

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO ANÁLISIS ACÚSTICO DEL TEATRO ROMANO DE MEDELLÍN

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías de la
Telecomunicación

Autor: M^a Luisa Barragán Pulido

Tutores: Dña. Elena García Quevedo
D. Manuel Martín Medina Molina

Cotutor: D. Juan Miguel Barrigón Morillas

Fecha: Julio 2014

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS ACÚSTICO DEL TEATRO ROMANO DE MEDELLÍN

HOJA DE FIRMAS

Alumno/a

Fdo.: M^a Luisa Barragán Pulido

Tutor/a

Tutor/a

Cotutor

Fdo.: Dña. Elena García
Quevedo

Fdo.: D. Manuel Martín
Medina Molina

Fdo.: D. Juan Miguel
Barrigón Morillas

Fecha: Julio 2014

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS ACÚSTICO DEL TEATRO ROMANO DE MEDELLÍN

HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación: _____

Presidente

Fdo.:

Vocal

Fdo.:

Secretario/a

Fdo.:

Fecha: Julio 2014

AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer a mi familia todo lo que hace por mí día a día, lo que ha hecho posible que pueda estar realizando mi Trabajo Fin de Título.

En primer lugar, agradecérselo y dedicárselo a mi padre, que ha sido, sin ninguna duda, el pilar básico.

A mis tutores, Elena y Manolo, porque sin su ayuda no hubiera podido acabarlo.

A J. Miguel y a Pedro que, desde Cáceres, me han apoyado para que el trabajo saliera adelante.

En el Teatro;

En especial, a Santiago Guerra, por haberme facilitado y ayudado cuanto ha podido en todos estos cinco meses.

A Manuel Viola Nevado, quien me cedió los planos y me dio las bases para poder comenzar.

Y a tantos otros amigos, compañeros y profesores que me han apoyado en esta empresa que, desde el principio, supuso para mí una cuestión personal.

“¿Por qué cuando se extiende paja sobre la orquesta de un teatro, el coro parece menos sonoro? ¿Es a causa de la rugosidad relativa producida por la paja, que la voz no encuentra el suelo suave y uniforme cuando llega hasta él, y en consecuencia pierde volumen a causa de las discontinuidades?”

Aristóteles, “Éxodo” (libro XI).

ÍNDICE

BLOQUE 0 INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Acústica en Antigüedad Clásica	11
1.2 Objetivo del TFG	17
1.3 Descripción de la memoria.....	18
CAPÍTULO 2. EL TEATRO ROMANO DE MEDELLÍN	21
2.1 El teatro original	24
BLOQUE I MEDIDAS IN SITU	31
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.	33
3.0 Introducción	33
3.1 Equipos y material de trabajo	33
3.1.1 Ordenador portátil Toshiba Satellite L500 + Software Dirac 7841	33
3.1.2 Sonómetro B&K 2250	34
3.1.3 Fuente B&K Omnipower 4296.....	35
3.1.4 Amplificador de potencia B&K 2716	35
3.1.5 Sistema inalámbrico Samson Stage 5	36
3.2 Procedimiento.....	37
3.2.1 Conexión del sistema.....	37
3.2.2 Posiciones de la fuente	41
3.2.3 Respuesta en frecuencia de la fuente.....	41
3.2.4 Puntos de medida	43
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	45
4.0. Introducción	45
4.1 Respuesta al impulso	46
4.1.1 Análisis de parámetros de reverberación	46
4.1.2 Análisis de parámetros de energía	57
4.1.3 Análisis de parámetros de inteligibilidad.....	60
4.2 Difusión.....	63
4.2.1 Nivel de presión sonora	63

4.3 Ruido de fondo	69
4.3.1 Nivel de presión sonora	70

BLOQUE II SIMULACIÓN EN EASE..... 75

CAPÍTULO 5. LEVANTAMIENTO DEL TEATRO ROMANO DE MEDELLÍN EN EASE 77

5.0 Introducción	77
5.0.1 Objetivo y justificación.....	77
5.0.2 El teatro actual.....	77
5.1 Diseño	80
5.2 Materiales	83
5.3 Áreas de audiencia	87
5.4 Parámetros climatológicos de la sala	88
5.5 Ruido de fondo	89

CAPÍTULO 6. VALIDACIÓN DEL MODELO EASE 91

6.0 Introducción	91
6.1 Simplificación geométrica	91
6.2 Ajuste del TR y el volumen del recinto	92
6.3 Definición de fuente	95
6.4 Validación de resultados	97
6.4.1 Comprobación de la radial 9 con reflectogramas.....	99

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS Y RESULTADOS 103

7.0 Introducción	103
7.1 Ocupación del recinto	103
7.3 Definición de fuente: voz humana	104
7.4 Resultado de parámetros	105

BLOQUE III CONCLUSIONES 115

CAPÍTULO 8. VALORACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES..... 117

8.1	Ruido de fondo	117
8.2	Reflexiones.....	118
	Tiempo de reverberación	119
	Claridad de la voz.....	121
8.3	Inteligibilidad	122
	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	129
	<i>PLANOS.....</i>	133
	<i>PLIEGO DE CONDICIONES</i>	135
1.	Especificaciones hardware para el estudio acústico	137
2.	Especificaciones software para el estudio acústico	137
3.	Equipos de trabajo para medidas acústicas	138
	<i>PRESUPUESTO.....</i>	139
1.	Desglose	142
2.	Recursos materiales.....	142
	Recursos hardware	143
	Recursos software.....	143
3.	Trabajo tarifado por tiempo empleado.....	144
4.	Costes de redacción del TFG.....	145
5.	Material fungible.....	146
6.	Derechos del visado del COIT	146
7.	Gastos de tramitación y envío.....	147
8.	Aplicación de impuestos	147
	<i>ANEXO 1. CONCEPTOS.....</i>	149
1.	Factores que influyen en la inteligibilidad de la palabra.....	149
	a. Ruido de fondo.....	149
	b. Nivel de reverberación	150
	c. Anomalías acústicas	150
	d. Directividad de la voz	151
	e. Características del mensaje vocal	151

2. Parámetros acústicos	151
Nivel de presión sonora	152
Tiempo de reverberación	152
Claridad de la voz C_{50}	154
Definición.....	156
ANEXO 2. RESPUESTA AL IMPULSO.....	159
ANEXO 3. DATOS DE DIFUSIÓN.....	217
ANEXO 4. DATOS DE RUIDO DE FONDO	229
ANEXO 5. SIMULACIÓN EASE.....	235
ANEXO 6. RELACIÓN DE TABLAS, IMÁGENES Y GRÁFICAS.....	251

MEMORIA

BLOQUE 0 INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. Introducción

1.1 Acústica en Antigüedad Clásica

Los avances alcanzados en la acústica arquitectónica durante la Antigüedad Clásica, se deben principalmente al nacimiento de la cultura teatral. Tanto en Grecia como en Roma, el estudio de todo lo relacionado con el sonido fue fruto del afán por conseguir una acústica óptima en los recintos teatrales. Cabe destacar que los sabios romanos a diferencia de los griegos, que enfatizaban sus estudios en torno a las leyes que rigen la naturaleza, estudiaban los fenómenos relacionados con el sonido con una visión más técnica y pragmática.

Fruto del análisis de las principales poesías épicas griegas, la *Iliada* y la *Odisea* de Homero, cuya composición según la opinión mayoritaria se realizó en el siglo VIII a.C., diversos autores llegaron a la conclusión de que Homero era conocedor de conceptos tales como eco, intensidad, tono o timbre de un sonido. El autor menciona estos fenómenos y conceptos en el desarrollo de la trama de las obras, como se puede apreciar en estos fragmentos de la *Iliada*:

“Esténtor tenía una voz tan poderosa como 50 hombres juntos”. “El feroz Ares prorrumpió en un grito tan fuerte como el clamor de diez mil guerreros en refriega...” [6]

Fue en Grecia donde se inician los estudios específicos de los fenómenos asociados con el sonido por parte del que se considera el primer matemático puro: Pitágoras (570 a.C.-497 a.C.). Pitágoras y sus discípulos en el siglo VI a.C. observaron que el ruido al golpear un yunque con un martillo variaba de tono en función de la masa del martillo. De esta forma se descubre la frecuencia natural de los objetos. Establecieron también una relación entre el tono del sonido que produce una cuerda vibrante y el inverso de la longitud de la misma. Conclusiones que no se reafirmarían hasta el siglo XVIII.

Posteriormente, Platón (427 a.C.-347 a.C.) afirmaba que la vibración del aire llega a los oídos, transmitiéndose del propio aire al cerebro o la sangre. En los años siguientes destacan las figuras de Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.) y sus discípulos. El gran filósofo griego escribe en el siglo IV a.C. “Leyes del movimiento” y “Libro sobre Acústica” donde

estudió el fenómeno natural del eco, atribuyéndolo a la reflexión del sonido. Aristóteles, además del mencionado fenómeno del eco, en sus estudios sobre acústica postuló que el sonido no se propaga en el vacío y señalaba una posible dependencia de la velocidad de propagación del sonido con el tono emitido, afirmación que no se ajusta a la realidad y de interpretación equívoca. Fue un discípulo suyo, Teofrasto de Eresos quien más tarde afirmaría que si dos sonidos en consonancia se emiten al mismo tiempo, si el receptor los percibe también en consonancia es porque se han desplazado a la misma velocidad, llegando al mismo tiempo. Hecho que no será comprobado experimentalmente hasta el siglo XIX.

En el siglo III a.C. se sientan las bases de la Acústica Geométrica, ligadas estrechamente a fenómenos ópticos. Arquímedes de Siracusa (287 a.C.-212 a.C.) uno de los científicos más importantes de la Antigüedad Clásica determinó el valor de la superficie esférica estableciendo como valor de $\pi = 22/7$ y sentó las bases de la “Ley de la inversa de los cuadrados” para fenómenos ondulatorios (sonido y luz). Un siglo más tarde los estudios de Herón de Alejandría indicaban que el ángulo de incidencia al chocar el sonido contra un sólido es igual al ángulo de reflexión. [1]

1.2.1. El teatro en la época antigua

Básicamente, la cultura teatral florece en la época que transcurre entre 550 a.C. y 220 a.C. dando pie a descubrimientos entorno al mundo de la acústica, y más en concreto a la aplicación de esta disciplina a la arquitectura en el diseño y puesta en escena del teatro clásico griego.

En sus inicios, las representaciones se realizaban en lugares abiertos cerca del altar del dios al que le rendían homenaje. Dada la popularidad que alcanzaron, en los teatros se fueron introduciendo graderíos para los espectadores, al principio construidos en madera que posteriormente fueron sustituidos por sólidas gradas de tierra para evitar los problemas de desprendimientos.

En la imagen 1.1 puede verse resumidamente las partes que conformaban los teatros griegos.

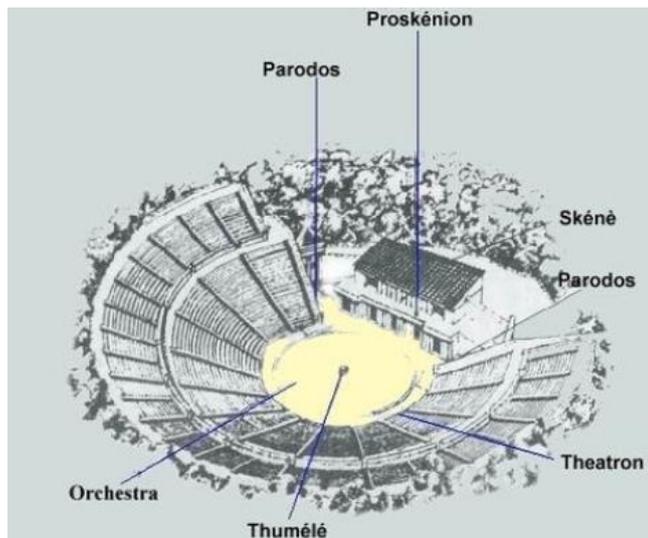


Imagen 1.1 Partes de un teatro griego [1].

- *Koilon o theatron*: es el nombre del conjunto de gradas destinadas a los espectadores y que ocupaba la ladera de una montaña. Su forma era perfectamente semicircular y los asientos se organizaban en gradas divididas en sectores a las que se podía acceder por escaleras y pasillos.
- *Orchestra*: Plataforma circular situada en un lugar llano al pie del *koilon*.
- *Skené*: Plataforma estrecha y alargada situada junto a la *orchestra*, en el lado opuesto al *koilon*. Se empezó a integrar en los teatros cuando las obras contaban con una cierta complejidad y empezó a haber actores y argumento.
- *Parodos*: Cada uno de los pasajes de acceso para los espectadores situados a los extremos de la *orchestra*.
- *Thumélé*: Altar situado en el centro de la *orchestra*.
- *Proskénion*: Lugar adornado con numerosas columnas y estatuas donde actuaban los actores y similar al proscenio actual.

La construcción y localización de los teatros griegos responde a una razón muy concreta, que era la de mantener los conceptos de audición y visibilidad íntimamente ligados, de ahí la construcción semicircular en depresiones del terreno, aprovechando su pendiente natural.

Un ejemplo de estos teatros lo encontramos en el Teatro de Epidauro (330 a.C.) construido en honor al dios Dionisio, es el teatro más grande del mundo occidental y poseía el diseño acústico más avanzado. Su construcción es obra del arquitecto Policleto el Joven que escogió un terreno para su asentamiento de forma cóncava y orientado al

Oeste, para que el sol naciente iluminase el escenario y el paisaje existente alrededor (ver imagen 1.2).



Imagen 1.2 Vista del Teatro de Epidauro.

En la excavación del terreno se colocaron bloques de piedra caliza que conformaban las gradas que daban cabida a 14.000 espectadores. Las representaciones se escuchaban de forma nítida en la última fila del graderío, situada a 70 m de la representación, simplemente con de unas máscaras a modo de megáfonos que portaban los actores.

La investigación realizada en el año 2007 por el experto en acústica Nico Declerq y la ingeniera Cindy Dekeyser explica este fenómeno. El diseño de las gradas, que cubren las enormes dimensiones de la excavación formando una superficie perfectamente acanalada, con una total ausencia de superficies planas. La voz emitida por los actores choca contra las gradas se refleja en todas las direcciones, reforzando el sonido original, lo que supone un sofisticado filtro acústico, capaz de transmitir el sonido que viene del escenario a altas frecuencias y hacer de difusor a las bajas frecuencias (componente principal del ruido de fondo: murmullos del público...). El experimento se realizó mediante simulaciones en las que se comprobó que las frecuencias hasta 500 Hz disminuían mientras que las que superaban este valor resonaban entre las filas de las gradas.



Imagen 1.3 Gradas del Teatro de Epidauro.

En los teatros romanos puede verse reflejada la tipología de los teatros griegos de los que derivaron. Una comparativa entre ambas estructuras puede verse a continuación en la imagen 1.4.

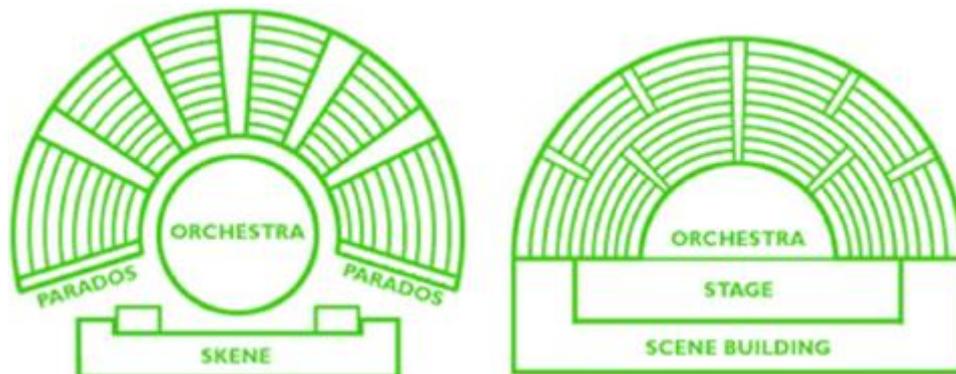


Imagen 1.4 Teatro griego a la izquierda, teatro romano a la derecha [1].

Ya en la época romana, Lucrecio y Vitrubio (s. I a.C.) sintetizan la sabiduría de sus predecesores y la aplican en conceptos como la inteligibilidad y el diseño de los recintos para optimizar la calidad de las audiciones. Lucrecio (99 a.C.-55 a.C.), poeta y filósofo romano, en alguno de sus textos define conceptos como reverberación, transmisión, difracción y aislamiento del sonido:

“En los lugares solitarios, las grandes paredes de roca nos devuelven las palabras, así abofetean colina tras colina y se repite la reverberación. La distribución de voces se asemeja a una chispa de fuego que a menudo golpea al propio fuego que la produjo y arde de nuevo. Por lo tanto, el espacio se llena de voces completamente, todo alrededor bulle y se excita con el sonido”. [7]

“Todas las imágenes luminosas siguen un camino recto hacia delante una vez que se producen; aunque ninguno puede verlas si se sitúa detrás de una pared, en cambio si que podrá oír las voces a través de ella. Pero aun cuando la voz sea capaz de superar la pared de una casa y penetrar en el oído, está embotada y confusa, y nos parece escuchar sonidos en vez de palabras.” [7]

Pero sería Vitruvio, arquitecto, escritor e ingeniero romano quien elaboraría el tratado sobre arquitectura más antiguo que se conserva y el único de la Antigüedad Clásica, “De Architectura” , probablemente escrito entre los años 27 y 23 a.C., formado por 10 libros y considerado la aportación más importante a la Acústica Arquitectónica hasta la época. Vitruvio realizó en él un completo análisis de los teatros, por ejemplo, en el libro V, capítulo IV se puede leer:

“El techo del pórtico del teatro, que ha de estar sobre el graderío más alto debe llegar a nivel de la altura del escenario, porque de este modo la voz, al ascender, alcanzará el mismo nivel en lo más alto del graderío que en el techo del escenario; pues si no existiera esta igualdad, la voz se extinguiría al nivel que hubiera llegado primeramente” [8].

En el capítulo V analiza la distribución del sonido desde el escenario al graderío y propone colocar estratégicamente vasijas de bronce de dimensiones proporcionales a la de los teatros que actuarían como vasos de resonancia. Asimismo, en el capítulo VIII del mismo libro, el autor realiza una clasificación de los sonidos, estableciendo lo siguiente:

- *Disonantes: “donde al principio la voz se dirige hacia arriba, golpea contra los cuerpos sólidos de las alturas y es reflejado, interfiriendo en su caída con la ascensión de la siguiente palabra” [8].* El concepto enunciado por Vitruvio tiene su correspondencia en el lenguaje habitual como las interferencias.
- *Circunsonantes: “donde la voz se mueve en todas las direcciones y luego vuelve hacia el centro, donde se disuelve, haciendo confusos los finales de las frases, y se muere en sonidos sin sentidos.” [8]* Se corresponde con el término reverberación.
- *Resonantes: “golpean contra los sólidos dando lugar a ecos y hacen que las palabras se oigan repetidas”. [8]* Sería el eco actual.

- Consonantes: *“la voz se ve reforzada en todas sus características, y ésta alcanza los oídos de los espectadores clara y distinta”*. [8] Este concepto no tiene un equivalente directo en un término actual pero se cree que encarga el ideal acústico, la perfección.

Los estudios de Vitruvio acerca de la Acústica también supusieron avances en el campo militar, donde estableció criterios para el ajuste correcto de las catapultas basándose en el sonido de que emitían los tirantes de cuerdas trenzadas cuando eran tensados. Posteriormente Lucio A. Séneca, hace hincapié en un concepto relacionado con el sonido: el ruido. Muestra de ello es la epístola LVI a Lucilio, donde muestra su desencanto frente al molesto bullicio existente en Roma. Claudio Ptolomeo en el siglo II, llega a la conclusión de que los sonidos se producen como consecuencia de los choques y del rápido movimiento vibratorio de las partículas. El autor recopila todos los conocimientos existentes relacionados con la Acústica en su texto “Armónicos”. [1]

1.2 Objetivo del TFG

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es estudiar el comportamiento acústico de un monumento histórico como es el Teatro Romano de Medellín; monumento del que a día de hoy se desconoce mucho debido a que los trabajos y estudios que se llevaron a cabo en un pasado no fraguaron de manera clara. Sin embargo, desde el año 2007 aproximadamente, se volvió a despertar el interés por el monumento que se encontraba enterrado en la ladera del cerro donde se localiza, tras haberse planteado, o previsto, el gran potencial que un monumento de esta índole podía alcanzar.

Se trata de un monumento cuyo valor es incalculable no solo como joya histórica que aún se conserva con casi 2000 años de antigüedad y que, artísticamente hablando, impresiona por su calidad y excelente estado de conservación, si no como lugar en el que puede seguir llevándose a cabo la función para la que fue diseñado hace tanto tiempo; el uso como teatro. Y es que, de manera tan sorprendente como extraña, sus características acústicas son inmejorables, quedando al nivel de cualquier otro teatro actual, construido con todos los conocimientos de los que hoy disponemos. Con todas estas consideraciones y en un afán por explotar el potencial del teatro, este mismo

verano de 2014, por primera vez se comenzará a utilizar para representaciones teatrales en una extensión del Festival de Teatro de Mérida.

Es pues, objetivo de este TFG, como primer análisis sobre la acústica del Teatro Romano de Medellín, estudiar sus características y comportamiento así como poder maravillarnos y admirar la grandiosidad con la que, sin conocimientos fundamentados y sin medios aparentes, estos filósofos, ingenieros y arquitectos romanos jugaban con la física y sus leyes, de una manera que muchos hoy no conseguimos comprender.

1.3 Descripción de la memoria

Se ha intentado recoger de manera general los aspectos que hemos considerado más importantes, pero siendo conscientes de que no es nada en comparación con las infinitas posibilidades de estudio que nos podría permitir el monumento.

Las partes fundamentales de este estudio son:

- Una primera parte, el Bloque 0, que es meramente **introdutoria**, para poner en situación al lector. La finalidad es mostrar la importancia histórica de la acústica a lo largo del tiempo, pasando por los objetivos que se pretenden alcanzar con este estudio y terminando con una visión general del Teatro Romano de Medellín.
- En el Bloque I se analizan las **medidas in situ**, basado en las medidas reales que se tomaron en el propio teatro. Con esos datos que recogimos hemos analizado diferentes características acústicas, todas ellas objetivas, como son la respuesta al impulso, medidas de difusión del campo sonoro y medidas para conocer el ruido de fondo. En este bloque además vienen adjuntados planos para facilitar la lectura y comprensión del análisis.
- El segundo bloque se centra en el diseño y construcción del teatro utilizando el software de **simulación acústica EASE**, con el fin de conocer más en detalle el comportamiento acústico del recinto mediante las teorías estadísticas actuales en las que se basa la ingeniería acústica.

- Finalmente se redacta un tercer bloque con las **conclusiones** y una visión global de todo el estudio acústico.

Se aportan, además, al final de la memoria, en el apartado de anexos, extensiones tanto de conceptos teóricos necesarios para la comprensión del texto, como de resultados y datos del estudio.

Capítulo 2. El teatro romano de Medellín

Medellín en la actualidad es un pequeño municipio de poco más de 2.000 habitantes, cuyo gentilicio es el de metellinense en honor de su fundador el Cónsul romano Quinto Cecilio Metello Pio. Está situado en la confluencia del río Ortiga con el Guadiana y, a pesar de su escasa población y un territorio reducido, siempre ha tenido una especial trascendencia en el devenir de los grandes acontecimientos históricos en Extremadura. Vive fundamentalmente de la agricultura de regadío propiciada por el Plan Badajoz en sus feraces vegas, produciendo principalmente frutas como son el melocotón, la ciruela y la nectarina, hortalizas como el tomate, y cereales como el maíz y el arroz, y algo de tabaco.

El municipio está situado en el suroeste peninsular, en la Comunidad Autónoma de Extremadura, provincia de Badajoz, comarca natural de las Vegas Altas del Guadiana, y partido judicial de Don Benito. Sus coordenadas son $38^{\circ} 58' 47''$ de latitud norte y $5^{\circ} 58' 28''$ de longitud oeste. Su altitud media es de 264 m sobre el nivel del mar, y dista unos 44 km de Mérida, unos 103 km de Badajoz capital, y unos 325 km de Madrid. A él se accede por carretera bien desde la autovía Madrid-Badajoz A-5 (antigua Nacional V), enlazando con la Ctra. Nal. 430 y con la Autonómica Ex-206, bien desde la autovía autonómica Ex-A2. Asimismo desde la carretera autonómica Ex-105. La estación de ferrocarril en servicio más próxima es la de Don Benito en la línea Madrid-Badajoz, a unos 8 km. En la imagen 2.1 se muestra la localización de Medellín.



Imagen 2.1 Localización del Municipio de Medellín. [Google Earth]

Afirmaba el primer arqueólogo que trabajó en unas excavaciones del Teatro Romano de Medellín, D. Mariano del Amo y de la Hera, en el simposio “El Teatro en la Hispania Romana” que el teatro de Medellín perteneció a la Colonia Metellinensis o Metellinum de la que tenemos constancia por un texto de Plinio, al referirse a la Lusitania, en el que figura como una de las cinco colonias de dicha provincia romana. También es citada por el geógrafo Claudio Ptolomeo y aparece en el Itinerarium Antonini Augusti como primera mansio donde se bifurcaban las calzadas de Emérita (actual Mérida) a Caesaraugusta (Zaragoza) y a Corduba (Córdoba). Asimismo está documentada en el Ravennatis Anonymi Cosmographia. Data su construcción en el último cuarto del siglo I a.C.

Decía también que los diversos nombres con que aparece citada la Colonia (Colonia Metellinensis, Caecilia Metellina, Colonia Metellina Caecilia, Metellinum y el propio nombre actual de Medellín) parecen indicar que su fundación fue debida a Quinto Caecilius Metellus que fue cónsul en el año 80 a.C. De cualquier forma, sea o no fundación del citado cónsul romano, es evidente que esta Colonia tiene su origen en época republicana.

La ciudad romana se asentó sobre un hábitat anterior en el que se ha constatado un largo proceso evolutivo que se inició en el Bronce Final, en torno al 800 a.C., perviviendo probablemente hasta la conquista romana. Sobre esta época dice por su parte el arqueólogo, Académico Anticuaria de la Real Academia de la Historia, D. Martín Almagro-Gorbea que la actual población de Medellín es heredera de la Metellinum romana y de la anterior población tartesia de Conisturgis, la ciudad-estado de los conios y una de las más importantes de dicha cultura en el suroeste peninsular. El oppidum prerromano de Medellín corresponde a la antigua Conisturgis, estando situado en el cerro del castillo dominando un amplio paisaje de las Vegas Altas del Guadiana junto a la desembocadura en este río de su afluente el Ortiga. Fue el más importante núcleo orientalizante de la cultura tartésica en Extremadura, como evidencia su cultura material, sus necrópolis y la lengua que documentan los hallazgos epigráficos, aunque ofrece una personalidad propia dentro de dicha cultura, que resulta clave para su interpretación cultural y étnica.

Bien, pues en ese mismo cerro que está coronado por un castillo medieval, frente a otros tres cerros que están separados únicamente por el río Guadiana, hacia la mitad de su ladera sur, y sobre la iglesia de Santiago, hoy día convertida en Centro de Interpretación Histórica local, se encuentra el yacimiento arqueológico más importante de

los últimos tiempos en Medellín, y me atrevería decir de Extremadura: el Teatro Romano de Medellín. Y, según Salvadora Haba Quirós, fue uno de los puntos más altos del trazado urbano en época romana. Aprovecha al máximo la topografía del cerro para su edificación y orienta la cavea al mediodía, exponiéndola constantemente a los rayos del sol, contrariamente a las normas vitrubianas.

Las primeras excavaciones arqueológicas las realizó, como decíamos antes, D. Mariano del Amo y de la Hera en los años 1969 y 1970. Escasa fue la financiación y poco vistosos fueron los resultados obtenidos; apenas constatar la estructura general del monumento. No consiguió que aflorara ningún elemento especialmente significativo que llamara la atención de forma considerable. Pero Del Amo y las autoridades competentes no podían imaginarse lo que realmente guardaba el yacimiento bajo las toneladas de tierra, piedras, derrubios y escombros que acumulaba durante tantos siglos de abandono. Tanto es así que no llegarían a realizarse nuevas excavaciones hasta el año 2007 como una parte más del proyecto “Adecuación del Parque Arqueológico de Medellín”, que dirigía el arqueólogo Santiago Guerra Millán en el programa “Patrimonio Crea Empleo” TECO de Medellín. Varios meses de excavaciones sirvieron para sacar a la luz el teatro romano de la península ibérica que mejor conserva su cavea. Casi 800 sillares de granito intactos en su posición original. Amén del mármol de su orchestra y muchas obras escultóricas y artísticas de exquisita calidad.

Actualmente el Gobierno de Extremadura ha iniciado expediente para la declaración de Bien de Interés Cultural para el Patrimonio Histórico-Artístico de todo Medellín, dentro del que está incluido, como no podía ser menos, el Teatro Romano, objeto de este trabajo.

Entendiendo que el teatro romano de Medellín es un monumento singular que requiere una atención y un cuidado especiales en su conservación al igual que todo su entorno, no por ello hemos de renunciar a disfrutar de su puesta en valor mediante la realización de actividades que justifiquen la enorme inversión económica que ha supuesto su excavación y, sobre todo, seguir manteniendo el fin para el que fue construido verdaderamente hace más de 2000 años que no es otro que el de las representaciones de obras teatrales para el público en general. Por todo ello, y por ser yo natural de Medellín, sintiéndome en la obligación de aportar mi parte a tal empresa, paso a exponer y a defender mi trabajo fin de grado titulado:

‘ANÁLISIS ACÚSTICO DEL TEATRO ROMANO DE MEDELLÍN’.

2.1 El teatro original

A continuación hacemos, de manera muy resumida, una descripción general de las partes principales que constituían el teatro.

Scaenae frons

Frente escénico unitario de articulación rectilínea. Es la fachada interior del teatro, con 3 puertas, la principal en el centro (valva regia de 4,5 m de amplitud) y 2 secundarias en los laterales (valva hospitalium de 2,5 m de longitud cada una). Poseía más de 44 m de longitud. Este muro estuvo probablemente decorado en su totalidad con pinturas aunque no se ha podido constatar este hecho. Siguiendo el modelo canónico impuesto por Vitrubio donde el pódium de la scaenae frons se corresponde con una 1/12 parte del diámetro de la orchestra, este tendría una altura máxima de 1,95 m. Por encima del podium se dispondrían 2 órdenes de columnas de granito revestidas de estuco y un magnífico conjunto escultórico en mármol. La altura final de la scaenae frons sería de unos 15,09 m, aproximadamente 1/4 de la anchura de la cavea (61,2 m) y 2/3 del diámetro de la orchestra.

Scaena

Escena; parte del teatro destinada a la realización de las representaciones teatrales. Sus dimensiones son 35 m de largo por 7 m de ancho. En la restauración se ha dispuesto un entarimado de madera.

Hyposcaenium

Foso que se localizaba bajo la escena, donde se instalaba el auleum (mecanismo para sujetar el telón durante las representaciones). Aunque era regular en casi toda su extensión, poseía un rebaje en su extremo norte para dar cabida a la maquinaria del auleum.

Frons pulpiti

Muro de poca altura (entre 1,3 y 1,5 m) que separa la zona de la orquesta de la escena, conformada por exedras semicirculares y rectangulares.

Parascenium

Estancia lateral de planta rectangular y dimensiones 7m x 2,5m desde la que se podía acceder a la escena.

Itinera

Pasillos laterales con losetas de mármol que servían de acceso a la zona de la orquesta.

Orchestra

Espacio semicircular con losetas también de mármol, situado entre la escena y la cavea donde se colocaba el coro. Su diámetro era de entre 22 y 23m.

Proedria

Tres gradas de menor altura que las del resto del graderío (0,2 m). En ella se sentaban las personalidades de mayor rango (magistrados). Se separaba de la cavea a través del balteus o pretil de mármol, y en sus extremos se han colocado réplicas de las esfinges que lo remataban.

Sacrarium

Especie de santuario o sagrario en el que seguramente se colocasen estatuas relacionadas con el culto imperial. Es una estructura de planta rectangular de 3,8 m x 2,6 m. Consta de 10 sillares de grandes dimensiones colocados en vertical, situados en la zona central de las 3 gradas inferiores de la cavea.

Ima cavea

Parte inferior del graderío compuesta por 8 gradas de 0,4 m de altura y 0,75 m de anchura aproximadamente. En esta zona, entre otros, se sentaban los caballeros (equites).

Media cavea

Zona de 8 gradas en la que se sentaban los ciudadanos libres, que empieza a partir del pasillo de distribución que limita la parte superior de la ima cavea. Asimismo contaba con un reposapiés o balteus más estrecho, que separa, junto con el pasillo (praecinctio) la media cavea de la ima. Este pasillo presenta un fondo ligeramente mayor que el que tienen las hiladas de gradas.

Ambulacrum o cripta

Corredor de 7 m de anchura total, incluyendo un muro interior de 2,4 m de anchura y el exterior de 3 m, de anchura construido mediante una galería con bóveda de ladrillos que facilitaba el acceso a la parte superior de la media cavea. La parte que mejor se conserva del mismo es el muro exterior o perimetral del graderío en el que aún se reconocen 4 vanos rematados con sillares de granito. En la actualidad se ha recuperado su nivel de uso mediante la instalación de una pasarela de madera.

Summa cavea

Parte más alta de la cavea en la que seguramente se sentarían entre otros, los esclavos y las mujeres. Está bastante destruida, sin embargo, aún se reconoce parte del muro exterior que cerraba la parte más baja de este espacio y que alcanza los 15 m de altura, llegando en el caso de que hubiera existido, y esto ya son hipótesis, a unos 19 m de altura total, incluyendo el techo. Las gradas en esta parte de la cavea contarían con mayor inclinación que las caveas inferiores.

Aditus maximus

Galerías laterales de 2,30 m de anchura, 16 m de largo y unos 5 m de altura. Fueron construidos con bóveda de ladrillos en esviaje y servía de acceso a la zona de la

orquestra. Sobre la bóveda del aditus maximus occidental aún puede observarse parte del escalonamiento del palco o tribunalia.

Versurae

Ala lateral del edificio escénico que serviría como vestíbulo de recepción y distribución de los espectadores. Se trataba de aulas de planta cuadrada de 7,5 m de lado.

Postscænium

Fachada trasera o posterior del frente escénico.

En la siguiente imagen 2.2 se muestra una representación esquemática de estas partes del teatro.

Actualmente, el estado del teatro no es el mismo que en sus orígenes; el paso del tiempo, el descuido y la dejadez a lo largo de tantos años han provocado la pérdida de ciertas partes de manera irrecuperable. En la imagen 2.3 se muestra una fotografía del estado actual del monumento.

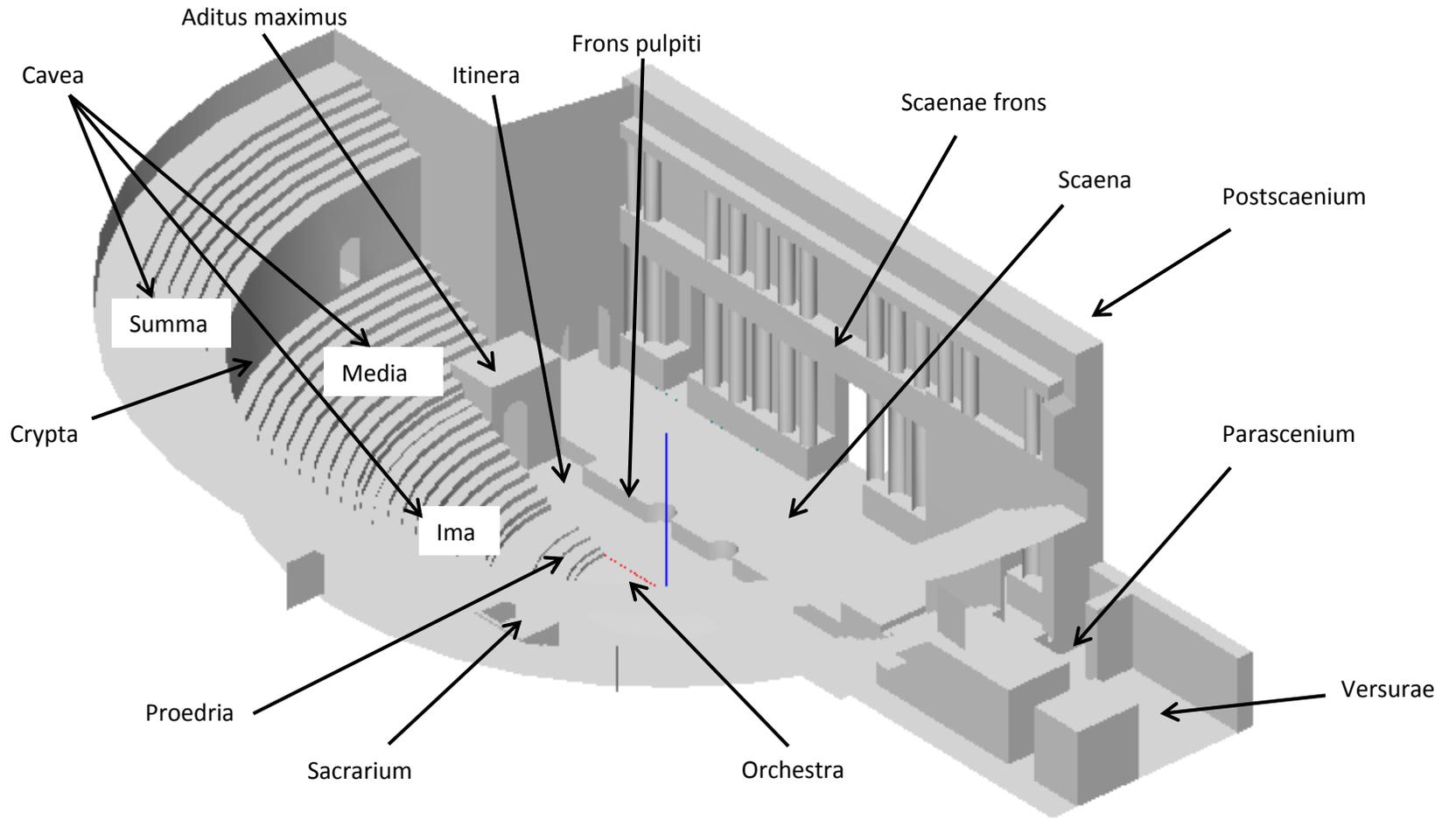


Imagen 2.2 Teatro estado original.



Imagen 2.3 Teatro actual. A la derecha encontramos un modelo del estado actual del teatro.

BLOQUE I MEDIDAS IN SITU

Capítulo 3. Metodología.

3.0 Introducción

El objetivo de este capítulo es explicar detalladamente el procedimiento seguido para tomar las medidas *in situ* realizadas en el Teatro Romano de Medellín durante la semana del 21 al 27 de abril de 2014. Las medidas que se realizaron fueron las que se indican en la tabla 3.1.

Tipo de medida	Parámetros obtenidos
Respuesta impulsiva	Reverberación
	Energía
	Inteligibilidad
Difusión	Nivel de presión sonora
Ruido de fondo	Nivel de presión sonora

Tabla 3.1. Resumen de medidas y parámetros

A continuación, se relacionará la instrumentación utilizada y, seguidamente, los procedimientos para llevar a cabo cada tipo de medida.

3.1 Equipos y material de trabajo

Los equipos y materiales necesarios fueron:

- Ordenador portátil Toshiba Satellite L500 + Software Dirac 7841.
- Sonómetro B&K 2250.
- Fuente B&K Omnipower 4296.
- Amplificador de potencia B&K 2716.
- Receptor y Transmisor inalámbrico Samson.

3.1.1 Ordenador portátil Toshiba Satellite L500 + Software Dirac 7841

Para dirigir el curso de las medidas fue necesario el uso de un ordenador portátil, concretamente para el envío de señales y el almacenamiento de los datos.

El modelo utilizado para ello fue el portátil Toshiba Satellite L500. En él se instaló el software de ingeniería acústica Dirac versión 4.1 Tipo 7841, de *Brüel & Kjaer*. Esta herramienta permite medir una amplia gama de parámetros acústicos mediante el análisis de la respuesta impulsiva. Ofrece la posibilidad de utilizar distintas formas de emisión como MLS internamente generado o barrido senoidal. Además, cumple con las normas ISO 3382 (acústica de salas), ISO 18233 (métodos de análisis) y CEI 60268-16 (inteligibilidad de la palabra). En su análisis se incluyen medidas de reverberación, inteligibilidad y otros, realizando para ello cálculos estadísticos (media, desviación estándar, min-max).

3.1.2 Sonómetro B&K 2250

El sonómetro de B&K 2250 es un dispositivo medidor de nivel sonoro de tipo 1, capacitado para medir con gran precisión y cumple con todas las normas nacionales e internacionales. Se trata de una plataforma de medida versátil que cuenta con muchos módulos opcionales, como análisis frecuencial FFT o la grabación de sonidos.

Incluye, además, un programa de análisis sonoro que permite medir simultáneamente todos los parámetros, con un rango dinámico de 120 dB. Se pueden medir espectros en bandas o en tercios de octava y con el registro de datos se puede obtener la evolución temporal de los niveles de ruido, entre otros.

Una vez recogidos los datos, se vuelcan al ordenador mediante un puerto USB con el programa descrito, que permite ver, archivar o gestionar los datos, así como controlar el medidor 2250 o exportar a hojas de cálculo o a cualquiera de los programas con licencia de *Brüel & Kjaer*. Una fotografía del dispositivo se muestra en la imagen 3.1.



Imagen 3.1 Sonómetro B&K 2250.

