paso ahorra la programación de esa operación matemática, aunque podría sin problema ser programada paso por paso dentro del programa. Para utilizar este comando se hace uso de la sintaxis:

```
Var = conv(Audio,IR);
```

Donde **Var** representa el nombre de la variable donde se almacenará la convolución de los archivos incluidos dentro del argumento del comando (Audio, la variable del archivo original e IR, la respuesta impulsiva del sistema).

La aplicación GUI puede ser creada fácilmente mediante la selección de elementos en el panel de elementos, pero no se tendrá ningún resultado si no se programa la función de cada elemento añadido.

Al añadir un elemento como por ejemplo un botón, se puede acceder a su programación mediante la selección de la opción *View Callback* con el uso del botón derecho del Mouse o desde el menú *View*. Al iniciar una interfaz GUI, Matlab crea automáticamente las funciones de inicialización de ésta, así cualquier elemento que se desee agregar en el inicio, como una imagen de fondo, imágenes para los botones, entre otros, se debe programar a continuación de esta sección del programa. La figura 6.1 ilustra el ambiente de programación.

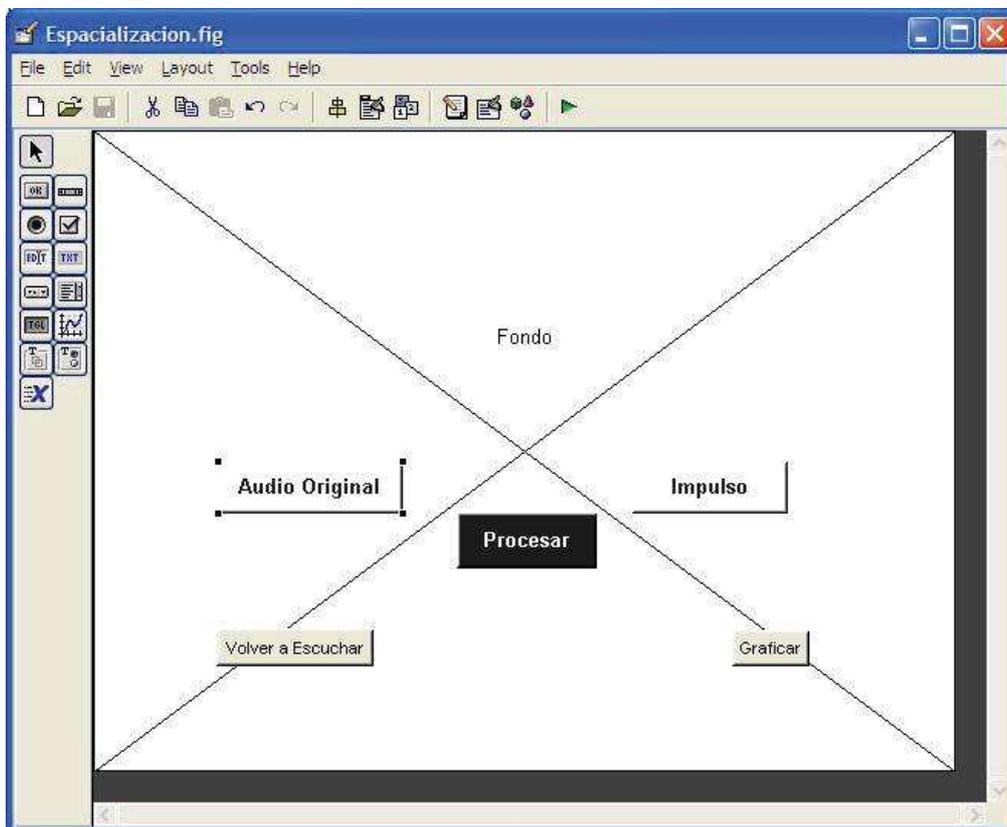


Figura 6.1. Ambiente de programación de la interfaz GUI.

El manejo de variables se da a través del uso del comando **handles** así:

```
handles.Nombre_de_la_nueva_variable=Nombre_del_elemento_a_almacenar
guidata(hObject,handles)
```

La última línea corresponde a un comando que permitirá la manipulación de la variable hacia cualquier otra sección (función) del programa, como puede ser la línea de programación de un botón

Cada elemento añadido corresponderá a una función del programa, es así que dentro de su *callback* o sección de programación, se podrá agregar el código del programa que deberá ejecutarse al presionar ese botón. Una vista más clara de la manera de programar una interfaz GUI en Matlab se tiene a continuación, es muy importante que se lean los comentarios del programa colocados a continuación del símbolo “%”.

Elementos del Programa:



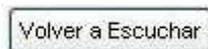
Permite cargar el archivo de audio original e impulso mediante un explorador.



Botón para ejecutar el procesamiento de la señal.



Botón para graficar las señales de audio.



Botón para volver a escuchar la señal procesada sin necesidad de volver a aplicar la convolución entre las señales.

Inicialización de la interfaz (creado automáticamente por Matlab):

```
function varargout = Espacializacion(varargin)
% ESPACIALIZACION M-file for Espacializacion.fig
%   ESPACIALIZACION, by itself, creates a new ESPACIALIZACION or
%   raises the existing
%   singleton*.
%
```

```

%   H = ESPACIALIZACION returns the handle to a new ESPACIALIZACION
or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   ESPACIALIZACION('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the
local
%   function named CALLBACK in ESPACIALIZACION.M with the given input
arguments.
%
%   ESPACIALIZACION('Property','Value',...) creates a new
ESPACIALIZACION or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Espacializacion_OpeningFunction gets called.
An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Espacializacion_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Espacializacion

% Last Modified by GUIDE v2.5 09-Mar-2010 21:07:20

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Espacializacion_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Espacializacion_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Espacializacion is made visible.

function Espacializacion_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

```

```
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin command line arguments to Espacializacion (see VARARGIN)
```

%Colocación de la imagen de fondo

```
Fondo=imread('E:\Programa de aplicacion\GUI\Fondo.JPG');
axes(handles.Fondo);
axis off;
imshow(Fondo);
```

%Coloca una imagen en el botón “Graficar”

```
[a,map]=imread('E:\Programa de aplicacion\GUI\Boton.JPG');
[r,c,d]=size(a);
x=ceil(r/60);
y=ceil(c/60);
g=a(1:x:end,1:y:end,:);
g(g==255)=5.5*255;
set(handles.Graficar,'CData',g);
```

```
% Choose default command line output for Espacializacion
handles.output = hObject;
```

```
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
```

```
% UIWAIT makes Espacializacion wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
```

```
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Espacializacion_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
```

```
% --- Executes on button press in Audio_Original.
function Audio_Original_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Audio_Original (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

%Cargar el Audio Original

```
[Archivo Direccion]=uigetfile({'*.wav'},'Buscar Audio Original');
```

```

if isequal(Archivo,0)
return
else

%Carga el audio original como una matriz Nombre-Frecuencia de Muestreo
[Audio,fs]=wavread(strcat(Direccion,Archivo));
sound(Audio,fs);

end

%Almacenar la Frecuencia de Muestreo, audio Original y Respuesta al impulso
%en variables respectivas para que puedan usarse en adelante
%
%Frecuencia de Muestreo

handles.Audio_Original=Audio;
guidata(hObject,handles);

handles.Fs=fs;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes on button press in Impulso.
function Impulso_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Impulso (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