3.1.3 Fuente B&K Omnipower 4296

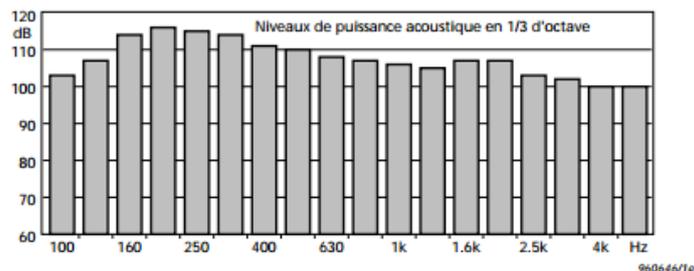
Para emitir señales se utilizó la fuente sonora *B&K Omnipower 4296*, la cual simula una esfera pulsante. Esta fuente que se muestra en la imagen 3.2, está formada por doce altavoces en una configuración dodecaédrica que irradia sonido siguiendo una distribución esférica. Sus altavoces están conectados en serie y paralelo para asegurar la operación en fase y una impedancia nominal de 6Ω .



Imagen 3.2 Fuente B&K Omnipower 4296.

El sistema completo, fuente-trípode, tiene un peso total de 14 kg y está provisto de un soporte; un asa sujeta a la estructura dodecaédrica que no provoca interferencias perceptibles con el campo sonoro, al igual que el trípode. Este último permite mantener segura la fuente a una altura de 1,5 m para realizar nuestras medidas.

En la gráfica 3.1 se muestra la respuesta en frecuencia de la fuente.



Gráfica 3.1 Respuesta en frecuencia B&K Omnipower 4296.
[Catálogo Brüel & Kjaer].

3.1.4 Amplificador de potencia B&K 2716

Para amplificar la señal utilizamos el amplificador de potencia 2716. Consta de dos canales que se pueden usar independientemente o de forma conjunta. Las señales introducen entradas balanceadas automáticamente a través de XRL y los conectores.

En la imagen 3.3 se muestra el amplificador de potencia 2716 dentro de la maleta KE0358, desde donde puede ponerse en funcionamiento.

La potencia total de salida es del orden de los 300 W y es relativamente independiente de la carga; esto cumple los requisitos para utilizar la fuente sonora Omnipower 4296, con un margen amplio de seguridad para que no se deterioren los altavoces. El amplificador suministra toda la potencia de salida necesaria para la medida de acústica de edificios.



Imagen 3.3 Amplificador de potencia 2716.

3.1.5 Sistema inalámbrico Samson Stage 5

Samson Stage 5 - 3 en 1 micrófono inalámbrico sistema (GTR/LM5/HS5) Ch 17 permite trabajar con tecnología inalámbrica en una amplia variedad de aplicaciones. En nuestro caso, servirá para evitar un conexionado complejo e incómodo y poder transmitir información del sonómetro al ordenador más fácilmente.

El sistema (ver imagen 3.4), ofrece una buena recepción RF con un funcionamiento sin interferencias. Dispone de un transmisor de petaca y un receptor de VHF de medio rack que cuenta con un limitador/silenciador variable, nivel de seis segmentos LED RF, medición de nivel audio, y una antena montada en la parte delantera, así como salidas XLR-3 y de 1/4-pulgada. El transmisor proporciona un tiempo de funcionamiento continuo durante 10 horas con una batería de 9 voltios e incluye un indicador de nivel de ésta.



Imagen 3.4 Sistema inalámbrico Samson Stage 5.

3.2 Procedimiento

3.2.1 Conexión del sistema

A continuación, se explica el conexionado para cada tipo de medida:

a. *Medida de la respuesta al impulso*

Con esta medida obtendremos los parámetros referentes a la reverberación, energía e inteligibilidad característicos del teatro. El esquema seguido para medir la respuesta al impulso se muestra en la imagen 3.5.

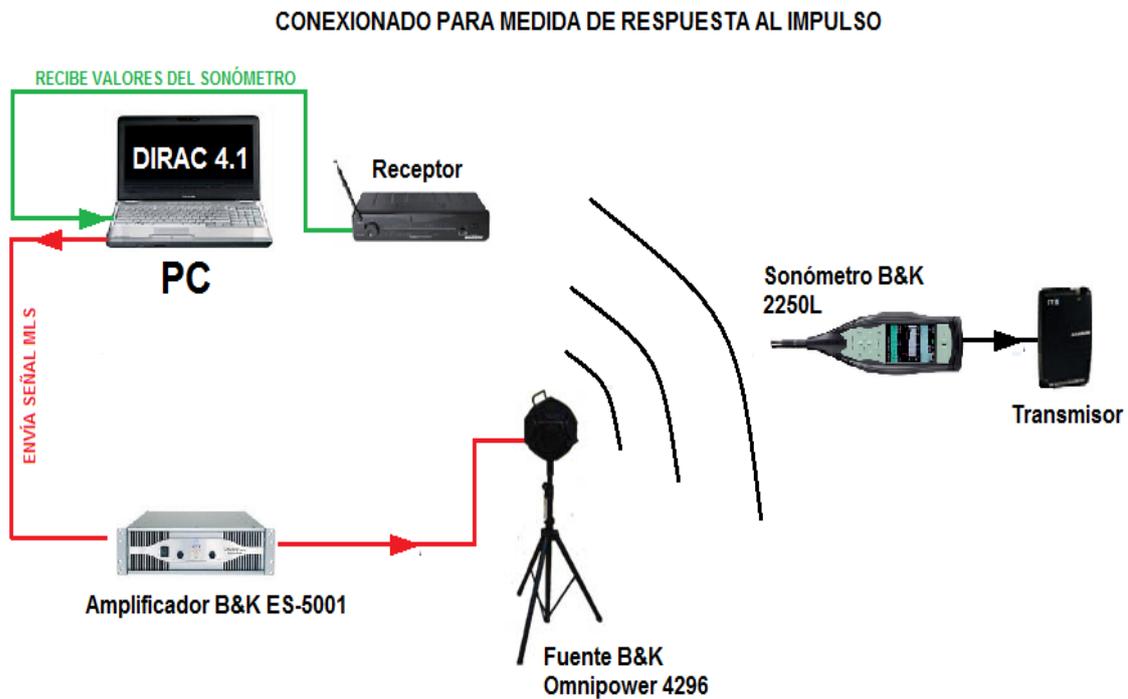


Imagen 3.5 Conexionado de respuesta al impulso.

Básicamente su funcionamiento consiste en el envío de señales MLS desde el PC a la fuente emisora y en la medida de la señal recibida en distintos puntos del teatro. Estas señales serán configuradas y generadas por el programa Dirac en el que, a partir de una interfaz como la que se muestra en las imágenes 3.6 y 3.7, podremos establecer sus características.

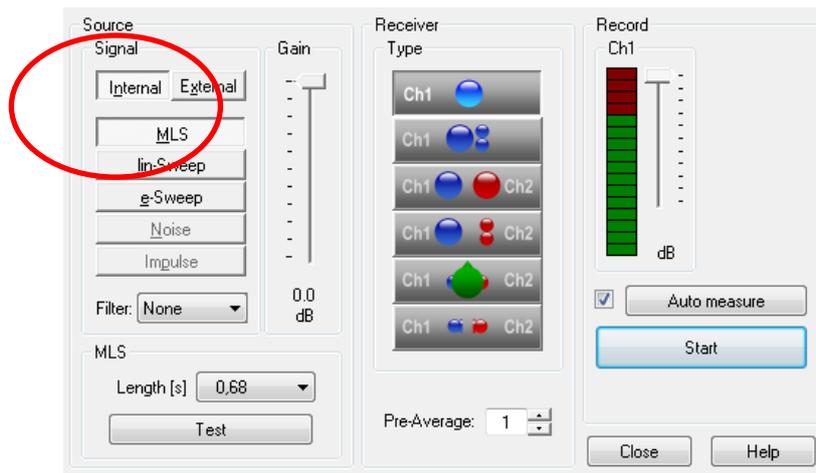


Imagen 3.6 Configuración Dirac.

Señal tipo Internal MLS. Longitud de la ventana 0.68 s.

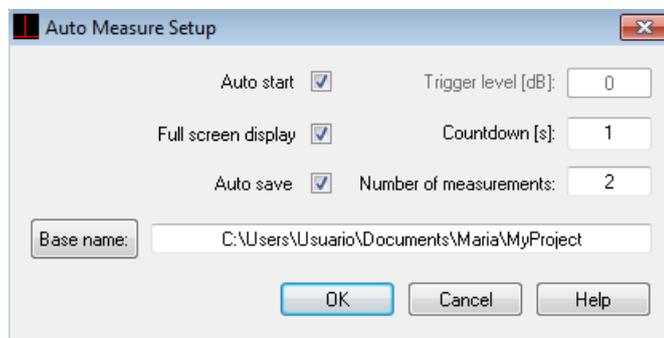


Imagen 3.7 Configuración de las señales MLS en Dirac.

Tiempo de duración de la señal MLS = 1 s. Número de señales emitidas en cada posición = 2.

Una señal de tipo MLS, resumidamente, es una señal digital pseudo aleatoria en la que se producen todas las combinaciones posibles de bits durante un ciclo de repetición. Alimentando con esta señal a la fuente y calculando una correlación cruzada entre la entrada a la fuente y lo que mide el sonómetro en distintos puntos tendremos la respuesta impulso, y podremos calcular posteriormente el contenido en frecuencia (trabajo realizado por el propio software).

De esta manera, una vez el programa envía la señal desde el PC a la fuente, con el amplificador incrementaremos el nivel de la señal hasta alcanzar a un metro de la fuente un nivel de presión sonora (en adelante L_p) de aproximadamente 99,6 dB para cada posición de fuente: una en el escenario y otra en la orquesta.

Una vez realizado lo anterior, se procederá a medir con el sonómetro en cada uno de los puntos de medida que se establecieron (detallados en el apartado 3.4). El transmisor inalámbrico al que el sonómetro está conectado será el

encargado de enviar los valores recogidos al receptor conectado al PC, donde serán almacenados y procesados por el programa Dirac.

Cabe aclarar que para esta medida la función del sonómetro no es calcular, sino simplemente trabajar como un dispositivo captador, un dispositivo de paso sensible a las variaciones de presión e imprescindible para hacer llegar al software la información acústica que percibe. A modo de resumen, los parámetros ajustados han sido los que se indican en la tabla 3.2.

Configuración medidas de respuesta al impulso							
Fuente			Medidas				Parámetros de interés
Posiciones	Lp a 1m [dBA]	Señal emitida	Nº	Duración [s]	Ponderación		
					Frec.	Temp.	
Escenario	99,6	MLS	44	2 señales consecutivas de 1 s cada una	A	Fast t. int.=1s	Reverberación Energía Inteligibilidad
Orquesta	99,6		44				

Tabla 3.2 Resumen configuración de respuesta al impulso.

b. Medidas de difusión

Consistirá en medir el nivel Lp producido por la fuente en cada punto de medida. En la imagen 3.8 se muestra el conexionado.

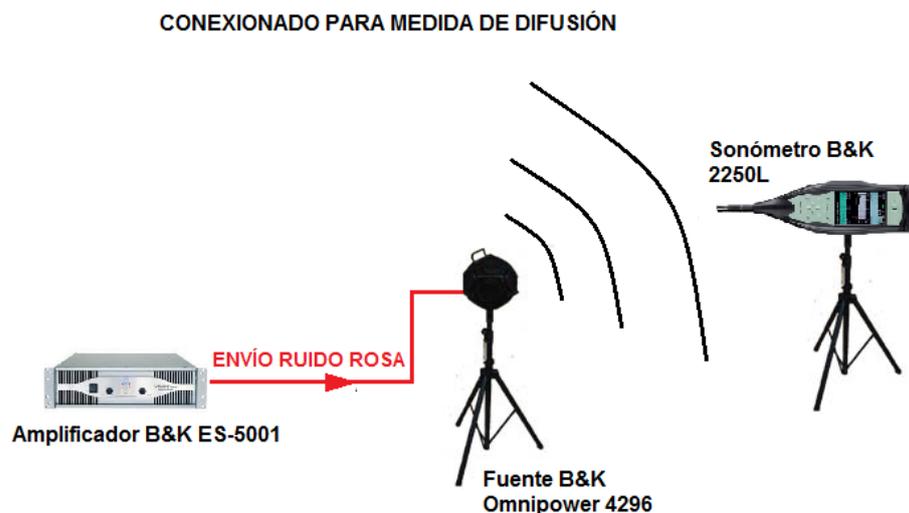


Imagen 3.8 Conexionado para medida de difusión.

Para realizar esta medida prescindiremos del ordenador, utilizando como generador de la señal el propio amplificador. Esta señal empleada será ruido rosa, que se caracteriza por tener el mismo nivel sonoro para cada banda de octava y que así permite saber qué ocurre con los niveles Lp a las distintas frecuencias que se estudiarán. El resumen de la configuración se muestra en la tabla 3.3.

Configuración medidas de difusión							
Fuente			Medidas			Parámetros de interés	
Posiciones	Lp a 1m [dBA]	Señal emitida	Nº	Duración [s]	Ponderación		
					Frec.		Temp.
Escenario	99,53	Ruido rosa	44	15	Z	Fast t. int.=1s	Lp
Orquesta	99,60		44				

Tabla 3.3 Configuración de medidas de difusión.

Como se puede apreciar, en este caso, al contrario que en la respuesta impulsiva, sí queremos que el sonómetro mida valores, los procese y los almacene. Posteriormente, serán volcados al PC y analizados con una hoja de cálculo Excel.

c. Medida del ruido de fondo

Se trata de medidas del ruido ambiental del recinto, tomadas en momentos intermedios entre la toma del resto de medidas, a diferentes horas y en diferentes lugares del teatro. No requiere un conexionado específico; basta con fijar el sonómetro sobre su trípode en los puntos elegidos y comenzar a medir cuando se considera que el ruido ambiente no está siendo perturbado por ninguna fuente indeseable (como podría ser el ruido puntual producido por maquinaria de obra que realmente no es habitual escuchar allí). La configuración del sonómetro es la que aparece en la tabla 3.4.

Configuración medidas de ruido de fondo				
Nº Medidas	Duración [s]	Ponderación		Parámetro de interés
		Frecuencial	Temporal	
8	60	Z	Fast t. Int. =1s	Lp

Tabla 3.4 Configuración de medida de ruido de fondo.

3.2.2 Posiciones de la fuente

A fin de poder contrastar diferentes resultados, para las medidas de respuesta al impulso, así como para las medidas de difusión, se tomaron dos posiciones distintas de la fuente que, colocada sobre el trípode alcanzaba una altura de 1,5 m (altura media para una persona; desde el suelo a la boca). Las posiciones de la fuente que se consideraron más interesantes fueron:

- Escenario: por razones obvias; la trama de la obra se desarrollaba en el escenario.
- Orchestra: donde en ocasiones podía haber músicos.

En la imagen 3.9 se representan estas posiciones:

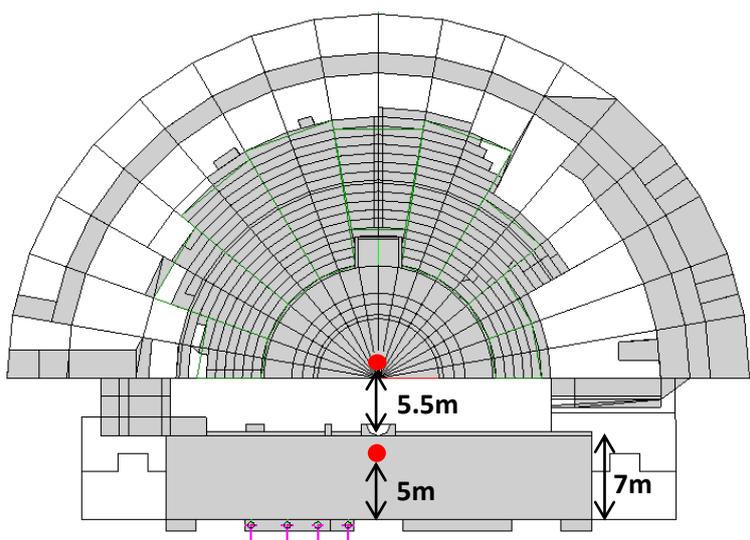


Imagen 3.9 Posiciones de la fuente.

3.2.3 Respuesta en frecuencia de la fuente

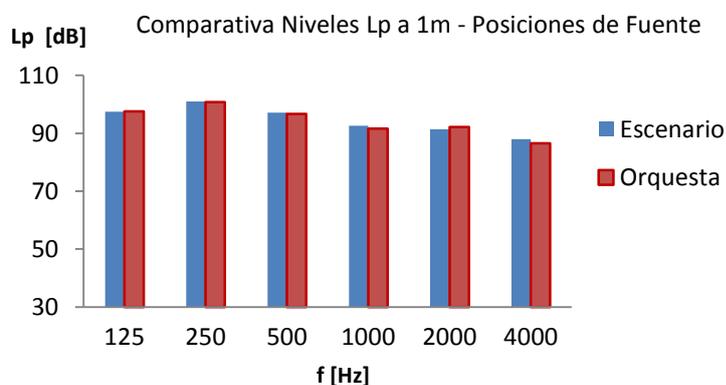
Para poder estudiar los valores que se recogieron a lo largo de todas las medidas, en primer lugar, será necesario conocer el comportamiento frecuencial de la fuente empleada para emitir el sonido. Este paso se lleva a cabo midiendo a 1 metro de la fuente el nivel L_p .

En este estudio existen dos posiciones distintas en las que se colocará la fuente. Vemos el nivel L_p , medido durante 15 segundos a 1 m de la fuente, que recogió el sonómetro para cada una de estas posiciones en la tabla 3.5.

	Escenario	Orquesta	Diferencia de niveles
f [Hz]	LZeq [dB]	LZeq [dB]	
125Hz	97,5	97,6	0,11
250Hz	101	100,8	0,26
500Hz	97,1	96,7	0,45
1kHz	92,6	91,7	0,97
2kHz	91,4	92,2	0,78
4kHz	88	86,5	1,49
Lp Global [dB]	104,4	104,2	

Tabla 3.5 L_p a 1m, L_p globales y diferencia entre L_p para cada posición de fuente.

Los datos originales en tercios de octava, de los que se han obtenido estos valores, pueden consultarse en el Anexo 3. Teóricamente, ambas posiciones deberían dar los mismos resultados a cada frecuencia, pero vemos que en la práctica no es así no es así, la diferencia entre ellas es mínima y pueden considerarse como errores de posición de los equipos de medida. En la siguiente gráfica 3.2 se representan ambos casos:



Gráfica 3.2 Comparativa de respuesta en frecuencia de la fuente en dos posiciones distintas.

Como se puede ver, alcanza un pico de presión a 250 Hz para ambas posiciones (entorno a los 101 dB), disminuyendo posteriormente de manera progresiva a medida que aumenta la frecuencia. En alta frecuencia, a 8 kHz, existe una diferencia notable entre ambos casos de aproximadamente 6 dB. Para esta fuente consideraremos como bandas

de interés de 125 Hz a 4 kHz, de modo que esta gran diferencia a 8 kHz no nos influirá en nuestro estudio; no se considera.

3.2.4 Puntos de medida

- a. Medidas de respuesta al impulso y medidas de difusión.

El criterio seguido para la elección de los puntos de medida fue tomar uno cada 2 o 3 metros. Se estableció un punto de medida cada dos peldaños alcanzando un total de 44 posiciones. En la imagen 3.10 se muestra cada posición representada por el número de medida que se le asignó y que, en adelante, será su referencia:

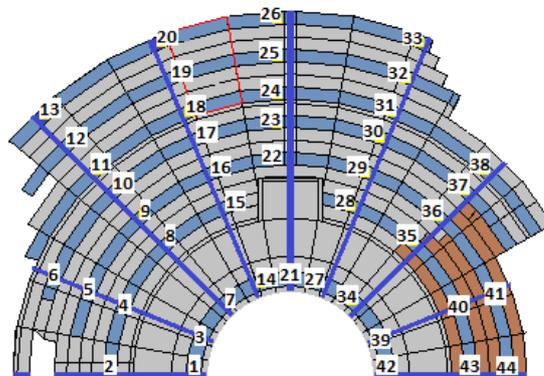


Imagen 3.10 Puntos de medida.

- b. Ruido de fondo

Se tomaron ocho medidas de ruido de fondo durante dos días (24 y 25 de abril), en posiciones aleatorias y momentos también aleatorios. Estas posiciones fueron las que se muestran en la imagen 3.11. Las condiciones ambientales en las que se tomaron cada una de ellas; información sobre temperatura, humedad, viento, fuentes percibidas y otras, vienen detalladas en el Anexo 4.

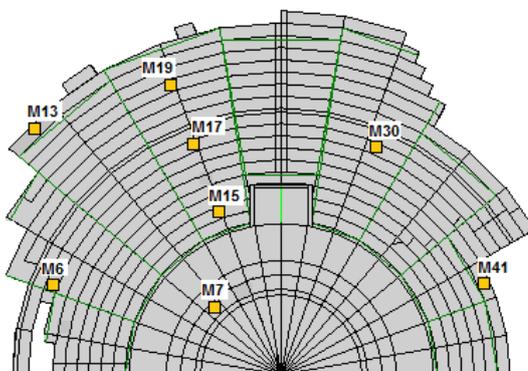


Imagen 3.11 Puntos de medida de ruido de fondo.

Capítulo 4. Análisis y resultados

4.0. Introducción

En este capítulo nos centraremos en el estudio de los resultados obtenidos por los procedimientos anteriores.

Se dividirá el capítulo en tres partes principales, cada una referente a un tipo de medida. Los detalles sobre qué se estudiará en cada una de ellas vienen descritos en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Respuesta al impulso		
Parámetro analizado	Detalles	Anexos y planos
Reverberación TR	Comparativa TR dos posiciones de fuente	<i>Anexo 2 – Respuesta al impulso. Fichas de parámetros.</i> <i>Plano Nº 1 – Inteligibilidad: Alcons.</i>
	Obtención del TR del teatro	
	TR a 1k comparativa	
Energía C50	Cálculo C50 - <i>Speech Average</i>	
	Comparativa para dos posiciones de fuente	
Inteligibilidad AlCons	Distribución por posiciones	
	Relación AlCons/Distancia/T30	

Tabla 4.1 Resumen Respuesta al impulso.

Difusión		
Nivel de presión sonora	Divergencia esférica a 1 kHz	<i>Anexo 3 – Datos de difusión</i> <i>Plano Nº 3 – Divergencia esférica y niveles LAeq.</i> <i>Plano Nº 2 – Difusión: Espectros LZeq.</i>
	Distribución frecuencial	
	Variación del Lp global con la distancia	

Tabla 4.2 Resumen Difusión.

Ruido de fondo		
Nivel de presión sonora	Espectros de ruido de fondo y cálculo de curvas NC	<i>Plano Nº 4 – Ruido de fondo: Espectros LAeq y Curvas NC.</i>
	Cálculo del ruido de fondo global del teatro y curva NC global	<i>Anexo 4 – Datos de ruido de fondo</i>
	Estudio de la naturaleza del ruido de fondo	

Tabla 4.3 Resumen Ruido de fondo.

4.1 Respuesta al impulso

4.1.1 Análisis de parámetros de reverberación

El estudio del tiempo de reverberación en un recinto (TR en adelante) nos permite conocer las reflexiones que se dan en él, las cuales tienen la capacidad de aumentar el sonido en aquellos lugares del recinto donde el sonido directo no llega, reforzándolo. También debe tenerse en cuenta que un gran número de éstas puede llegar a enmascarar el sonido, perjudicando seriamente la acústica del lugar y, si su permanencia es elevada, puede llegar a producir ecos.

Una definición intuitiva de la reverberación puede entenderse como la prolongación del sonido en el tiempo, una vez la fuente sonora ha cesado. En el capítulo anterior se explicó respecto a las medidas de respuesta al impulso, que en nuestro caso para cada posición se medirían dos caídas, es decir; la fuente emitirá durante 1 segundo y cesará; repitiendo esta acción dos veces. De esta manera el software Dirac puede obtener los parámetros de interés considerando la primera caída como 'preparatoria'.

En el Anexo 2 se han dispuesto los resultados de estas medidas en fichas, con tablas y gráficas representando los parámetros TR, T20, T30 y EDT para cada posición.

Debido al gran número de medidas que se recogieron (88; 44 con la fuente en el escenario y 44 con la fuente en la orquesta), en este apartado para realizar un análisis descriptivo se han seleccionado, del total, siete para cada posición de fuente. En la imagen 4.1 se muestran estas posiciones elegidas.

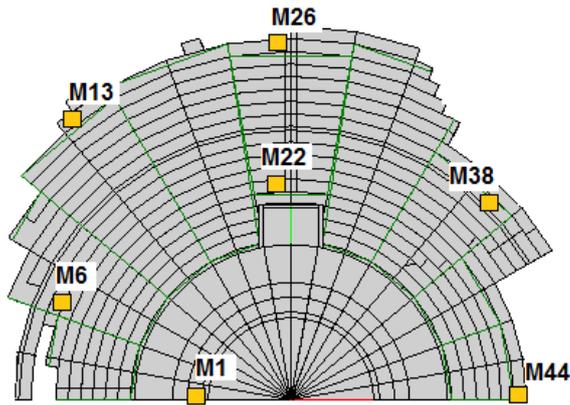


Imagen 4.1 Posiciones para el análisis de la reverberación.

Comparativa del TR para dos posiciones de fuente distintas

A continuación, se ofrece una representación comparativa (escenario frente a orquesta) para el TR en cada una de estas siete posiciones.

Análisis de M1

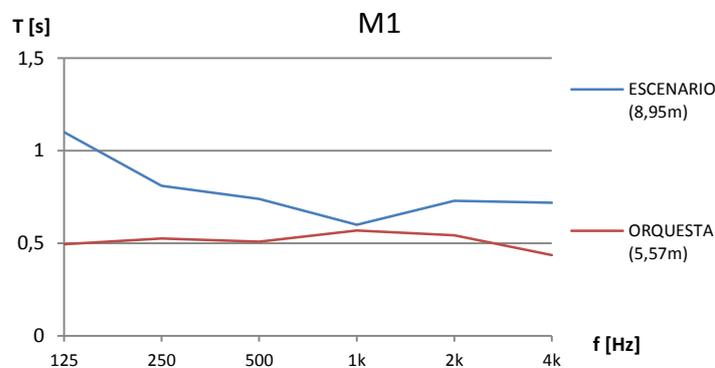


Gráfico 4.1 Comparativa TR M1.

La posición M1 es el punto más cercano para ambas posiciones de fuente. Podemos apreciar que a 125 Hz, con la fuente en el escenario, se produce un aumento del TR, que podría ser debido a una reflexión que, mediante interferencia constructiva posiblemente incrementaría el valor del TR a esa frecuencia. Estas reflexiones podrían llegar desde el suelo de la orquesta, que es de mármol y altamente reflectante, pero

también es posible que proviniesen de sillares del graderío, que son de granito y por lo tanto, tienen también un coeficiente de absorción bajo.

El efecto que produce la interferencia constructiva consiste en el incremento de la señal en un punto dado debido a que ambas ondas, la directa y la reflejada (relativamente inmediata), a cierta frecuencia guardan una relación entre la longitud de onda y la trayectoria del camino sonoro seguido. Lógicamente, de tratarse de un efecto como el mencionado (y no, por ejemplo, de un posible error en la estimación del TR por parte del software), este hecho se evitaría simplemente desplazando la fuente, pues supondría variar ese camino sonoro que recorre la onda y que, por cuestiones relacionadas con la distancia y la longitud de onda de la señal, produce la suma o incremento de los efectos en una posición dada. Cuando en lugar de sumarse los efectos de las ondas directa y reflejada, éstos disminuyen estaremos ante el caso opuesto; una interferencia destructiva.

De cualquier manera en el bloque de simulación, con el programa EASE, mediante el trazado de rayos podremos conocer el reflectograma para cada posición y así entender qué ocurre en ese punto.

Por otro lado, la idea de que el muro que se encuentra sobre la escena (podium) de aproximadamente 1,4 m pudiera influir en este hecho, fue descartada ya que nuestro 'problema' aparece generado por una onda, u ondas, de frecuencia entorno a los 125 Hz. Una onda de 125 Hz tiene una longitud de 2,7 metros, si consideramos la velocidad del sonido propagándose en el aire de 340 m/s. Por tanto, un obstáculo de las dimensiones descritas no provocaría la reflexión de una onda como la dada.

Por otro lado, la presencia del aditus maximus occidental podría tener que ver si tenemos en cuenta que, de todas las frecuencias que analizamos, que son de 125 Hz a 4 kHz, las únicas ondas cuyas longitudes son mayores que las del aditus maximus, que tiene 2,3 metros de ancho como menor dimensión, y por ello podrían penetrar en éste, son las de 125 Hz (que como se ha indicado miden 2,7 metros).

Explicando esto de otra manera; las ondas cuya longitud es grande, se distribuyen por todo el espacio posible abarcando o rodeando sin problemas aquellos obstáculos cuyas dimensiones son menores que la de la propia onda (son las ondas más graves), las ondas cuya longitud es menor que las dimensiones de un obstáculo dado son más directivas y chocan y se reflejan en ellos, perdiéndose y desviándose más en la trayectoria.

El caso que se presenta aquí es el de un pasillo de acceso a la zona de la orquesta, el llamado *aditus maximus*, y tenemos una fuente emitiendo en el escenario. El pasillo tiene un ancho de 2,3 metros y es el que se muestra en la imagen 4.2 donde, además, se indica con una flecha la posición de M1.

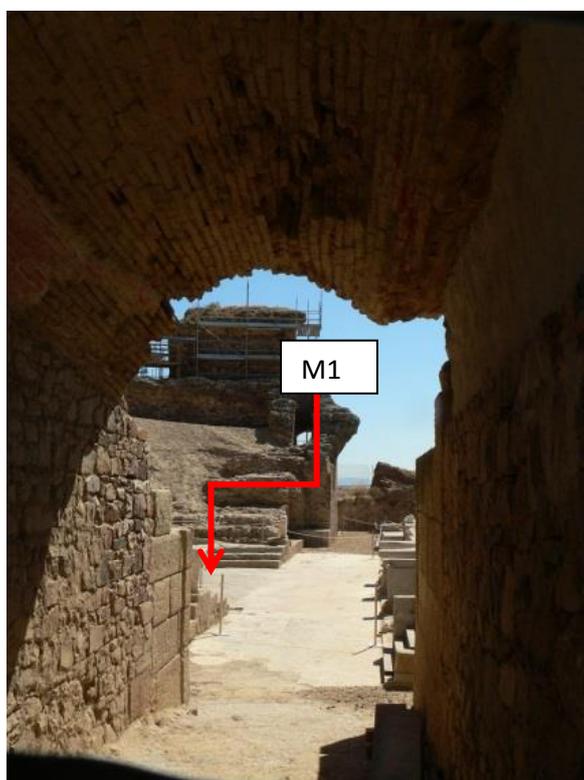
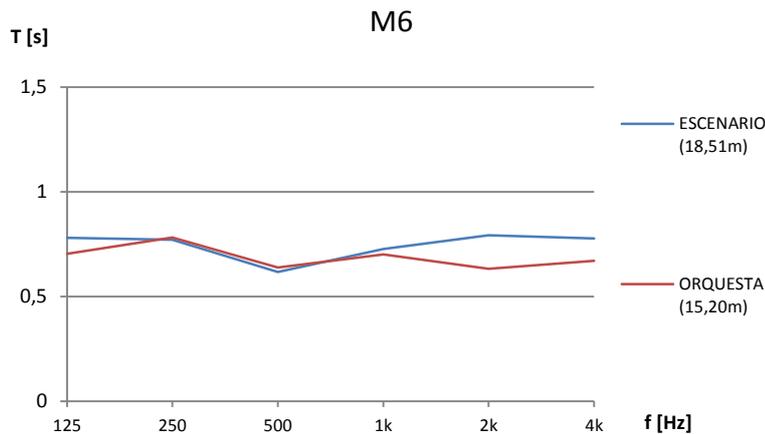


Imagen 4.2 Aditus maximus occidental.

Nos planteamos entonces: ¿Podría ser que esta onda, de 125 Hz y 2,7 metros de longitud, que además es mayor que el ancho del pasillo en cuestión, penetrara en el *aditus maximus* produciendo un efecto regenerador de onda que aumentara la sonoridad a 125 Hz en la posición M1?.

Es posible, pero haría falta un estudio más en profundidad (tanto de medidas in situ, como de cálculos a posteriori) y analizar detenidamente todos los pormenores antes de aventurarse y obtener conclusiones sin bases sólidas. Como se ha indicado, lo más probable sea simplemente el hecho de que en M1 se crea un efecto de interferencia constructiva.

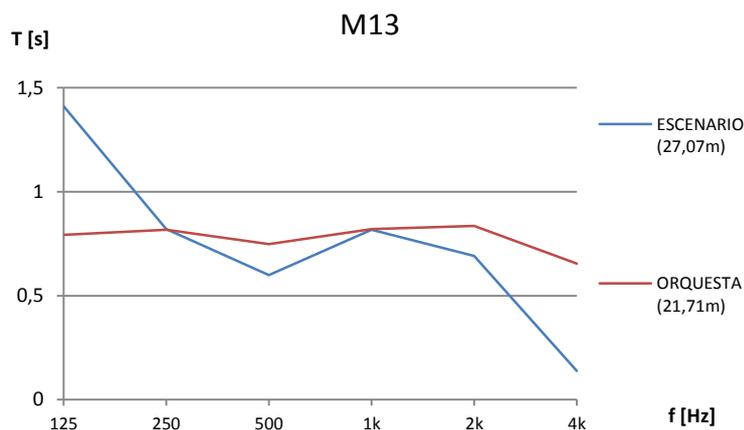
Análisis de M6



Gráfica 4.2. Comparativa TR M6.

En este caso los valores son más coherentes, a primera vista se aprecian bastante uniformes. El comportamiento de la reverberación para ambos casos es similar lo cual es favorable si tenemos en cuenta que, según la teoría estadística, los valores para ambas posiciones de fuente deberían coincidir. Además no se trata de valores altos, sino que se encuentran sobre los 0,7 – 0,8 s.

Análisis de M13



Gráfica 4.3. Comparativa TR M13.

En esta medida de nuevo aparece un pico a 125 Hz. Una resonancia producida, quizá por los huecos que quedan entre la pasarela posterior que rodea el graderío y el

nivel del suelo. Estos huecos, vacíos, están compuestos por la madera de la pasarela, como límite superior y cubiertos por rocas y tierra de la ladera del cerro. Algunos forman cavidades cerradas y otros quedan abiertos por ambos extremos. Su altura varía entre 0,9 y 0,6 m. En el caso de M13, justo detrás, existe un hueco abierto por debajo de la pasarela a unos 4 metros de distancia de la posición de medida y de una altura de 0,9 m. Analizaremos también este punto con el programa EASE por si existiera algún efecto que provocara estos resultados. Valores tan irregulares como los de esta gráfica en el caso de la fuente en el escenario pueden deberse en parte al efecto de la distancia, que desde el escenario son 27,07 m, o incluso al viento, aunque también pueden deberse a errores del programa Dirac en el cálculo de la caída del TR .

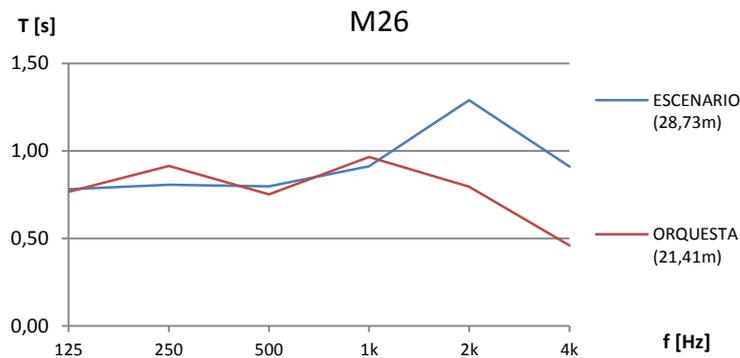
Análisis de M22



Gráfica 4.4. Comparativa TR M22.

Continuando con M22, recordamos que se trata del punto central del graderío, en el eje central también. Justo en frente del centro del escenario y a media altura de la cavea. Parece lógico pensar que a este punto llegará más reverberación cuando exista una fuente en el centro de la orquesta (posición menos expuesta a factores como el viento y, además, rodeada de materiales reflectantes) que cuando la fuente se sitúa en el escenario. Es una buena posición, las reflexiones que llegan desde el escenario son en su mayoría en torno a 2 kHz (información del habla), hecho más conveniente que si se tratara de bajas frecuencias (ruido).

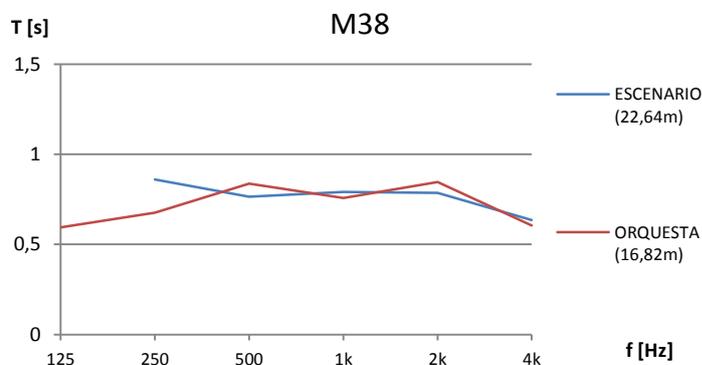
Análisis de M26



Gráfica 4.5 Comparativa TR M26.

En M26, también en el eje central, la reverberación respecto a los niveles de la fuente en la orquesta y en el escenario, se comporta de manera similar a como lo hacía en M22. A la frecuencia de 2 kHz encontramos de nuevo un pico. Esta posición, recordemos, se encuentra en la última fila de sillares de la cavea, los asientos más alejados de la fuente, pero también los más cercanos a la zona donde encontramos los huecos bajo la pasarela. Sin embargo, en este caso a diferencia de M1 y M13, tenemos que se produce un aumento del TR en 2 kHz, es decir, una onda de 17 cm. Es demasiado pequeña para poder penetrar en uno de esos huecos posteriores y actuar como onda estacionaria. El motivo más razonable es pensar que al igual que en M22, la onda de 2 kHz que llega del escenario, choca con el suelo de la orquesta y mediante interferencia constructiva incrementa el TR a 2 kHz.

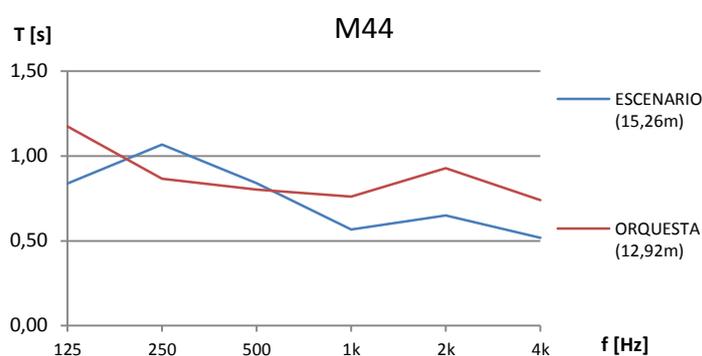
Análisis de M38



Gráfica 4.6 Comparativa TR M38

Sobre esta posición, M38, cabe decir que se encuentra cercana a las gradas que han sido reconstruidas en madera. Los valores que tenemos para bajas frecuencias para ambas posiciones de la fuente son bastante similares, hecho que cabría esperar en todas las medidas y que sin embargo no se obtiene, debido a que trabajamos en un recinto abierto en donde el cálculo de la reverberación, como valor único no se cumple.

Análisis de M44



Gráfica 4.7 Comparativa TR M44.

De nuevo, un pico a 125 Hz. A pesar de considerar picos a los valores que destacan del resto de frecuencias, hay que subrayar que incluso tratándose de valores pico, como en este caso, no alcanzan un valor de TR alto, propiamente hablando. Salvando la frecuencia a 250 Hz, en general el nivel producido por la fuente en la orquesta es mayor que el producido por la fuente en el escenario.

En resumen, podemos concluir que, de manera general, en la orquesta la reverberación se da de manera más uniforme para todas las frecuencias. Exceptuando M44, en la mayor parte de los casos la reverberación que existe con la fuente en el escenario es mayor para las altas frecuencias. Si tenemos en cuenta que en el escenario las fuentes de sonido eran personas, resulta conveniente este hecho, siempre y cuando las reflexiones no estén demasiado retardadas con respecto al sonido directo, pues se perjudicaría la escucha.

Por otra parte, es lógico también pensar que la reverberación que se produzca en la orquesta sea más uniforme para todas las frecuencias ya que a diferencia del escenario, donde la fuente de voz será humana y lo que interesa mayormente son las

frecuencias medias, en la orquesta podrían tocar instrumentos que no solo emitieran a estas frecuencias. Cabe destacar también que la orquesta se encuentra más recogida y rodeada de materiales reflectantes como el mármol y el granito y, por tanto, se producen más reflexiones que prolongan la duración del sonido homogéneamente.

Cálculo del TR del Teatro Romano de Medellín

Para los lugares cerrados suele utilizarse una reverberación alta para mejorar la audición, en cuanto a sonoridad, no así en los recintos abiertos como éste. Sin embargo el valor óptimo para el TR depende del uso concreto del recinto. Se debe priorizar la claridad de la palabra (TR menor) o bien la sonoridad (TR mayor), y conseguir un compromiso entre ambos. Debido a que este tipo de recintos se empleaban mayoritariamente para obras teatrales y otros espectáculos del género, era de interés dar prioridad a la palabra.

Otro aspecto importante es que la reverberación, siguiendo la teoría estadística, no debería cambiar ni con la posición de la fuente ni con la del sonómetro, sin embargo el hecho es que sí lo hace. Éste es el motivo por el cual en recintos abiertos no se suele utilizar este valor.

Es cierto que la reverberación decae con la frecuencia, sin embargo, hemos considerado oportuno calcular un valor único tanto para cada posición de fuente como para el TR global del teatro. Así podremos ver hasta qué punto se cumple que el TR varía o no en función de las posiciones de la fuente. Estos valores globales de reverberación se obtienen para cada posición de la fuente promediando los valores de cada punto de medida a las distintas frecuencias. En la tabla 4.4 aparecen representados.

	Promedio escenario [s]	Promedio orquesta [s]	TR Promedio [s]
125	0,90	0,78	0,84
250	0,83	0,78	0,81
500	0,72	0,74	0,73
1000	0,79	0,78	0,78
2000	0,85	0,77	0,81
4000	0,64	0,59	0,61
Global	0,79	0,74	0,76

Tabla 4.4. Valores medios TR para las dos posiciones de fuente, y TR global.

Comparando gráficamente estos valores obtenemos la gráfica 4.8.

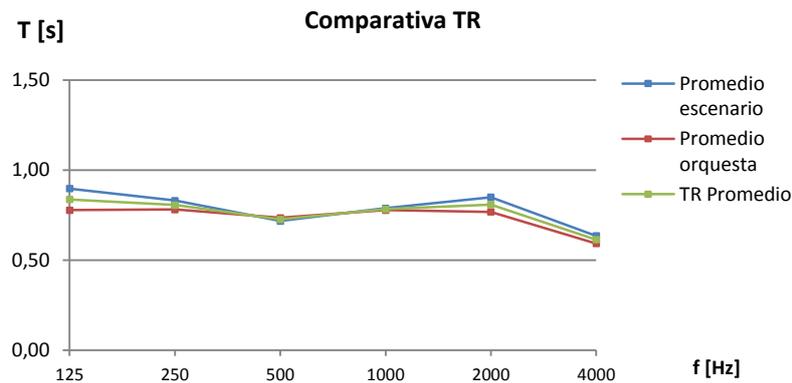


Gráfico 4.8 Comparativa TR promedio.

Se trata de una diferencia, en el peor caso, calculando el error porcentual del 6%, referido al valor medio. Podemos ver que el TR del recinto es bajo, lo cual es bueno ya que nos interesa ante todo una buena comprensión de la palabra.

Calculando la media aritmética de los valores medios obtenidos para cada posición de fuente, independientemente de su frecuencia obtenemos un valor igual a 0,76 s; que podría definirse como el tiempo de reverberación del teatro.

Este valor medio de TR entorno a los 0,76 s se debe también a que las dimensiones del Teatro de Medellín no son grandes, si las comparamos con otros teatros contemporáneos o griegos, que debían asegurar que, a pesar de la distancia como en el Teatro de Epidauro, el sonido llegara hasta el punto más alejado del graderío jugando con una reverberación mayor. Según estudios realizados en teatros similares como el Teatro Romano de Mérida, el TR alcanza los 1,3 s de media. Sin embargo, es evidente que las dimensiones no son comparables, el Teatro Romano de Medellín tenía cabida para unas 3000 personas, mientras que el de Mérida tenía capacidad para unas 6000; que es el doble.

Comparativa del TR a 1k

Tomando como referencia la frecuencia de 1kHz, comparamos en el siguiente gráfico 4.9 cómo varía el TR a medida que nos alejamos de la fuente. Podemos ver aquí también otra prueba más de que en el valor del TR no influye la distancia a la fuente, si no la frecuencia.

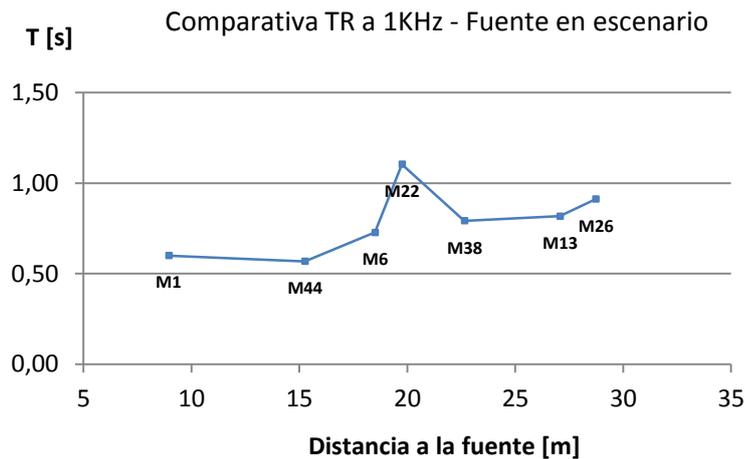


Grafico 4.9 Comparativa TR a 1kHz.

En este caso, que tenemos una frecuencia dada; 1kHz y sería lógico esperar que el valor TR fuera el mismo en todas las posiciones. Vemos que en la práctica no ocurre así; como se explicó, en los recintos abiertos como éste, no se cumple.

La diferencia mayor para el TR a 1kHz la encontramos entre las medidas 44, cuyo TR es 0,57 s, y la 22, cuyo valor es 1,1 s. El error porcentual respecto al valor medio a 1 kHz (que es 0,79 s) sería para M22 del 39,2%, y para M44 del 27,8%. Existiendo entre ambas una diferencia de 0,53 s, y localizándose cada una de ellas en puntos muy diversos tanto por geometría y situación en la cavea como por materiales que las rodean; M22 está tomada sobre un sillar de granito, M44 es un punto de medida tomado sobre gradas reconstruidas con maderas de traviesas de la vía del tren (ver imagen 4.3). Obviamente tenemos unas condiciones mucho más absorbentes en ésta última, motivo que justificaría entre otros, esa diferencia entre el valor del TR en un punto y otro.

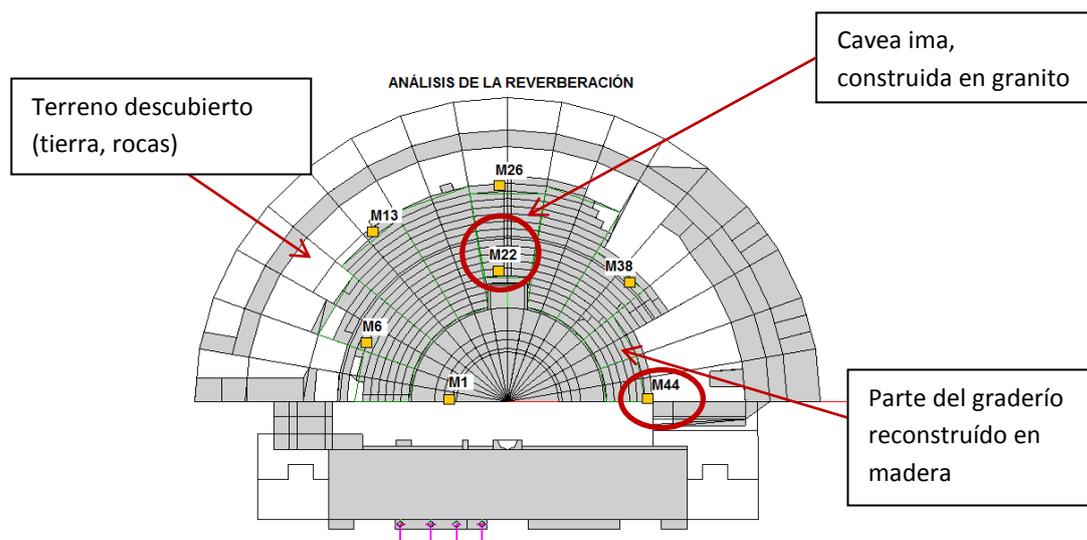


Imagen 4.3. Situación del teatro(1).

4.1.2 Análisis de parámetros de energía

Con el mismo número y posiciones de medida que en el análisis de la reverberación, procederemos eligiendo para la fuente en el escenario los valores de C_{50} , de los que obtendremos un valor global, no dependiente de la frecuencia.

Este tipo de parámetros, relacionados con la contribución energética del sonido, sirven para estudiar el grado de concentración de las reflexiones y, analizando hasta qué punto éstas son significativas o no, podemos averiguar la importancia del sonido directo en un punto del recinto. Existen distintos parámetros para medir la proporción efectiva de las primeras reflexiones, en nuestro caso analizaremos la claridad de la voz (parámetro C_{50}), fundamental para recintos dedicados a la palabra.

Claridad de la voz C_{50}

Este parámetro mide la relación entre la energía sonora recibida durante los primeros 50 ms después de recibir el sonido directo (éste incluido) y la energía restante. Se expresa en dB.

Según L.G. Marshall [2], para caracterizar una sala con un único valor, es suficiente utilizar el denominado “Speech Average”, que se calcula a partir del C_{50} como sigue:

$$C_{50}(\textit{speech_average}) \equiv 0,15 \cdot C_{50}(500) + 0,25 \cdot C_{50}(1k) + 0,35 \cdot C_{50}(2k) + 0,25 \cdot C_{50}(4k) [dB]$$

Las constantes que aparecen en esta ecuación fueron deducidas de la proporción en que las distintas bandas de frecuencia influyen en la inteligibilidad de la palabra.

Para una aceptable inteligibilidad, deberá cumplirse la siguiente condición:

$$C_{50}(\textit{Speech Average}) \geq 2 \text{ dB}$$

Cuanto más se supere este límite, mayor será la sonoridad y la inteligibilidad de palabra en un punto considerado.

Una forma de aumentar la claridad de voz es disminuyendo el nivel del sonido reverberante, y como hemos visto en nuestro recinto la reverberación (TR bajo) no se presenta como un problema.

Representaremos el citado valor C_{50} (Speech Average), para cada una de las siete posiciones consideradas, comparando los valores obtenidos de la fuente situada en el escenario (ver gráfica 4.10). Los datos utilizados para ello, son los adjuntados en el Anexo 2.

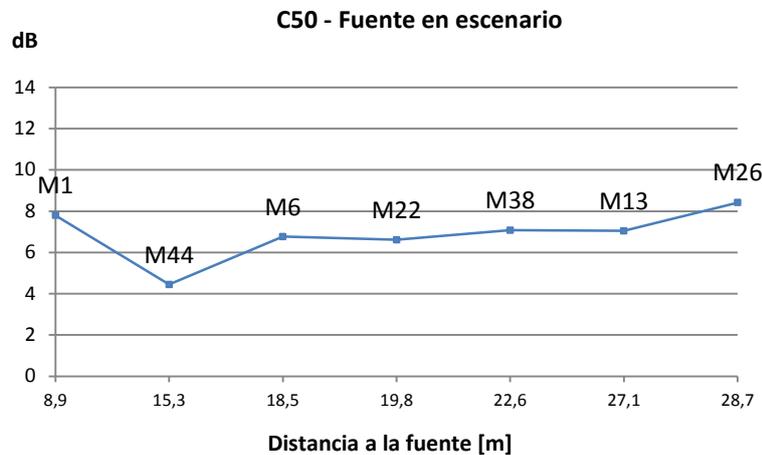


Gráfico 4.10 C_{50} fuente en escenario

Todos los valores, como vemos, sobrepasan ampliamente el límite de 2 dB y, además, exceptuando la medida M44, los valores son relativamente uniformes independientemente de la posición en la que nos encontremos, e independientemente de la distancia; pues M26 es la más alejada de la fuente y aun así obtiene el mejor valor de C_{50} . Con la fuente situada en la orquesta los valores obtenidos son los que se muestran en la siguiente gráfica 4.11.

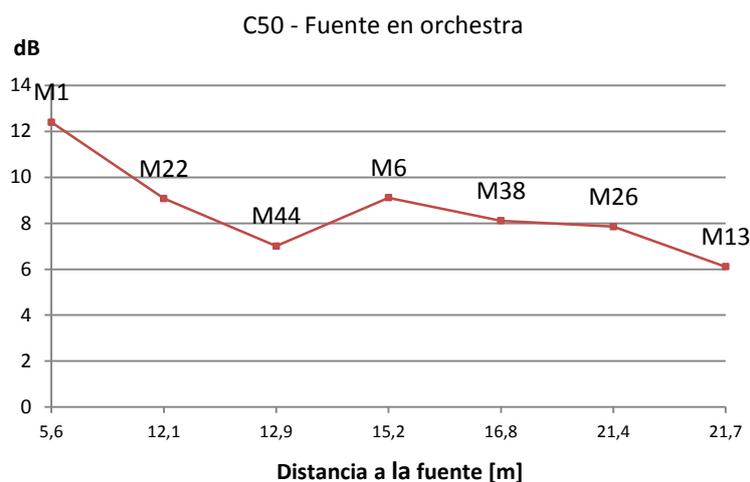


Gráfico 4.11 C_{50} Fuente en orquesta.

Igualmente, todos los valores sobrepasan los 2 dB y, si hacemos una media para todas las 14 posiciones analizadas obtenemos un valor de 7,7 dB. El mejor valor con diferencia es en M1 donde alcanza los 12,4 dB, punto más cercano a la fuente (5,57 metros), situado en la zona de la orquesta y al que mayor proporción de sonido directo respecto a las reflexiones llegará (se trata de una zona muy limitada en número de asientos y solo las autoridades la ocupaban). El peor valor vendría dado en M13 (a 21,71 metros) en principio no por razones de lejanía a la fuente, pues en el caso anterior en M26 obteníamos el mejor valor, y era también el más alejado.

El hecho de que ocurra esto puede deberse a la estructura que rodea a M13, completamente asimétrica y rodeada no por la estructura semicircular de granito original, si no por terreno descubierto y rocas irregulares. Todo ello, consecuencia de la desaparición de parte de los sillares de granito de esa zona. De los extremos tanto occidental como oriental del teatro se han perdido numerosas partes debido, entre otros motivos, al saqueo y al descuido que durante años el teatro, que se ha mantenido enterrado bajo la ladera del cerro, ha sufrido (ver imagen 4.4).

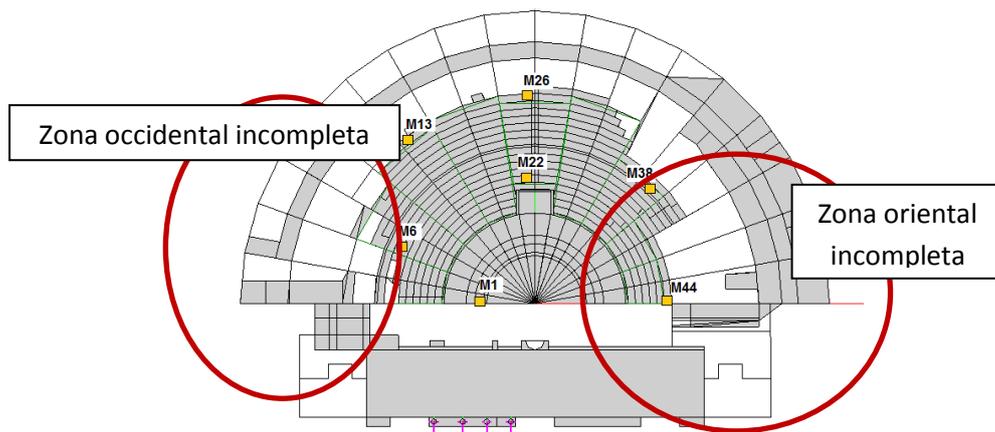
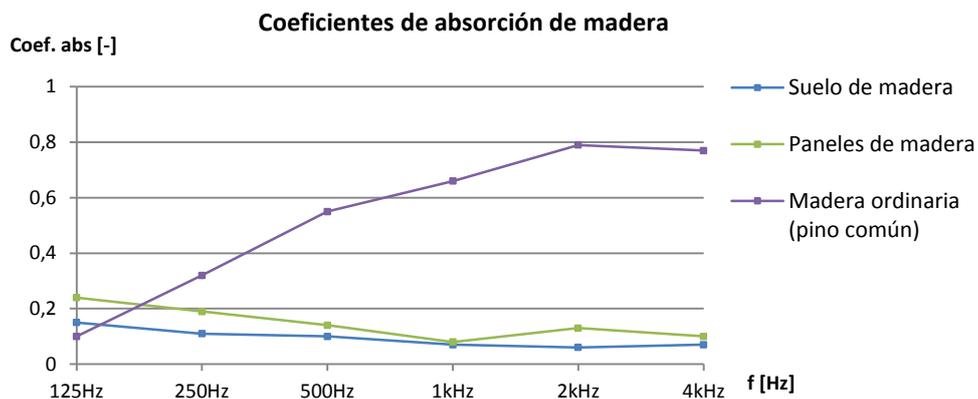


Imagen 4.4 Situación del teatro(2).

Existe un hecho común a ambas gráficas, 4.10 y 4.11, y es el punto M44. En ambas coinciden como el peor valor. En primer lugar podemos pensar que se deba al coeficiente de absorción de la madera para las distintas frecuencias, pues en caso de no absorber las bajas frecuencias, sino las altas provocaría que la energía en baja frecuencias se mantuviera mientras que la energía en altas frecuencias desaparecieran antes. El resultado sería que el parámetro C_{50} , como indicador de estas relaciones de energías a distintas frecuencias, empeorara.

Las traviesas de la vía del tren están construidas con un tipo de madera conocida como ordinaria; es el pino común. La información sobre los coeficientes de absorción para bloques de 3×0,15×0,25 m o láminas de 1 y 2 cm de espesor de 2×1,22 m viene representada en la gráfica 4.12, en la que además se han representado otros tipos de madera ordinaria para poder hacer una comparativa en cuanto al comportamiento en frecuencia.



Gráfica 4.12. Coeficientes de absorción acústica para la madera ordinaria.

Como se puede apreciar y sospechábamos la madera de pino tiene un comportamiento mucho más absorbente en altas frecuencias que otras. Podría significar un empeoramiento del C_{50} para la posición M44, ya que absorbiendo altas frecuencias se pierde la información de la palabra mientras que se mantiene las reflexiones a bajas frecuencias, donde lo que se percibe es ruido.

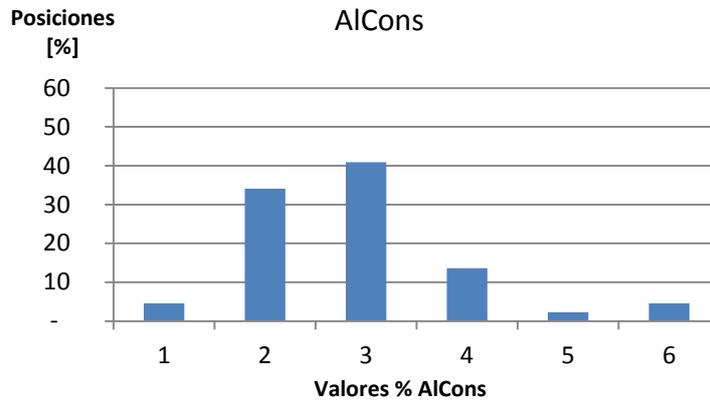
Sin embargo, solo con esta información sobre la posición no es seguro afirmar algo así, por lo que es preferible esperar a que la simulación nos aporte más datos, como el trazado de rayos en M44, para obtener una conclusión al respecto.

4.1.3 Análisis de parámetros de inteligibilidad

El criterio de selección para estudiar ciertos puntos en base a la inteligibilidad de la palabra se basará en los valores del parámetro %AICons recogidos con la fuente colocada en el escenario.

Como se explica en el Anexo 1, el %AICons es el porcentaje de pérdida de la articulación de las consonantes (concentrada en su mayor parte en la banda de 2kHz), y, cuanto mayor sea este valor, menor será la inteligibilidad de la palabra.

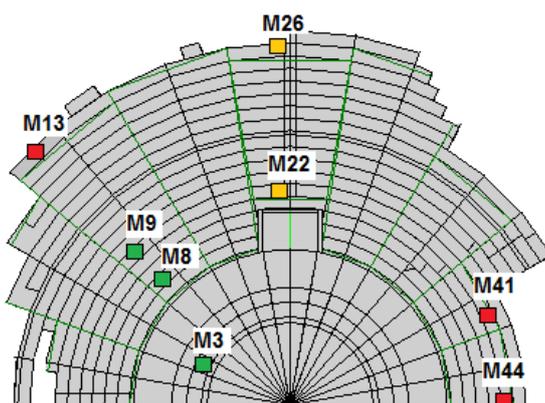
En la siguiente gráfica 4.13 se representa la distribución de valores %AICons para el total de las medidas con la fuente en el escenario, es decir; para 44 medidas.



Gráfica 4.13 Distribución %AICons.

En ella puede apreciarse que hasta un 41% (18 medidas) del total, tiene un AICons del 3%. Éste es más que un valor aceptable, es un buen dato. Incluso es más favorable aun si tenemos en cuenta que le sigue un porcentaje del 34% de las medidas cuyo valor es mejor que el anterior; con un porcentaje del 2% de AICons.

Sin embargo, a fin de ofrecer una idea general del comportamiento de este parámetro se adjunta el Plano N° 1 – Inteligibilidad con todos los valores de las 44 posiciones. A continuación, aquí, analizamos solo los que consideramos de mayor interés (ver imagen 4.5).



Verde: tres mejores valores.

Rojo: tres peores valores.

Amarillo: dos posiciones del eje central.

Imagen 4.5 Posiciones parámetros de inteligibilidad.

En la tabla 4.5 se muestra un resumen donde aparecen los valores %AlCons para estas ocho posiciones acompañadas de los valores de T30 y las distancias a la fuente de cada posición, a fin de poder establecer una relación entre todos ellos:

	Mejores posiciones			Peores posiciones			Eje central	
	M3	M8	M9	M13	M41	M44	M22	M26
AlCons [%]	2,02	1,65	1,92	5,77	6,06	6,37	3,50	2,86
Distancia [m]	10,03	16,15	18,45	27,07	16,69	15,26	19,75	28,73
T30 (125Hz)[s]	0,59	0,78	0,75	0,91	1,19	0,78	0,55	0,75
T30 (1kHz) [s]	0,62	0,83	0,83	0,77	0,74	0,55	1,10	1,02
T30 (2kHz) [s]	0,57	0,57	0,82	0,61	0,97	0,68	0,40	1,29

Tabla 4.5 Relación de parámetros de respuesta al impulso.

Un TR alto, como se comentó anteriormente, no interesa demasiado si lo que se busca es la inteligibilidad de la palabra, por tanto, cabría esperar que en M22 y M26, cuyos T30 son los mayores de todas las medidas de la tabla 4.19 (sobrepasando el segundo de duración), tuvieran los peores valores.

Sin embargo, debemos tener en cuenta que estos valores de T30 están referido a 1 kHz, banda que se considera de interés para la inteligibilidad de la palabra (junto con las bandas de 500 a 2 kHz aproximadamente), de modo que el hecho de tener un T30 alto, a esta frecuencia podría beneficiar a la comprensión dando como resultado un buen %Alcons. También se aprecia cómo a 125 Hz (banda que no es de interés para la inteligibilidad de la palabra) el TR es bajo para ambos casos.

Si no fuera así, ocurriría como en los tres peores casos donde el T30 a 125 Hz es mayor que a 1 y 2 kHz y el %AlCons empeora. Cabe mencionar también, por ejemplo, la medida M26, cuyo %AlCons es del 2,86%, y que es un valor más que aceptable teniendo en cuenta la distancia a la que se encuentra este punto de la fuente; el más alejado, a casi 29 m. Entendemos que también en este caso un TR para 1 kHz de 1,02 s y a 2 kHz de 1,29 s; mucho más altos que en las bajas frecuencias, pueden resultar beneficiosos y aconsejables para solventar el problema de la pérdida por distancia.

4.2 Difusión

Con las medidas de difusión se pretende conocer la distribución del nivel de presión sonora en el recinto.

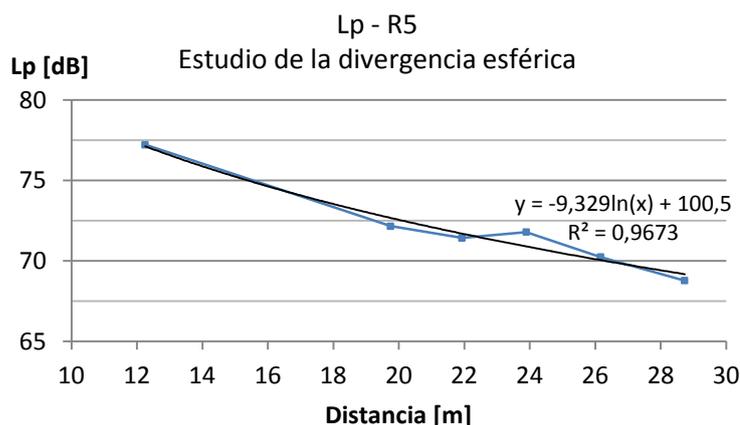
4.2.1 Nivel de presión sonora

Divergencia esférica en R5

En el Anexo 3, los valores del nivel L_p de las 44 medidas tomadas se presentan ordenados por la distancia a la que se tomaron desde la fuente, de menor a mayor. De esta manera puede apreciarse fácilmente cómo el nivel L_p disminuye progresivamente, hecho que se debe a la divergencia geométrica (pérdida de la emisión sonora por distanciamiento entre la fuente y el receptor) y a otros factores como son la absorción del aire y absorción de superficies en la trayectoria del sonido.

En este apartado el objetivo es comprobar hasta qué punto, las pérdidas del nivel L_p , que asociamos a la divergencia esférica, coinciden con las pérdidas que en teoría debería haber.

Para poder realizar esta comprobación elegimos las 6 medidas que se tomaron en la radial central del teatro (R5). Estos valores aparecen representados en la siguiente gráfica 4.14 junto con su línea de tendencia y la tabla 4.6.



MEDIDA	DIST. FUENTE (m)	Lp[dB] 1kHz
M21	12,25	77,22
M22	19,75	72,16
M23	21,93	71,42
M24	23,89	71,79
M25	26,16	70,24
M26	28,73	68,77

Gráfico 4.14 Divergencia esférica a 1 kHz.

Tabla 4.6 Valores
Difusión en R5

De la tabla anterior tenemos que las pérdidas en dB existentes entre la posición de R5 más cercana a la fuente (M21) y la más alejada (M26) son:

$$\left. \begin{aligned} L_{p(M26)} &= 68,77 \text{ dB} \\ L_{p(M21)} &= 77,22 \text{ dB} \end{aligned} \right\} \Delta L_{p(\text{insitu})} = 8,5 \text{ dB}$$

De modo que, sabiendo que la fórmula teórica de la divergencia esférica viene dada por:

$$L_p(r) = L_{p0} - 20 \log(r) \text{ [dB]}$$

Donde:

L_p = Nivel de presión sonora a r metros de la fuente.

L_{p0} = Nivel de presión sonora a 1 metro de la fuente.

El término logarítmico hace referencia al total de las pérdidas que se dan en la trayectoria del sonido.

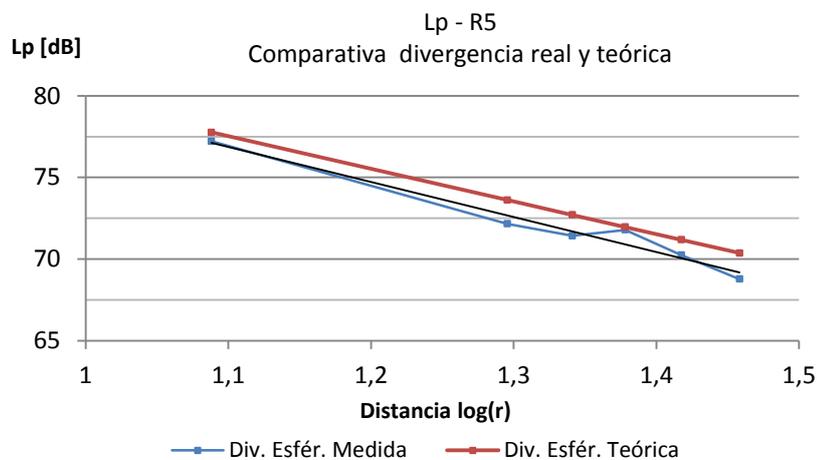
Tomando el dato $L_{p0} = 99,53 \text{ dB}$ del Anexo 3 sustituimos:

$$\left. \begin{aligned} \text{Si } r_{M26} = 28,73 \text{ m} &\rightarrow L_{p(M26)} = 99,53 - 20 \log(28,73) = 70,4 \text{ dB} \\ \text{Si } r_{M21} = 12,25 \text{ m} &\rightarrow L_{p(M21)} = 99,53 - 20 \log(12,25) = 77,8 \text{ dB} \end{aligned} \right\} \Delta L_{p(\text{teórico})} = 7,4 \text{ dB}$$

Como podemos ver, la diferencia por ambos procedimientos es de 1,1 dB; una diferencia aceptable. La distancia en metros entre M21 y M26 viene dada por:

$$d(M26) - d(M21) = 28,73 - 12,25 = 16,48 \text{ m}$$

En la gráfica 4.15, podemos comparar los niveles esperados según la ecuación teórica y los que realmente se obtuvieron.



Gráfica 4.15. Comparativa divergencia real y teórica.

Teóricamente, cada vez que se dobla la distancia, atendiendo a la fórmula de la divergencia esférica el nivel L_p debe caer en 6 dB. En nuestro caso real, podemos concluir que al doblarse esta distancia nivel L_p decae en 6,3 dB.

En el Plano N° 3 – Divergencia esférica y Niveles L_{Aeq} , puede verse la representación de la divergencia esférica para cada una de las radiales consideradas.

Variación del campo sonoro en función de la frecuencia

Analizaremos cómo los niveles de presión sonora cambian en las distintas posiciones y frecuencias. En el Anexo 3 se adjunta una tabla con los niveles detallados para cada posición y además en el Plano N° 2 – Difusión: Espectros L_{Zeq} se muestran estos valores representados en gráficas, a fin de hacer más intuitivo el estudio y más cómodo al lector.

A continuación, se muestran en las siguientes imágenes siguiendo la Norma ISO 1996-2:1987 (E-Acústica - Descripción y medidas del ruido ambiental) la distribución espacial de los niveles del campo sonoro a diferentes frecuencias para una fuente cuyo nivel L_p a 1 m es de 99,53 dB (Anexo 3).

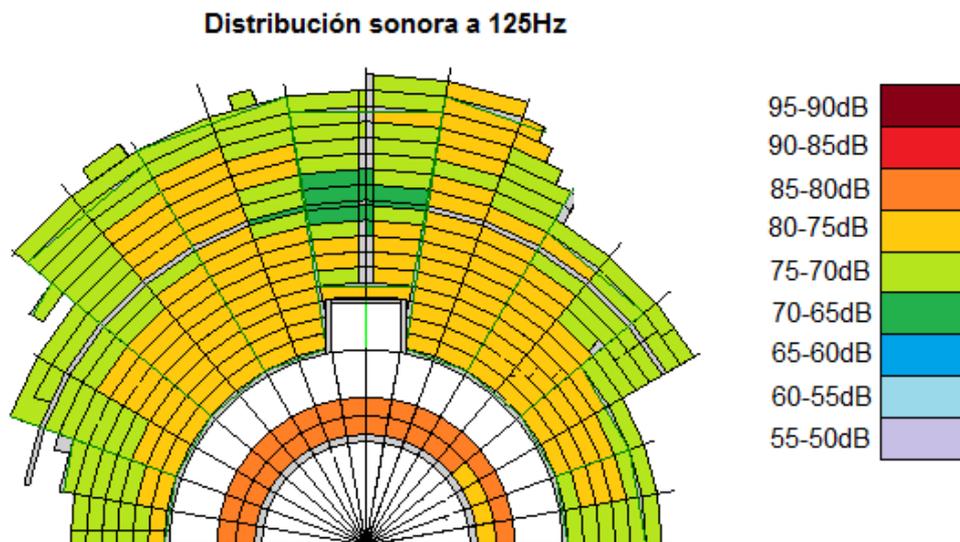


Imagen 4.6 Distribución sonora 125 Hz.

Se aprecian niveles entre 75 y 80 dB en la zona central de la cavea. Aparece una zona de “sombra” alrededor de la posición M24, debida probablemente a una interferencia destructiva creada por la onda que llegaría directa desde la fuente en el

escenario a la zona en cuestión y la onda que se pudiera reflejar en el mármol de la orquesta. Esta coincidencia entre ambas, en vez de sumarse, debido a la diferencia entre ambas trayectorias, provocaría la anulación parcial de las ondas reduciendo el nivel percibido total en esa zona.

Distribución sonora a 500Hz

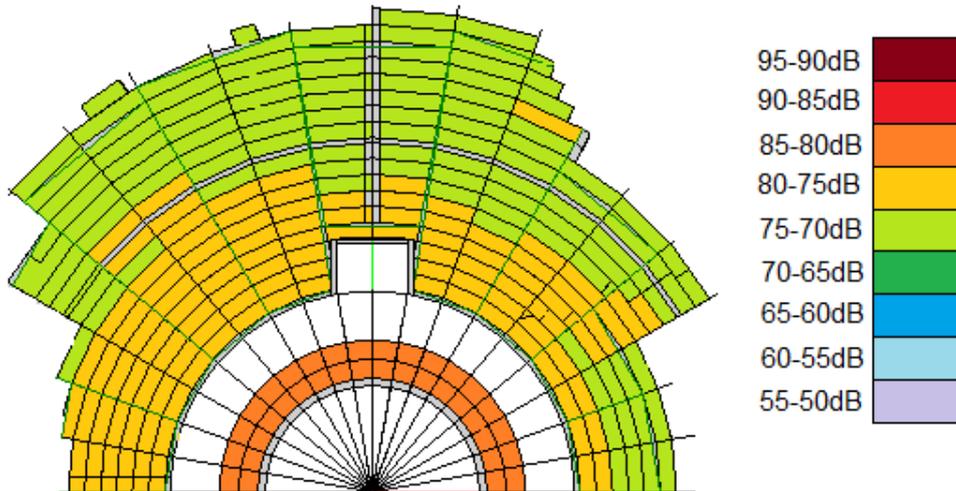


Imagen 4.7 Distribución sonora 500 Hz.

En este caso pasamos a analizar frecuencias medias. Vemos que aumentan las zonas del graderio con niveles entre 75 y 70 dB, reducción de 5 a 10 dB respecto a la anterior, aunque básicamente se mantiene similar. Desaparece la llamada zona de sombra.

Distribución sonora a 1kHz

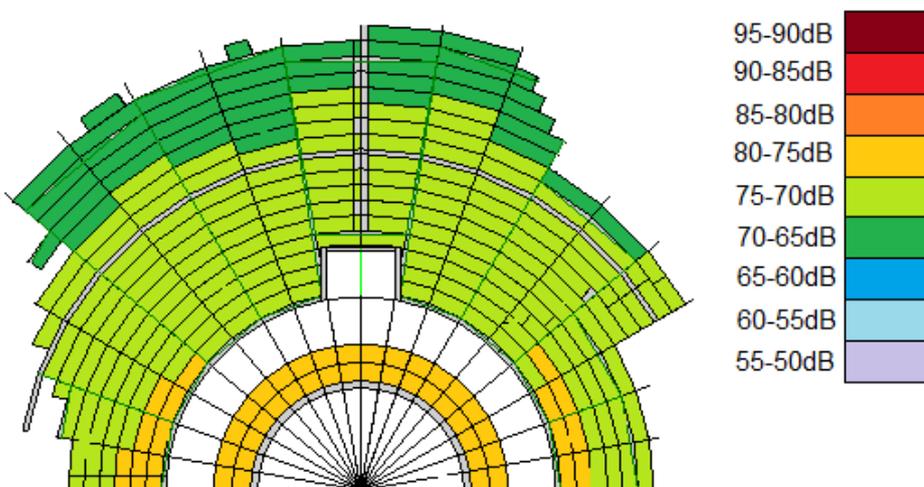


Imagen 4.8 Distribución sonora 1 kHz.

A 1000 Hz prácticamente se pierden los niveles entre 80 y 75 dB, quedando en su

mayor parte a un nivel entre 75 y 70 dB, y apareciendo en las zonas más alejadas del graderío niveles entre 70 y 65 dB.

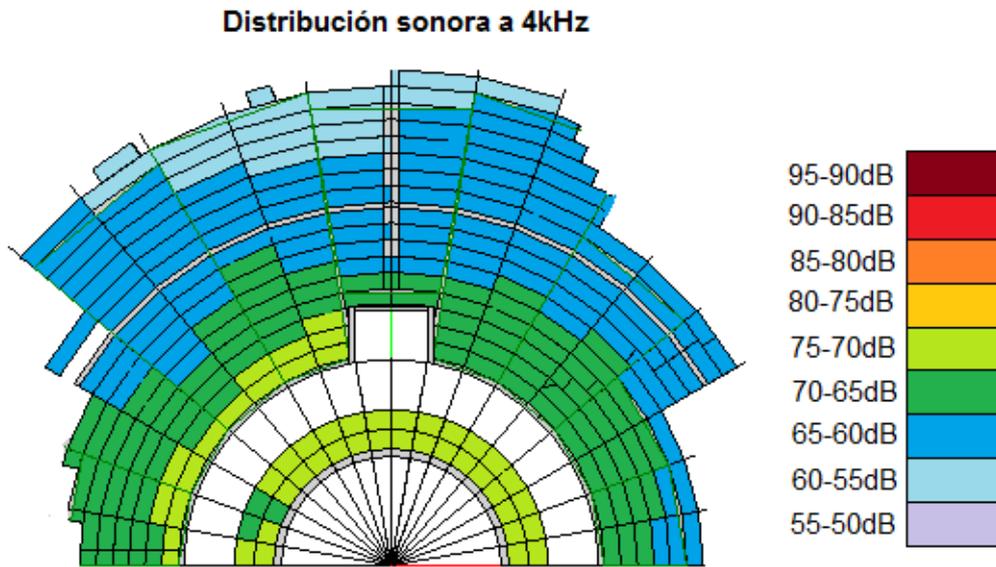


Imagen 4.9 Distribución sonora 4 kHz.

En lo que consideramos altas frecuencias, los niveles se reducen notablemente respecto a las bajas, pasando la mayor parte del graderío a un nivel entre 70 y 60 dB. En las zonas más alejadas se rozan valores de unos 55 dB. Existe una diferencia de niveles entre las bajas frecuencias (a 125 Hz) y a altas (a 4 kHz), de unos 20 dB de manera general.

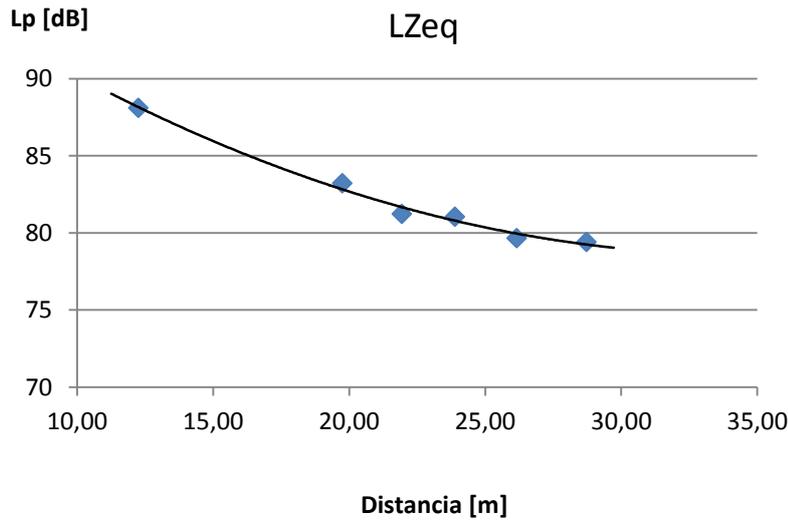
De estas imágenes se puede deducir cómo la distribución sonora se caracteriza por ir reduciendo el nivel L_p a medida que aumenta la frecuencia, tratándose de la misma medida, con la misma fuente, mismos niveles L_p a 1 metro. Este hecho tiene su lógica, pues las altas frecuencias son más directivas y tienden a limitar más su distribución en todo el campo, perdiéndose más en la trayectoria bien por obstáculo o bien por absorción de los materiales, que normalmente absorben más las frecuencias altas. Los niveles superiores a 4 kHz sólo se encuentran en las proximidades de la fuente, las bajas frecuencias, por el contrario se distribuyen de una manera más uniforme distribuyéndose por todo el espacio.

Variación del L_p global con la distancia

Independientemente de la frecuencia que queramos estudiar, el cálculo del nivel L_p global nos puede dar una idea de qué se percibe en cada punto.

Para calcularlo se combina energéticamente en cada posición los niveles de presión en cada banda de octava. Así, podremos representar este nivel L_p global, en función de la distancia e independiente de la frecuencia. En el Anexo 3 se detallan estos valores y, al mismo tiempo, en el Plano N° 3 – Difusión: Divergencia esférica y niveles L_{Aeq} se representan en sus posiciones correspondientes.

A continuación se muestra en la gráfica 4.16 como varía este nivel global en función de la frecuencia en el eje central del graderío (R5):

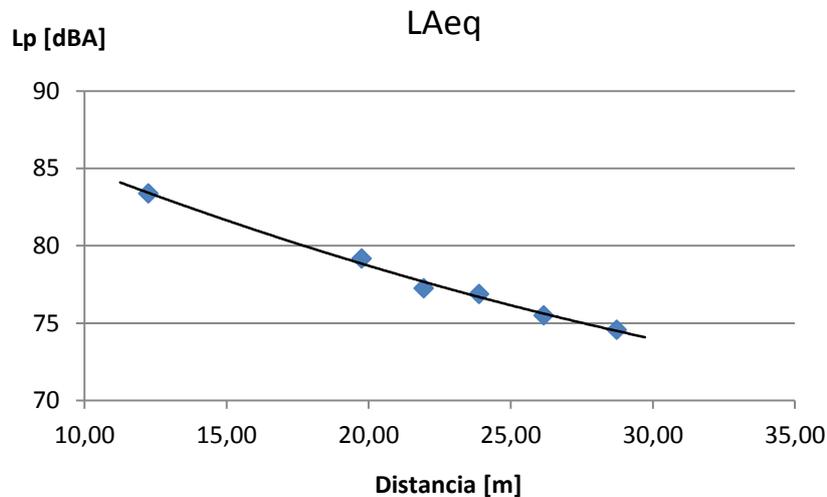


Gráfica 4.16 Niveles L_p Globales - L_{Zeq}

Podemos apreciar en la distribución el efecto, explicado anteriormente para la frecuencia concreta de 1kHz, que causa la divergencia esférica, junto con la absorción del aire y los obstáculos en la trayectoria del sonido. En este caso los valores no se corresponden con 1kHz, si no que se han calculado, como se ha comentado, los valores globales para todas las frecuencias. Como puede observarse, estos valores globales representados no están ponderados; se trata de niveles L_{Zeq} .