%Cargar Impulso
[Archivo Direccion]=uigetfile({'*.wav'},'Seleccionar Impulso');
if isequal(Archivo,0)
return
else

%Carga el audio del impulso como una matriz Nombre-Frecuencia de Muestreo
[IR,fs]=wavread(strcat(Direccion,Archivo));
sound(IR,fs)

end

%Respuesta al Impulso
handles.ImpR=IR;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes on button press in Convolucion.
function Convolucion_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Convolucion (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

%Ejecutar el procesamiento de audio

%

%Crea vectores de valores en el dominio frecuencial para muestrear el sonido

%original y el sonido del impulso

Audio2=handles.Audio_Original;

Fs2=handles.Fs;

IR2=handles.ImpR;

t= 0:Fs2:Fs2*(length(Audio2)-1);

t_imp = 0:Fs2:Fs2*(length(IR2)-1);

disp('Calculando convolución de audio con respuesta al impulso ...');

AudioProc = conv(Audio2,IR2);

%Crea un vector de valores en el dominio frecuencial para muestrear el sonido procesado

t_proc=0:Fs2:Fs2*(length(AudioProc)-1);

%

%

handles.t2=t; %Almacenar los valores de tiempo en una variable
guidata(hObject,handles);

handles.t_imp2=t_imp; %Almacenar los valores de tiempo en una variable
guidata(hObject,handles);

handles.t_proc2=t_proc; %Almacenar los valores de tiempo en una variable
guidata(hObject,handles);

handles.AudioProc2=AudioProc; %Almacenar el audio procesado en una variable

guidata(hObject,handles);

%%%

soundsc(AudioProc,Fs2);

% --- Executes on button press in Graficar.

function Graficar_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject handle to Graficar (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

%Representación gráfica de los archivos de audio para comparación visual

Audio3=handles.Audio_Original;

```

Fs3=handles.Fs;
t3=handles.t2;
t_imp3=handles.t_imp2;
t_proc3=handles.t_proc2;
IR3=handles.ImpR;
AudioProc3=handles.AudioProc2;

figure(1);
subplot(311);
plot(t_imp3,IR3); title('Sonido de respuesta impulsional');
subplot(312);
plot(t3,Audio3); title('Audio original');
subplot(313);
plot(t_proc3,AudioProc3); title('Audio procesado');

```

% Programación de un Botón para volver a escuchar el audio procesado sin necesidad de volver a convolucionar las señales.

% --- Executes on button press in Volver.

function Volver_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject handle to Volver (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Almacenar el audio y la frecuencia de sampleo en una nueva variable

AudioProc4=handles.AudioProc2;

Fs4=handles.Fs;

% Reproducir el audio almacenado en los dos pasos anteriores

soundsc(AudioProc4,Fs4);

A continuación, se muestra en la figura 6.2, la interfaz como la vería un usuario que ejecute el programa:



Figura 6.2. Interfaz del programa luego de ejecutarse desde Matlab

Puede implementarse un procedimiento similar para utilizarse en archivos estéreo, se deberá obtener los datos mediante procedimientos de medición binaural, en cuyo caso la espacialización será más completa. Se podría también crear un pseudo-estéreo de la simulación dividiendo en dos la matriz del archivo de audio leído, tomando los datos sólo de un lado del archivo y realizar las operaciones dos veces, una por cada canal del audio o, también podría optarse por programar el proceso de convolución por completo.

La figura 5.23 es una gráfica de amplitud *versus* tiempo de las señales implicadas en la convolución efectuada durante la ejecución del programa.

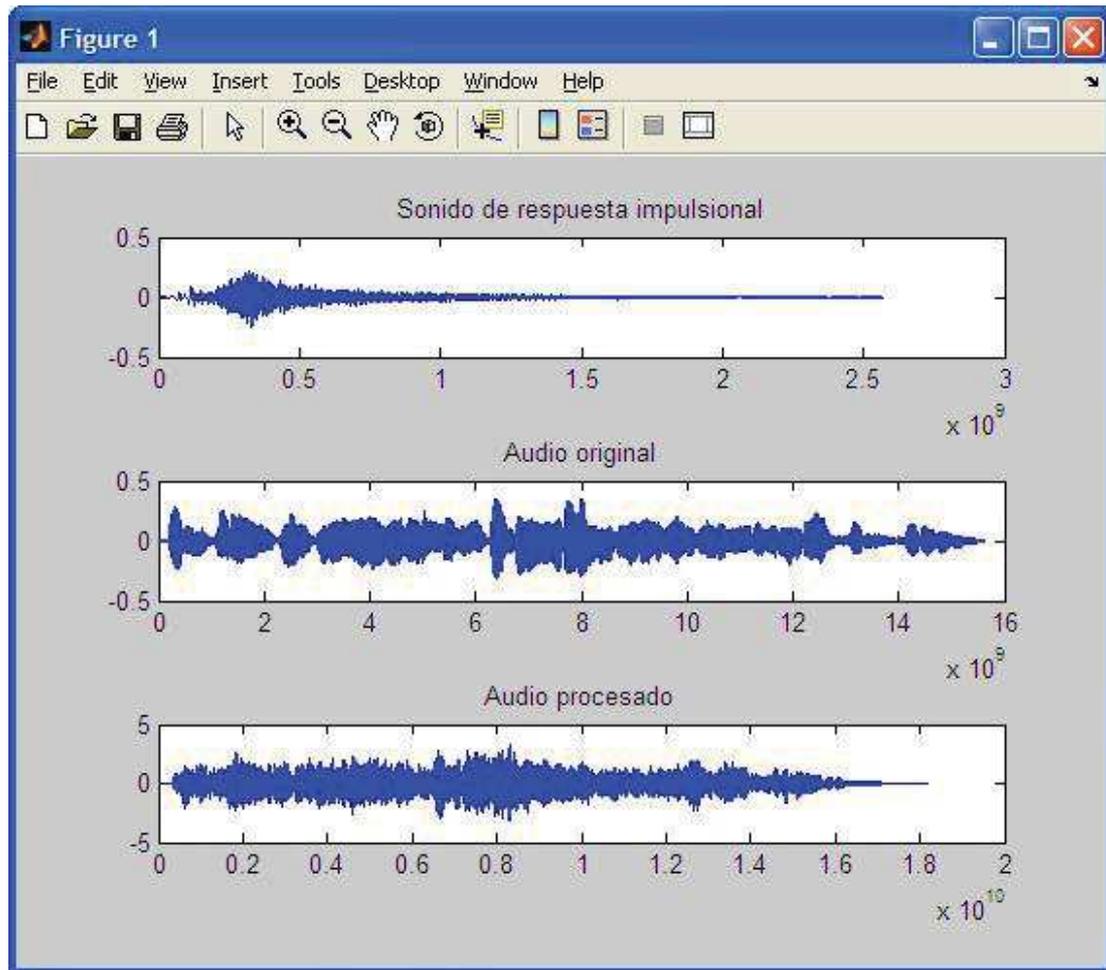


Figura 5.23. – Gráficas generadas por Matlab de la señal de impulso (arriba), la señal sin procesar (en el medio) y la señal procesada o convolucionada (abajo).