El hecho de ponderar los niveles que capta el sonómetro se debe a que realmente el oído humano no tiene la misma sensibilidad para todas las frecuencias, como tendría un sonómetro específicamente diseñado para captar las diferencias de presión sonora. Por ello, con el fin de que el comportamiento del sonómetro sea igual al del oído humano, se modifica su sensibilidad con la curva de ponderación tipo A que atenúa las bajas y altas frecuencias, mientras que las frecuencias medias las mantiene prácticamente sin

modificación (emulando el comportamiento del oído). Así pues, ponderando los valores de la gráfica anterior obtenemos la misma situación, pero ponderada; en dB(A).



Gráfica 4.17 Niveles Lp Globales - LAeq

Esta gráfica 4.17 muestra los niveles “reales” que un oyente percibiría. Podemos ver que estos valores han variado respecto a los niveles anteriores LZeq pero que igualmente decaen logarítmicamente a medida que la distancia fuente-sonómetro aumenta.

4.3 Ruido de fondo

Se entiende como ruido de fondo aquel sonido indeseado que se produce de manera simultánea a la realización de una medida acústica y que puede afectar en mayor o menor medida al resultado de la misma. Este ruido de fondo incluye, por ejemplo, el ruido eléctrico generado por los propios instrumentos de medición (50Hz para la corriente eléctrica).

El objetivo de este apartado será evaluar el ruido ambiental en el Teatro Romano de Medellín y ver de qué manera pueda influir en las actividades que se esperan poder realizar en él.

4.3.1 Nivel de presión sonora

Las medidas que tomamos para evaluar el ruido de fondo fueron ocho del nivel de presión sonora a las distintas frecuencias, y que ya fueron indicadas en el capítulo 3, de Metodología, pero que, por facilitar la lectura del documento, se muestran de nuevo en la imagen 4.10.

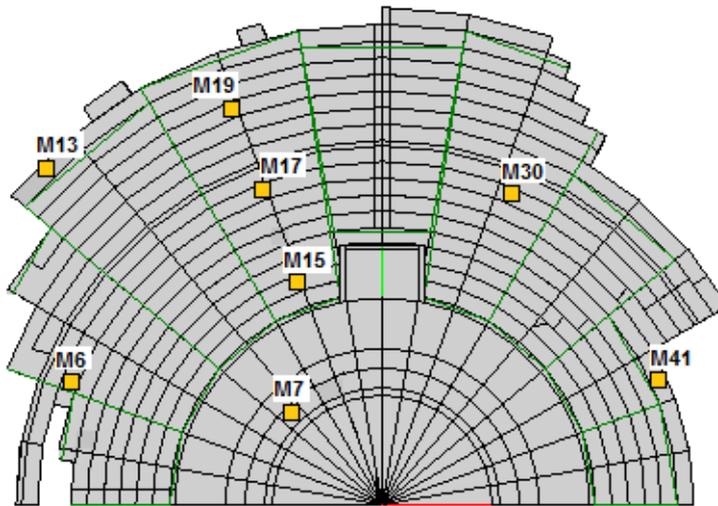


Imagen 4.10 Posiciones de las medidas de ruido de fondo.

Espectros de ruido de fondo y cálculo de curvas NC

Se tomaron ocho medidas para el ruido de fondo. Se realizaron con la fuente apagada e intentando evitar sonidos que hubieran sido producidos por fuentes claramente puntuales (como es el caso de grupos de visitas al teatro).

De cada una de las medidas de ruido de fondo recogidas y que se adjuntan detalladas en el Anexo 4, se han obtenido las gráficas adecuadas y han sido distribuidas oportunamente en el Plano N° 4 – Ruido de fondo, referenciadas cada una de ellas con su curva NC correspondiente en cada posición.

Cálculo del ruido de fondo global del teatro y curva NC global

Independientemente de estos valores en cada uno de estos ocho puntos de medida, se ha procedido a calcular el nivel de ruido de fondo global, un valor único con el

que se definirá el ruido de fondo del teatro. A partir de éste, hemos calculado su curva NC obteniendo la gráfica 4.18.

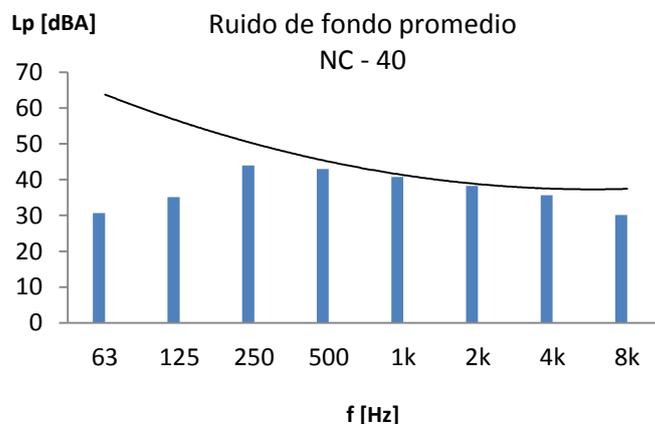


Grafico 4.18 Ruido de fondo del Teatro Romano de Medellín

Las distintas medidas en las que nos basamos para obtener el ruido de fondo global fueron tomadas durante dos de los tres días que se dedicaron a realizar las medidas in situ y a diferentes horas (aleatoriamente entre las 11:00h y las 20:00h). Ver Anexo 4.

Es conveniente comparar estos niveles de ruido de fondo con las curvas NC. Estas curvas sirven para estimar la molestia del ruido de fondo con respecto a la actividad concreta que esté previsto desarrollarse en el teatro. Como se aprecia en la gráfica 4.18, esta curva es la NC-40. Obteniendo para el Teatro Romano de Medellín un nivel de ruido de fondo global de 48,6 dB(A). Hay que mencionar las dificultades que tuvimos para poder llevar a cabo este tipo de medidas en las que a menudo debíamos parar, pues se producían ruidos de fuentes puntuales, como gente hablando.

Es curioso, también, lo que pudimos observar en cuanto al comportamiento de los pájaros. En un primer momento, cada vez que la fuente sonora comenzaba a funcionar (y en este caso nos referimos no a las medidas de ruido de fondo), se alejaban rápidamente del lugar, asustados. Sin embargo, después de tres días seguidos procediendo del mismo modo, encendiendo la fuente, midiendo, y así durante muchas veces a lo largo del día, nos dimos cuenta de que las medidas del ruido de fondo el último día nos resultaban más complicadas ejecutarlas de manera 'limpia' ya que, a menudo, durante el minuto que duraban estas medidas, algún pájaro emitía ruidos perjudicando puntualmente las medidas; a pesar de considerarse ruido ambiente del recinto, sea como sea.

Como puede observarse en el Plano N° 4 - Ruido de fondo, en su mayor parte todas las medidas se caracterizan con curvas NC-40 y NC-35, siendo recomendable para teatros una curva NC-30.

Estudio de la naturaleza del ruido de fondo

A modo de resumen se exponen en la siguiente tabla 4.7 las condiciones ambientales en las que se tomaron dichas medidas y las fuentes sonoras que se detectaron como habituales durante esos tres días.

Fuentes	Características
Animales	Perros Palomas (Batido de alas) Gallinas Cigüeñas Tórtolas Grajos
Tráfico	Coches Motocicletas Camiones
Viento	La velocidad de viento registrado, como puede comprobarse detalladamente en el Anexo 4, oscilaba generalmente entre 1 y 4 km/h.
Personas	Grupos de visitas Niños
Maquinaria de trabajo	Excavadoras Tractores Maquinaria agrícola
Avión	Paso de tres o cuatro aviones al cabo de un día.

Tabla 4.7 Fuentes percibidas de ruido de fondo.

La temperatura media registrada fue de unos 24°C y una humedad del 38% aproximadamente. Cabe destacar que, de los tres días que duraron las medidas, el segundo, tuvimos que cancelarlas sobre las 18:00h debido a que empezó a llover, con todo lo que ello conllevaba y podía perjudicar en cuanto a toma de medidas. Es sabido que el sonido no se transmite del mismo modo con más humedad que con menos, a más temperatura o menos, y por tanto no era deseable que las superficies estuvieran mojadas y el ambiente más húmedo.

Otro aspecto a destacar es la localización de dos carreteras interurbanas situadas como se muestra en la imagen 4.11, rodeando el cerro donde se encuentra el teatro, desde su lado este.



Imagen 4.11 Google Earth. Localización de carreteras cercanas al teatro.

A pesar de la distancia a la que se encuentran del recinto, unos 500-600 metros, se percibe perfectamente el paso de vehículos, especialmente motocicletas y camiones. Se trata de la carretera secundaria que une el Municipio de Medellín con la localidad de Don Benito y la carretera autonómica EX-206.

BLOQUE II SIMULACIÓN EN EASE

Capítulo 5. Levantamiento del Teatro Romano de Medellín en EASE

5.0 Introducción

5.0.1 Objetivo y justificación

El objetivo de este capítulo consistirá en diseñar el recinto a través de las herramientas que ofrece el software de predicción acústica EASE, del inglés Enhanced Acoustic Simulator for Engineers y distribuido por la empresa Renkus Heinz (www.renkus-heinz.com).

En general, este software permite estudiar el comportamiento de la acústica en recintos, conocer qué ocurre mediante determinadas herramientas y métodos estadísticos, explorando y evaluando las distintas opciones que se puedan presentar. De esta manera virtual, se puede saber qué aspectos acústicos del recinto trabajar, cuáles no, y evitar así, además de trabajo innecesario, costosos cambios tanto en tiempo como en dinero.

A la hora del diseño de nuestro recinto en el programa EASE, tendremos en cuenta las condiciones geométricas, de materiales y parámetros climatológicos y de ruido de fondo, recurriendo cuando sea necesario a los datos obtenidos de las medidas in situ analizadas en el Bloque I, a fin de conseguir una simulación tan real como nos sea posible.

Una vez se haya realizado lo anterior, mediante las opciones que el programa ofrece, podremos visualizar tanto gráfica como numéricamente el comportamiento acústico de un determinado equipo de sonido en el Teatro Romano de Medellín.

5.0.2 El teatro actual

Como se describió detalladamente en el Capítulo 2: El Teatro Romano de Medellín, se trata de una construcción de origen romano, situado en la ladera sur del cerro del Municipio de Medellín, con todas las apreciaciones que ello conlleva.

Para el análisis en este capítulo podríamos estructurarlo simplídicamente en tres partes principales:

- **Cavea:** graderío donde el público se sentaba; labrada en granito en la propia ladera. Formada por tres zonas: *cavea ima*, *media* y *suma*.
- **Orchestra:** donde se sentaban las autoridades y, si acaso los había, donde tocaban los músicos. Era la zona privilegiada.
- **Scaena:** el escenario; donde se desarrollaba la trama.

A continuación, en la imagen 5.1 se muestra un esquema con las partes mencionadas.

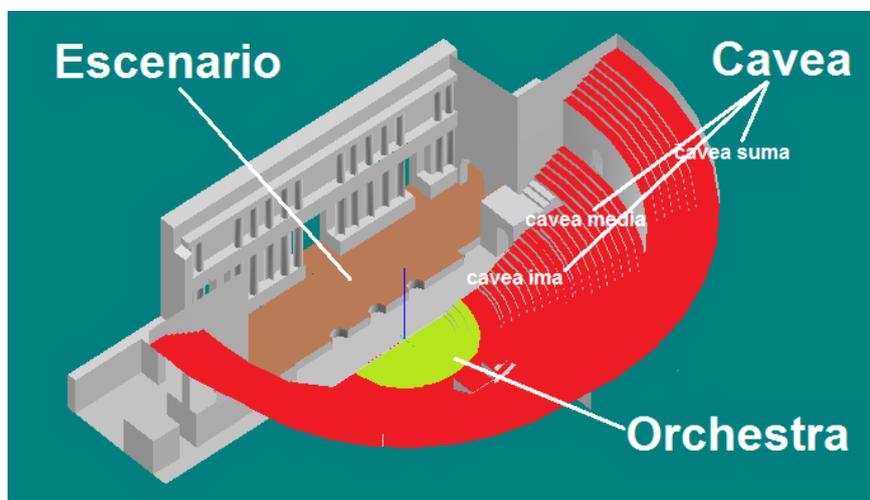


Imagen 5.1 Esquema básico del modelo original del Teatro Romano de Medellín.

El estado actual del monumento es distinto al original, conservando solo ciertas partes intactas tras el paso del tiempo. Actualmente encontramos:

1. **Cavea:** se conserva la mayor parte de la *ima* y *media cavea*. La primera de ellas conserva 8 gradas (en la zona oriental parte de estas gradas se han reconstruido en madera) y la segunda, la *media cavea*, conserva 7 gradas, todas ellas formadas por sillares de granito de 0,4 m de alto por 0,76 m de ancho (formando una pendiente de 30°). La *suma cavea* ha desaparecido completamente. Sus dimensiones actuales son 21,77 m de radio, desde el punto central del semicírculo que conforma la *orchestra*.

2. *Aditus maximus*: aún se mantiene el del lado occidental cuyas dimensiones son de 2,3 m de ancho por 5 m de altura y unos 5,79 m de profundidad.



Imagen 5.2. Estado actual del Teatro Romano de Medellín, vista desde el escenario.

3. *Orchestra*: aún conserva los mármoles originales. Sus dimensiones actuales rondan los 14,2 m de radio. En ella se incluyen los primeros peldaños de menor altura; de unos 0,2 m.
4. *Scaena*: por lo que respecta la scaena, en sus inicios estaba adosada al muro perimetral frontal que era el scenae frons, pero actualmente está formada por un entarimado de lamas madera de 7 m de ancho por 35 m de largo con una altura de unos 1,30 m aproximadamente del suelo original.



Imagen 5.3 Estado actual del Teatro Romano de Medellín, vista desde M22.

Podemos apreciar que las condiciones actuales no son las mismas que en su día, sobre todo por factores como la desaparición del frente escénico, parte de la cavea y el desgaste de los materiales con que fue construido. No obstante, aun siendo distintas estas condiciones, uno de los grandes enigmas con los que nos encontramos es la grandeza y perfección en cuanto a su diseño y geometría, así como en cuanto a la elección de los materiales con los que lo construyeron que, incluso hoy, siguen proporcionando una acústica al lugar prácticamente inmejorable.

Visto así, en un principio podríamos suponer que no sería necesario el desarrollo de un sistema de refuerzo sonoro ya que nos encontramos ante recintos que se diseñaron con la idea de que cualquier orador fuera escuchado con total claridad por todos los oyentes del público. De cualquier manera, ésta será una cuestión que abarcaremos más adelante a medida que dispongamos de resultados y fundamentos para poder obtener conclusiones más sólidas, pues bien es cierto que el refuerzo sonoro puede ayudar incluso a mejorar las condiciones aún más.

5.1 Diseño

Para comenzar con el diseño del recinto en EASE se partirá de los planos del teatro, definiendo uno a uno puntos determinados por sus coordenadas (x, y, z) , que a su vez uniremos entre sí para formar caras. Estableceremos como punto central $(0, 0, 0)$ el centro del semicírculo que forma la orchestra, tal y como se muestra en la imagen 5.4, que ofrece un esquema básico de la estructura seguida para el levantamiento del recinto en EASE.

Como se ve, la cavea se puede dividir en dos partes. La inferior, la ima cavea está formada por 8 peldaños de sillares, con una parte de ellos, la oriental, reconstruida en madera. La cavea inmediatamente superior, la cavea media conserva prácticamente la totalidad de 7 peldaños, aunque ciertos sillares han desaparecido.

También se ha considerado para el diseño del recinto, la pasarela y el muro perimetral, ambos rodeando la media cavea y a una distancia límite del punto central de 30,6 m que coincide con el final de este muro periférico, donde se sostenía la cavea suma, ya desaparecida.

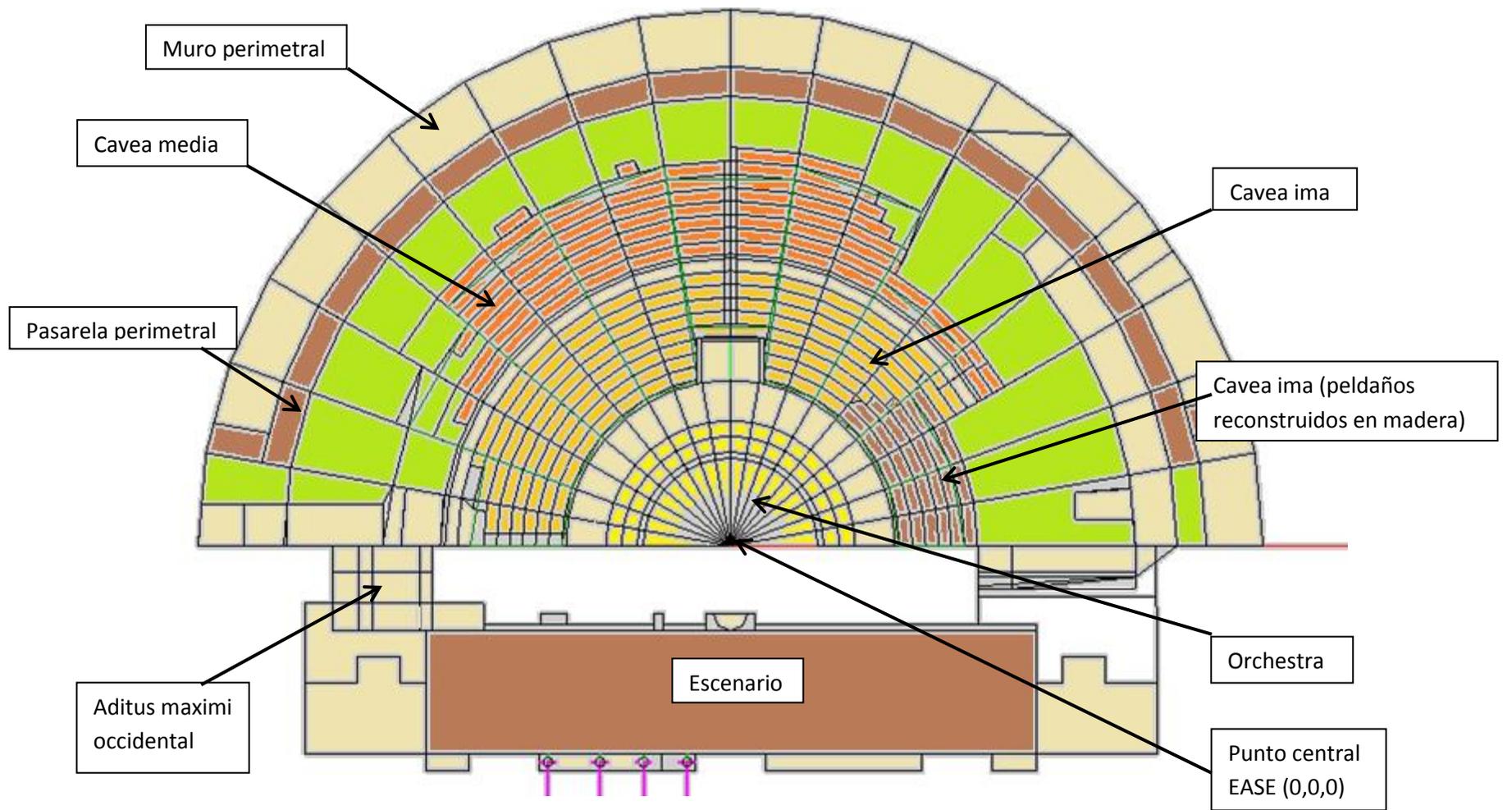


Imagen5.4 Esquema básico de la construcción del recinto en EASE.

Para hacer viable el trabajo se ha dividido el recinto en radiales que parten del punto central (0, 0, 0); en total 18 radiales (ver imagen 5.5).

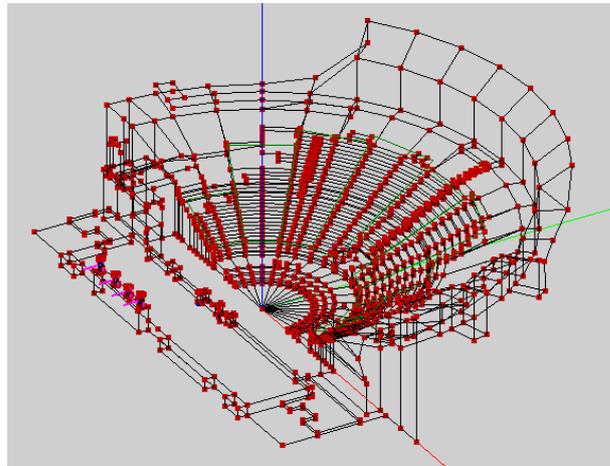


Imagen 5.5 Modelo EASE del estado actual del Teatro Romano de Medellín, representación de puntos y caras.

Siguiendo este procedimiento, finalmente hemos obtenido un total de 1.452 vértices y 1.120 caras. Esta manera de construir el recinto es muy trabajosa pero, a cambio, nos asegura acercarnos al modelo real. El resultado puede verse en la imagen 5.6.

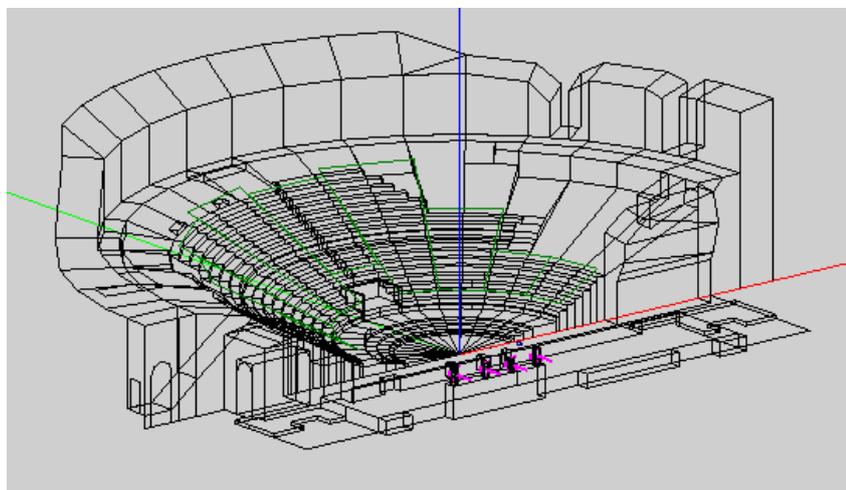


Imagen 5.6 Modelo EASE del estado actual del Teatro Romano de Medellín

En cualquier caso, siempre será posible simplificar el número de caras y puntos si, llegado el momento, tuviéramos algún tipo de problema con el nivel de complejidad de los cálculos de la simulación.

5.2 Materiales

En el teatro encontramos diferentes materiales que se comportarán de manera distinta a la hora de absorber el sonido, aspecto que tenemos que tener muy en cuenta a la hora de realizar el modelo.

A continuación, se relacionan los materiales principales que podemos encontrar en el teatro.

PIEDRA DE GRANITO LABRADA EN MORTERO DE CAL

Se localiza en la zona del graderío (sillares de la cavea ima y media). Además, también se encuentra en parte del suelo y algunas paredes como en el aditus maximus. El granito como material pulido se trata de una piedra altamente reflectante en cuanto al sonido, sin embargo el estado de las superficies estos sillares no es liso, sino más poroso, con un acabado donde la superficie presenta pequeños cráteres de 1 – 3 mm de profundidad y anchura uniformemente repartidos (granito abujardado), efecto que produce un aclarado del tono general de la roca. Este hecho hace que los coeficientes de absorción en altas frecuencias se incrementen.

En la imagen 5.7 se puede ver una fotografía del material; en el gráfico 5.1 se muestran los coeficientes de absorción que consideraremos en la simulación.



Imagen 5.7 Cavea de granito

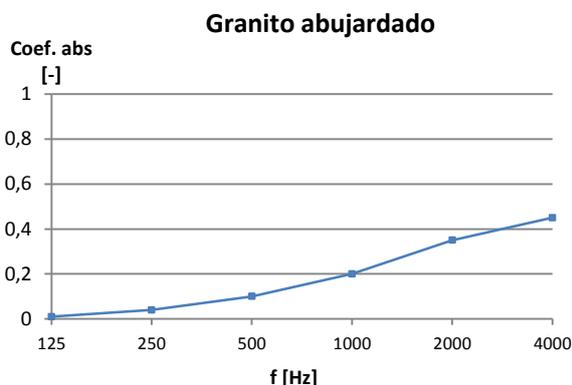


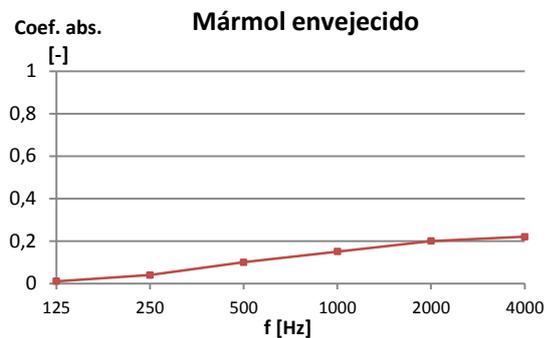
Gráfico 5.1. Coeficientes de absorción de granito abujardado

MÁRMOL ORIGINAL

Se trata de revestimientos de mármol sobre lecho de mortero de cal. Se conserva en la zona de la orquesta y algunas áreas de los pasillos laterales que a ella dan paso (itineraria). Además, encontramos bastantes fragmentos de este mármol en los bordes y marcos que rodean el escenario (el pulpito estaba originalmente cubierto en su totalidad de mármol pulido). De la misma manera que en el caso anterior, este mármol hay que considerarlo más poroso y por tanto con coeficientes de absorción, ligeramente superiores en las altas frecuencias al del mármol pulido.



Imagen 5.8. Suelo de la orquesta, de mármol



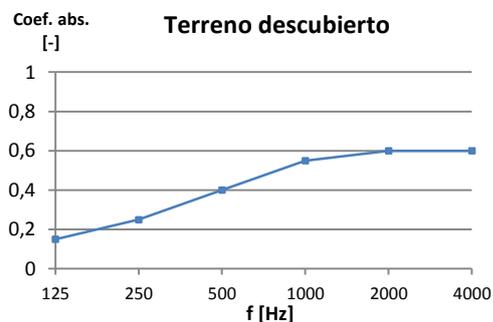
Gráfica 5.2 Coeficientes de absorción mármol envejecido.

TERRENO DESCUBIERTO

Se trata de la ladera del cerro que ha quedado desnuda tras haber desaparecido, por diversas causas, la construcción original. Está compuesta por una mezcla de rocas de cuarcita, arcilla y arena de granito (ver imagen 5.9). Los coeficientes de absorción acústica considerados en este caso se muestran en la gráfica 5.3, siendo genéricos para terrenos compuestos por este tipo de materiales.



Imagen 5.9 Terreno descubierto.



Gráfica 5.3 Coeficientes de absorción terreno descubierto.

MADERA DE LAS TRAVIESAS DE LA VÍA DEL TREN

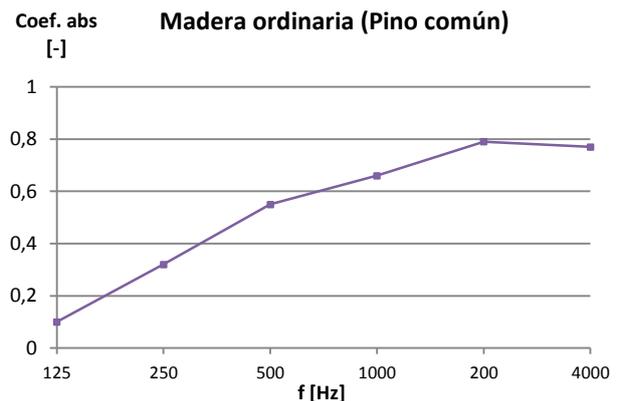
Ha sido utilizada para la reconstrucción de una pequeña parte del graderío oriental (exactamente los seis primeros peldaños de la cavea ima). En la imagen 5.10 pueden apreciarse al fondo.

En el gráfico 5.4, a la derecha, se muestran los coeficientes de absorción para la madera ordinaria (de pino común), madera típicamente usada para la fabricación de traviesas de la vía del tren (estos coeficientes vienen dados para bloques de 2x0,15x0,25 m o bien láminas de 1 – 2 cm de espesor y de dimensiones 2mx1,22m).

Es una madera rígida pero de fácil manejo para diferentes aplicaciones en la construcción. Resiste pequeños accidentes y golpes, pero sin embargo puede ser afectada por insectos o ambientes atmosféricos húmedos, variando su comportamiento acústico, que ya por sí mismo, es alto sobre todo en altas frecuencias.



Imagen 5.10 Gradadas reconstruidas en madera.



Gráfica 5.4 Coeficientes de absorción madera ordinaria.

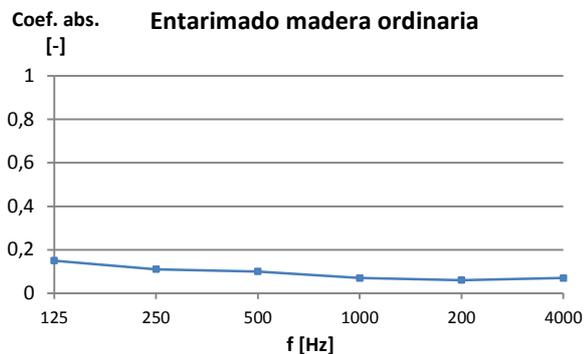
MADERA DE PINO VALSAÍN

Utilizada para el escenario. Se trata de pino silvestre también llamado pino común o valsaín. Ha sido utilizado en tablonces de 3 cm de grosor montado sobre una chapa metálica y una estructura también metálica. Además, cuenta con aislamiento acústico justo debajo de los anteriores (lana de vidrio). Bajo toda esta estructura descrita hay una cámara de altura variable (entre 0,5 m a 1,80 m de profundidad, llamada hypoescenium). Por todo lo expuesto, las condiciones de absorción acústica del

escenario con respecto a las traviesas de las vías del tren serán distintas; fundamentalmente por el grosor de un caso y otro.



Imagen 5.11 Suelo del escenario.



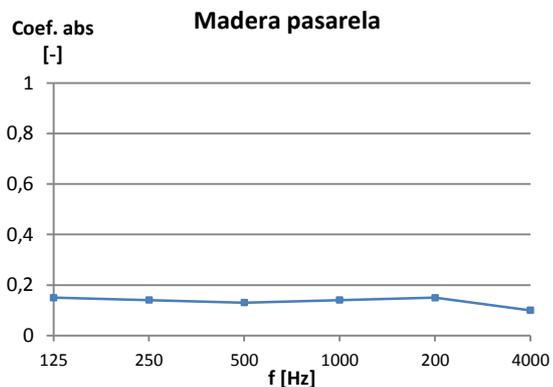
Gráfica 5.5 Coeficientes de absorción entarimado de madera de pino valsaín.

PASARELA DE MADERA

Está formada por lamas de madera también de pino, con una amplitud de 1,5 m rodeando la cavea media. Por su localización, en principio no consideramos que pueda ser muy significativa para nuestro estudio, pero aun así, podría haber situaciones en las que influyera. En la imagen 5.12 se puede ver y en la gráfica 5.6 se representan los valores de sus coeficientes de absorción.



Imagen 5.12 Vista de la pasarela periférica.



Gráfica 5.6 Coeficientes de absorción de la pasarela.

ARGAMASA CICLÓPEA Y FÁBRICA DE PIEDRA DE CUARCITA

La argamasa ciclópea consiste en una técnica constructiva clásica basada en la mezcla

de cal, grava y piedras (técnica conocida por los romanos como opus caementicium) y fábrica de piedra de cuarcita (opus incertum). Eran métodos robustos ampliamente utilizados para recubrir muros y paredes, como en este caso ocurre con el muro perimetral que rodea el graderío del teatro. En la imagen 5.13 se muestra una representación bastante intuitiva de la idea en la que se basa esta técnica.

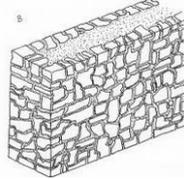
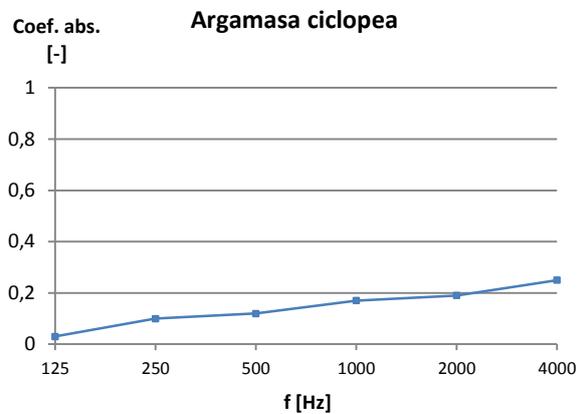


Imagen 5.13 Estructura básica de los muros (argamasa ciclópea)

En cuanto a los materiales que la conforman y sus coeficientes de absorción, tenemos que la mayor parte de la superficie de estos muros lo conforman las bases planas de piedras de cuarcita, dejando entrever la “mezcla” de cal, grava y piedras. Obviamente no estamos ante una superficie lisa, reflectante casi en su totalidad por el efecto de la piedra de cuarcita; si no que la superficie final es rugosa y con relieves que harán que en cierta parte el muro tenga un comportamiento más difusor. En la gráfica 5.7 se muestran los valores considerados, ligeramente superiores a los que un muro formado por piedras lisas de cuarcita tendría.



Imagen 5.14 Al fondo, muro perimetral construido en argamasa ciclópea.



Gráfica 5.7 Coeficientes de absorción argamasa ciclópea.

5.3 Áreas de audiencia

Para poder continuar con la simulación deberemos crear las áreas de audiencia. Se trata de áreas “no físicas” que deben coincidir con los lugares que ocuparán los

espectadores pero, además, con la altura aproximada a la que estarán sus oídos (1,2 m sobre el suelo que pisan, si estuvieran sentados).

Se definen del mismo modo que se han definido el resto de caras y el programa calcula sobre ellas los parámetros acústicos de interés.

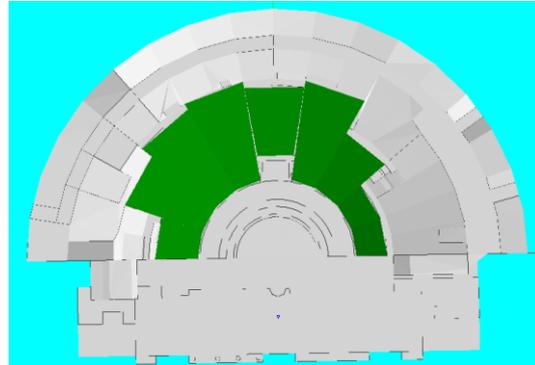


Imagen 5.15 EASE; áreas de audiencia.

En la imagen 4.15 se puede apreciar en verde dónde se ha considerado que debe ir el área de audiencia. Como se ha dicho, el programa utilizará las áreas de audiencia como superficies de cálculo y fuera de ellas no obtendremos resultados.

5.4 Parámetros climatológicos de la sala

Otro aspecto influyente en la acústica de cualquier lugar son las condiciones climatológicas. El programa nos da la oportunidad de ajustar para la simulación los parámetros de humedad y temperatura, los cuales configuraremos en base los valores medios de las medidas in situ (Bloque I). Los datos aparecen en la tabla 5.1, y la configuración en EASE, en la imagen 5.16.

Humedad [%]	Temperatura [°C]
38	25,5
37	21,1
33	26,1
36	21,7
41	24
44	21.3
34	20.2
Valor medio	Valor medio
37,6	23,7

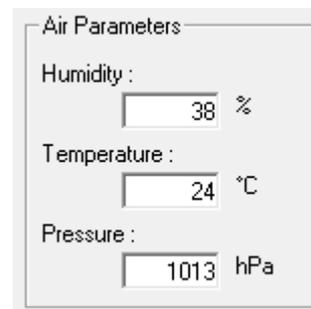


Imagen 5.16 Configuración EASE.

Tabla 5.1 Valores medios de humedad y temperatura.

5.5 Ruido de fondo

Los niveles que tomaremos para configurar el ruido de fondo de nuestro recinto serán los valores que se calcularon en el Bloque I como el ruido de fondo del Teatro Romano de Medellín; obtenidos en base a cada una de las ocho medidas in situ recogidas.

Esos niveles, que fueron calculados por bandas de octava, pueden verse en la tabla 5.2, y posteriormente los hemos sido convertido a tercios de octava (ver imagen 5.17) mediante la siguiente ecuación:

$$L_{TERC} = 10 \log\left(\frac{10^{0,1L_{OCT}}}{3}\right) [dB]$$

Donde:

L_{OCT} = valor del ruido de fondo en una banda de octava.

L_{TERC} = valor que corresponde a cada uno de los tercios de octava que forman una banda. Los tres tercios tendrán el mismo valor.

f [Hz]	LZeq [dB]
125	51,2
250	52,5
500	46,1
1k	40,8
2k	37,0
4k	34,6
8k	31,2

Tabla 5.2. Valores promedios en bandas de octava para el ruido de fondo del Teatro Romano de Medellín. Medidas in situ – Bloque I.

	Noise Level [dB]
100 Hz	46.40
125 Hz	46.40
160 Hz	46.40
200 Hz	47.80
250 Hz	47.80
315 Hz	47.80
400 Hz	41.40
500 Hz	41.40
630 Hz	41.40
800 Hz	36.00
1000 Hz	36.00
1250 Hz	36.00
1600 Hz	32.30
2000 Hz	32.30
2500 Hz	32.30
3150 Hz	29.90
4000 Hz	29.90
5000 Hz	29.90
6300 Hz	26.50
8000 Hz	26.50
10000 Hz	26.50

Imagen 5.17 Configuración del ruido de fondo en base a las medidas in situ.

Capítulo 6. Validación del modelo EASE

6.0 Introducción

El programa EASE nos permite realizar una gran cantidad de cálculos acústicos de una forma sencilla. Así podemos saber, por ejemplo, qué ocurriría en determinadas situaciones en las que todavía no se han podido realizar medidas *in situ*, o conocer resultados cuando simplemente no se prevé realizar pruebas por un motivo u otro.

Sin embargo, para llevarlo a cabo de manera fiable deberemos validar antes de nada el modelo EASE y asegurarnos de que funciona como se espera. Esto se consigue haciendo que bajo las mismas condiciones en las que se realizaron las medidas *in situ*, los valores simulados y medidos del Bloque I, coincidan.

Para ello lo primero, como se ha dicho, consistirá en configurar el programa EASE de forma que se aproxime lo más posible a las condiciones reales en las que se tomaron dichas medidas.

Los recursos empleados para aproximar el modelo que se levantó en el Capítulo 5 pasarán por una simplificación geométrica, un ajuste del volumen y el tiempo de reverberación del recinto y la definición de una fuente de idénticas características a la utilizada para las medidas.

Hecho esto, comprobaremos qué valores obtenemos de la simulación y si son o no aceptables respecto a los valores reales.

6.1 Simplificación geométrica

Debido a la complejidad del recinto, respecto al número de caras y superficies que lo conforman, será necesario aplicar una serie de simplificaciones geométricas para facilitar los cálculos del algoritmo y, además, para evitar encontrar incongruencias en los resultados.

La simplificación que se ha aplicado ha sido las que se muestran en las imágenes 6.1 y 6.2.

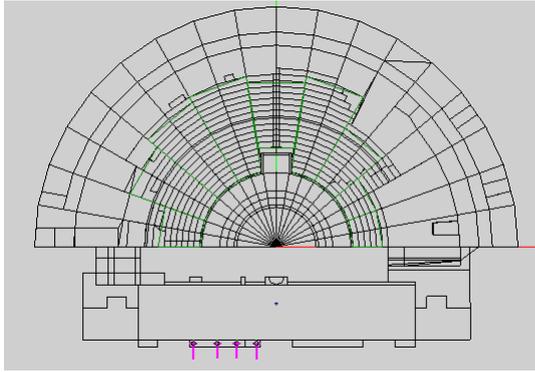


Imagen 6.1 Modelo de recinto sin simplificar EASE

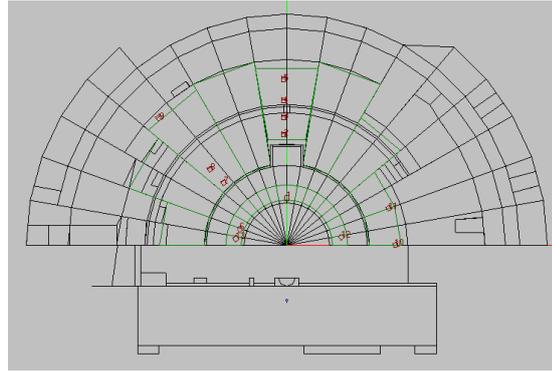


Imagen 6.2 Modelo de recinto simplificado EASE

Se ha simplificado el graderío definiendo un único plano inclinado y evitando así el elevado número de caras sobre las que las ondas sonoras se podían ver reflejadas, pues el programa, para realizar los cálculos, debe tener en cuenta todas y cada una de ellas. En cuanto al resto, básicamente se mantiene sin cambios, como puede apreciarse en la imagen en perspectiva 6.3.

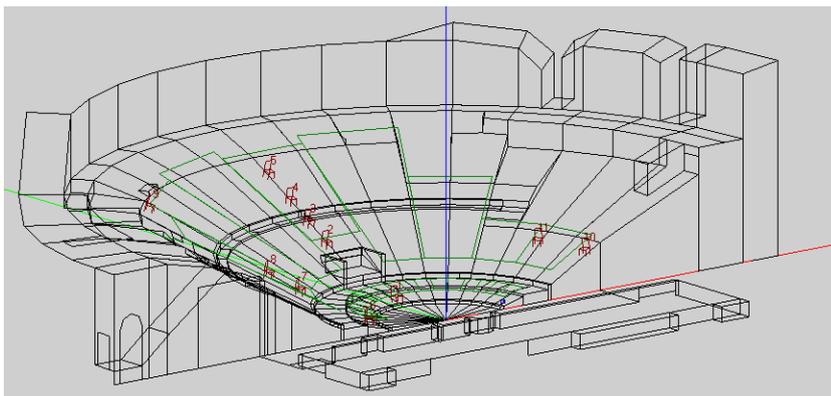


Imagen 6.3 Modelo EASE del recinto simplificado

6.2 Ajuste del TR y el volumen del recinto

Para conocer el TR de un recinto se pueden realizar diferentes tipos de estimaciones. Una de las más utilizadas es la que emplea fórmula de Sabine. Esta fórmula relaciona el tiempo de reverberación con el volumen y la superficie del recinto con su absorción acústica. La ecuación viene dada por:

$$TR = \frac{0.161V}{Aa} [s]$$

Siendo:

TR=Tiempo de reverberación estimado [s]

V=el volumen del recinto [m^3]

A= superficie (m^2)

α =absorción acústica total

En este punto hay que destacar un hecho importante, y es que, si bien el programa EASE permite trabajar con recintos abiertos como el nuestro, tiene sus limitaciones. Para conocer el TR, este software trabaja con teorías estadísticas como la fórmula de Sabine (6.1) que, como podemos ver, necesita de un volumen; un recinto con un volumen limitado, cerrado. Nuestro recinto, sin embargo, es abierto y matemáticamente podríamos decir que el volumen real del recinto es infinito. Virtualmente eso no es viable.

De modo que, si para poder hacer viables los cálculos necesitamos un volumen concreto, nos planteamos ¿Qué volumen consideramos? Si EASE se basa en la ecuación 6.1 para sus cálculos, tenemos que:

- El término $A\alpha$ (superficie por absorción acústica) es el que es, y viene dado por los materiales que conforman el teatro; es un dato y viene especificado en el Capítulo 5.
- Si el término TR del recinto lo conocemos, pues es una de las medidas in situ que se llevaron a cabo y de las que, además, obtuvimos un valor promedio en el Capítulo 4, podremos buscar el volumen que requiere el programa para caracterizar el recinto con el TR que sabemos, debe tener.

Por tanto, recuperamos del Capítulo 4 el valor del TR promedio que obtuvimos y a medida que variemos el volumen del recinto en EASE, el propio programa irá cambiando el TR. Cuando obtengamos un TR similar al real, dejaremos de variar el volumen. Los valores que obtuvimos como TR promedio del recinto pueden verse en la tabla 6.1, y la configuración en EASE del TR y volumen, en la imagen 6.4.

f [Hz]	TR Promedio
125	0,84
250	0,81
500	0,73
1000	0,78
2000	0,81
4000	0,61
Global	0,76

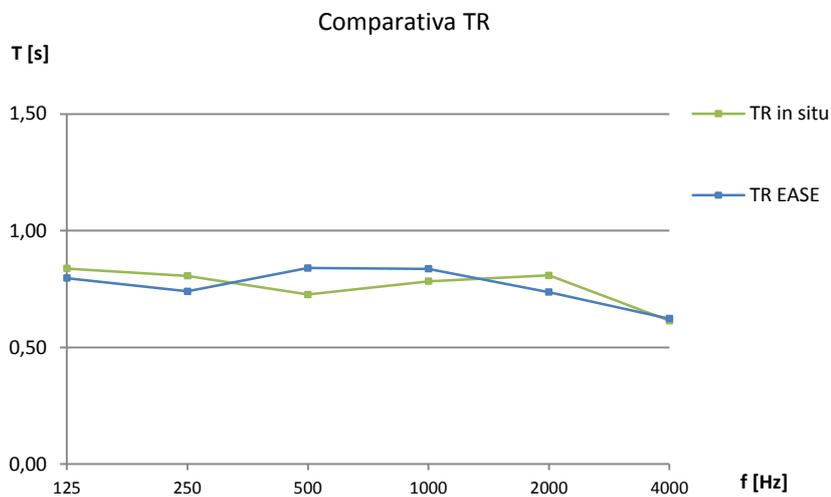
Tabla 4.4 Valores medios TR.

The screenshot shows the EASE software interface for setting reverb time. The 'Reverb. Time' section includes a 'Formula' dropdown set to 'Sabine', a 'Locked' checkbox, an 'Interpolate' button, and a 'Desired [s]' input field set to 0.00. Below this are folder and file icons. The 'Air Parameters' section includes input fields for Humidity (38%), Temperature (24°C), and Pressure (1013 hPa). The 'Room Geometry' section includes 'Volume [m³]' (2500.00) and 'Effective Surface [m²]' (2940.82), with checkboxes for 'Room open' (checked) and 'Room symmetric' (unchecked). To the right is a table of reverb time and absorption coefficient values.

	Rev. Time	Absorp. Coe
100 Hz	0.79	0.18
125 Hz	0.79	0.18
160 Hz	0.81	0.17
200 Hz	0.74	0.19
250 Hz	0.75	0.18
315 Hz	0.73	0.19
400 Hz	0.71	0.20
500 Hz	0.91	0.15
630 Hz	0.90	0.15
800 Hz	0.87	0.16
1000 Hz	0.83	0.17
1250 Hz	0.81	0.17
1600 Hz	0.76	0.18
2000 Hz	0.74	0.18
2500 Hz	0.71	0.19
3150 Hz	0.65	0.20
4000 Hz	0.63	0.20
5000 Hz	0.59	0.20
6300 Hz	0.54	0.19
8000 Hz	0.48	0.19
10000 Hz	0.40	0.19

Imagen 6.4 Valores TR EASE para un volumen de 2500 m³.

En la gráfica 6.1 comparamos el TR real del teatro con el que hemos obtenido en EASE estableciendo un volumen de 2500 m³.



Gráfica 6.1 Comparativa TR in situ y TR EASE.

6.3 Definición de fuente

A la hora de simular la fuente, hemos partido del modelo omnidireccional predefinido por EASE cuyos diagramas de directividad se muestran en la imagen 6.5 y 6.6.

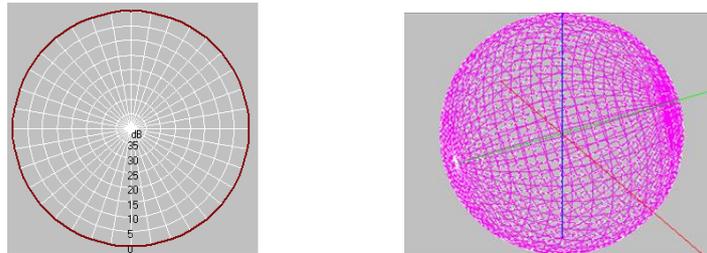


Imagen 6.5 y 6.6. Modelo EASE predefinido para fuente omnidireccional

Este modelo ha sido aproximado a la fuente de tipo omnidireccional, modelo *B&K Omnipower 4296*, cuya respuesta en frecuencia en tercios de octava viene dada por la siguiente gráfica 3.1.

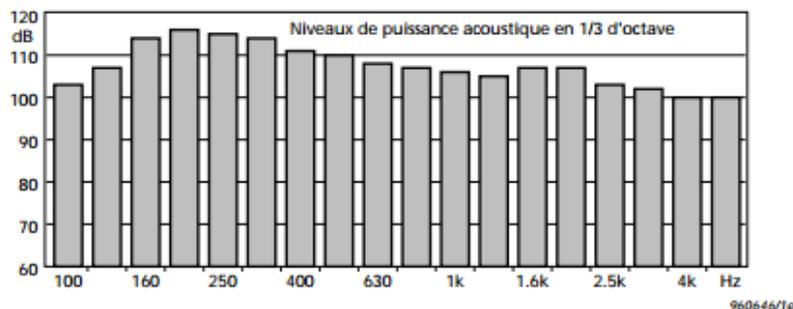


Imagen 3.1 Respuesta en frecuencia de fuente *B&K Omnipower 4296*.

[Catálogo Brüel & Kjaer]

Hemos considerado el mismo nivel de presión sonora a 1m por tercios de octava que se midió en el escenario durante las medidas *in situ*. Estos niveles que ya fueron presentados en el capítulo 3, se muestran de nuevo en la tabla 3.5 y en la imagen 6.7 se muestra el ajuste de esa respuesta en frecuencia. Lo principal será que ambas respuestas en frecuencia coincidan, independientemente del nivel de presión sonora que se configure pero, en cualquier caso, ésta es una configuración que puede variarse según

nos interese sin más que incrementar los valores con las opciones de configuración que EASE nos ofrece.

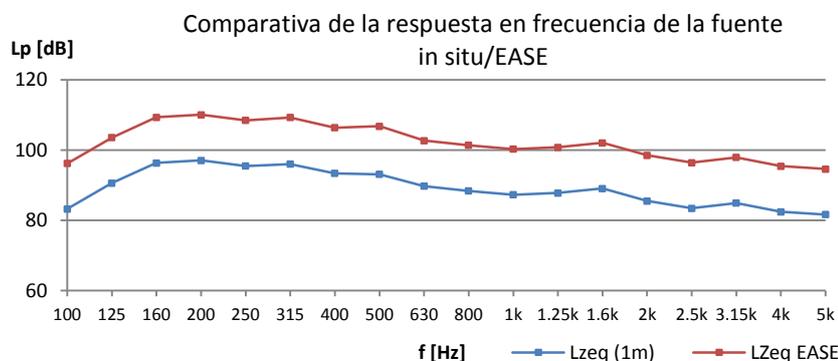
F [Hz]	LZeq [dB]
100	83,21
125	90,58
160	96,32
200	97,07
250	95,47
315	96,03
400	93,39
500	93,08
630	89,72
800	88,39
1k	87,27
1.25k	87,8
1.6k	89,04
2k	85,5
2.5k	83,42
3.15k	84,92
4k	82,42
5k	81,62

SPL		Pha:
Frequ.	Ele.Power	SPL (1m)
100 Hz	0.458	96.21
125 Hz	2.500	103.58
160 Hz	9.376	109.32
200 Hz	11.14	110.07
250 Hz	7.709	108.47
315 Hz	8.770	109.03
400 Hz	4.775	106.39
500 Hz	4.446	106.08
630 Hz	2.051	102.72
800 Hz	1.510	101.39
1000 Hz	1.167	100.27
1250 Hz	1.318	100.80
1600 Hz	1.754	102.04
2000 Hz	0.776	98.50
2500 Hz	0.481	96.42
3150 Hz	0.679	97.92
4000 Hz	0.382	95.42
5000 Hz	0.318	94.62
6300 Hz	0.394	95.56
8000 Hz	0.295	94.30
10000 Hz	2.729	94.36

Tabla 3.5 Respuesta en frecuencia de la fuente en el escenario.

Imagen 6.7. Respuesta en frecuencia de la fuente en EASE.

Representando estos valores tenemos la gráfica 6.2. Cabe mencionar que el hecho de que los niveles sonoros no sean los mismos a nosotros no nos es relevante, pues no importa el nivel de presión sonora emitido como tal, sino el comportamiento respecto a la frecuencia y la diferencia de niveles entre posiciones de medida entre un método y otro.



Gráfica 6.2. Comparativa de la respuesta en frecuencia de la fuente. In situ/EASE.

Sin embargo, para hacer más intuitiva la comparación, una vez hemos ajustado todo lo anterior, hemos fijado el nivel de la fuente para que, tomando como punto de referencia la posición de M21 donde se midió in situ 88,1 dB, en EASE tengamos el mismo valor (valor de referencia).

Para terminar, hemos colocado la fuente en la misma posición en el escenario: posición (0, -6.75, 2.64) a partir del punto central, nuestro punto de inicio en el modelo.

6.4 Validación de resultados

Realizados todos los ajustes anteriores, compararemos ahora los resultados de la simulación y los recogidos in situ.

En el apartado anterior se expusieron una serie de limitaciones que el programa EASE tenía a la hora de calcular ciertos parámetros en recintos que no fueran cerrados. Por tanto, no podremos conocer aquellos parámetros que, como el %AICons, el EASE calcula a partir de un volumen.

Características como el sonido directo y los reflectogramas para las posiciones de interés los podremos obtener sin problemas. Será en ellos en los que nos basaremos para nuestras comparaciones: en los niveles de sonido directo (que no el sonido total percibido en un punto, el cual es suma del directo y el reverberante; obtenido por EASE empleando un volumen). En la siguiente imagen 6.8 se muestra esta comparación.

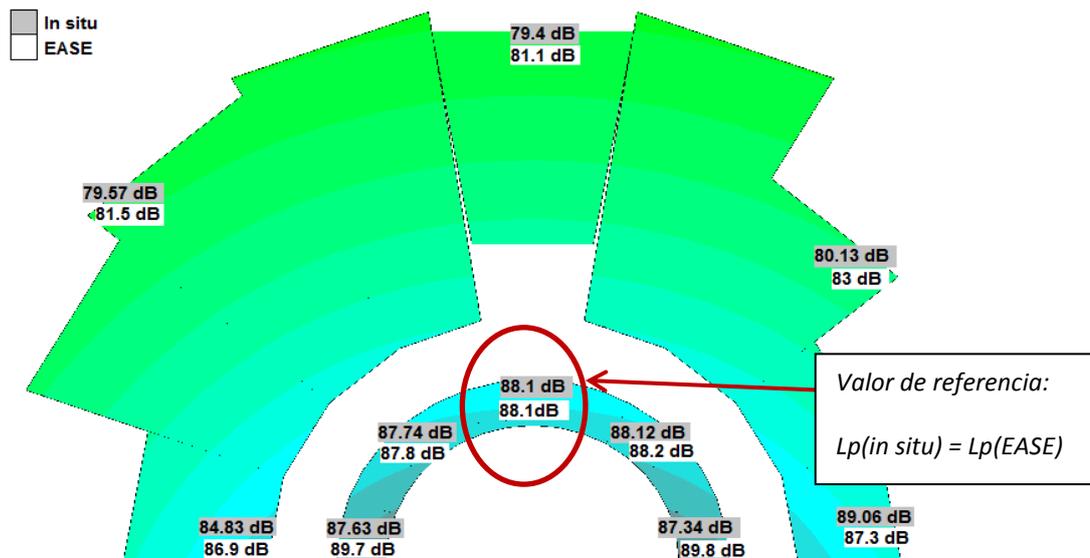


Imagen 6.8 Niveles EASE.

Asimismo, en la tabla 6.1, se presentan numéricamente los valores para las radiales que se indican, del nivel Lp en el punto de medida más cercano a la fuente (1º) y en el más lejano (2º), siguiendo la estructura de la imagen 6.8. Las columnas intermedias denominadas ‘Dif’ expresan la diferencia entre ambos puntos (1º-2º). La diferencia en dB entre el uso de un método y otro viene indicada en la última columna.

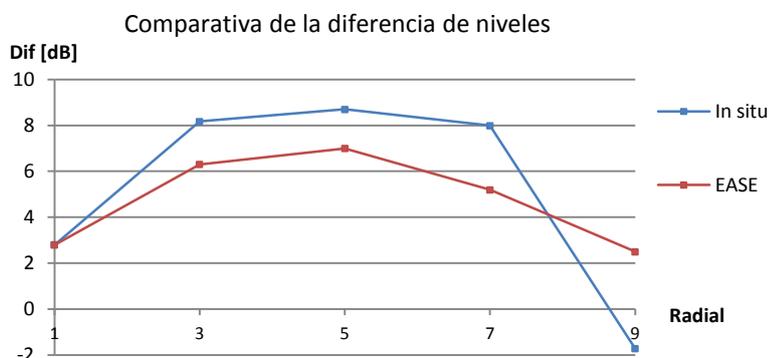
Comparativa de valores In situ/EASE							
RADIAL	In situ			EASE			Dif métodos de medida [dB]
	1º	2º	Dif [dB]	1º	2º	Dif [dB]	
1	87,63	84,83	2,8	89,7	86,9	2,8	0
3	87,74	79,57	8,17	87,8	81,5	6,3	1,87
5	88,1	79,4	8,7	88,1	81,1	7	1,7
7	88,12	80,13	7,99	88,2	83	5,2	2,79
9	87,34	89,06	-1,72	89,8	87,3	2,5	-4,22

Tabla 6.1 Comparación de resultados in situ/EASE.

En esta tabla 6.1 comparamos el nivel total medido en un punto (medidas in situ) con el nivel exclusivamente directo calculado por EASE. Obviamente es lógico que la diferencia entre niveles de ambas posiciones para cada método sea distinta:

- EASE solo considera el directo y, de manera general, coinciden los valores de las primeras posiciones con los de las medidas in situ. Estaría bien ajustado en el primer frente.
- En el segundo frente (en las posiciones más lejanas) los valores que obtenemos del EASE son aproximadamente 2 dB superiores respecto a las medidas in situ.

En relación con lo anterior puede verse que en la gráfica una comparación entre el comportamiento de la pérdida de nivel por ambos métodos.



Gráfica 6.3. Diferencia de niveles por ambos métodos.

Por otra parte, en la radial 9 encontramos un hecho especial, y es:

- Niveles in situ: la posición más alejada tiene mayor nivel que la más cercana, comportándose de manera inesperada.
- Niveles en EASE: el comportamiento se ajusta al que cabría esperar.

Anteriormente se habló sobre los reflectogramas, concretamente en el capítulo 4 cuando, a la hora de analizar el TR de ciertas posiciones obteníamos picos a determinadas frecuencias. Discutíamos entonces si podía deberse a interferencias constructivas, u otros motivos. Fue ahí, en esos casos, donde se hizo alusión a los reflectogramas que ahora podremos obtener de la simulación y que vamos a emplear, a continuación, para buscar una explicación al hecho especial de la radial 9 que acabamos de mencionar.

6.4.1 Comprobación de la radial 9 con reflectogramas

Comenzaremos primero aclarando el concepto de oyente en EASE: qué es, cómo y por qué se definen.

Se trata de posiciones concretas en las que se sitúa un oyente y en las que el programa nos permite realizar un estudio exhaustivo del comportamiento acústico en ese punto. En ese “estudio exhaustivo” se incluye la opción del trazado de rayos que fundamentalmente será el que nos resulte más útil, dado que podremos ver exactamente qué rayos llegan al oyente y sus niveles, entre otros. Este paso es necesario e importante ya que, basándonos en qué ocurre para cada oyente y conociendo qué ocurre realmente, podemos fundamentar nuestro análisis.

En la imagen 6.9, se muestran los rayos (sus niveles y retardos) que llegan a la posición de la radial 9; M44.

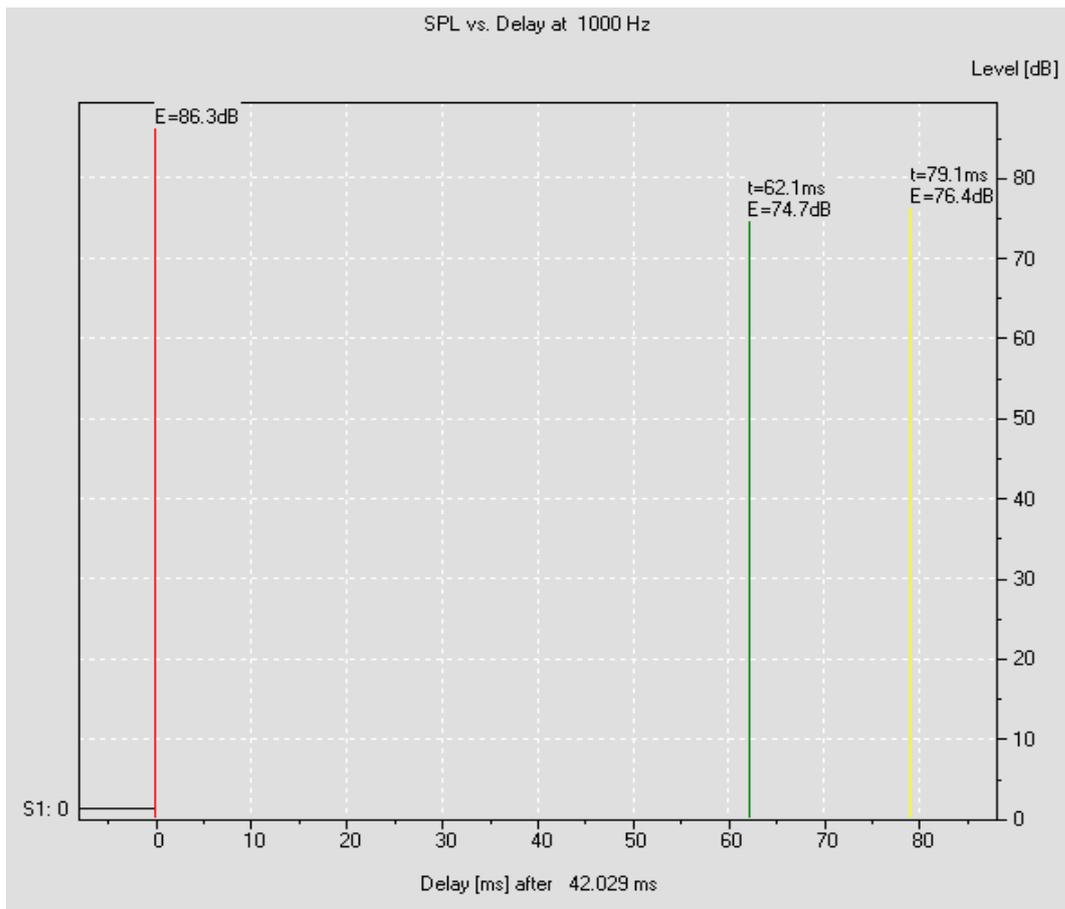


Imagen 6.9. Reflectograma M44.

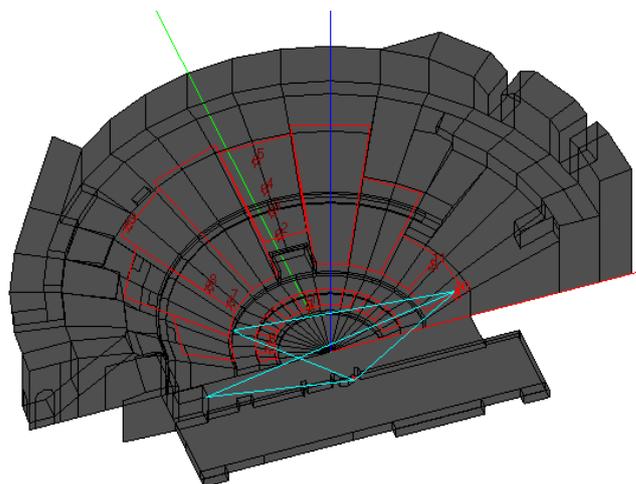


Imagen 6.10 Trazado de rayos M44.

En la imagen 6.9 podemos ver los tres rayos:

- Rayo directo: 86,3 dB.

- Rayo reflejado 1: procedente de las propias gradas de la ima cavea, de 74,7 dB.
- Rayo reflejado 2: procedente del aditus maximus y de mayor nivel que el rayo reflejado 1; de 76,4 dB.

Estos rayos reflejados que se consideran en el reflectograma explicarían porqué en M44 la inteligibilidad empeora (tenemos reflexiones ampliamente retardadas respecto al sonido directo y sus niveles también son altos). Sin embargo, no terminaría de explicar el hecho de que el nivel L_p en M44 sea mayor que en M42, por ejemplo. Si es por interferencia constructiva, lo más probable es que además de los representados, exista un rayo reflejado en el suelo de la orchestra, como ocurre en otras posiciones. Según esto, podría explicarse que en esta posición más alejada hubiera más nivel que en la más cercana donde el nivel in situ es de 87,34 dB.

En EASE tampoco se corresponde este nivel in situ de M42 con el simulado, que alcanza los 90 dB. Pero veamos qué ocurre en esta posición más cercana según el software:

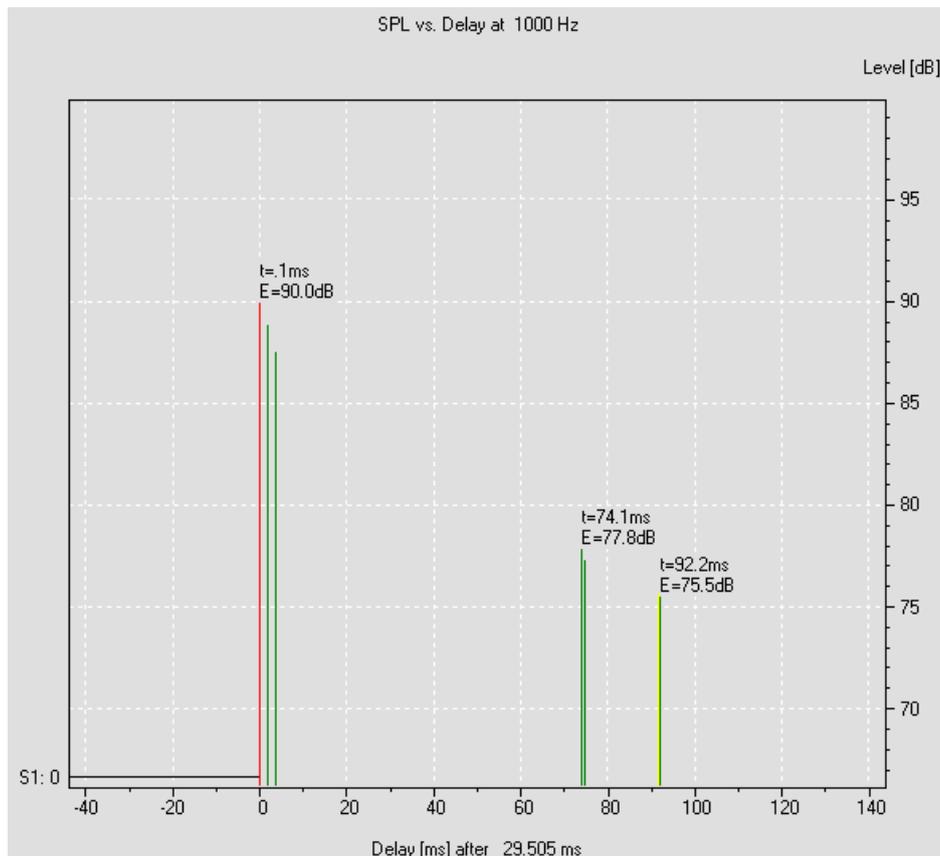


Imagen 6.11 Reflectograma M42.

Vemos que en M42 tenemos un nivel EASE de 90 dB aproximadamente. Nivel que se ve incrementado por la cantidad de reflexiones que le llegan del aditus maximus, que viene mostrada en la imagen 6.12. Sin embargo, como el sonido directo llega mucho antes que estas reflexiones, potenciado además por las reflexiones inmediatas que tienen lugar en el suelo de la orquesta, el efecto del aditus maximi no influye significativamente sobre la inteligibilidad de la palabra en esta posición. Podemos recordar que M42 estaba caracterizada por un 3,33% de AICons.

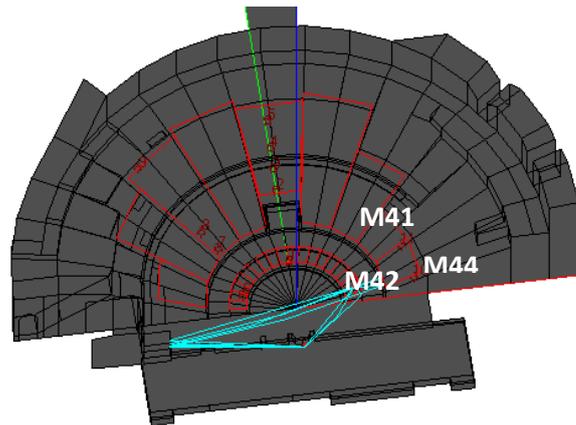


Imagen 6.12. Trazado de rayos M42.

Para terminar, en el caso de M44, al igual que si nos referimos a M41 (dos peores posiciones en cuanto a inteligibilidad), la problemática es que el sonido directo está más igualado en nivel a las reflexiones, y esto no es conveniente. Aun así, a pesar de ser los peores valores debemos aclarar que se trata de datos más que aceptables; M44 tenía un 6,37% y M41 un 6,06%.

Capítulo 7. Análisis y resultados

7.0 Introducción

Una vez validado el modelo y, conociendo respecto a las comparativas anteriores, el grado de validez de nuestro modelo EASE procedemos a simular qué pasaría si en vez de una fuente omnidireccional emitiendo fuera una persona quien, sin refuerzo sonoro y con un graderío lleno de espectadores, emitiera en lo que podemos suponer fuera una representación teatral.

Antes de nada estableceremos las características del área de audiencia, cuya absorción influirá notablemente sobre los resultados en función del número de espectadores por m². Luego procederemos a definir la fuente (voz de mujer) y a analizar los resultados.

7.1 Ocupación del recinto

Es tal la influencia de la absorción en la zona del área de audiencia (área de medida) que, si hasta ahora los cálculos para validar nuestro modelo EASE se han realizado sobre un recinto vacío (mismas condiciones que durante la toma de medidas *in situ*), ahora para simular como si el teatro estuviera lleno y ver qué ocurre, tendremos que cambiar el material de cada una de las caras del modelo donde consideremos que habrá espectadores. Rescatando la imagen 5.15 del capítulo 5, tenemos las áreas que se consideraron destinadas a espectadores.

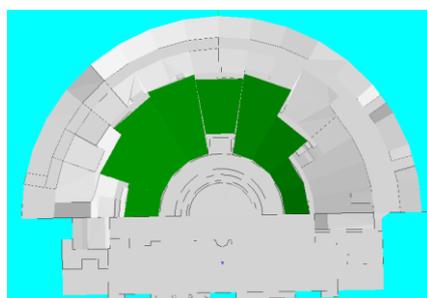
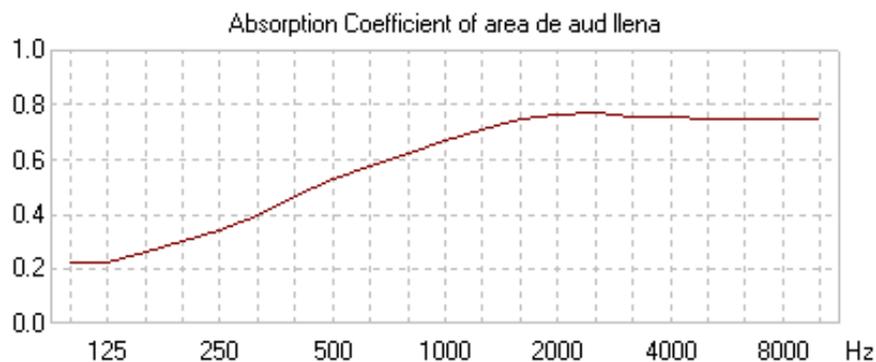
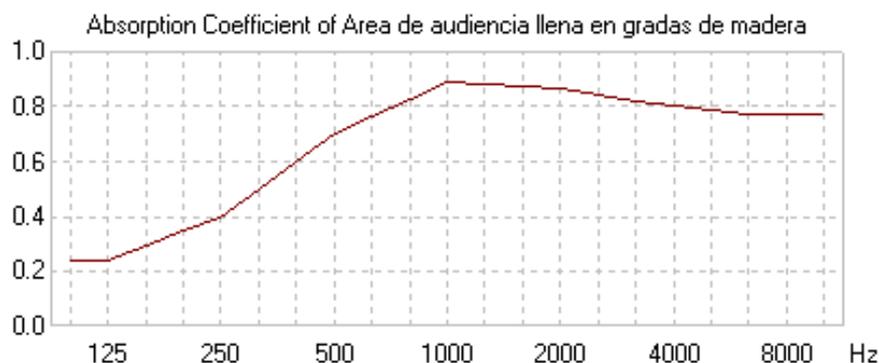


Imagen 5.15 EASE; áreas de audiencia.

Las caras definidas inicialmente en EASE que cubren estas áreas pasarán de considerarse material de granito labrado en mortero de cal (sillares del graderío), a considerarse compuestas por un material cuyos coeficientes de absorción coincidan con la absorción que produciría un conjunto de espectadores. En las gráficas 7.1 y 7.2 aparecen los valores considerados para un recinto lleno; aproximadamente dos personas por m^2 , considerando, además, que la absorción acústica no será la misma la de los espectadores que se sienten en los sillares de granito que la de los que se sienten en las gradas de madera.



Gráfica 7.1 Absorción en el área de audiencia para 2 pers/m²

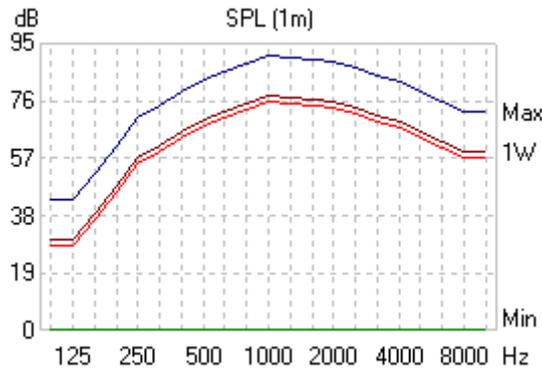


Gráfica 7.2 Absorción en el área de audiencia en las gradas de madera para 2 pers/m²

7.3 Definición de fuente: voz humana

Cambiaremos la configuración del altavoz utilizado anteriormente por una fuente con las características sonoras de una mujer, en este caso, hablando en voz media-alta

para que el público pueda escuchar. La posición de la fuente será la misma que en el capítulo anterior y configuración será la que se ve en la gráfica 7.3 y en imagen 7.1.



Gráfica 7.3 Representación frecuencial de voz de mujer.

Frequ.	Ele.Power	SPL (1m)
100 Hz	0.631	28.00
125 Hz	0.631	28.00
160 Hz	0.631	37.00
200 Hz	0.631	46.00
250 Hz	0.631	55.00
315 Hz	0.631	59.33
400 Hz	0.631	63.67
500 Hz	0.631	68.00
630 Hz	0.631	70.67
800 Hz	0.631	73.33
1000 Hz	0.631	76.00
1250 Hz	0.631	75.33
1600 Hz	0.631	74.67
2000 Hz	0.631	74.00
2500 Hz	0.631	71.67
3150 Hz	0.631	69.33
4000 Hz	0.631	67.00
5000 Hz	0.631	63.67
6300 Hz	0.631	60.33
8000 Hz	0.631	57.00
10000 Hz	0.631	57.00

Imagen 7.1 Valores en frecuencia de voz de mujer.

7.4 Resultado de parámetros

En esta sección analizaremos las siguientes características para las posiciones de interés con el recinto lleno:

- Nivel de presión sonora: sonido directo.
- Reflectogramas y trazado de rayos.

Nivel de presión sonora

Nos permite analizar hasta qué punto se cumple con los requisitos de homogeneidad en el área de audiencia, factor determinante a la hora de sonorizar cualquier recinto.

Es el nivel de presión sonora con que llega a un punto dado el sonido emitido por la fuente en su trayectoria más corta. En el caso del nivel directo, se puede considerar que un campo es uniforme cuando, a 1KHz, los valores oscilan en 3 dB; arriba o abajo. Para analizar este parámetro no es relevante el que la fuente se trate de voz de mujer o voz de hombre ya que los resultados se consideran proporcionales al nivel L_p emitido. En la siguiente imagen 7.2 se muestran los valores en distintos puntos del graderío.

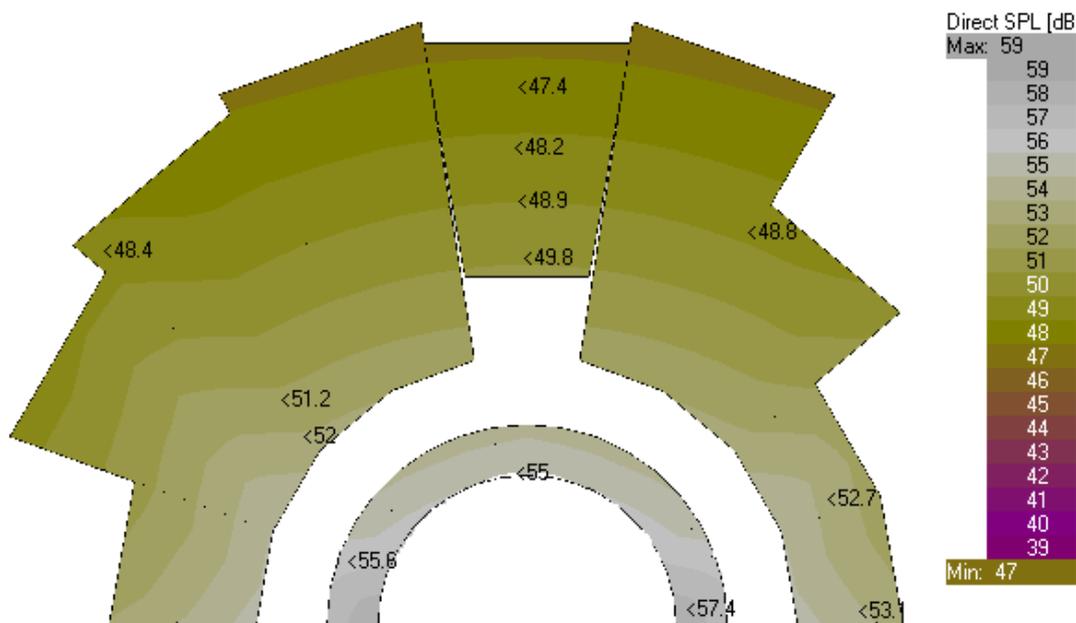
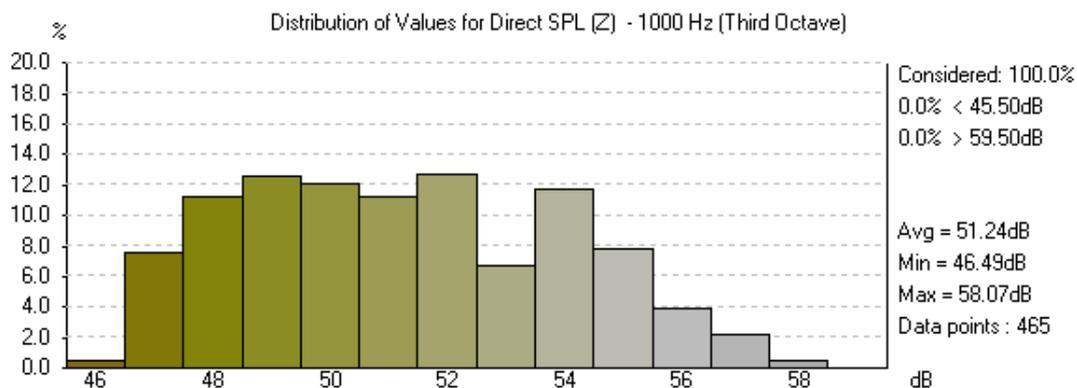


Imagen 7.2 Simulación de niveles SPL directo.

Recordamos que los valores a 1 m para la fuente de voz femenina configurada en el apartado anterior es, a 1 KHz, 76 dB (voz elevada).



Gráfica 7.4 Distribución de valores SPL directo.

Como vemos, se el campo directo no es uniforme. Aproximadamente el 50% del área de audiencia recibirá valores que oscilan entre los 50 y 54 dB de nivel directo, situándose ésta en la zona central del graderío y restando los valores superiores e inferiores a las zonas más cercanas y lejanas a la fuente, respectivamente. Sin embargo, cabe aclarar que la diferencia entre el nivel más alto y más bajo es del orden de los 10 dB, problema que se resolvería con refuerzo sonoro.

Si relacionamos el nivel directo medio obtenido a 1 KHz; 51,24 dB con el nivel de ruido de fondo a esa misma frecuencia; 40 dB, tenemos que no existe la diferencia necesaria (25 dB) entre ambos niveles para considerar un nivel de emisión de la fuente suficientemente por encima del ruido de fondo ya que incluso añadiendo a esos 51,24 dB de sonido directo, el sonido reverberante, no alcanzarían el nivel suficiente sobre el ruido de fondo. Respecto a este hecho, no sería por tanto satisfactorio el nivel de emisión de la fuente.

Reflectogramas en posiciones de interés

En esta memoria hemos considerado como posiciones de interés con la fuente de voz de mujer emitiendo a un nivel elevado: M1, M13, M26 y M44. En el Anexo 5, aparecen 13 posiciones con sus reflectogramas y trazados de rayos con la misma fuente pero hablando a un volumen normal, con la intensidad que pueda tener una conversación cualquiera. En este caso, los reflectogramas no variarán, simplemente la diferencia se encuentra en el nivel de esos rayos; para una mujer que está alzando la voz el nivel L_p en dB será superior que si está hablando normal.

Por otra parte, aclarar que M44 aunque ya se comentó anteriormente para la fuente omnidireccional, resulta un punto interesante por estar situada en la parte del graderío de madera, por tener un AICons del 6,37 % (el más alto de todas las posiciones analizadas) y por interés respecto a qué influencia pueda tener sobre ella el aditus maximi occidental.