Matlab maneja la frecuencia y amplitud de manera normalizada, es decir que el máximo valor corresponderá a 1, el resto de valores se ubicará proporcionalmente por debajo del valor normalizado. Si el programa verificara un valor resultante superior a 1, se producirá un *clip* de señal, es por esto que se debe manejar la amplitud de los archivos de audio de manera que no se obtenga distorsión digital en el resultado, La razón para que la amplitud se eleve al final del proceso es porque al convolucionar las señales, sucede como si al audio original se le agregaran más señales-copias, obviamente asociadas a las reflexiones registradas en la respuesta impulsiva de los recintos, las cuales contribuyen como refuerzo de la amplitud total de la señal procesada.

6.1.4 APLICACIONES

Entre las varias aplicaciones que puede tener este proyecto se puede citar la simulación de espacios arquitectónicos. No solamente de espacios previamente registrados, sino también de espacios inexistentes mediante la construcción o modificación de respuestas impulsionales, para así tener ideas predictivas sobre el diseño de recintos. Una nueva tendencia a nivel mundial es la preservación de los parámetros acústicos como parte del patrimonio intangible de los países, así se puede reconstruir espacios virtualmente y registrar en fonogramas el estado acústico de estos lugares.

En el mundo del audio y el sonido, la aplicación de este tipo de procesamientos también muy amplia, esta técnica puede utilizarse para simulación de especialización de fuentes, es decir una definición exacta del panorama de audición según la ubicación de la fuente y el oyente en puntos específicos de la localidad, algo que puede ser muy apetecido también en edición y mezcla de audio al trabajar con *Plugins* para agregar reverberación a una grabación. En la post-producción de audio para video puede resultar increíblemente satisfactorio el simular la ubicación de un sonido en un lugar en el que por ejemplo la voz original de un actor tuvo que ser reemplazada por algún motivo, o al agregar un sonido de *Foley* o efecto sonoro para enriquecer alguna escena.

7. CAPÍTULO VII

7.1. CONCLUSIONES

- Para concluir acerca del estado acústico de ambas iglesias, se abordará cada parámetro evaluado en términos generales, es decir, resumiendo lo observado en las mediciones en el altar y en el coro:

Tiempo de Reverberación (T60): A pesar de que se ve que los valores recomendados son superados, el tiempo de reverberación en cada iglesia es normal y consecuente con su forma y volumen. Observando la distribución de este indicador en el espectro, ambas iglesias poseen T60 elevados en el rango de frecuencias de la voz (aprox. 400Hz – 4000Hz).

Índice de claridad de la voz (C50 S.A.): Este indicador resulta más alentador en la Iglesia de La Catedral que en La Compañía, de acuerdo con los valores tomados, La Catedral manifiesta cierta mejora sobre La Compañía, a pesar de esta comparación es necesario recalcar que ambas ofrecen resultados favorables en cuanto a este parámetro.

Índice de claridad musical (C80): Entre las dos iglesias estudiadas, La compañía es la que mejores resultados asocia a este parámetro. Un concierto podrá apreciarse con más nitidez y equilibrio tonal dentro de esta iglesia que dentro de La Catedral.

Definición (D50): Ambas iglesias poseen menos de un 50% de definición del sonido. De entre las dos, la que mayor definición registra es la Iglesia de La Catedral.

Brillo acústico (Br): Las dos iglesias se encuentran cerca del valor recomendado, sin embargo el promedio de este indicador no se cumple en ninguna de ellas, esto no implica que el sonido en su interior sea muy opaco ya que el T60 no se distribuye tan uniformemente en el interior de

la iglesia, lo cual supone que habrá zonas en que los materiales favorezcan la percepción de los armónicos del sonido.

Calidez Acústica (BR): Se observa una mejor relación de bajos en la iglesia de La Compañía, que cumple las recomendaciones. En la Iglesia de La Catedral los valores no se cumplen pero son muy cercanos.

Inteligibilidad de la palabra (%ALCons y STI/RASTI): Ambas iglesias poseen datos favorables en cuanto a inteligibilidad de la palabra y pérdida de las consonantes, Las condiciones óptimas se tienen dentro de la iglesia de La Catedral. Debe tomarse en cuenta que las mediciones fueron realizadas en sala vacía, lo cual quiere decir que a medida de que incremente la absorción provocada por las personas en el interior, estos valores mejorarán aún más.

- Se ha evaluado el ruido de fondo en ambos recintos estudiados. La primera observación es que analizando el contenido espectral del ruido, los valores se cumplen totalmente en la Iglesia de La Compañía, mientras en la Iglesia de La Catedral, los valores recomendados se cumplen parcialmente. De manera que, si se trata de sacar una única conclusión en base al ruido de fondo, ésta es que no se cumplen las recomendaciones y que se debe trabajar en el aislamiento de la Iglesia de La Catedral para corregir ese inconveniente.
- Quito cuenta con su propia Ley de Patrimonio Cultural, en la que se toma en cuenta lo intangible como parte importante de esa identificación cultural y social. Sin embargo la calidad de subjetividad de ese patrimonio ha conducido a que no se lo haya evaluado desde un principio. Respecto a esto, la interrogante sobre cómo ha variado la calidad acústica no sólo en las iglesias aquí estudiadas, sino en todo el patrimonio en el que esta característica puede resultar trascendental, es algo que difícilmente puede ser respondido. El identificar la información

relacionada con la acústica del Patrimonio cultural de Quito, constituirá un avance en el inventario del mismo, para propender hacia su conservación.

- A pesar de que las dos iglesias analizadas en esta tesis tengan igual contemporaneidad, es muy difícil hacer una comparación precisa entre ellas, ya que ambas mantienen estilos completamente diferentes que determinan que el comportamiento del sonido en su interior difiera entre la una y la otra. Se conoce que la Iglesia de La Compañía De Jesús es la iglesia más representativa del barroco en el Ecuador, y de hecho, es evidenciable el respeto total por los elementos de arquitectura y de arte en la construcción, algo que podría permitir ubicar y concluir reglas tipológicas para explicar y clasificar el comportamiento del sonido en el interior del local. Pero no sucede lo mismo en la Catedral Metropolitana, cuyo eclecticismo no permite la generalización en base a estudios existentes sobre acústica en iglesias clasificadas por su estilo, volumen o año de construcción.
- Este estudio ha permitido conocer el tiempo de reverberación en los dos recintos de culto estudiados, así como varios parámetros acústicos derivados de él. A partir de todos estos valores puede concluirse acerca de la calidad de ambos locales en términos de acústica; se puede establecer por ejemplo, la suavidad con que se percibirá la música en el interior, la facilidad con la que se distinguiría una voz hablando en el interior, la calidez del sonido percibido por un oyente en el interior, entre otros aspectos técnicos y subjetivos; pero difícilmente se puede generalizar con el método aquí utilizado, las peculiaridades de los elementos del interior. Serán necesarios estudios posteriores mediante herramientas matemáticas más complejas o mediante simulación por *software*, para lograr explicar lo que sucede con los elementos arquitectónicos y decorativos en las superficies.