En la imagen 7.3 podemos ver su comportamiento para la fuente de voz humana

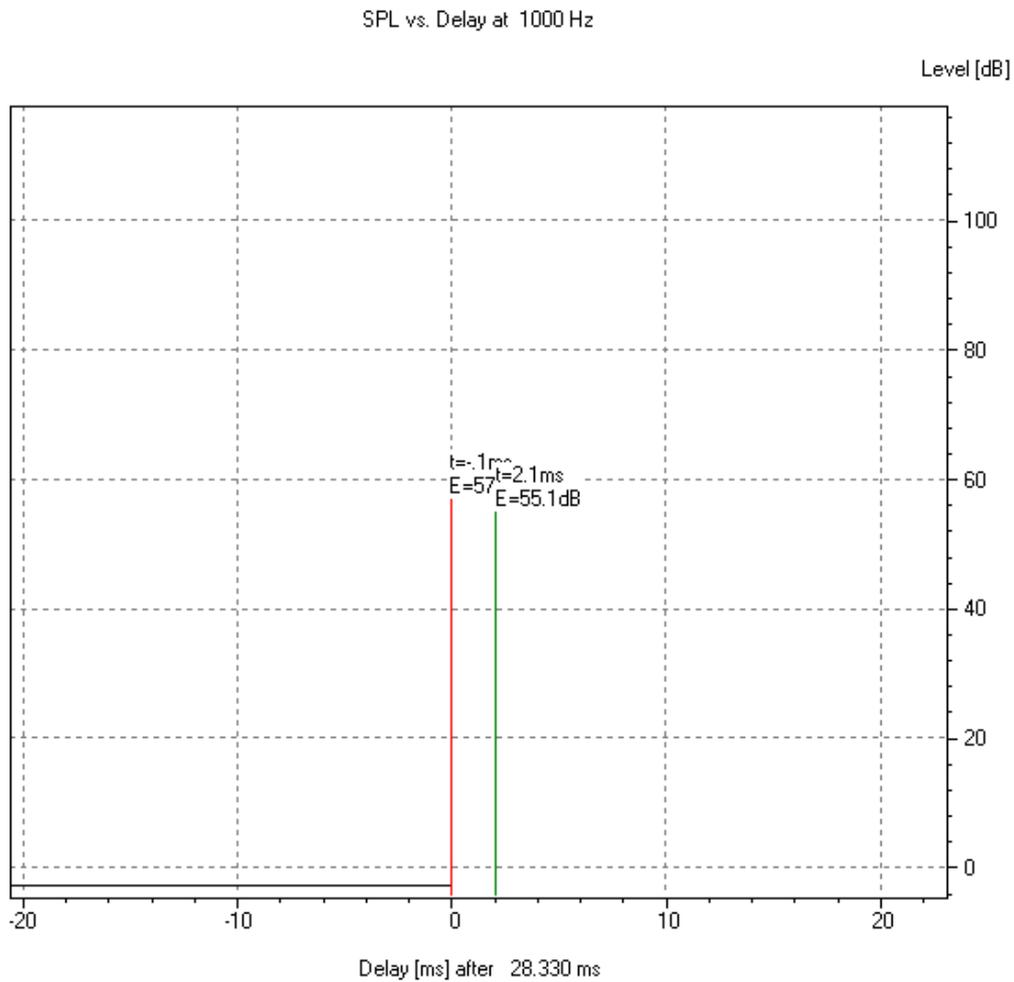


Imagen 7.3 Reflectograma M1.

Llegaría en primer lugar un rayo de 57 dB seguido, prácticamente inmediato, de otro de 55,1 dB 2,1 ms después. Aclaramos que estos no serían los niveles percibidos en esa posición, sino que el nivel percibido sería mayor a 57 dB ya que el sonido directo vendría reforzado debido al pequeño retardo con el que llega el segundo rayo reflejado. Lo que sí resulta interesante es ver dónde se producen estos dos rayos que aparecen en el reflectograma. En la imagen 7.4 tenemos el trazado de rayos.

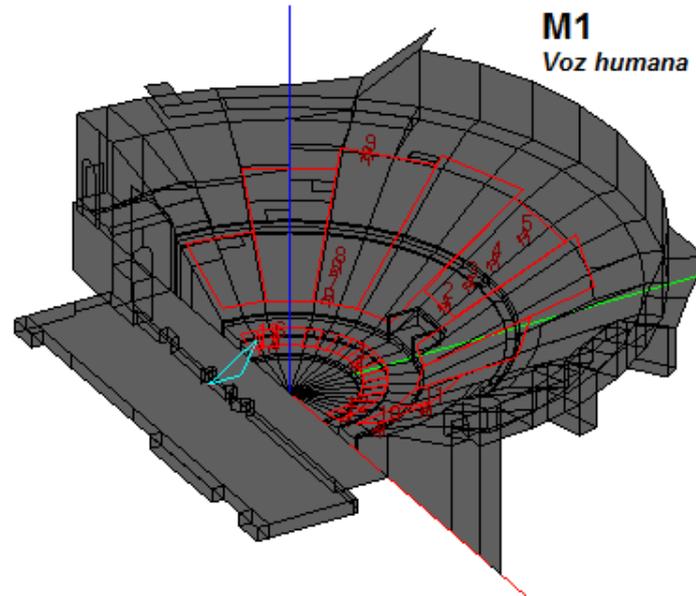


Imagen 7.4 Trazado de rayos M1.

Como cabía esperar, el comportamiento es exactamente el mismo en cuanto a reflexiones que en los casos anteriores. Existe el rayo que va desde la fuente al oyente por el camino directo y le sigue una reflexión que se produce en el suelo, frente al escenario. Este suelo está cubierto por el mármol original en su mayoría (ya que está restaurado en ciertas zonas). El efecto que crea este material es una reflexión con un nivel muy igualado al del sonido directo. Entre ambos existe una diferencia de 2 dB aproximadamente, y además prácticamente llegan simultáneamente, produciendo en la posición un incremento de la sonoridad, de manera que el espectador apreciará un buen nivel, superior al del sonido directo simplemente.

En el capítulo 4, se encontró además en M1 un pico para el valor de TR a 125 Hz. Para poder asegurar rotundamente qué ocurrió en ese punto, se necesitaría realizar más medidas y más en profundidad exclusivamente para esa posición. Sin embargo, el hecho que se muestra en la imagen 7.4, en el trazado de rayos, es que tenemos una importante reflexión en el suelo frente a la orquesta y esto corroboraría aún más lo que en ese capítulo se supuso: existe una interferencia constructiva en ese punto provocado por una reflexión que, aun no sabiendo de donde llegaba, intuíamos que existía. Por otra parte, no parece (con la seguridad que nos puede dar un simulador) que el aditus maximus cree en principio ningún efecto como tubo abierto por ambos extremos y su consecuente generación de ondas estacionarias (hipótesis que también se señaló como posible).

La posición M13 en inteligibilidad nos daba un %Alcons in situ del 5,77%. En el reflectograma que se muestra en la imagen 7.5 tenemos tres rayos, retardados entre sí entre 2 y 5 ms y cuyos niveles son inferiores a los de otras posiciones debido también a la distancia a la fuente; 27 m.

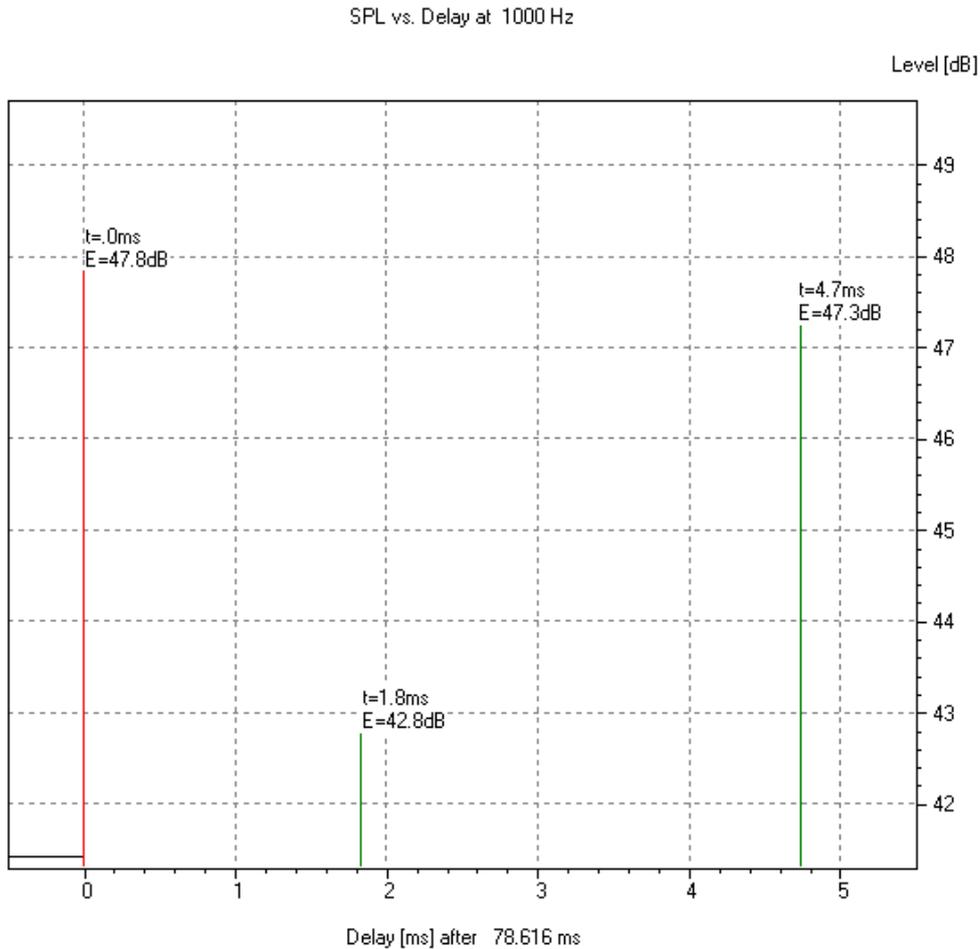


Imagen 7.5. Reflectograma M13.

En el trazado de rayos que se muestra en la imagen 7.6, vemos que el primer rayo, reflejado en el graderío (cuyos sillares son de granito pero que está lleno de espectadores los cuales son muy absorbentes), es mucho menor que el sonido directo, aproximadamente 5 dB inferior tanto con respecto al rayo directo como respecto al segundo rayo reflejado que llega del suelo de la orquesta igualado en nivel al sonido directo.

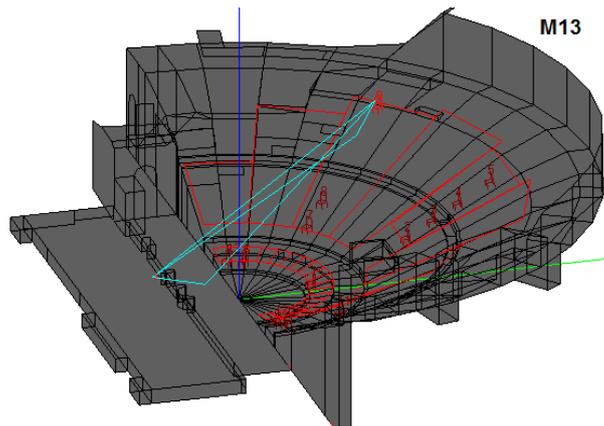


Imagen 7.6 Trazado de rayos M13.

M26

En M26 encontramos que se producen gran cantidad de reflexiones, eso sí, casi simultáneamente. Si miramos la imagen 7.7 donde aparece el reflectograma de la posición tenemos que la reflexión más tardía que contempla está a 6,1 ms a partir del sonido directo. Esto perceptiblemente es insignificante.

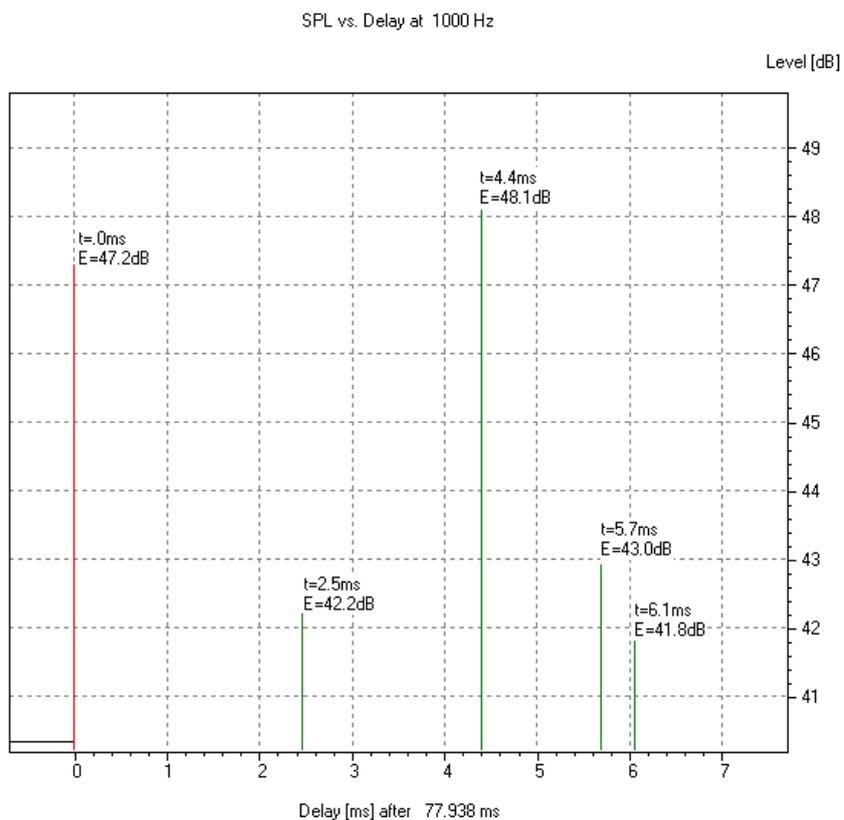


Imagen 7.7 Reflectograma M26.

Respecto a dónde se producen cada una de ellas tenemos la imagen 7.8.

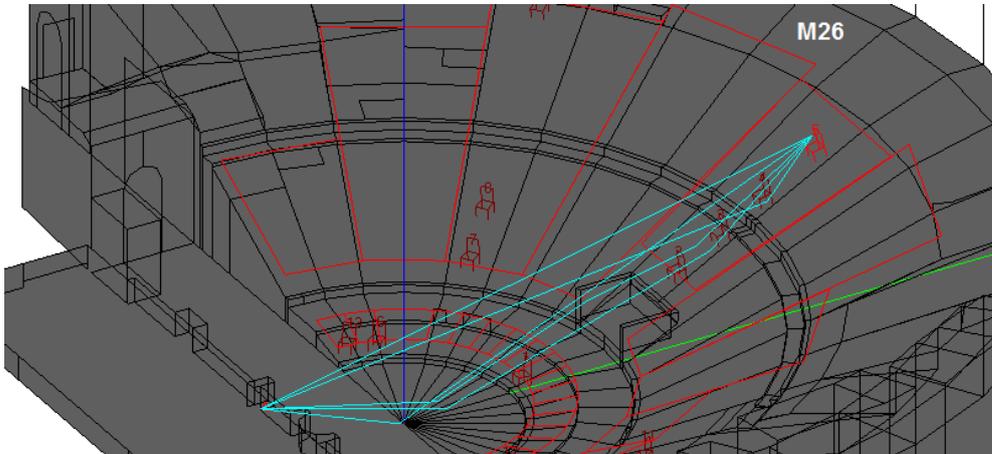


Imagen 7.8 Trazado de rayos M26.

- Sonido directo: 47,2 dB.
- Reflexión 1: Choca con los sillares de la media cavea y su nivel es 5 dB inferior al sonido directo.
- Reflexión 2: Más intensidad que las anteriores con un nivel de 48,1 dB. Este rayo llega reflejado desde la orquesta, la cual estamos viendo que tiene una gran importancia, siendo el mármol que la conforma primordial en la función de ésta.
- Resto de reflexiones: chocan primeramente con el suelo de la orquesta y después con las superficies del graderío, perdiendo respecto a las anteriores en torno a 5 o 6 dB.

Debido a que el retardo entre ellas es mínimo, todas estas reflexiones contribuirán positivamente (Del capítulo 4 tenemos que el %Alcons en M26 era del 2,86%).

M44

En la posición M44, sobre las gradas de madera, obtenemos el siguiente reflectograma:

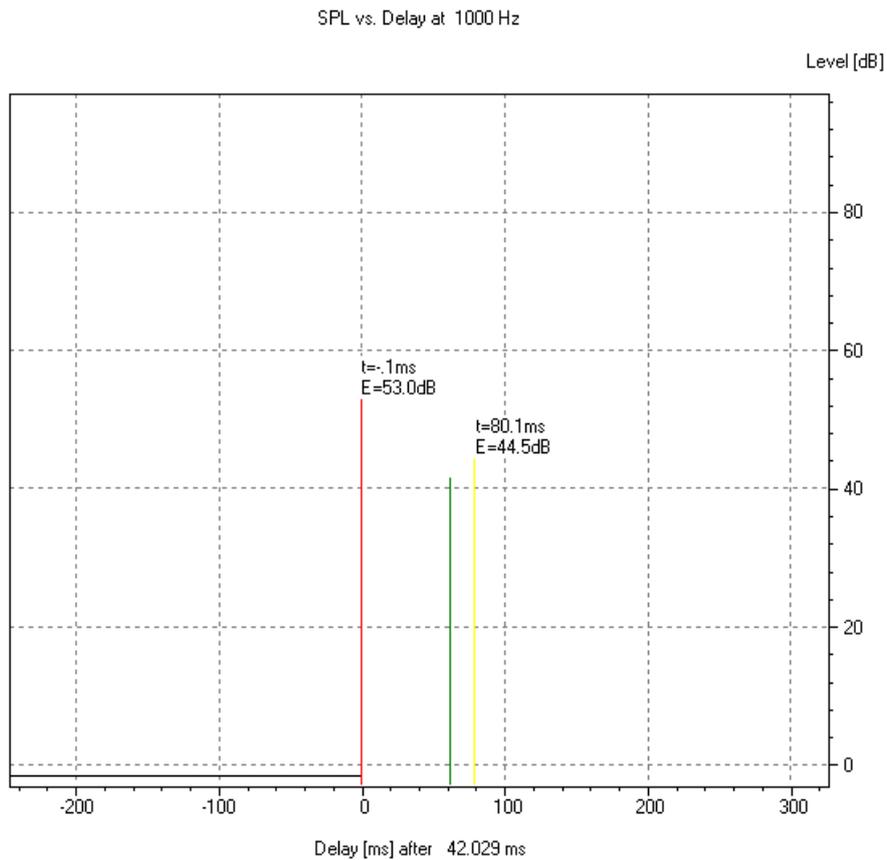


Imagen 7.9 Reflectograma M44.

De la imagen 7.9 podemos deducir que llegan rayos bastante retardados a la posición; entre 60 y 80 ms. El tiempo de integración del oído humano es 50 ms y, por tanto, todo lo que llegue después de ese tiempo será percibido por el cerebro como un sonido distinto, generando mayor confusión a la hora de escuchar. En el trazado de rayos que aparece en la imagen 7.10, observamos cómo aquí el aditus maximus sí tiene efecto sobre M44 y provoca, siendo la tercera reflexión, un nivel 3 dB mayor que la segunda.

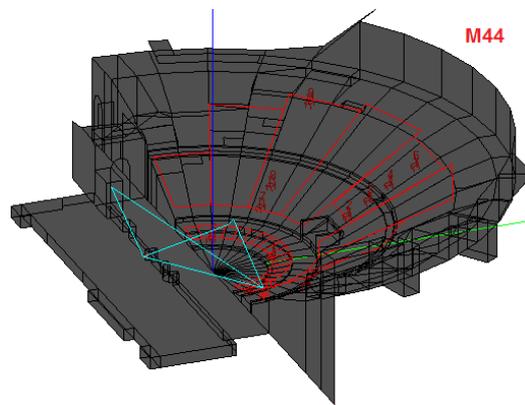


Imagen 7.10. Trazado de rayos M44.

BLOQUE III CONCLUSIONES

Capítulo 8. Valoración de resultados y conclusiones

A la hora de diseñar un teatro clásico destinado a representaciones teatrales lo que de manera incuestionable se pretendía conseguir era la buena inteligibilidad de la palabra en todas las zonas del área de audiencia. En los capítulos anteriores hemos hecho un análisis de diferentes parámetros objetivos, intentando entender y tener una visión general del comportamiento acústico en el Teatro Romano de Medellín.

¿Qué se necesita para conseguir una inteligibilidad óptima?

Los requisitos que se deben cumplir dependerán siempre del recinto en cuestión. En el caso de los teatros clásicos al aire libre, si se considera un único sonido propagándose desde la fuente sonora, el nivel de presión disminuye en 6 dB cada vez que se dobla la distancia.

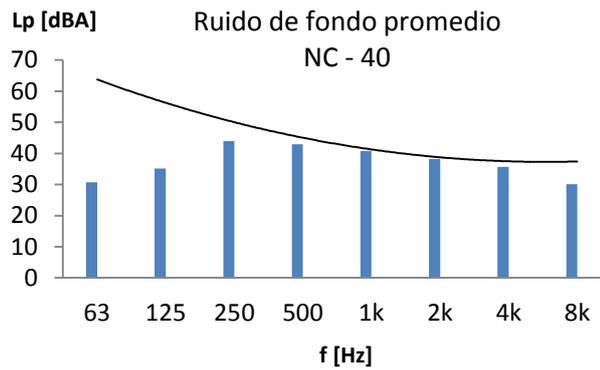
Según experimentos llevados a cabo por Kudsén [10], si nos encontramos en una zona cuyo ruido de fondo es mínimo, la máxima distancia a la que puede ser comprendido un mensaje oral es de 42 m en la dirección frontal a la fuente.

Sin embargo, podemos encontrar en la evolución historia de la acústica arquitectónica obras como el Teatro clásico de Epidauro, en Grecia, construido en el año 300 a. C. que conserva incluso a día de hoy una inteligibilidad sorprendentemente buena en el punto del graderío más alejado a la fuente (a 70 m).

Existen distintos factores que propician este hecho y entre ellos tenemos el ruido de fondo y las primeras reflexiones.

8.1 Ruido de fondo

Para conseguir tan buena inteligibilidad es un factor común la ubicación del teatro en una zona donde el ruido ambiental es extremadamente bajo. Esta condición ha sido primordial para la inteligibilidad óptima que estos recintos conseguían. Recuperando del Capítulo 4 el nivel de ruido de fondo promedio que obtuvimos (ver gráfica 4.18), podemos decir que, en el Teatro Romano de Medellín, con una curva NC40, no es el más adecuado.



Grafica 4.18 Ruido de fondo del Teatro Romano de Medellín.

Se trata de una característica difícilmente corregible, dado que viene provocada por factores externos, como ya se comentó. Por ejemplo, factores como la existencia de carreteras próximas al teatro.

También es cierto que las medidas de ruido de fondo fueron tomadas durante el día, cuando el ruido de fondo es mayor. Por tanto, con vistas a representaciones que se pudieran realizar por la noche, este nivel dado por la curva NC-40 lo más seguro es que disminuyera. La recomendación en cuanto a ruido de fondo para teatros viene dada por la curva NC30.

8.2 Reflexiones

Otro aspecto clave para entender el comportamiento acústico de este tipo de teatros es el refuerzo del sonido directo gracias a la existencia de primeras reflexiones (con retardo máximo de 50 ms respecto al sonido directo) en la zona de la orquesta, formada por un material altamente reflectante.

Teóricamente la existencia de una única primera reflexión generada por una superficie totalmente reflectante produce un incremento de 3 dB en el nivel de presión sonora. Siguiendo esto obtenemos un factor de aumento neto de la distancia límite a la que podemos escuchar igual a $\sqrt{2}$. Si antes decíamos que la distancia frontal máxima para comprender un mensaje en campo abierto era de 42 m, ahora con esta reflexión se incrementará hasta 60 m. Si además se utilizaban también otras técnicas como el uso de máscaras a modo de megáfonos, por parte de los actores, y la presencia de una pared posterior, se podría explicar casos como el de Epidauro.

Con respecto a los teatros griegos, los romanos tenían una serie de diferencias y entre ellas estaban las dimensiones más reducidas; si en el Teatro de Epidauro la capacidad era para unas 14000 personas (10 veces más capacidad que los teatros actuales), en el caso de los teatros romanos se reducían las dimensiones a recintos del orden de 6000 espectadores con el objetivo de mejorar la inteligibilidad (como el de Mérida) o 8000 espectadores (como el de Aspendos, en Turquía). El Teatro Romano de Medellín, algo más pequeño que los anteriores, tenía en su estado original capacidad para unas 3000 personas.

Sin embargo, a pesar de la importancia que tienen las primeras reflexiones en los teatros romanos, es cierto que el jugar con las que se formaban en el suelo de la orquesta era mucho más imprescindible en los teatros griegos, en los que las dimensiones eran mucho mayores. Un reflejo de ello es por ejemplo, como ya se indicó anteriormente en el documento, que en los teatros romanos la zona de la orquesta estaba ocupada por las autoridades. Estas personas absorbían el nivel de las primeras reflexiones, impidiendo que llegaran al resto del público. Todo esto además hacía que se requiriera un escenario más bajo por el tema visual; una altura entorno a los 1,4 m para teatros romanos, mientras que los griegos se situaban en torno a los 3,5 m.

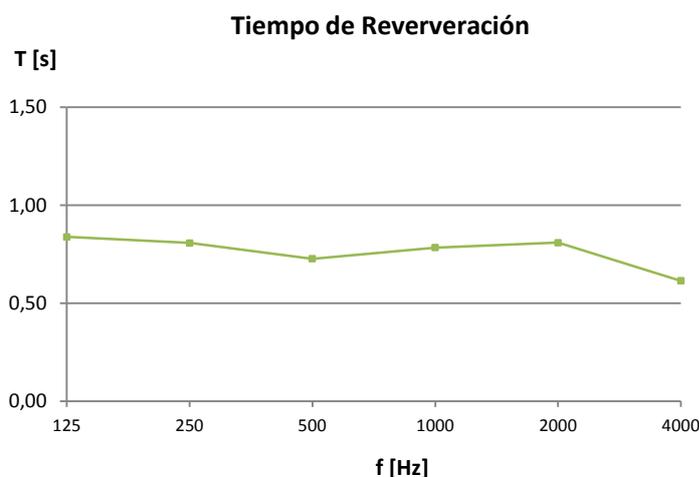
Otro factor con el que se jugaba al tener en cuenta las reflexiones era la pendiente de las gradas, pendientes pronunciadas de entre 30 y 34°, que favorecía tanto visual como acústicamente, provocando que los ángulos de incidencia de los sonidos directo y reflejado fueran mayores al incidir en el graderío, potenciando su nivel. En el nuestro caso la pendientes es del Teatro de Medellín es de 30°.

Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación como tiempo que tarda en caer el sonido 60 dB desde que la fuente cesa de emitir, viene referido a las reflexiones, claro está. Más arriba se acaba de decir que en recintos al aire libre sólo se considera el sonido directo, y que si se utilizan reflexiones para proporcionar mayor sonoridad a los espectadores, lo óptimo es conseguir que estas reflexiones lleguen antes de los 50 primeros ms, de manera que el oído pueda integrarlo.

Por todo esto, se comentó en capítulos pasados que no es del todo ortodoxo estudiar el tiempo de reverberación para este tipo de recintos abiertos, de igual manera que el EASE no lo calcula, pues es un parámetro fundamentado en teorías estadísticas que relacionan directamente el TR con el volumen del recinto.

En nuestro caso, nos desplazamos al teatro y medimos qué niveles obteníamos como tiempo de reverberación y se calculó para el Teatro Romano de Medellín un TR global de 0,76 s. En la gráfica 4.8 (Capítulo 4) se muestran de nuevo los valores por frecuencias.



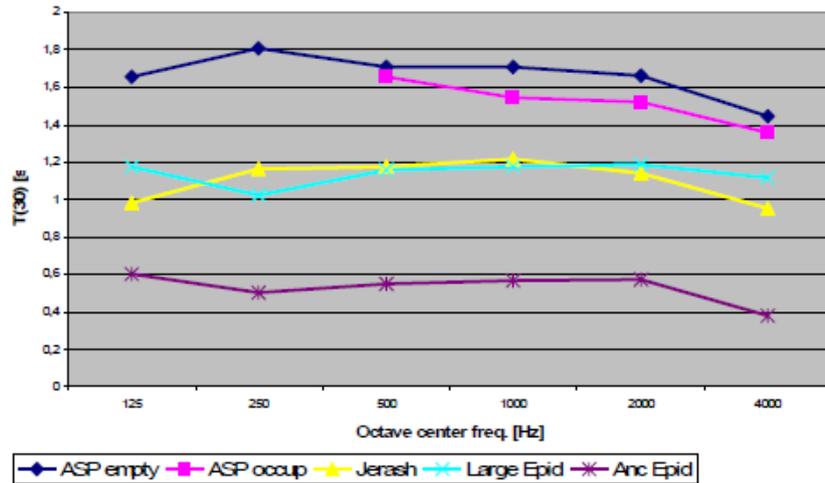
Gráfica 4.8 TR promedio

No es un tiempo de reverberación alto si se compara con otros teatros del género como por ejemplo el cercano Teatro Romano de Mérida, cuyo valor de TR es 1,3 s. Además un aspecto positivo es que se mantiene aproximadamente constante para las distintas frecuencias decayendo únicamente en las altas.

En la siguiente gráfica 8.1, tomada de un estudio de la Universidad de Dinamarca, se muestran los valores de los tiempos de reverberación en frecuencias medidos en diferentes teatros antiguos. Puede observarse que los mayores valores corresponden al Teatro de Aspendos, tanto ocupado como no (rondando los 1,6 s aproximadamente). El Gran Teatro de Epidauro (anteriormente mencionado) ronda los 1,2 s de tiempo de reverberación.

Si nos fijamos el que tiene menor TR es el Antiguo Teatro de Epidauro; sobre los 0,6 s, con una capacidad para 2000 espectadores. Es el que más se aproxima tanto en dimensiones como en TR al de Medellín.

Greek/Roman theatres; Reverb. time



Gráfica 8.1 Comparación de los tiempos de reverberación de teatros griegos y romanos [Img tomada de Acoustic Technology, Technical University of Denmark]

Otra cuestión que cabría plantearse, referida a la reverberación podría ser el efecto de la lona que se utilizaba en los teatros romanos, que no en los griegos. Se utilizaba para proteger del sol y suponemos que también el teatro de Medellín tenía una. En este TFG no valoraremos su posible efecto.

Claridad de la voz

Este parámetro está, como ya se indicó, muy relacionado con las primeras reflexiones: es la relación entre la energía que llega al oyente durante los primeros 50 ms incluido el sonido directo y la que llega después. Los valores recomendados para el parámetro C_{50} (Speech Average) dado por L.G. Marshall [2] son:

$$C_{50}(\text{Speech Average}) \geq 2 \text{ dB}$$

Cuanto mayor sean estos valores mejor será la inteligibilidad de la palabra y tendremos mayor sonoridad en el punto dado. Nosotros obtuvimos un valor C_{50} (Speech Average) para el Teatro Romano de Medellín de 7,7 dB; haciendo media de todas las posiciones medidas. Este nivel ampliamente sobrepasa esos 2 dB de límite y, por tanto, es un dato positivo en cuanto a la comprensión de la palabra en el teatro.

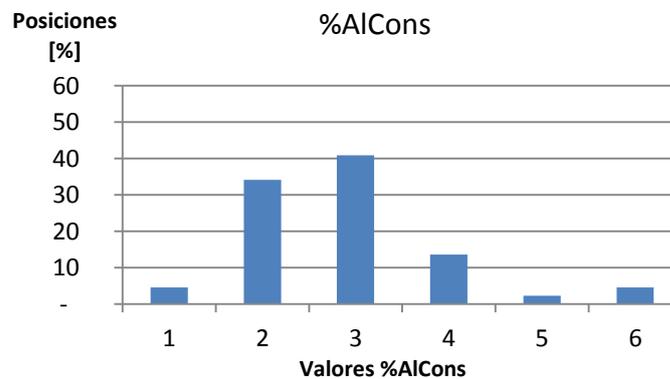
8.3 Inteligibilidad

El parámetro %Alcons se basa en la pérdida de articulación de las consonantes siendo un buen indicador de la calidad acústica y uno de los más orientativos a la hora de calificar la inteligibilidad en un recinto. En la tabla 8.1 aparecen los valores recomendados para el %Alcons.

%Alcons	VALORACIÓN
< 3%	Excelente
3%-7%	Muy buena
7% - 10%	Buena
10%-15%	Pobre
> 15%	Mala

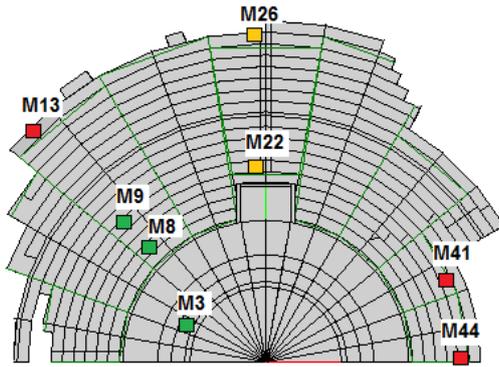
Tabla 8.1. Valores %Alcons recomendados.

La siguiente gráfica 8.2, la obtuvimos en el capítulo 4 para comparar los valores en las distintas posiciones.



Gráfica 8.2 Distribución de los valores %Alcons.

Aproximadamente un 73% de los puntos de medida disfruta de un %Alcons de entre el 2 y el 3%. Las posiciones más relevantes que consideramos en esta sección se muestran en la imagen 4.5 (Capítulo 4).



Verde: tres mejores valores.

Rojo: tres peores valores.

Amarillo: dos posiciones del eje central.

Figura 4.5 Posiciones parámetros de inteligibilidad.

Como se dijo, y es la base para la calidad acústica en cualquier recinto abierto sólo debe considerarse para tener una buena inteligibilidad el sonido directo y las primeras reflexiones que deben llegar antes de los primeros 50 ms y que reforzarán al directo.

Un ejemplo del comportamiento que se espera y que es un reflejo de la idea de los teatros romanos se puede ver en la medida M3 que se muestra en la imagen 8.1:

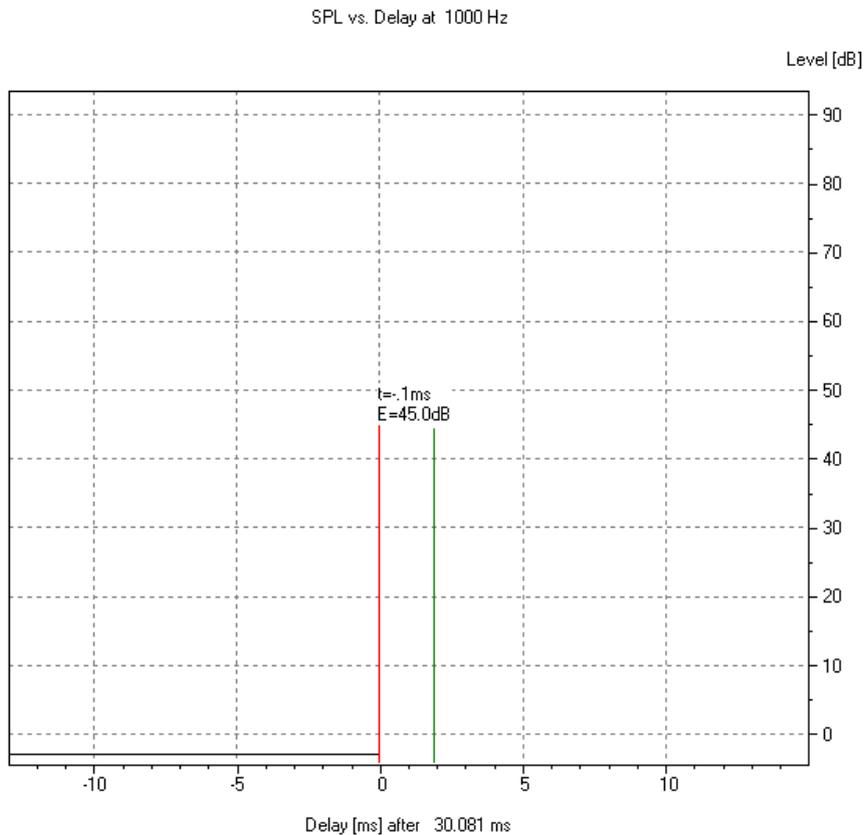


Imagen 8.1. Reflectograma M3.

El retardo entre ambos rayos es mínimo, 2 ms, y además el nivel es aproximadamente el mismo para los dos. Este hecho producirá, por tanto, un incremento de unos 3 dB en la percepción del sonido en M3.

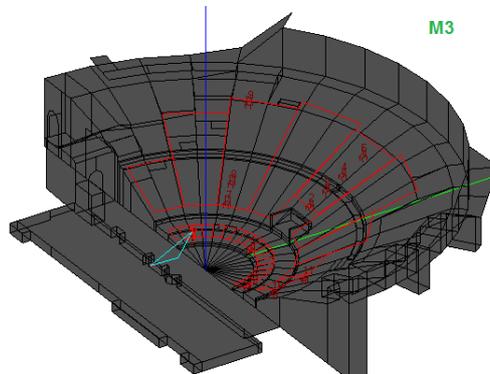


Imagen 8.2 Trazado de rayos M3.

En las tres mejores posiciones tenemos, y puede consultarse en el Anexo 7.4, que el sonido directo y la primera reflexión son del mismo nivel aproximadamente y distanciados entre sí un tiempo mínimo (entre 2 y 5 ms de retardo). Todas ellas tienen en común que esta primera reflexión se produce en el suelo de la orquesta que, por las características materiales del mármol que la conforma, refleja la onda que le llega, prácticamente sin pérdidas.

En el caso de las tres peores posiciones (de las que aun así el valor %Alcons oscila entre el 5 y 6%), por ejemplo en M44, aparecen reflexiones retardadas más de 50 ms (exactamente en 80 ms) y, aunque el nivel con el que llegan estas reflexiones es unos 9 dB por debajo del sonido directo, puede provocar una ligera pérdida de inteligibilidad respecto a las posiciones en las que no ocurre esto. Además las reflexiones llegan de las gradas de granito, la primera, y del muro del aditus maximus, la segunda. Lo vemos en la imagen 8.3.

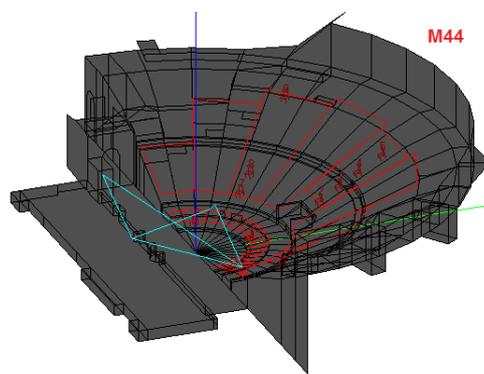


Imagen 8.3 Trazado de rayos M44.

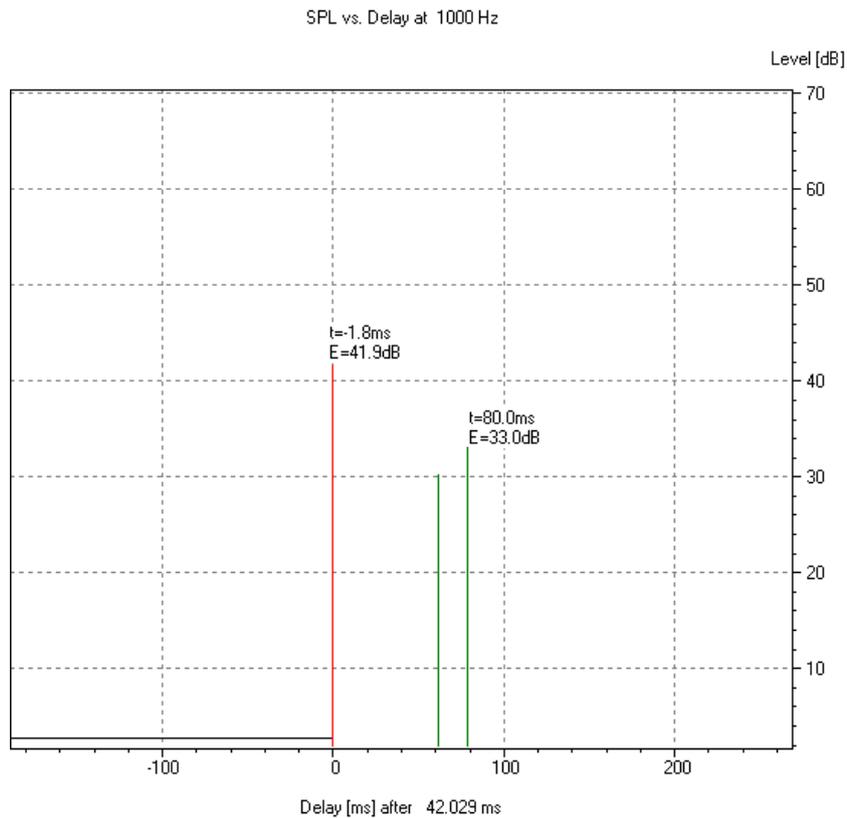


Imagen 8.4 Reflectograma M44.

Es importante aclarar el hecho de si tiene relación o no que M44 y M41, cuyos %Alcons son los más altos, estén localizados en la zona del graderío de madera. Dado que para los teatros al aire libre solo se cuenta con el rayo directo y las primeras reflexiones, no es significativo el hecho de que estas gradas sean de madera, ya que ninguna de las reflexiones que pueden tenerse en cuenta vendrán reflejadas por este material, si no que llegarán del suelo de la orquesta o por ejemplo, por parte del aditus maximus, como es el caso de M44.

Pero entonces cabría plantearnos *¿Por qué ‘casualmente’ los peores valores de Alcons los encontramos aquí, en la única zona donde el graderío está reconstruido en madera?* Posiblemente, y parece la opción más lógica después de analizar el trazado de rayos de estas posiciones, se deba a que:

- Al lado oriental (gradas de madera, posiciones M44 y M41) llegan reflexiones del graderío que se encuentra a la misma altura pero en el lado opuesto, en el occidental (que es de granito).
- En este lado occidental (posiciones M8, M9) por el contrario, encontramos los mejores valores de %Alcons. Quizá se deba a que las reflexiones que le podían llegar del lado oriental, quedan atenuadas

porque las gradas en vez de ser reflectantes son de madera de las vías del tren, altamente absorbentes.

La cuestión es, si esto es cierto, *¿No conocían los romanos este hecho? ¿Por qué no decidieron que el graderío fuera de madera y evitar las reflexiones de los sillares?* Para responder a esta pregunta debemos recordar lo que anteriormente se explicó:

Las reflexiones (relacionadas con el TR) pueden conseguir aportar más sonoridad a un recinto, pero a costa de una pérdida de inteligibilidad. Por eso, la clave es alcanzar un compromiso entre ambos: sonoridad para que pueda llegar el sonido a todos los espectadores (más necesaria a medida que las dimensiones del recinto aumentan) e inteligibilidad (pilar básico en los teatros y que empeora a medida que aumenta el TR, las reflexiones).