- No se ha logrado develar por completo todo el misterio que envuelve la teoría aplicada durante la construcción de los templos aquí analizados, pero sí se han deducido aspectos que dan indicios de que por empíricos que fueran los recursos con que contaban los diseñadores, arquitectos y constructores, éstos se basaban en el razonamiento y en la experiencia, lo cual dentro de la ciencia como actividad humana, resultan igualmente valederos para la adquisición de conocimiento.
- Las características acústicas en locales son aspectos muy valorados dentro del arte de la música y, en cuanto a la técnica, dentro del audio y la ingeniería en sonido –como caso particular de la ingeniería acústica– se privilegia a ciertos espacios debido a sus condiciones en este sentido, es así que a nivel comercial incluso se encuentra *software* complementario para la simulación de parámetros acústicos como la reverberación en recintos específicos, tales como teatros y templos, por consiguiente, el aporte de este proyecto con un *software* básico para especialización de fuentes, constituye un aporte para la toma de conciencia acerca del respeto y conservación de la acústica como parte del Patrimonio Cultural de Quito.
- El mecanismo más aplicable para la predicción del T60 en iglesias resulta ser la aplicación de la fórmula de Sabine por no presentar mayores restricciones en cuanto a distribución de materiales en el recinto. A pesar de ello, un modelo nunca puede ser más preciso que lo que se evalúa, es por eso muy necesario, el efectuar buenas prácticas para evaluar parámetros acústicos en recintos de manera experimental.
- En la actualidad todavía se trata de mantener el T60 en valores bajos, pero en recintos como las iglesias que poseen un gran volumen y complejas formas arquitectónicas además de espacios acoplados a un principal y de elementos de decoración sobre sus superficies, un elevado T60 es natural e incluso necesario debido al rompimiento de los

frentes de ondas que ocurre por la presencia de relieves en las superficies. Esto significa que consecuentemente con el incremento de reflexiones creadas por la aparición de campo difuso, se provoca también un incremento en el tiempo de reverberación por incremento en el nivel del campo reverberante, en otras palabras, existe un punto de equilibrio en el que un prolongado tiempo de decaimiento o tiempo de reverberación contribuye al aumento de la energía del sonido percibido sin necesidad de producir pérdida en la inteligibilidad de la palabra.

7.2. RECOMENDACIONES

- En cuanto a la parte técnica, la mayor recomendación que a partir de este estudio puede hacerse, es la mejora del aislamiento acústico en La Catedral a fin de disminuir el ruido en el interior de los recintos a niveles adecuados para su uso. Cualquier trabajo en favor de esto deberá utilizar procedimientos que involucren la conservación de los locales.
- No se recomienda colocar elementos acústicos para disminuir el T60, ya que debe siempre propenderse a la conservación de éste como parte del Patrimonio intangible de ambas iglesias estudiadas.
- Es muy necesaria en la realidad nacional, la iniciativa de las entidades relacionadas con el manejo del Patrimonio para actualizar los mecanismos y elementos legales que protegen los bienes patrimoniales así como su estudio, con el propósito de promover la colaboración por parte de las funciones encargadas de la dirección y administración para facilitar la investigación y asegurar el respeto a los elementos por parte de los investigadores
- Para mediciones de este tipo, es recomendado por normativa que el nivel de presión sonora de la señal emitida por la fuente se mantenga al menos 45dB por encima del nivel de ruido de fondo si se evalúa el T30,

y de al menos 35dB si se evaluara T20. Debe evitarse en cualquier caso una sobrecarga de la señal en el sistema de grabación y en la fuente sonora, por lo que se hace necesario siempre utilizar sistemas que permitan el monitoreo visual de la señal. En este caso podría también ser aconsejable realizar un ajuste previo de los niveles para cada banda de frecuencia mediante el uso de un ecualizador que contenga las bandas de interés, tomando en cuenta además que si la medición se lleva a cabo entre bandas de frecuencia de octava, debe generarse una pendiente adecuada para el resto de frecuencias en el ecualizador en caso de utilizar un artefacto conformado por bandas distintas a una octava, por ejemplo un tercio de octava.

- Se recomienda que al interpretar los datos se tome en cuenta los rangos frecuenciales en los que el sistema utilizado (cualquiera que éste sea) pierde precisión. Para el caso de Aurora Plugin será necesario decidir sobre la fiabilidad de los datos en rangos iguales e inferiores a 250Hz, según lo observado en las figuras 4.1 a la 4.5. Cave aprovechar que el sistema cumple con la normativa ISO 3382, de manera que si los niveles de presión sonora emitidos por la fuente se mantienen por encima de los mínimos recomendados por la normativa, los errores en las medidas podrán mantenerse al mínimo.
- En la utilización del programa de aplicación, debe mantenerse niveles bajos tanto en el audio de los impulsos como en el del sonido a espacializar además de mantener la duración más corta y precisa posible en estos primeros para evitar sobrecargar los procesos del programa en cuanto a recursos del computador. Para esto se recomienda utilizar un programa de edición de audio para ajustar los niveles de las señales y el inicio y fin de los archivos correspondientes a los impulsos para así agregar precisión a su duración y facilitar los cálculos que efectúa el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CARRIÓN, Antoni. Diseño Acústico De Espacios Arquitectónicos, Barcelona, Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 1998. 433p.
- [2] ARAU, Higini. ABC De La Acústica Arquitectónica. Barcelona, Ediciones CEAC S.A., 336p.
- [3] ZENDRA, J. J. ZAMARREÑO, T. NAVARRO, T. ALGABA, J. El Problema De Las Condiciones Acústicas En Las Iglesias: Principios Y Propuestas Para La Rehabilitación. Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción (IUCC), Universidad de Sevilla, 141p.
- [4] VARGAS, José María, Fr, O.P. Patrimonio Artístico Ecuatoriano, Tercera Edición. Quito, TRAMA Ediciones, 2005, 457p.
- [5] BERARDI, Umberto. CIRILLO, E. MARTELOTTA, F. La Extensión y Clasificación de Un Modelo Energético Para Predecir Parámetros Acústicos En Iglesias. Revista de Acústica, mayo 2009. Sociedad Española de Acústica.
- [6] BERARDI, Umberto. CIRILLO, E. MARTELOTTA, F. Predicting Energy-Based Acoustic Parameters In Churches: An Attempt To Generalize The μ Model. Bari, Politecnico di Bari, 2008, 11p.
- [7] Solís, G, Hugo. El Espacio Físico Como Variable Estructural En Música. UNAM, Escuela Nacional de Música, Instituto de Investigaciones Estéticas, 1998, 15p.
- [8] BERARDI, Umberto. CIRILLO, Ettore. MARTELOTTA, Francesco. A Comparative Analysis of Acoustic Energy Models for Churches. Dipartimento di Architettura e Urbanistica, Politecnico di Bari. Bari. 24 julio 2009.
- [9] INSTITUTO Nacional De Patrimonio Cultural, CORPORACIÓN Andina De Fomento, CABILDO Catedralicio. Salvaguarda de la Catedral Primada de Quito. Quito, Ediciones Culturales UNP, enero 1998