En el diseño de un teatro este compromiso es primordial. Tenemos que las dimensiones actuales de la cavea son de unos 22 m. Realmente no estamos ante un teatro de grandes dimensiones, pero aun así resulta importante que existan reflexiones que aporten sonoridad y viveza al recinto, más teniendo en cuenta que a pesar de existir estas reflexiones por parte del graderío, la inteligibilidad sigue siendo más que buena.

Finalmente sobre posibles modificaciones acústicas como podría ser la instalación de una concha acústica en el escenario o un sistema de refuerzo sonoro, decir que podría utilizarse de manera que se favorecieran los niveles, la inteligibilidad o la reverberación de acuerdo con las necesidades de cada función que se representara.

Sin embargo, sobre todo por el tema de la reverberación, a pesar de que en nuestro recinto concreto no sea muy alta, debe ponerse especial atención, pues estos recintos fueron diseñados pensando únicamente en fuentes sonoras humanas y no precisamente teniendo en cuenta la posibilidad de un sistema de refuerzo sonoro. Por tanto, llegado el caso se deberán tomar las consideraciones oportunas evitando la aparición de ecos y otros efectos indeseados que hoy por hoy no existen en el teatro, y que mismamente en un intento por mejorarse, pueden llevarnos a situaciones que empeoren las condiciones actuales.

De cualquier manera, éste no es nuestro tema de estudio, aunque es una cuestión que podría contemplarse con vistas a una interesante continuación que abarcara todos estos aspectos.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. REDONDA FERNÁNDEZ. Evolución histórica desde la antigüedad hasta su actual integración en los procesos constructivos (Universidad da Coruña, TFG Julio 2013).
- [2] L.G. MARSHALL. *Experience with early-to-late reverberation ratios as a measure of auditorium acoustics* (J. Acoust. Soc. Am. 89, 1991).
- [3] M. RECUERO LÓPEZ. *Ingeniería Acústica* (Paraninfo, 1999).
- [4] V. MORGADO SERRANO. *Estudio de las características acústicas del Teatro Romano de Mérida y su entorno*, Universidad de Extremadura (Extremadura, 2005).
- [5] A. CARRIÓN. Diseño acústico de espacios arquitectónicos (Universidad Politécnica de Cataluña, 1998).
- [6] HOMERO. La Ilíada (s. VIII a. C.)
(<http://www.ecdotica.com/biblioteca/Homero%20-%20La%20II%C3%ADada.pdf>).
Última visita: 05/07/2014.
- [7] J. VERA GUARINOS. Perspectiva histórica de la acústica, Universidad Nacional de Rosario (Argentina, 1996).
(<http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/histacus.pdf>). Última visita: 05/07/2014.
- [8] VITRUBIO. De arquitectura, libro V, capítulos IV y VIII, s. I a. C.)
- [9] L.L. BERANEK. *Music, Acoustics and Architecture* (New York, 1962).
- [10] H. KNUDSEN. *Acoustical Designing in Architecture*. (1950).
- [11] M. RECUERO LÓPEZ Y C. GIL GONZÁLEZ. *Acústica Arquitectónica*. (Madrid, 1991).
- [12] M. del AMO. El Teatro Romano de Medellín, separata de las Actas del Simposio: El Teatro Clásico en la Hispania Romana (Badajoz, 1982).

- [13] M. ALMAGRO GORBEA. Medellín-Conisturgis: Reinterpretación Geográfica del Suroeste de Iberia, Boletim da Sociedades de Geografia de Lisboa, serie 126ª, nº 1-12, p. 84-115 (2008).
- [14] S. HABA QUIRÓS. Medellín Romano. La Colonia Metellinensis y su Territorio, Departamento de publicaciones de la Diputación Provincial de Badajoz (1998).
- [15] P. MATEO, Y. PICADO. El Teatro Romano de Metellinum. (Badajoz, 2008).
(https://www.academia.edu/3531837/El_teatro_romano_de_Metellinum_Medellin_Badajoz). Última visita: 13/07/2014.
- [16] P. P. GARCÍA LOPE. Acondicionamiento Acústico del Aula 105 de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, Universidad de Sevilla.
(<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4393/fichero/Capitulo+2%252FCapitulo+2.pdf>).
Última visita: 12/07/2014.
- [17] M. BARRON. Auditorium Acoustics and Architectural Design (Ed. E& FN Spon, 1993).
- [18] J. C. PRIETO HERNÁNDEZ. Estudio acústico de la Sala 25 de los Cines Kinépolis, Universidad Carlos III de Madrid (Madrid, 2011).
- [19] A. C. GADE, K. ANGELAKIS. Acoustics of ancient Greek and Roman theatres in use today, University of Denmark (Denmark, 2006).
- [20] M. C HARRIS. Manual de medidas acústicas y control del ruido. 3ª Ed. (Madrid, 1995).
- [21] C. G. GARCÍA. Base de datos de coeficientes de absorción sonora de diferentes materiales, Asociación Argentina de Mecánica Computacional (Argentina, 2013)
(<http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/4527/4456>). Última visita: 19/06/2014.
- [22] M. A. GARCÍA CÉSPEDES. Diseño de un difusor acústico. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (Méjico, 2010).
(http://www.arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_237.pdf).
Última visita: 03/06/2014.

PLANOS

PLIEGO DE CONDICIONES

En esta sección se especificarán los requisitos necesarios de software y hardware para llevar a cabo el estudio.

1. Especificaciones hardware para el estudio acústico

El sistema mínimo necesario requiere:

- Ordenador personal que disponga como mínimo de las características que se detallan en la tabla PC1.

Procesador	Tecnología Intel con Procesador Intel Pentium® Dual Core T4200 (2,0 GHz, FSB 800 MHz, 1 MB L2)y chipset Intel® GM45"
Memoria principal	4 GB RAM (2+2 GB) DDR2 800 MHz.
Disco duro	250 GB Serial ATA. (5.400 rpm)
Tarjeta gráfica	ATI Mobility Radeon™ HD 4570con tecnología HyperMemory™ de hasta1.789 MB (512 MB dedicados + hasta 1.277 MB compartidos)
Interfaces	1 × Ranura multitarjetas 4-en-1 (soporte Tarjetas SD™ hasta 16 GB, Memory Stick® hasta 256 MB, Memory Stick Pro™ hasta 2 GB y MultiMedia Card™ hasta 2 GB) 2 × USB 2.0
Comunic. sin cables	Compatibilidad : Wi-Fi® Soporte de red : 802.11b/g/n Wireless Technology : Wireless LAN
Comunic. con cables	Tipología : Fast Ethernet LAN Velocidad : 10BASE-T/100BASE-TX

Tabla PC1. Requisitos Ordenador portátil.

2. Especificaciones software para el estudio acústico

Para poder realizar el estudio es necesario un hardware como el anterior capaz de soportar:

- Sistema Operativo: Windows® 7 Home Premium.
- Autodesk: AutoCad® 2007
- Microsoft® Office 2007.
 - Word: para la redacción del TFG.
 - PowerPoint: presentación TFG.
 - Excel: tratamiento de los datos.
- Software de Ingeniería Acústica Dirac® versión 4.1 Tipo 7841, de *Brüel & Kjaer*.
- Software de simulación acústica EASE® 4.3, de Ahnert Feistel Media Group.

3. Equipos de trabajo para medidas acústicas

Para realizar las medidas in situ se deberá disponer de manera obligatoria de equipos que, como mínimo, brinden los mismos servicios que:

- Sonómetro B&K 2250.
- Fuente B&K Omnipower 4296.
- Amplificador de potencia B&K 2716.
- Receptor y Transmisor inalámbrico Samson.

PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

M^a Luisa Barragán Pulido, autora del presente Trabajo Fin de Grado, declara que:

El Trabajo Fin de Grado con título: “Análisis Acústico del Teatro Romano de Medellín”, desarrollado en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones y Electrónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, tiene un coste de desarrollo total de 16.825,00 € correspondiente a la suma de las cantidades consignadas a los apartados considerados a continuación.

Fdo.: M^a Luisa Barragán Pulido.

Las Palmas de Gran Canaria, a 18 de julio de 2014.

1. Desglose

Este presupuesto ha sido realizado siguiendo las recomendaciones del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT) sobre baremos orientativos mínimos para trabajos profesionales en 2009.

Los distintos costes asociados al Trabajo Fin de Grado, cuya duración ha sido fijada en 5 meses, se han desglosado en varias secciones como sigue:

- Recursos materiales.
- Trabajo tarifado por tiempo empleado.
- Costes de redacción del TFG.
- Material fungible.
- Derechos del visado del COIT.
- Gastos de tramitación y envío.
- Aplicación de impuestos.

2. Recursos materiales

Entre los recursos materiales utilizados para la realización de este TFG se incluyen las herramientas software para el desarrollo del estudio, los paquetes utilizados para la redacción de la memoria y el sistema operativo. Asimismo, se incluyen los equipos hardware utilizados para dar soporte a estas herramientas.

Se estipula el coste de amortización para un período de tres años, empleando un sistema de amortización lineal, en el que se supone que el inmovilizado material se deprecia constantemente a lo largo de su vida útil. La cuota de amortización lineal viene dada por la siguiente expresión:

$$Cuota\ anual = \frac{Valor\ de\ adquisición - Valor\ residual}{Número\ de\ años\ de\ vida\ útil}$$

Donde:

Valor residual = valor teórico que se supone que tendrá el elemento después de su vida útil.

Recursos hardware

Las herramientas hardware que se han utilizado han sido:

- Ordenador portátil Toshiba Satellite L500:
 - Procesador: Intel Pentium Dual Core T4200.
 - RAM : 4GB.
 - Disco duro: 250 GB Serial ATA. (5.400 rpm).
 - Tarjeta gráfica: ATI HD4570 512MB dedicados.

Costes de las herramientas hardware			
Descripción	Coste total (€)	Valor residual a 3 años (€)	Valor amortización a 5 meses (€)
Ordenador portátil	599,00	200,00	55,42
Total costes (€)			55,42

Tabla P1. Costes de herramientas hardware.

Recursos software

Las herramientas software utilizadas fueron:

- Sistema Operativo: Windows® 7.
- Autodesk: AutoCad 2007
- Microsoft Office® 2007.
 - Word: redacción del TFG.
 - PowerPoint: presentación TFG.
 - Excel: tratamiento de los datos.
- Software de Ingeniería Acústica Dirac versión 4.1 Tipo 7841, de *Brüel & Kjaer*.
- Software de simulación acústica EASE 4.3, de Ahnert Feistel Media Group.

Costes de las herramientas hardware			
Descripción	Coste total (€)	Valor residual a 3 años (€)	Valor amortización a 5 meses (€)
Windows® 7	200,00	0	27,77
Microsoft Office® 2007	250,00	0	34,72
AutoCad® 2007	1.910,00	0	265,27
Dirac versión 4.1	3.100,00	0	430,55
EASE 4.3	1.760,00	0	244,44
Total costes (€)			1002,75

Tabla P2. Costes recursos software.

3. Trabajo tarifado por tiempo empleado

Como se expuso anteriormente, se seguirán las recomendaciones del COIT para calcular el importe de las horas de trabajo empleadas. Fijando la duración de las tareas de especificación, desarrollo y documentación del TFG en 300 horas, se aplica:

$$H = C_t \cdot 74,88 \cdot H_n + C_t \cdot 96,72 \cdot H_e$$

Donde:

H = honorarios totales por el tiempo dedicado.

H_n = horas trabajadas dentro de la jornada laboral.

H_e = horas especiales.

C_t = factor de corrección, función del número de horas trabajadas.

Todas las horas invertidas se consideran dentro del horario laboral normal.

Según el COIT el factor C_t tiene un valor variable en función del número de horas empleadas dado por la tabla P3.

Horas empleadas	Factor de corrección (C_t)
Hasta 36 h	1,00
36 a 72 h	0,90
72 a 108 h	0,80
108 a 144 h	0,70
144 a 180 h	0,65
180 a 360 h	0,60
360 a 540 h	0,55

Tabla P3. Valor del factor de corrección.

Para este estudio, el valor del factor de corrección es $C_c=0,60$ y, por tanto, la expresión anterior queda:

$$H = 0,6 \cdot 74,88 \cdot 300 = 13.478,40 \text{ €}$$

Los honorarios totales por tiempo dedicado libres de impuestos ascienden a *trece mil cuatrocientos setenta y ocho euros con cuarenta céntimos (13.478,40€)*.

4. Costes de redacción del TFG

El importe de redacción se calcula siguiendo la expresión:

$$R = 0,07 \cdot P \cdot C_n$$

Donde:

P =presupuesto.

C_n =coeficiente de ponderación en función del presupuesto.

En la tabla P4 se muestra el presupuesto calculado hasta el momento.

Descripción	Costes (€)
Recursos hardware	55,42
Recursos software	1.002,75
Trabajo tarifado por tiempo empleado	13.478,40
Total de costes (€)	14.536,57

Tabla P4. Costes de ejecución material.

Como el coeficiente de ponderación para presupuestos menores de 30.050,00 € viene definido por el COIT con un valor de 1, el coste derivado de la redacción del TFG es de:

$$R = 0,07 \cdot 14.536,57 \cdot 1,00 = 1.017,60 \text{ €}$$

Por tanto, el coste libre de impuestos derivado de la redacción del TFG es de *mil diecisiete euros con sesenta céntimos (1.017,60 €)*.

5. Material fungible

En la tabla P5, se relaciona el material fungible empleado en la realización del TFG.

Descripción	Costes (€)
Folios	15,00
Encuadernación	10,00
Impresión	40,00
Impresión gran formato	10,34
Total de costes(€)	75,34

Tabla P5. Costes del material fungible.

6. Derechos del visado del COIT

Todos los cálculos son orientativos y se han añadido, también, los derechos de un supuesto visado por el COIT. Los gastos de visado del COIT se tarifican mediante la siguiente expresión:

$$V = 0,006 \cdot P \cdot C_v$$

Donde:

P = presupuesto del TFG.

C_v = coeficiente reductor en función del presupuesto del trabajo.

El presupuesto P calculado hasta el momento es suma de ejecución material, de redacción y de material fungible:

$$P = 14.536,57 + 1.017,60 + 75,34 = 15.629,51 \text{ €}$$

Como el coeficiente de ponderación para presupuestos menores de 30.050,00 € es igual a 1,00, según el COIT, el coste de los derechos de visado del trabajo asciende a:

$$V = 0,006 \cdot 15.629,51 \cdot 1,00 = 93,78 \text{ €}$$

El coste de los derechos de visado es asciende a *noventa y tres euros con setenta y ocho céntimos (93,78€)*.

7. Gastos de tramitación y envío

Los gastos de tramitación y envío están fijados en 6,01 €.

8. Aplicación de impuestos

El coste total de la realización del Trabajo Fin de Grado, antes de aplicarle los correspondientes impuestos, es de 15.724,30 €, a lo que hay que sumarle el 7% de I.G.I.C. quedando el coste definitivo como se indica en la tabla P6.

Costes totales del TFG		
Descripción	Coste parcial (€)	Total (€)
Recursos materiales		1.058,17
Hardware	55,42	
Software	1.002,75	
Coste de ingeniería		13.478,40
Coste de redacción		1.017,60
Material fungible		70,34
Derechos de visado		93,78
Tramitación y envío		6,01
Subtotal		15.724,30
Aplicación de impuestos (7% I.G.I.C.)		1.100,70
Total costes (€)		16.825,00

Tabla P6. Costes totales del TFG.

El presupuesto total asciende a la cantidad de *dieciséis mil ochocientos veinticinco euros (16.825,00 €)*.

Fdo.: M^a Luisa Barragán Pulido.

Las Palmas de Gran Canaria, a 18 de julio de 2014.

ANEXO 1. CONCEPTOS

La finalidad de este anexo consiste en explicar de manera sencilla y resumida los parámetros analizados en la memoria del TFG.

Para un recinto como el dado, un teatro, estos parámetros serán fundamentalmente los relacionados con la palabra, de manera que un oyente desde cualquier punto pueda no sólo oír, sino además entender.

Existen muchos más conceptos y parámetros en los que podríamos invertir mucho tiempo, sin embargo, aquellos que se han considerado como imprescindibles y base para poder comprender lo que se expone en la memoria, son los que a continuación se relacionan.

1. Factores que influyen en la inteligibilidad de la palabra

a. Ruido de fondo

Se considera señal útil al sonido directo junto con las primeras reflexiones. Para una correcta comprensión del mensaje vocal, será necesario que esta señal útil supere al nivel de ruido de fondo.

Un criterio para conocer hasta qué punto el ruido de fondo puede ser molesto para el oyente es mediante la comparación de los niveles de ruido de fondo con las curvas estandarizadas Noise Criteria (conocidas como curvas NC). Cada sala o tipo de recinto se caracteriza por una curva NC y tiene en cuenta la distinta sensibilidad auditiva frente a la frecuencia (Nivel sonoro equivalente).

Tipos de recintos	Curva NC	Equivalencia en dBA
Sala de ordenadores	35-45	46-55
Despachos/ bibliotecas	30-35	42-46
Salas de conferencias Aulas	20-30	33-42

Tabla A1.1 Valores recomendados de ruido de fondo.

Este parámetro además de tener que estar 25 dB por debajo del nivel de presión sonora para cumplir con los requisitos mínimos de calidad acústica deberá tener unos valores máximos dependiendo del tipo de sala. En nuestro caso deberá encontrarse en la curva NC 30.

b. Nivel de reverberación

Un requisito indispensable para la buena inteligibilidad de la palabra es que el nivel de la señal esté por encima del nivel del sonido reverberante. El nivel reverberante depende de los materiales utilizados en las superficies del recinto. Su valor disminuye cuanto más absorbentes sean estas superficies, y aumenta con el volumen del recinto.

Es un parámetro que puede emplearse para modificar la característica del recinto que nos interese de manera que:

- Si buscamos buena inteligibilidad: debemos disminuir la reverberación
- Si buscamos mayor sonoridad: debemos aumentarla.

La reverberación, por tanto, es una característica buena o mala en función del uso del recinto en cuestión.

c. Anomalías acústicas

Existen diferentes anomalías acústicas que pueden perjudicar seriamente la comprensión del mensaje, además de resultar molestas. De modo que resulta interesante poder detectarlas para eliminarlas o reducirlas en la medida de lo posible. Entre estas anomalías que se consideran de diseño encontramos:

- Ecos
- Focalizaciones del sonido
- Efecto Seat dip.

d. Directividad de la voz

Se trata de una característica intrínseca del sistema de fonación humano, en el que la potencia radiada es máxima en la dirección frontal y mínima en la dirección posterior. Además, esta característica aumenta con la frecuencia.

e. Características del mensaje vocal

En general, una palabra consta de vocales y consonantes. Cada una de ellas tiene una característica específica:

- Una vocal posee componentes en baja frecuencia, un nivel sonoro 12dB superior al de una consonante y de mayor duración (90 ms). Por ello, aportan nivel a la voz, siendo máxima su contribución en la banda de 500 Hz.
- Una consonante presenta una mayor aportación de altas frecuencias, una menor duración (20 ms) y un nivel sonoro inferior. Puesto que la inteligibilidad de la palabra radica en la correcta percepción de las consonantes, es de vital importancia percibir bien las altas frecuencias.

En la tabla A1.1 aparece una clasificación por bandas de octava de la contribución a la inteligibilidad de la palabra y al nivel sonoro:

Frecuencias (Hz)	250	500	1k	2k	4k
Nivel sonoro	22%	46%	20%	3%	2%
Inteligibilidad	5%	13%	20%	31%	26%

Tabla A1.2 Clasificación por bandas de octava a la inteligibilidad de la palabra y al nivel sonoro.

2. Parámetros acústicos

Para examinar si un recinto cumple los objetivos acústicos necesarios para el correcto desempeño de la función que tiene asignada, se utilizan dos métodos de análisis complementarios:

- Análisis objetivo: parámetros acústicos
- Análisis subjetivo: auralización.

En nuestro caso no abarcaremos el análisis subjetivo, si no que nos centraremos en el análisis de los parámetros acústicos. A continuación, se relacionan los que para nuestro caso resultan de mayor interés.

Nivel de presión sonora

Mide la magnitud del campo sonoro y viene definida como:

$$SLP \equiv 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right) \quad (dB)$$

Donde:

p_{rms} : Presión eficaz del sonido en el punto considerado.

p_0 : Presión eficaz de referencia. Coincide con el umbral de audición a 1kHz ($2 \cdot 10^{-5} Pa$).

La elección de representar el sonido en dB se debe a que el oído responde a los estímulos sonoros de forma logarítmica y, por otra parte, si se expresasen los sonidos audibles en Pascales (Pa), la escala sería Acondicionamiento acústico del aula 105 excesivamente amplia: desde el umbral de audición $2 \cdot 10^{-5} Pa$ hasta el umbral del dolor 100 Pa. Los valores manejados quedan comprendidos entre 0 dB (por escoger el umbral de audición como valor de referencia) y 135 dB, siendo 1 dB el mínimo cambio perceptible.

Tiempo de reverberación

Se define como el tiempo que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta que el nivel de presión sonora decae 60 dB. Se trata de un parámetro indicativo del grado de reverberación o viveza de una sala.

Sin embargo, como el ruido de fondo suele ocultar la parte final de dicha curva, en la práctica se mide el tiempo que tarde en decaer 20 ó 30 dB y se aproxima TR, multiplicando dichos tiempo por 3 ó 2, respectivamente. Esta curva de decaimiento energético es distinta para cada posición dentro de la sala y además, varía con la frecuencia. Por ello, se adquieren los tiempos de reverberación de varias posiciones, que serán promediados a continuación. Y esto se hace para las bandas de octava centradas en las frecuencias 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz. Es habitual prescindir de la primera y última banda, en especial, para salas dedicadas a la palabra.

También podemos calcular TR mediante las fórmulas basadas en la teoría estadística (Sabine, Eyring, Arau-Puchades, Kuttruff, etc.). El inconveniente es que su valor es independiente de la posición del receptor y además, sólo es válido en condiciones de campo difuso (la propagación del sonido en el recinto es equiprobable en cualquier dirección)

Todo recinto tiene un valor de TR óptimo, según la aplicación a la que se destine. Para salas de teatros con volúmenes comprendidos entre 100 y 10000m³ se recomienda que el valor promediado de los TR correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz, cuando la sala está ocupada, esté comprendido aproximadamente entre:

$$0.7 \leq TR_{mid} \leq 1.2s$$

Donde:

$$TR_{mid} = \frac{TR(500Hz) + TR(1kHz)}{2}$$

En una sala viva o reverberante (TR elevado), la persistencia de las vocales en el tiempo es todavía mayor que la que habría en espacio libre, que ya de por sí es elevada (90 ms). Esta mayor duración de las vocales, junto con su mayor nivel sonoro y el hecho de que su espectro sea rico en bajas frecuencias, pueden llevar a un solapamiento de las vocales sobre las consonantes. Dado que éstas son las que aportan significado al mensaje, si son enmascaradas parcial o totalmente, la inteligibilidad de la palabra disminuirá.

Así pues, cuanto mayores sean las exigencias de una sala respecto a la inteligibilidad de la palabra, menor será el tiempo de reverberación óptimo. Además, conviene que sea lo más constante posible con la frecuencia, en especial, en bajas frecuencias (bandas de octava 125 y 250 Hz.)

Por otra parte, para un correcto diseño acústico, es aconsejable que la variación del tiempo de reverberación con el grado de ocupación de la sala sea pequeña, para que las condiciones acústicas sean aceptables en cualquier circunstancia.

Existen varias formas de medir experimentalmente el tiempo de reverberación, entre ellas, las más usuales son la fórmula de Sabine y la formula de Eyring.

Claridad de la voz C_{50}

Existen dos parámetros distintos para medir la proporción efectiva de las primeras reflexiones:

- Claridad de la voz (C_{50}): para las salas dedicadas a la palabra
- Claridad musical (C_{80}): para salas destinadas a música.

El parámetro C_{50} , que mide la relación entre la energía sonora recibida durante los primeros 50 ms después de recibir el sonido directo (éste incluido) y la energía restante. Se expresa en dB:

$$C_{50} = \frac{\text{Energía}_{t_0 \rightarrow 50ms}}{\text{Energía}_{50ms \rightarrow \infty}}$$

Siendo:

t_0 : instante de tiempo en el que llega el sonido directo

Según L.G. Marshall [2], para caracterizar una sala con un único valor, es suficiente utilizar el denominado "Speech Average", que se calcula a partir de C_{50} :

$$C_{50}(\text{speech_average}) \equiv 0.15 \cdot C_{50}(500) + 0.25 \cdot C_{50}(1k) + 0.35 \cdot C_{50}(2k) + 0.25 \cdot C_{50}(4k) [dB]$$

Las constantes que aparecen en esta ecuación fueron deducidas de la proporción en que las distintas bandas de frecuencia influyen en la inteligibilidad de la palabra. Para una aceptable inteligibilidad, deberá cumplirse la siguiente condición:

$$C_{50}(\text{Speech Average}) \geq 2 \text{ dB}$$

Cuanto más se supere este límite, mayor será la sonoridad y la inteligibilidad de palabra en un punto considerado. Una forma de aumentar la claridad de voz es disminuyendo el nivel del sonido reverberante.

El parámetro C_{80} se define como el cociente entre la energía sonora recibida durante los 80 ms después de recibir el sonido directo (este incluido) y la energía que llega después de esos 80 ms. Se expresa en dB:

$$C_{50} = \frac{\text{Energía}_{t_0 \rightarrow 80ms}}{\text{Energía}_{80ms \rightarrow \infty}}$$

Siendo:

t_0 : instante de tiempo en el que llega el sonido directo.

Como valor representativo se utiliza el “music Average”, que se calcula así:

$$C_{80}(\text{Music Average}) = \frac{C_{80}(500Hz) + C_{80}(1kHz) + C_{80}(2kHz)}{3}$$

Según Beranek [9], el margen de valores recomendados cuando la sala está vacía es:

$$-4 \leq C_{80}(\text{Music Average}) \leq 0 \text{ dB}$$

mientras que para la sala ocupada, L.G. Marshall, aconseja el siguiente margen de valores:

$$-2 \leq C_{80}(\text{music Average}) \leq 2 \text{ dB}$$

En cualquier caso, este parámetro se utiliza para valorar el grado de separación que se puede apreciar entre los distintos sonidos de una composición musical.

Por último, hay que mencionar que tanto el parámetro C_{50} como el C_{80} no son estadísticamente independientes, sino que varían con el tiempo de reverberación, disminuyendo a medida que este aumenta.

Definición

Se denomina así a la proporción de energía que llega durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (éste incluido) respecto a la energía total recibida. Se mide en dB.

$$D_{50} = \frac{\text{Energía}_{t_0 \rightarrow 50ms}}{\text{Energía}_{t_0 \rightarrow \infty}}$$

Por otra parte, este parámetro se relaciona con la claridad de voz mediante la siguiente expresión:

$$D \equiv \frac{1}{1 + 10^{-\frac{CS0}{10}}}$$

De modo que, conociendo la claridad en un punto, se puede deducir la definición y viceversa.

Su valor depende de la posición del oyente respecto a la fuente sonora, disminuyendo al aumentar la distancia a la misma. Esto se debe a que alejándose de la fuente aumenta el nivel del campo sonoro reverberante y, como consecuencia, la proporción de energía de las primeras reflexiones disminuye.

Además, debido al carácter direccional de la voz humana, la definición es mayor cuando el oyente se sitúa frontalmente a la persona que constituye la fuente sonora en ese momento.

En cualquier caso, para un correcto diseño de una sala destinada a la palabra, deberá cumplirse que, cuando la sala esta ocupada, el valor de D sea lo más uniforme posible para cualquier posición del oyente y que, para cada banda de frecuencias, supere los 0.5 dB.

En salas destinadas a la palabra se hace necesario cuantificar la inteligibilidad de la palabra. Para ello se usan los siguientes parámetros:

- %Alcons
- STI
- RASTI

%AlCons

%ALCons representa las siglas de “articulation Loss of Consonants”, es decir, es el porcentaje de pérdida de la articulación de las consonantes. Por tanto, cuanto mayor sea, menor será la inteligibilidad de la palabra.

Basándose en teorías estadísticas se consigue obtener una relación con el tiempo de reverberación:

$$\% AlCons \equiv \frac{200 \cdot r^2 RT^2}{VQ}, r \leq 3.16D_c$$

$$\% AlCons \equiv 9 \cdot RT, r > 3.16D_c$$

Siendo:

r: distancia a la fuente sonora (en metros)

V: volumen de la sala (m³)

Q: directividad de la fuente. En el caso de la voz humana, para una posición frontal Q = 2.

TR: tiempo de reverberación (en segundos)

D_c es la distancia crítica que limita que ecuación debe usarse. Se calcula mediante:

$$D_c \equiv 0.14 \cdot \sqrt{QR}$$

Donde:

R es la constante característica de la sala, definida como:

$$R \equiv -\frac{S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})}{1 - \bar{\alpha}}$$

En la práctica, se suele escoger como valor representativo el de la banda de octava centrada en 2 kHz, pues es el que más influye en la inteligibilidad de la palabra.

STI, RaSTI

STI viene del inglés “Speech Transmission Index” (Índice de Transmisión de la Palabra o Discurso). Puede tomar valores comprendidos entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima).

Su cálculo es muy complejo y laborioso concluyendo finalmente en la siguiente ecuación:

$$STI \equiv \frac{\left(\overline{\frac{S}{N}}\right)_{ap} + 15}{30}$$

Debido a esta complejidad, surge el parámetro RaSTI, de las siglas en inglés “Rapid Speech Transmission Index” (Índice Rápido de Transmisión de la Palabra), patentado por la empresa danesa Brüel y Kjaer, y que se calcula reduciendo el número de frecuencias moduladoras y portadoras. Mide la inteligibilidad de la palabra en una sala, pero usando un menor número de índices, con lo que se reduce el tiempo de cálculo y el número de medidas.

La siguiente tabla recoge la correspondencia entre la inteligibilidad de la palabra en una sala y su valor de %ALCons y STI o RASTI.

%ALCons	STI/RASTI	Inteligibilidad
0% – 1.4%	0.88 – 1	Excelente
1.6% – 4.8%	0.66 – 0.86	Buena
5.3% – 11.4%	0.5 – 0.64	Aceptable
12% – 24.2%	0.36 – 0.49	Pobre
27%1 – 46.5%	0.29 – 0.34	Mala

Tabla A1.3 Correspondencia entre inteligibilidad y sus parámetros.

ANEXO 2 RESPUESTA AL IMPULSO

FICHAS DE PARÁMETROS

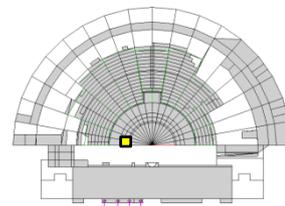
Nº FICHAS: 51

POSICIONES CON FUENTE EN ESCENARIO: 44

POSICIONES CON FUENTE EN ORQUESTA: 7

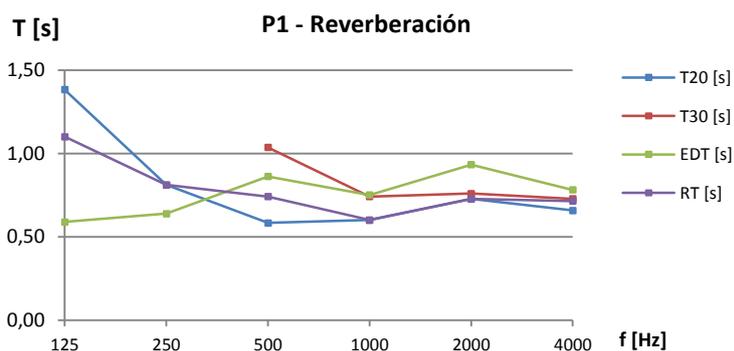
Fuente en escenario

POSICIÓN 1 ORCHESTRA



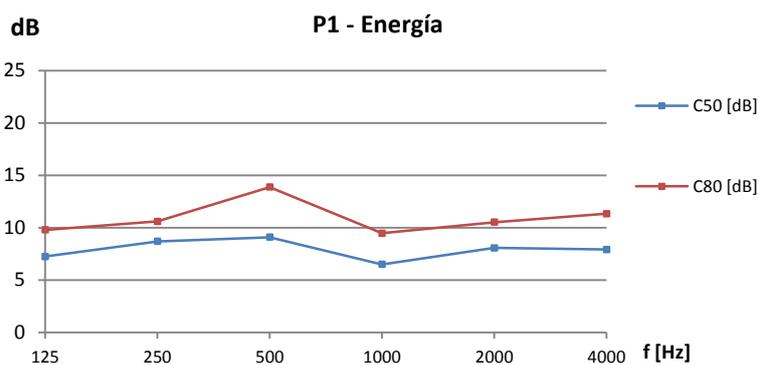
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,38	0,81	0,58	0,60	0,73	0,66
T30 [s]			1,04	0,74	0,76	0,73
EDT [s]	0,59	0,64	0,86	0,75	0,93	0,78
RT [s]	1,10	0,81	0,74	0,60	0,73	0,72



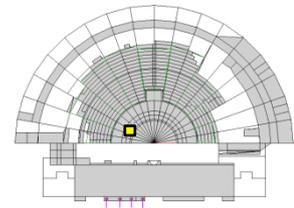
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	7,3	8,7	9,1	6,5	8,1	7,9
C80 [dB]	9,8	10,6	13,9	9,5	10,5	11,3
D50 [-]	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9



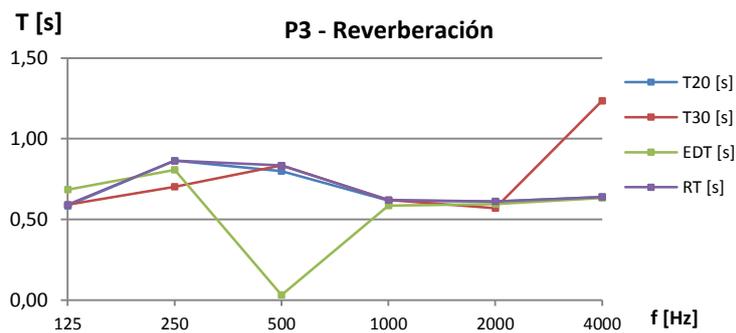
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,8
STI masculino [-]	0,8
RASTI [-]	0,82
ALCONS[%]	2,04



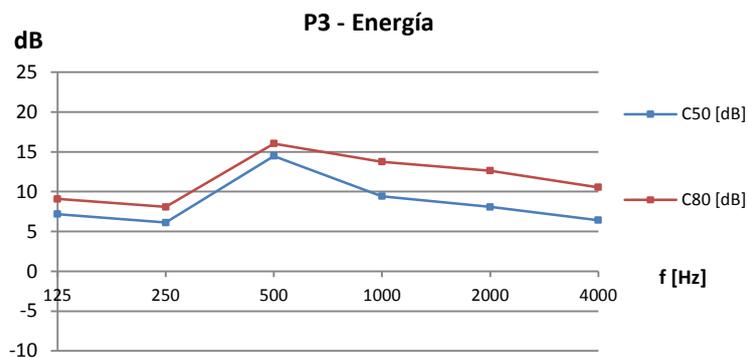
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,59	0,86	0,80	0,62	0,61	0,64
T30 [s]	0,59	0,70	0,83	0,62	0,57	1,24
EDT [s]	0,69	0,81	0,03	0,59	0,60	0,63
RT [s]	0,59	0,86	0,83	0,62	0,61	0,64



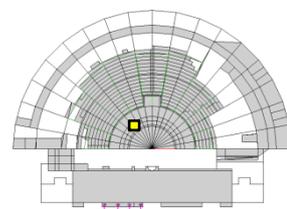
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	7,2	6,1	14,5	9,4	8,1	6,4
C80 [dB]	9,1	8,1	16,0	13,8	12,6	10,5
D50 [-]	0,8	0,8	1,0	0,9	0,9	0,8



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

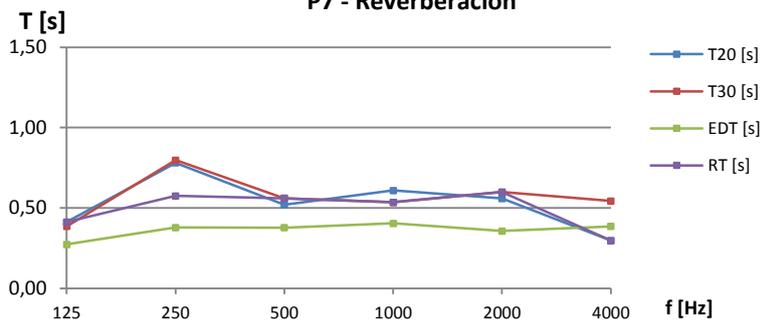
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,82
STI masculino [-]	0,82
RASTI [-]	0,86
ALCONS[%]	1,59



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,41	0,78	0,52	0,61	0,56	0,30
T30 [s]	0,39	0,80	0,56	0,54	0,60	0,54
EDT [s]	0,27	0,38	0,38	0,40	0,36	0,39
RT [s]	0,41	0,58	0,56	0,54	0,60	0,30

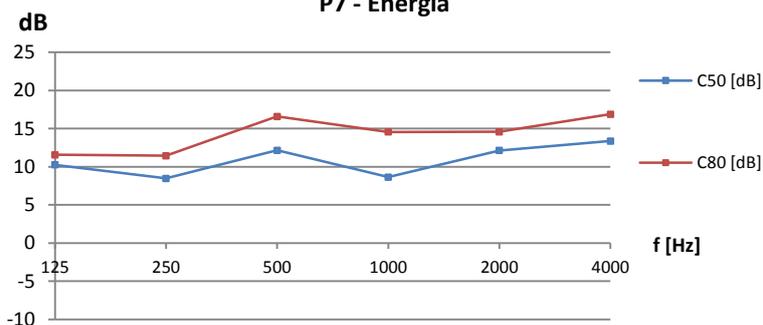
P7 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	10,2	8,5	12,2	8,6	12,1	13,4
C80 [dB]	11,6	11,5	16,6	14,6	14,6	16,9
D50 [-]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0

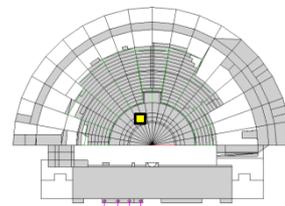
P7 - Energía



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

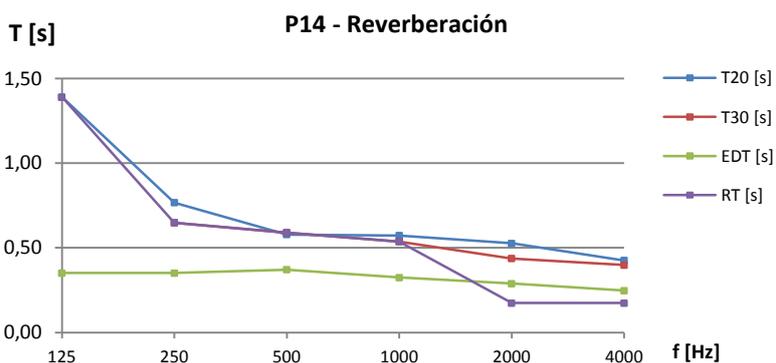
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,79
STI masculino [-]	0,79
RASTI [-]	0,83
ALCONS[%]	1,94

POSICIÓN 14 ORCHESTRA



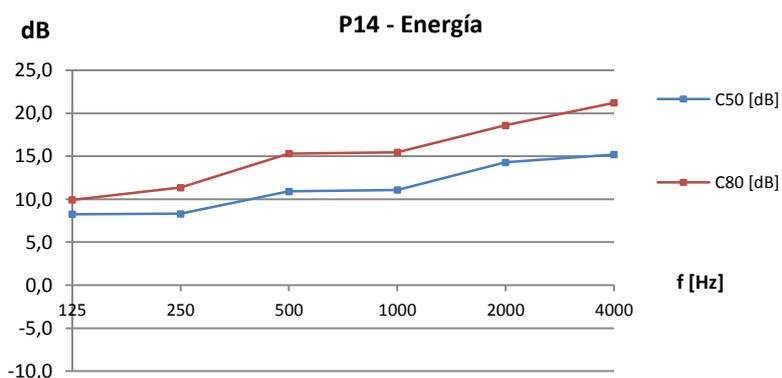
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,39	0,77	0,58	0,57	0,53	0,43
T30 [s]		0,65	0,59	0,54	0,44	0,40
EDT [s]	0,35	0,35	0,37	0,33	0,29	0,25
RT [s]	1,39	0,65	0,59	0,54	0,17	0,17



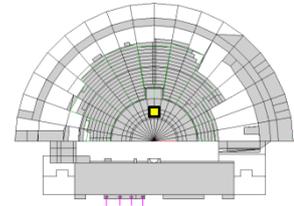
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	8,3	8,3	10,9	11,1	14,3	15,2
C80 [dB]	9,9	11,4	15,3	15,5	18,6	21,2
D50 [-]	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0



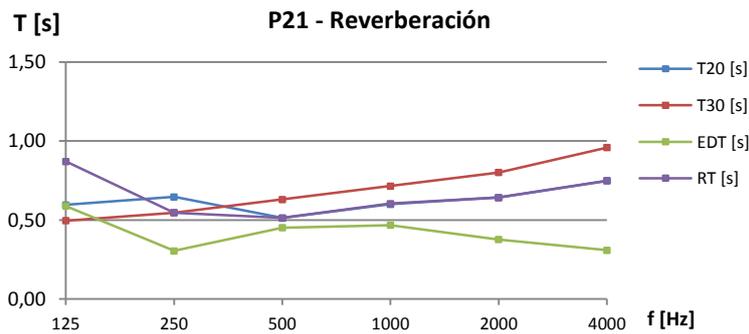
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,82
STI masculino [-]	0,81
RASTI [-]	0,82
ALCONS[%]	2,01