- [10] VALDEZ Francisco. Protección De Patrimonio Cultural: Bienes Materiales (del Lirismo A La Realidad). En:, Seminario: CULTURA Y POLÍTICA EXTERIOR. Plan Nacional de Política Exterior: 30 de marzo de 2006. Quito, Ministerio de relaciones Exteriores. 31p.
- [11] ROLÓN Sebastián, BUSTAMANTE Mario, NAVÍA Marcelo, ULLOA Julio, La Conservación Del Espacio Acústico Como Parte Del Patrimonio Integral: Iglesias De Misiones Jesuitas En La Chiquitanía Boliviana. En:, VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008: 5,6 y 7 noviembre de 2008. Buenos Aires, Federación Iberoamericana de Acústica.10p.
- [12] Codificación No. 27. ECUADOR. Ley de Patrimonio Cultural, Codificación.
Registro Oficial Suplemento 465. Comisión de Legislación y Codificación. H. Congreso Nacional, Quito, Ecuador, 19 de Noviembre del 2004. 10p.
- [13] ISO 3382. SUIZA. Acoustics – Measurement Of The Reverberation Time Of Rooms With Reference To Other Acoustical Parameters. International Organization for Standardization (ISO), Ginebra, Suiza, 1997, 21p.
- [14] FLOODY, Sergio. UNDURRAGA, Jaime. HERNÁN, Ángel. URIBARRI, Mauricio. Sistema De Medición De Parámetros Acústicos Utilizando Sweeps. Santiago, Universidad Pérez Rosales, Departamento de Acústica, 2005.69p.
- [15] CAMPANINI, Simone y FARINA, Angelo. A New Audacity Feature: Room Objective Acoustical Parameters Calculation Module. Parma, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Parma, 6p.
- [16] MERINO, Jesús M. Las Vibraciones De La Música. San Vicente, Editorial Club Universitario, 2006,412p.
- [17] UNDURRAGA, Jaime. URIBARRI, Mauricio. Nuevas Herramientas Para Mediciones Acústicas Utilizando Sweeps. EN:, V Congreso Iberoamericano de Acústica: 25 al 28 de noviembre de 2006. Santiago. 10p.

- [18] PALMESE, Cristina. CARLES, José .L. Acústica y Arquitectura: El marco Acústico y Su Evolución. [en línea]. Revista Scherzo No. 193, enero 2005 <<http://www.revistas culturales.com/articulos/60/scherzo/258/2/acustica-y-arquitectura-el-marco-acustico-y-su-evolucion.html>> [consulta: diciembre 2008].
- [19] ORTIZ, Marcelino. El portal de la Ciencia y la Tecnología en Español: Los asientos ayudaban a los antiguos griegos a escuchar desde la última fila [en línea]. <<http://www.solociencia.com/arqueologia/07050202.htm>> [consulta: diciembre 2008].
- [20] MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES. Nociones de Patrimonio Cultural Por qué protegerlo? [en línea]. <www.mmrree.gov.ec/mre/documentos/ministerio/planex/ponencia_10.pdf> [consulta: 20 junio 2009].
- [21] PEREZ, de S.M., Antonio .C. Universidad De Córdoba. Analisis espectral de ruidos. [en línea]. <<http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/%282%29%20Analisis%20espectral/indices%20de%20valoracion%20de%20ruido.htm#encabezado%20de%20p%C3%A1gina>> [consulta: 29 junio 2009].
- [22] WIKIPEDIA. %Alcons. [en línea]. < <http://en.wikipedia.org/wiki/Alcons>> [consulta: 21 junio 2009].
- [23] WIKIPEDIA. Espacialización Sonora [en línea]. http://es.wikipedia.org/wiki/Espacializaci%C3%B3n_sonora [consulta: 22 octubre 2009].
- [24] SKYSCRAPERCITY FORUMS. Fotografías [en línea]. <<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=512910>> [consulta: 7 junio 2009].
- [25] PANORAMIO. Fotografías [en línea]. <<http://www.panoramio.com/photo/7751482>> [consulta: 7 junio 2009].

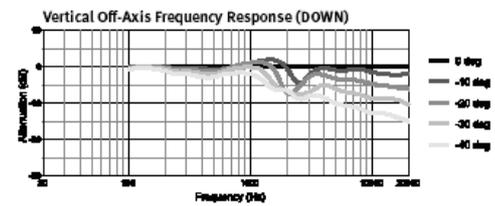
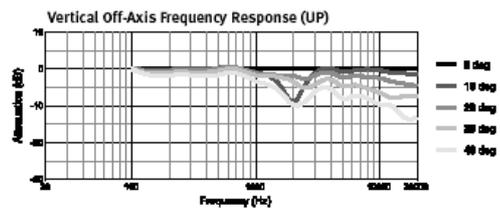
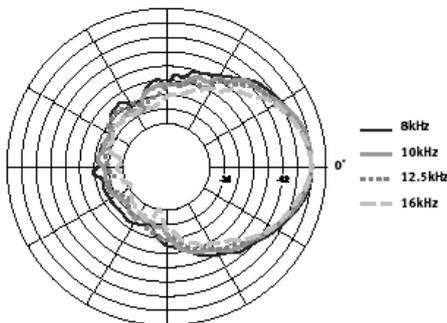
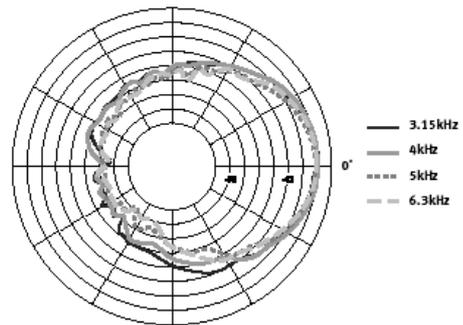
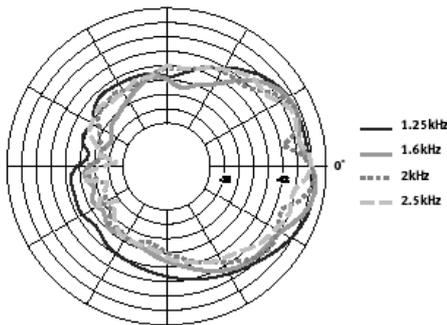
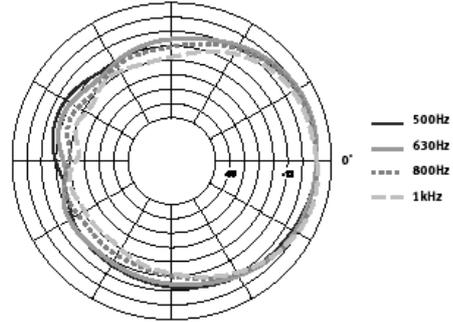
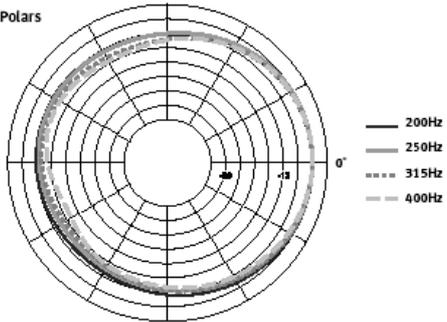
ANEXOS

ANEXO 1:

PATRÓN POLAR Y RESPUESTA DE FRECUENCIA ALTAVOZ RCF Art 300

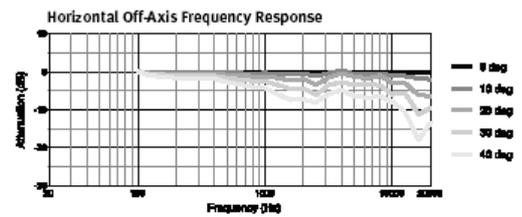
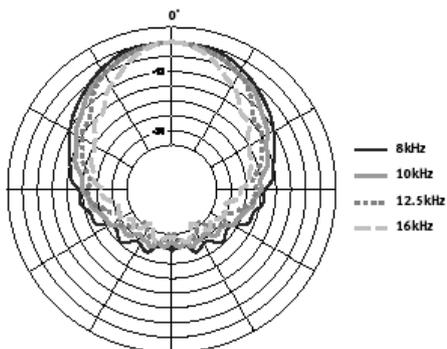
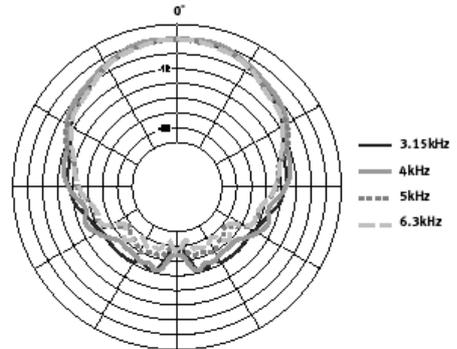
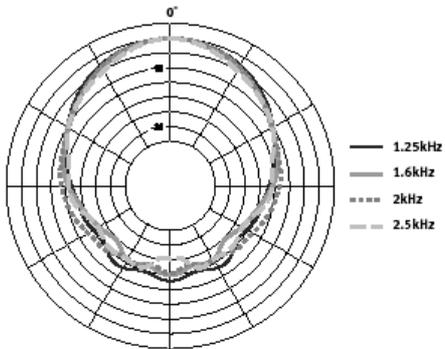
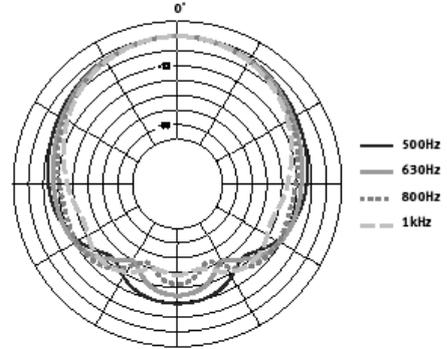
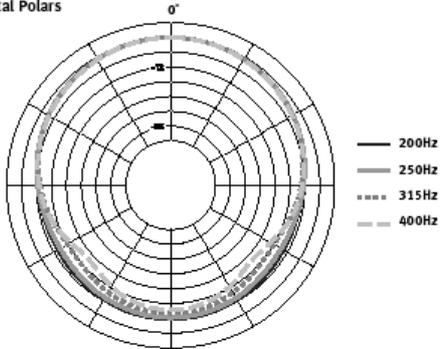
Diagramas polares verticales:

ART300
Vertical Polars



Diagramas polares horizontales:

ART300
Horizontal Polars



ANEXO 2:
CÁLCULO DE VOLUMEN Y SUPERFICIE APROXIMADOS
IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS

VOLÚMENES:

1. CÚPULA DEL CRUCERO:

$$V = \left(\pi \cdot 4.725^2 \cdot \pi \cdot 4.5 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 4.725^3 \right) + \left(\pi \cdot 2.25^2 \cdot \pi \cdot 2 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 2.25^3 \right) = 592.2209 \text{ [m}^3 \text{]}$$

2. CÚPULA DE LAS NAVES LATERALES:

$$V = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 2.25^3 \right) + \left(\pi \cdot 0.71^2 \cdot \pi \cdot 2.1 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 0.71^3 \right) = 27.9318 \text{ [m}^3 \text{]}$$

3. CÚPULA DEL PRESBITERIO:

$$V = \left(\frac{\pi \cdot 1.35^2 \cdot 2.5}{3} \right) + \left(\pi \cdot 1.35^2 \cdot 2.3 \right) + \left[\frac{\pi \cdot 4.725 \left(3.5^2 + 1.35 \cdot 4.725 + 4.725^2 \right)}{3} \right]$$

$$= 168.9873 \text{ [m}^3 \text{]}$$

4. EMPLAZAMIENTO DEL PRESBITERIO:

$$V = \left\{ (1 \cdot 2 \cdot 3) + \left[\frac{(9.45 + 3.6) \cdot 3.95}{2} \right] + (9.45 \cdot 6.7) \right\} \cdot 18.75 = 1713.5391 \text{ [m}^3 \text{]}$$

VOLÚMENES PARA RESTAR:

5. COLUMNAS DEL CRUCERO:

$$V = 2 \cdot [(1.7 \cdot 3.15) + (1.35 \cdot 2.4)] \cdot 10.74 = 184.6206 \text{ [m}^3 \text{]}$$

6. COLUMNAS DE LA NAVE:

$$V = 6 \cdot [(1.25 \cdot 0.7) + (1.55 \cdot 2) + 2 \cdot (0.2 \cdot 0.8)] = 35.07 \text{ [m}^3 \text{]}$$

7. ARCOS DE LA NAVE CENTRAL:

$$V = \left\{ \left[(5.65 \cdot 2.53 \cdot 1.55) - \left(\frac{2.825^2 \cdot \pi \cdot 1.55}{2} \right) \right] \right.$$

$$+ \left[(5.75 \cdot 2.53 \cdot 1.55) - \left(\frac{2.875^2 \cdot \pi \cdot 1.55}{2} \right) \right]$$

$$+ \left[(5.78 \cdot 2.53 \cdot 1.55) - \left(\frac{2.89^2 \cdot \pi \cdot 1.55}{2} \right) \right]$$

$$\left. + \left[(5.75 \cdot 2.53 \cdot 1.55) - \left(\frac{2.875^2 \cdot \pi \cdot 1.55}{2} \right) \right] \right\} = 9.9049 \text{ [m}^3 \text{]}$$

8. ARCOS DE LAS NAVES NORTE Y SUR:

$$V = 8 \left\{ \left[(2.18 \cdot 5.5 \cdot 1.25) - \left(\frac{2.75^2 \cdot \pi \cdot 1.25}{2} \right) \right] \right\} = 1.10853 [m^3]$$

9. ARCOS DEL CRUCERO:

$$V = 2 \left[(2.18 \cdot 5.5 \cdot 2.25) - \frac{(2.75^2 \cdot \pi \cdot 2.25)}{2} \right] = 0.49884 [m^2]$$

10. NAVE CENTRAL:

$$V = (10.74 \cdot 9.45 \cdot 45.14) + (4.725^2 \cdot \pi \cdot 45.14) = 7747.42422 [m^3]$$

11. VOLUMEN NAVES NORTE Y SUR

$$\begin{aligned} V &= [(0.14 + 1.55 + 0.65 + 5.5 + 0.14 + 0.51) \cdot 7.74 \cdot 35.79] \\ &+ [(0.65 + 5.50 + 0.6 + 1.65 + 0.14) \cdot 7.74 \cdot 35.79] - 184.6206 \\ &- 35.07 - 9.9049 - 1.10853 - 0.49884 = 4464.607368 [m^3] \end{aligned}$$

12. VOLUMEN TOTAL:

$$V_T = (1) + 8 \cdot (2) + (3) + (4) + (10) + (11) - (5) - (6) - (7) - (8) - (9)$$

$$\begin{aligned} V_T &= 592.22094 + 8 \cdot 27.9318 + 168.9873 + 1713.5391 + 7747.42422 \\ &+ 4464.607368 - 184.6206 - 35.07 - 9.9049 - 1.10853 - 0.49884 \\ &= 14679.030458 [m^3] \end{aligned}$$

SUPERFICIES

• **CÚPULA DEL PRESBITERIO:**

$$\begin{aligned} g &= \sqrt{2.5^2 + 1.35^2} = 2.841 [h] \\ S &= \pi \cdot (35 \cdot 2.841) + \pi \cdot (7 \cdot 2.3) + \pi \cdot (7 + 9.45) \cdot 2.841 = 140 [h^2] \end{aligned}$$

• **CÚPULA DEL CRUCERO:**

$$S = \frac{4\pi \cdot (2.25^2)}{2} + 4.5 \cdot \pi \cdot 2 + \frac{4\pi \cdot (2.75^2)}{2} + 9.45 \cdot \pi = 333.9552 [h^2]$$

• **CÚPULAS DE LAS NAVES NORTE Y SUR (8):**

$$S = 8 \cdot \left[\frac{4\pi \cdot (0.71^2)}{2} + 1.42 \cdot \pi \cdot 2.1 + \frac{4\pi \cdot (2.25^2)}{2} \right] = 354.7537 [h^2]$$

• **COLUMNAS DE LA NAVE:**

$$S = 6 \cdot (2.25 \cdot 0.7) + (5.5 \cdot 3) + 2 \cdot (2 \cdot 0.8) + 4.58 = 160.6206 [h^2]$$

- **PAREDES FRONTALES EN EL CRUCERO:**

$$S = (0.65 + 5.5 + 0.6 + 1.65 + 0.14) \cdot 18.75 + (0.14 + 0.65 + 5.5 + 0.14 + 0.51) \cdot 18.75$$

$$= 290.25 \text{ m}^2$$

- **ARCOS DE LAS NAVES NORTE Y SUR (LATERALES):**

$$S = 2 \cdot \left\{ (0.15) (0.65 + 5.75 + 5.78 + 5.75) - \frac{1}{2} \left[(0.825^2 \cdot \pi) + 2.89^2 \pi \right] \right\} = 108.1021 \text{ m}^2$$

- **ARCOS DE LAS NAVES NORTE Y SUR (DEBAJO):**

$$S = \frac{1}{2} (0.65 \cdot \pi \cdot 1.55) + \frac{1}{2} (0.75 \cdot \pi \cdot 1.55) + \frac{1}{2} (0.78 \cdot \pi \cdot 1.55) + \frac{1}{2} (0.75 \cdot \pi \cdot 1.55)$$

$$= 55.8285 \text{ m}^2$$

- **PRESBITERIO:**

$$S = (6.7 + 5.3 + 0.7 + 1 + 2.3 + 1 + 0.6 + 4.9 + 6.7) \cdot 18.75 = 527.4375 \text{ m}^2$$

- **BÓVEDA:**

$$S = \frac{1}{2} (9.45) \cdot 35.79 = 531.2677 \text{ m}^2$$

- **PAREDES LATERALES:**

$$S = 2 \cdot (5.14 \cdot 7.74) = 702.792 \text{ m}^2$$

- **PARED TRASERA:**

$$S = (0.65 + 5.5 + 0.6 + 1.65 + 0.14 + 0.14 + 1.55 + 0.65 + 5.5 + 0.14 + 0.51 + 1.84) \cdot 7.74 + 9.45 (0.74)$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot 4.725^2 \cdot \pi = 282.6158 \text{ m}^2$$

ARCOS TRANSVERSALES EN LAS NAVES NORTE Y SUR (FRONTAL):

$$S = 6 \cdot \left[(0.65 + 5.5 + 0.6) (0.18 + 0.63) - \frac{1}{2} (0.75^2 \cdot \pi) \right] = 42.539 \text{ m}^2$$

- **ARCOS TRANSVERSALES EN LAS NAVES NORTE Y SUR (DEBAJO):**

$$S = 2 \cdot \left[\frac{1}{2} (0.65 + 5.5 + 0.6) \cdot \pi (0.3 + 1.35 + 1.35 + 2.2) \right] = 65.7378 \text{ m}^2$$

- **PISO:**

$$S = (0.65 + 5.5 + 0.6 + 1.65 + 0.14 + 9.45 + 0.14 + 1.55 + 0.65 + 5.5 + 0.14 + 0.51) \cdot (5.14)$$

$$- 2 \cdot (0.3 \cdot 2.25) + (0.85 \cdot 2.4) + (0.1 \cdot 0.85) + (0.7 \cdot 2.85) + (0.1 \cdot 0.75) + (0.1 \cdot 0.75)$$

$$- 6 \cdot (0.25 \cdot 0.7) + (0.55 \cdot 3) + 2 \cdot (0.8 \cdot 0.2) = 1245.6672 \text{ m}^2$$

- **SUPERFICIE DE LAS SILLAS:**

$$S = 29 \cdot 2 + 2.5 = 60.5 \text{ m}^2$$

- **SUPERFICIE DE LA PUERTA:**

$$S = 3 \cdot 4 = 12 \text{ m}^2$$

- **RETABLO:**

$$S = 9.45 \cdot 18.75 = 177.1875 \text{ m}^2$$

ALTARES

$$S = 3 \cdot 4.58 \cdot 8 = 109.92 \text{ m}^2$$

- **PISO DEL PRESBITERIO:**

$$S = \left\{ 4 \cdot 2.3 + \left[\frac{0.45 + 3.6 + 3.95}{2} \right] + 0.45 \cdot 6.7 \right\} = 91.3888 \text{ m}^2$$

ANEXO 3:
CÁLCULO DE VOLUMEN Y SUPERFICIE APROXIMADOS

IGLESIA DE LA CATEDRAL METROPOLITANA

VOLÚMENES:

13. CÚPULA DEL PRESBITERIO:

$$V = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 4.625^3 \right) + \left(0.675^2 \cdot \pi \cdot 2.5 \right) = 210.7804 \text{ m}^3$$

14. BÓVEDA + NAVE CENTRAL:

$$V = \left[\frac{0.25 + 4.7}{2} \cdot 1.6 + 9.25 \cdot 11.8 \right] \cdot 39.755 = 4782.9241 \text{ m}^3$$

15. NAVES NORTE Y SUR:

$$V = 2 \cdot \left[\frac{0.75 \cdot 2.1}{2} + 4.755 \cdot 9.7 \right] \cdot 73.275 = 7490.3175 \text{ m}^3$$

16. PRESBITERIO:

$$V = \frac{1}{2} \left(4.625^2 \cdot \pi \right) \cdot 15.15 + 9.25 \cdot 4.625 \cdot 15.15 = 1157.1807 \text{ m}^3$$

17. GIROLA:

$$V = 9.25 \cdot 8.45 \cdot 15.15 + \left(0.25 \cdot 9.25 \right) \cdot 15.15 - 1157.1807 = 1323.2531 \text{ m}^3$$

18. VOLUMEN LIBRE BAJO EL CORO ALTO:

$$V = 2 \cdot \left[\frac{0.25 \cdot 4.7}{2} \cdot 1.6 + 9.25 \cdot 11.8 \right] = 240.84 \text{ m}^3$$

19. VOLUMEN BAJO LOS ARCOS EN LA NAVE CENTRAL:

$$V = \left(0.7 \cdot 1.7 \right) \left(0.245 + 6.615 + 6.63 + 6.18 + 6.48 + 6.83 + 6.235 \right) - \frac{1}{2} \left(0.375^2 \cdot \pi \cdot 1.17 \right) \cdot 16 = 613.6877 \text{ m}^3$$

VOLÚMENES PARA RESTAR:

$$V = 16 \cdot \left\{ 1.7 \cdot \left[\frac{0.1 + 4}{2} \cdot 4.75 \right] - \frac{1}{2} \left(0.375^2 \cdot \pi \cdot 1.17 \right) \right\} = 411.4606 \text{ m}^3$$

- **VOLUMEN TOTAL:**

$$V = 210.7804 + 4782.9241 + 7490.3175 + 1157.1807 + 1323.2531 + 240.84 + 613.6877 - 411.4606 \\ = 15407.5229 \text{ [m}^3 \text{]}$$

SUPERFICIES:

- **COLUMNAS:**

$$S = (6 \cdot 1.7 \cdot 11.8) + (2 \cdot 1.7 \cdot 5.7 = 631.04) \text{ [m}^2 \text{]}$$

- **PISO:**

$$S = (4.75 + 1.7 + 9.45 + 1.7 + 4.75) \cdot (3.275 = 1289.64) \text{ [m}^2 \text{]}$$

- **PAREDES:**

$$S = 2 \cdot (3.275 \cdot 11.8) + 2 \cdot (0.25 \cdot 11.8) + 2 \left[\frac{(4.8 + 9.7) \cdot 4.75}{2} \right] - 5.5 - 4.6 = 1953.215 \text{ [m}^2 \text{]}$$

- **TECHO:**

NAVES:

$$S = 2 \cdot [1.935(6.235 + 6.83 + 6.48 + 6.18 + 6.63 + 6.615 + 7.245 + 9.25 + 8.45)] = 663.8858 \text{ [m}^2 \text{]}$$

ARTESONADO:

$$S = (4 + 2.4 + 3) \cdot 73.275 = 615.51 \text{ [m}^2 \text{]}$$

- **SUPERFICIE BAJO LOS ARCOS – NAVES NORTE Y SUR:**

$$S = 16 \cdot \left[\frac{1}{2} (4.75 \cdot \pi \cdot 1.7) \right] = 202.9469 \text{ [m}^2 \text{]}$$

- **SUPERFICIE SOBRE LOS ARCOS – BÓVEDA (LATERAL):**

$$S = 2 \cdot \left\{ 73.275 \cdot 6.1 - \frac{1}{2} \left[(1.175^2) + (0.415^2) + (0.24^2) + (0.09^2) + (0.315^2) \right] + \left[(0.3075^2) + (0.6225^2) + (0.625^2) + (0.225^2) \right] \right\} \cdot \pi = 530.4122 \text{ [m}^2 \text{]}$$

- **SUPERFICIE SOBRE LOS ARCOS – NAVES NORTE Y SUR:**

$$S = 32 \cdot \frac{(6.1 + 4) \cdot 4.75}{2} - \frac{2.35^2 \cdot \pi}{2} = 490.0096 \text{ [m}^2 \text{]}$$

- **SUPERFICIE BAJO LOS ARCOS - BÓVEDA:**

$$S = 2 \left[\frac{1}{2} (6.235 + 6.83 + 6.48 + 6.18 + 6.63 + 6.15 + 7.245 + 9.25 + 8.45) \cdot \pi \cdot 1.7 \right] = 338.8679 \text{ [m}^2 \text{]}$$

PUERTAS:

$$S = (6 \cdot 5) + (4 \cdot 6) = 49 \text{ [m}^2 \text{]}$$

- **RETABLO:**

$$S = \frac{1}{2} (25 \cdot \pi \cdot 15.15) = 220.1275 \text{ m}^2$$

- **SILLAS:**

$$S = 5 \cdot 39.755 = 198.775 \text{ m}^2$$

Anexo 5

RESUMEN DE DATOS CATEDRAL METROPOLITANA. FUENTE EN EL ALTAR											Valores promedio		Valores óptimos
Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin	
T60 [s]	5,81	3,81	3,88	5,05	6,05	6,20	5,29	4,15	2,60	1,33	5,51	7,56	<2,5
C50 [dB]	1,76	1,87	0,05	1,19	-2,30	1,80	3,29	5,78	11,66	19,79	6,30	5,38	-
C80 [dB]	10,61	4,48	2,91	1,81	-0,11	2,85	4,39	7,10	13,28	22,66	7,66	7,34	-
D50 [%]	44,33	40,61	36,93	27,98	24,17	38,74	43,41	52,28	76,72	92,82	54,44	52,88	>50%
T60mid [s]	6,13												2<T60mid<3
BR	0,73												>=1,1
Br	0,77												>0,87
C50 (S.A.)	2,7												-
C80 mid [dB]	0,75												-4<C80<0
D50 mid [%]	37,3												>50%

RESUMEN DE DATOS CATEDRAL METROPOLITANA. FUENTE EN EL CORO											Valores promedio		Valores óptimos
Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin	
T60 [s]	4,97	3,35	3,68	4,80	5,95	5,89	5,31	4,39	2,67	1,40	5,39	5,48	<2,5
C50 [dB]	3,91	3,36	1,80	0,05	3,56	4,18	6,41	7,80	13,90	22,61	9,61	9,51	-
C80 [dB]	5,64	4,47	5,32	2,04	4,34	4,76	66,89	8,61	15,12	25,15	10,38	10,52	-
D50 [%]	48,43	47,28	46,01	39,37	31,23	43,38	53,95	60,41	78,33	91,20	62,45	61,96	>50%
T60mid [s]	5,92												2<T60mid<3
BR	0,72												>=1,1
Br	0,82												>0,87
C50 (S.A.)	5,77												-
C80 mid [dB]	6,69												-4<C80<0
D50 mid [%]	45,7												>50%