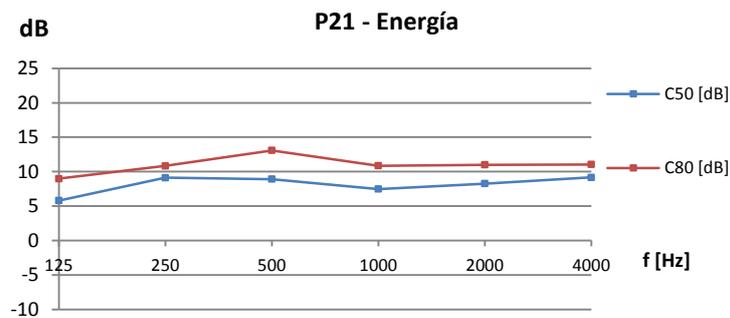
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,60	0,65	0,51	0,60	0,64	0,75
T30 [s]	0,50	0,55	0,63	0,72	0,80	0,96
EDT [s]	0,59	0,31	0,45	0,47	0,38	0,31
RT [s]	0,87	0,55	0,51	0,60	0,64	0,75



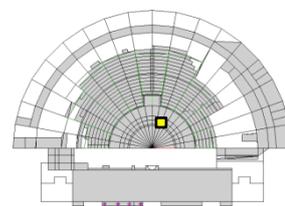
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	5,8	9,1	8,9	7,5	8,3	9,2
C80 [dB]	9,0	10,8	13,1	10,9	11,0	11,0
D50 [-]	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

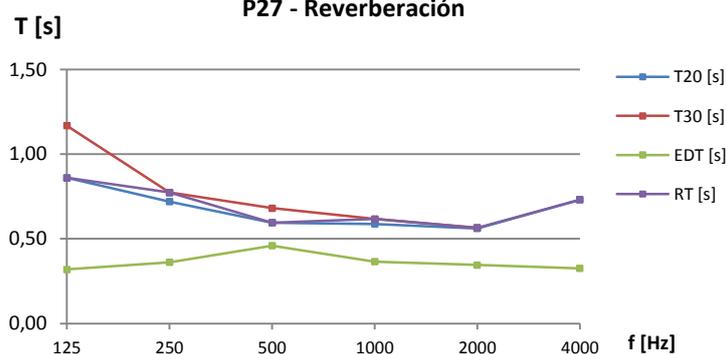
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,73
STI masculino [-]	0,74
RASTI [-]	0,76
ALCONS[%]	2,74



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,86	0,72	0,60	0,59	0,56	0,73
T30 [s]	1,17	0,77	0,68	0,62	0,57	
EDT [s]	0,32	0,36	0,46	0,37	0,35	0,33
RT [s]	0,86	0,77	0,60	0,62	0,57	0,73

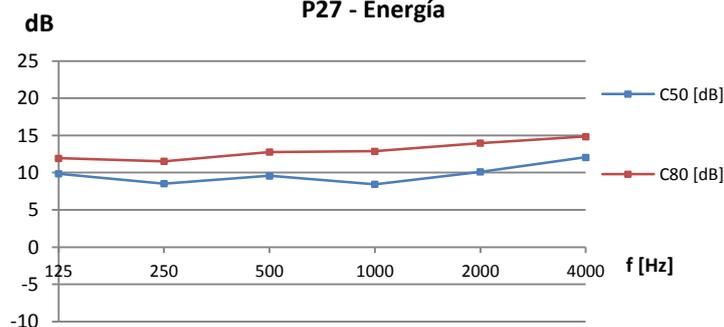
P27 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

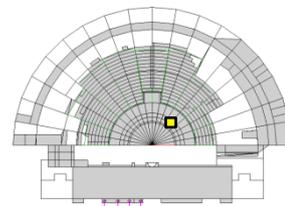
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	9,9	8,5	9,6	8,5	10,1	12,1
C80 [dB]	11,9	11,5	12,8	12,9	14,0	14,9
D50 [-]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

P27 - Energía



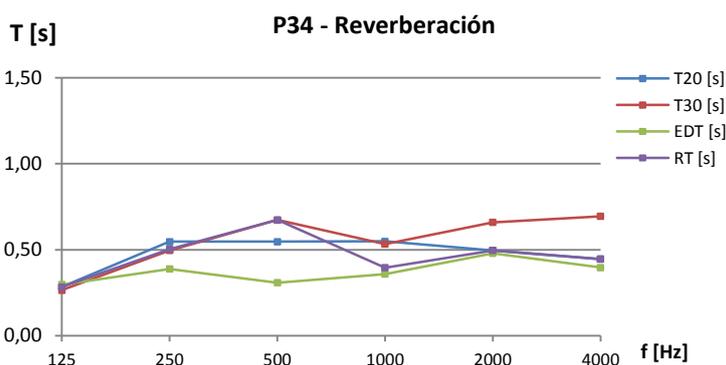
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,78
STI masculino [-]	0,78
RASTI [-]	0,79
ALCONS[%]	2,35



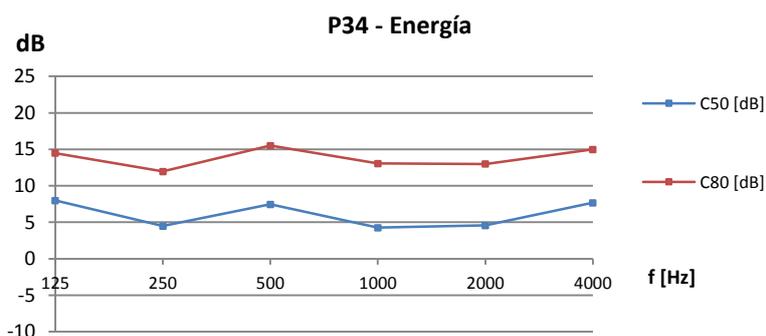
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,28	0,55	0,55	0,55	0,50	0,45
T30 [s]	0,27	0,50	0,67	0,53	0,66	0,70
EDT [s]	0,30	0,39	0,31	0,36	0,48	0,40
RT [s]	0,28	0,50	0,67	0,40	0,50	0,45



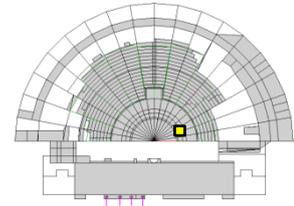
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	9,6	7,7	10,0	7,5	7,2	10,1
C80 [dB]	14,5	12,0	15,5	13,1	13,0	15,0
D50 [-]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9



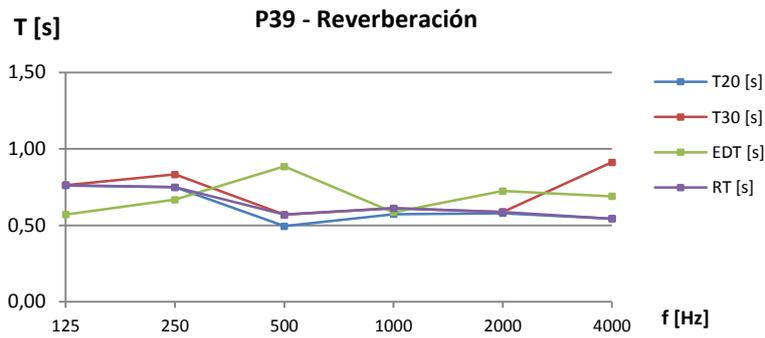
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,76
STI masculino [-]	0,77
RASTI [-]	0,79
ALCONS[%]	2,4



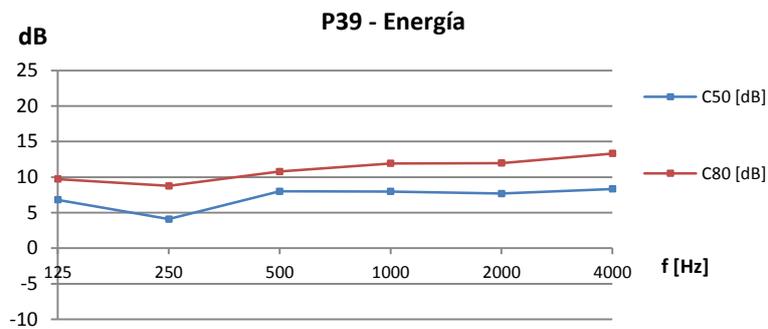
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,76	0,75	0,49	0,57	0,58	0,54
T30 [s]	0,76	0,83	0,57	0,61	0,59	0,91
EDT [s]	0,57	0,67	0,89	0,59	0,72	0,69
RT [s]	0,76	0,75	0,57	0,61	0,59	0,54



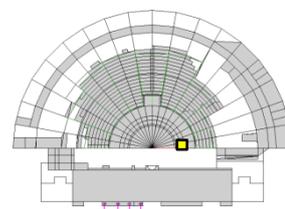
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	6,8	4,1	8,0	8,0	7,7	8,3
C80 [dB]	9,7	8,8	10,8	11,9	12,0	13,3
D50 [-]	0,8	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9



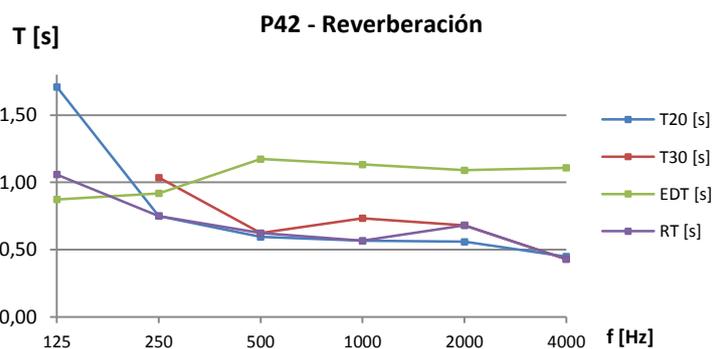
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,8
STI masculino [-]	0,8
RASTI [-]	0,81
ALCONS[%]	2,16



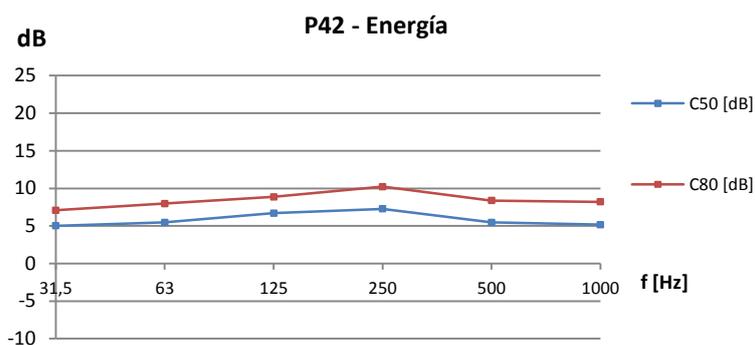
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,71	0,75	0,60	0,57	0,56	0,45
T30 [s]		1,04	0,62	0,73	0,68	0,43
EDT [s]	0,87	0,92	1,17	1,13	1,09	1,11
RT [s]	1,06	0,75	0,62	0,57	0,68	0,43



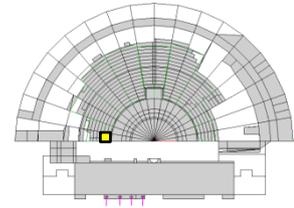
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	5,0	5,5	6,7	7,3	5,5	5,2
C80 [dB]	7,1	8,0	8,9	10,2	8,4	8,2
D50 [-]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8



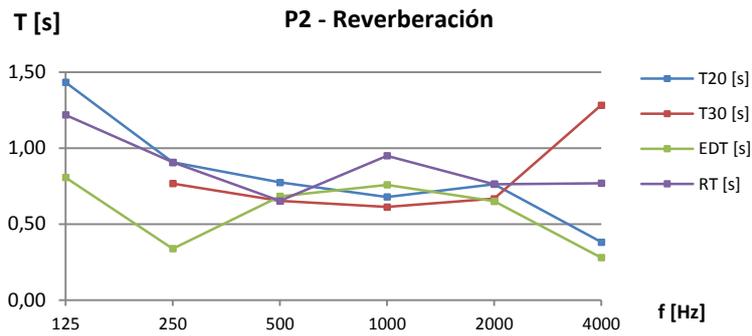
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,78
STI masculino [-]	0,77
RASTI [-]	0,76
ALCONS[%]	2,71



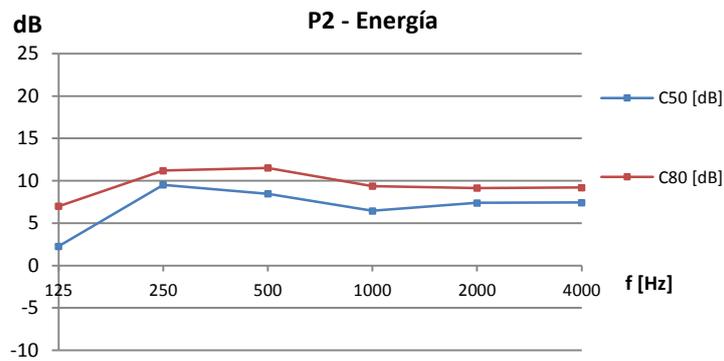
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,43	0,91	0,77	0,68	0,76	0,38
T30 [s]		0,77	0,65	0,61	0,67	1,28
EDT [s]	0,81	0,34	0,68	0,76	0,65	0,28
RT [s]	1,22	0,91	0,65	0,95	0,76	0,77



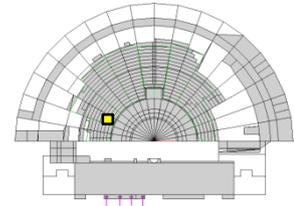
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	2,3	9,5	8,5	6,5	7,4	7,4
C80 [dB]	7,0	11,2	11,5	9,4	9,2	9,2
D50 [-]	0,6	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9



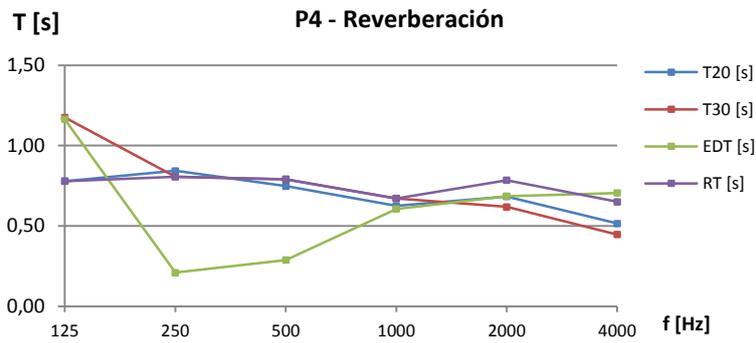
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,70
STI masculino [-]	0,71
RASTI [-]	0,75
ALCONS[%]	3



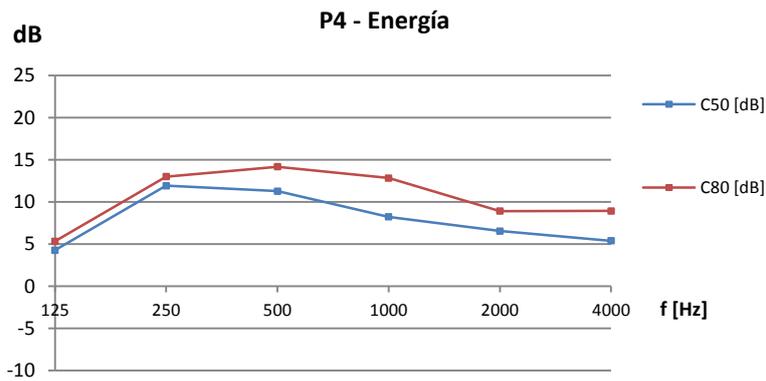
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,78	0,84	0,75	0,63	0,68	0,52
T30 [s]	1,18	0,81	0,79	0,67	0,62	0,45
EDT [s]	1,16	0,21	0,29	0,61	0,69	0,71
RT [s]	0,78	0,81	0,79	0,67	0,79	0,65



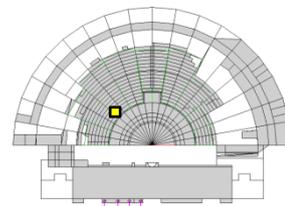
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	4,3	11,9	11,3	8,2	6,5	5,4
C80 [dB]	5,3	13,0	14,2	12,8	8,9	8,9
D50 [-]	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8



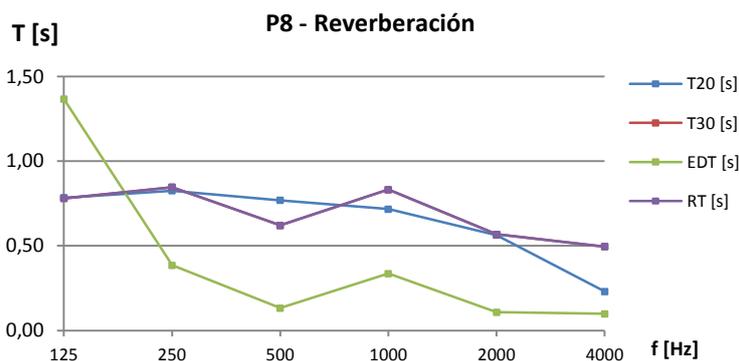
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,73
STI masculino [-]	0,74
RASTI [-]	0,77
ALCONS[%]	2,56



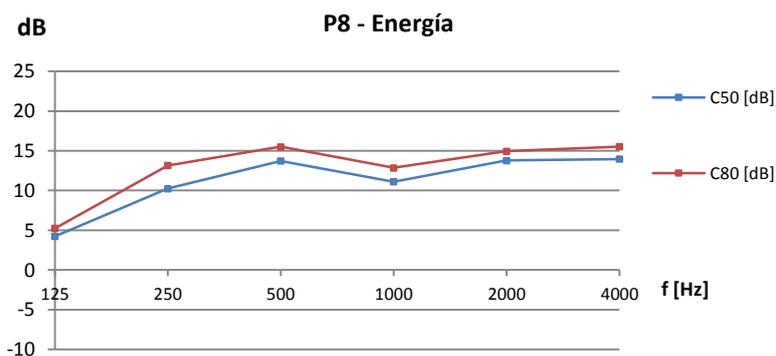
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,78	0,83	0,77	0,72	0,56	0,23
T30 [s]	0,78	0,85	0,62	0,83	0,57	0,50
EDT [s]	1,37	0,39	0,13	0,34	0,11	0,10
RT [s]	0,78	0,85	0,62	0,83	0,57	0,50



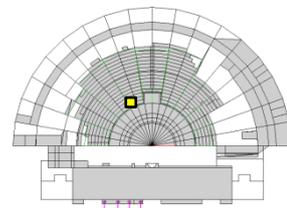
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	4,2	10,3	13,7	11,1	13,8	14,0
C80 [dB]	5,2	13,2	15,5	12,9	14,9	15,5
D50 [-]	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0



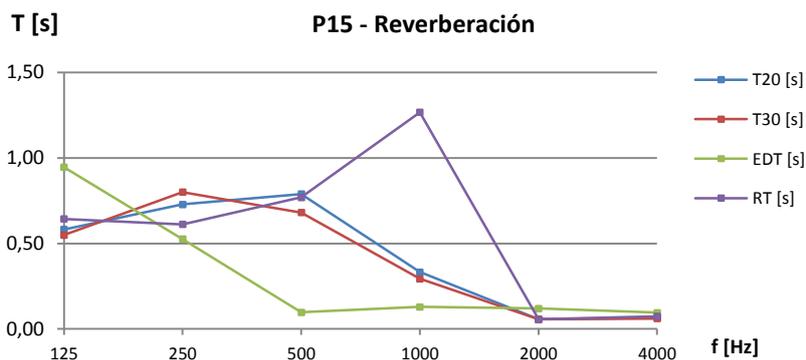
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,85
STI masculino [-]	0,85
RASTI [-]	0,9
ALCONS[%]	1,33



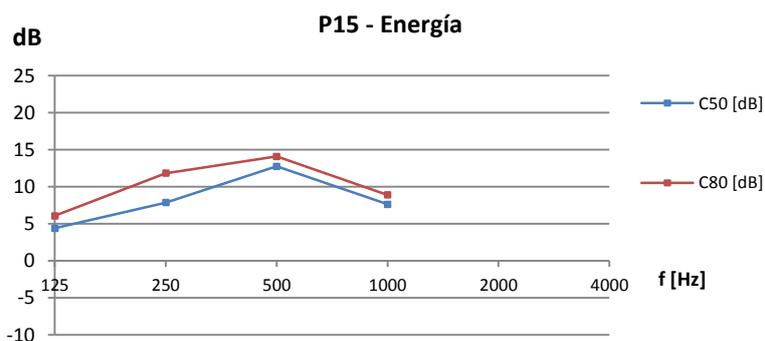
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,58	0,73	0,79	0,33	0,06	0,07
T30 [s]	0,55	0,80	0,68	0,29	0,06	0,06
EDT [s]	0,95	0,53	0,10	0,13	0,12	0,10
RT [s]	0,55	0,80	0,68	1,02	0,06	0,07



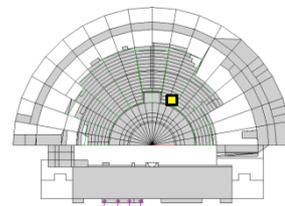
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	4,4	7,87	12,77	7,63		
C80 [dB]	6,09	11,83	14,1	8,91		
D50 [-]	0,73	0,86	0,95	0,85	1	1



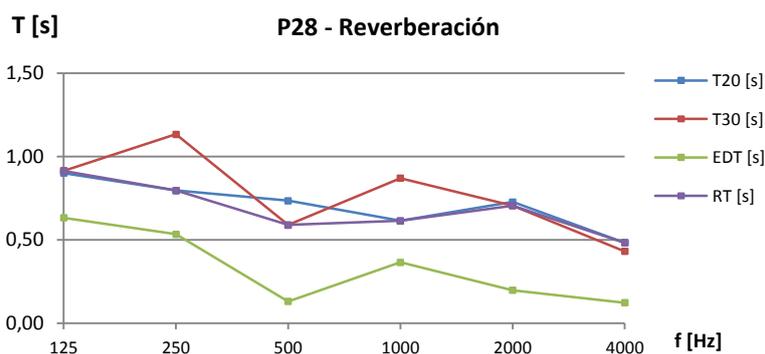
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,58
STI masculino [-]	0,61
RASTI [-]	0,72
ALCONS[%]	3,45



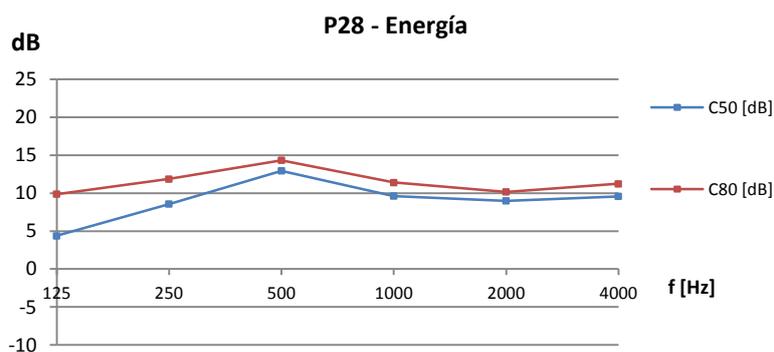
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,90	0,80	0,74	0,62	0,73	0,48
T30 [s]	0,92	1,13	0,59	0,87	0,71	0,43
EDT [s]	0,63	0,54	0,13	0,37	0,20	0,12
RT [s]	0,92	0,80	0,59	0,62	0,71	0,48



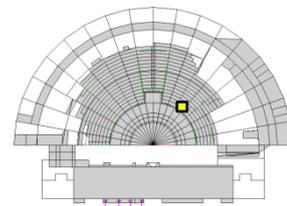
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	4,4	8,6	12,9	9,6	9,0	9,6
C80 [dB]	9,9	11,9	14,3	11,4	10,2	11,2
D50 [-]	0,7	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

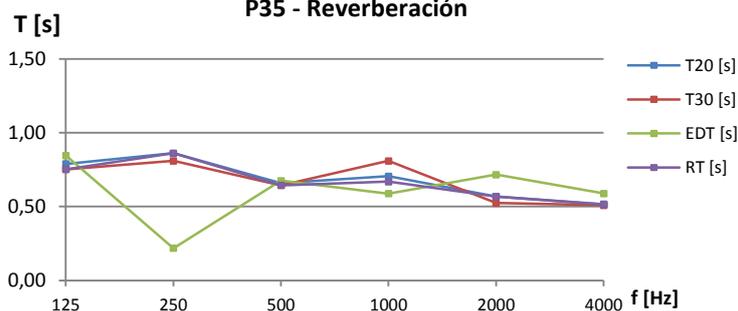
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,73
STI masculino [-]	0,75
RASTI [-]	0,82
ALCONS[%]	2



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,79	0,86	0,66	0,71	0,57	0,52
T30 [s]	0,75	0,81	0,64	0,81	0,52	0,51
EDT [s]	0,85	0,22	0,68	0,59	0,72	0,59
RT [s]	0,75	0,86	0,64	0,67	0,57	0,51

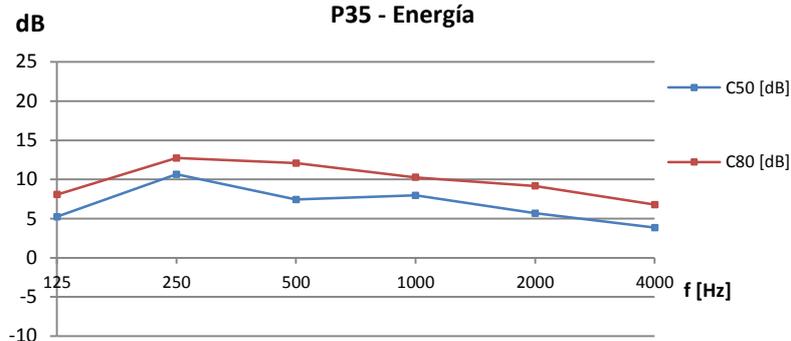
P35 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

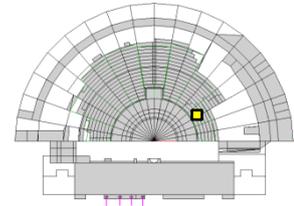
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	5,2	10,7	7,4	8,0	5,7	3,8
C80 [dB]	8,1	12,7	12,1	10,3	9,2	6,8
D50 [-]	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7

P35 - Energía



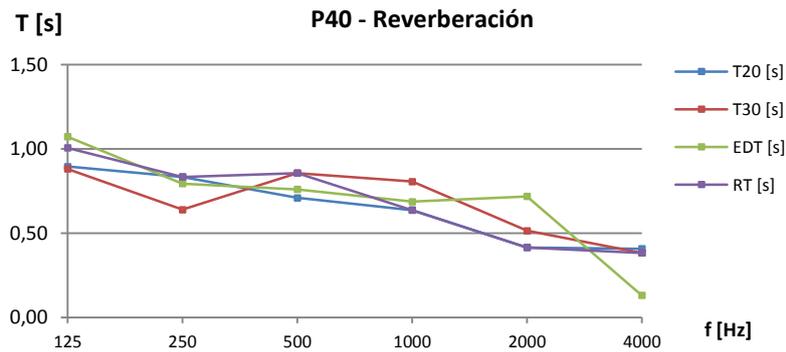
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,66
STI masculino [-]	0,68
RASTI [-]	0,72
ALCONS[%]	3,41



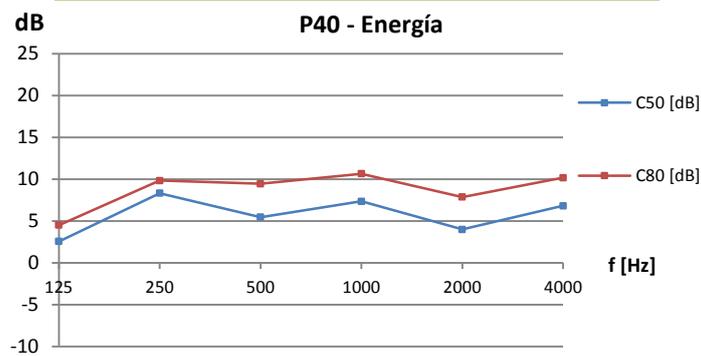
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,90	0,83	0,71	0,64	0,42	0,41
T30 [s]	0,88	0,64	0,86	0,81	0,51	0,38
EDT [s]	1,07	0,79	0,76	0,69	0,72	0,13
RT [s]	1,01	0,83	0,86	0,64	0,42	0,38



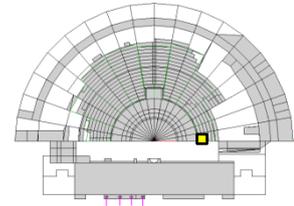
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	2,6	8,3	5,5	7,4	4,0	6,8
C80 [dB]	4,5	9,9	9,5	10,7	7,9	10,2
D50 [-]	0,6	0,9	0,8	0,8	0,7	0,8



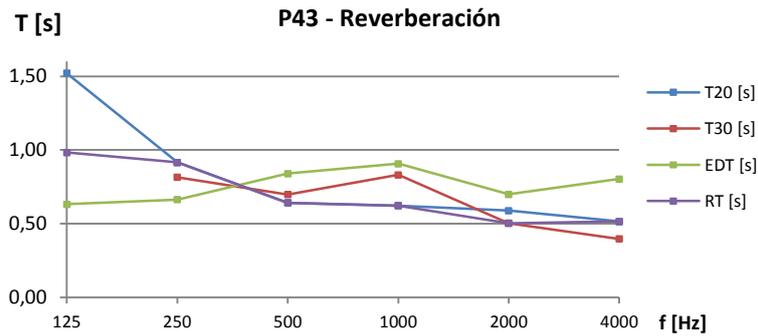
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,66
STI masculino [-]	0,67
RASTI [-]	0,68
ALCONS[%]	4,36



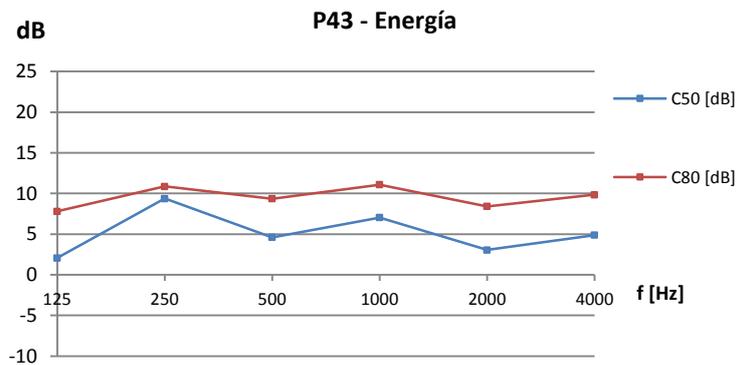
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,52	0,92	0,64	0,62	0,59	0,52
T30 [s]		0,82	0,70	0,83	0,50	0,40
EDT [s]	0,63	0,66	0,84	0,91	0,70	0,80
RT [s]	0,98	0,92	0,64	0,62	0,50	0,52



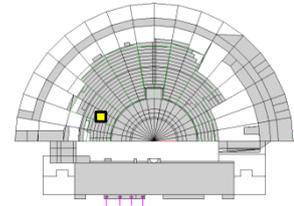
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	2,1	9,4	4,6	7,0	3,1	4,9
C80 [dB]	7,8	10,9	9,4	11,1	8,4	9,8
D50 [-]	0,6	0,9	0,7	0,8	0,7	0,8



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

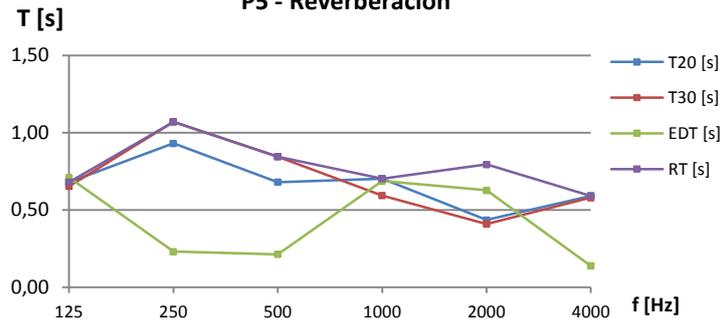
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,68
STI masculino [-]	0,69
RASTI [-]	0,69
ALCONS[%]	4,12



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,68	0,93	0,68	0,70	0,44	0,59
T30 [s]	0,65	1,07	0,85	0,59	0,41	0,58
EDT [s]	0,71	0,23	0,21	0,69	0,63	0,14
RT [s]	0,68	1,07	0,85	0,70	0,79	0,59

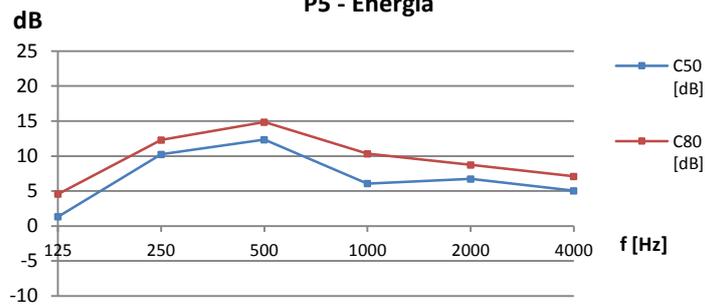
P5 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

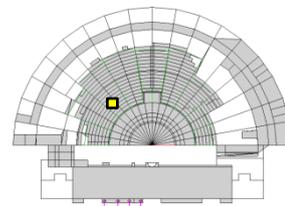
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	1,3	10,3	12,3	6,1	6,7	5,0
C80 [dB]	4,6	12,3	14,8	10,3	8,7	7,1
D50 [-]	0,6	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8

P5 - Energía



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

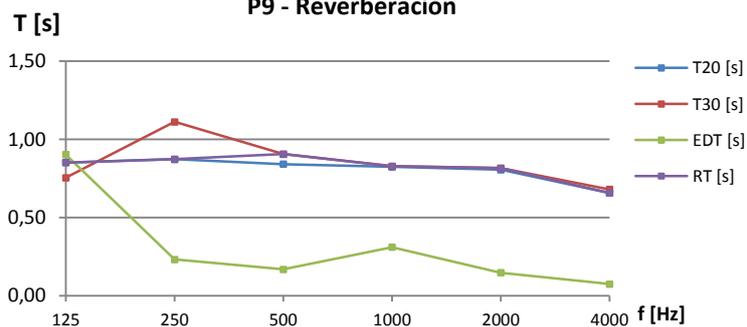
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,66
STI masculino [-]	0,68
RASTI [-]	0,77
ALCONS[%]	2,6



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,85	0,87	0,84	0,82	0,81	0,66
T30 [s]	0,75	1,11	0,91	0,83	0,82	0,68
EDT [s]	0,90	0,23	0,17	0,31	0,15	0,07
RT [s]	0,85	0,87	0,91	0,83	0,82	0,66

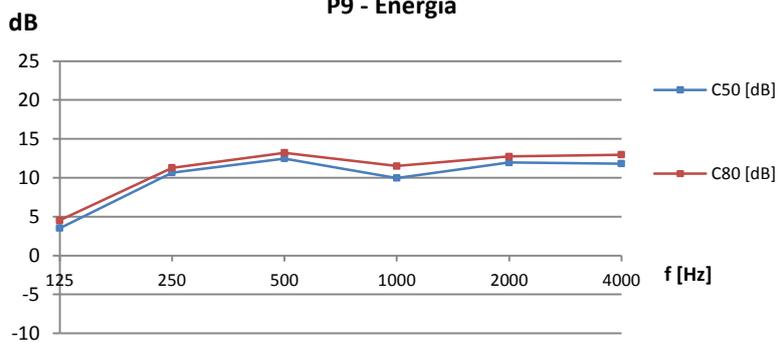
P9 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

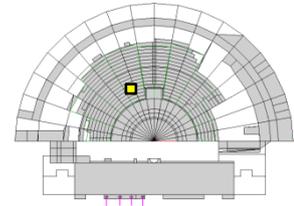
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	3,5	10,7	12,5	10,0	12,0	11,8
C80 [dB]	4,5	11,3	13,2	11,5	12,7	13,0
D50 [-]	0,7	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9

P9 - Energía



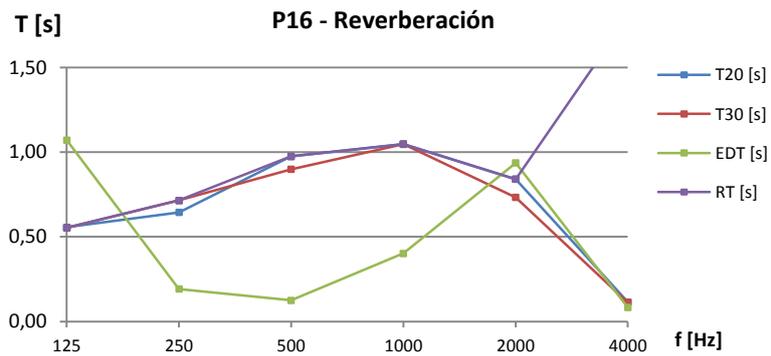
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,82
STI masculino [-]	0,82
RASTI [-]	0,87
ALCONS[%]	1,52



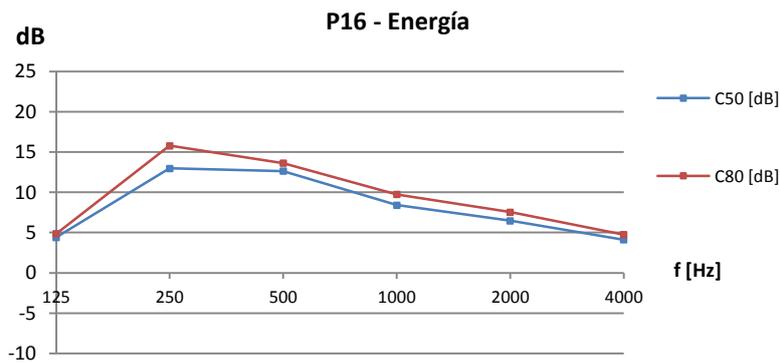
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,56	0,65	0,98	1,05	0,84	0,12
T30 [s]	0,55	0,72	0,90	1,05	0,73	0,11
EDT [s]	1,07	0,19	0,13	0,40	0,94	0,08
RT [s]	0,55	0,72	0,98	1,05	0,84	1,80



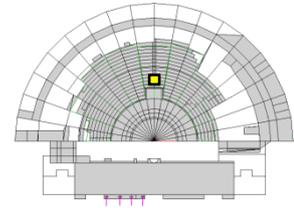
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	4,4	13,0	12,6	8,4	6,5	4,1
C80 [dB]	4,9	15,8	13,6	9,8	7,5	4,7
D50 [-]	0,7	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7



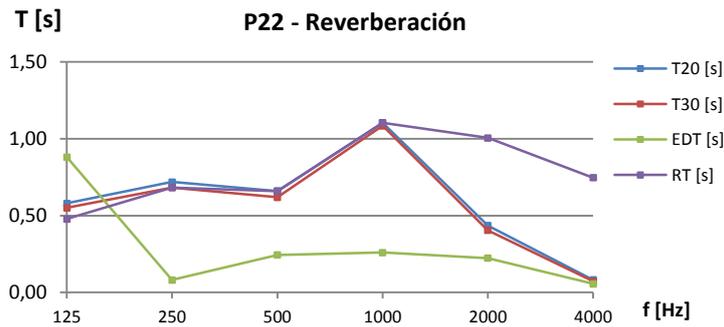
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,70
STI masculino [-]	0,71
RASTI [-]	0,78
ALCONS[%]	2,53



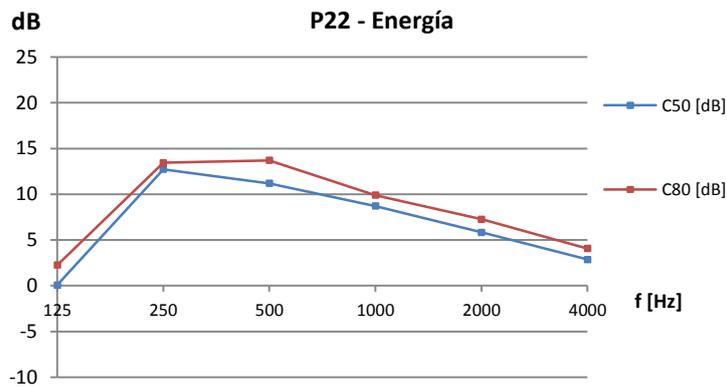
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,58	0,72	0,66	1,10	0,44	0,08
T30 [s]	0,55	0,68	0,62	1,09	0,40	0,07
EDT [s]	0,88	0,08	0,24	0,26	0,22	0,06
RT [s]	0,48	0,68	0,66	1,10	1,01	0,75



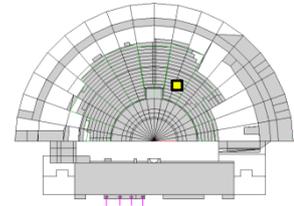
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	0,1	12,7	11,2	8,7	5,8	2,9
C80 [dB]	2,3	13,4	13,7	9,9	7,3	4,1
D50 [-]	0,5	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7



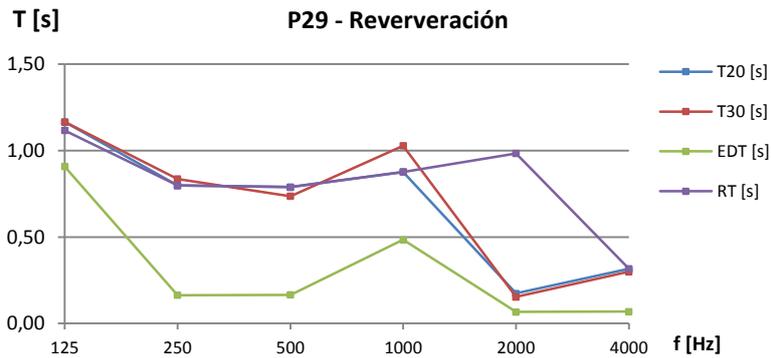
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,65
STI masculino [-]	0,67
RASTI [-]	0,75
ALCONS[%]	2,98



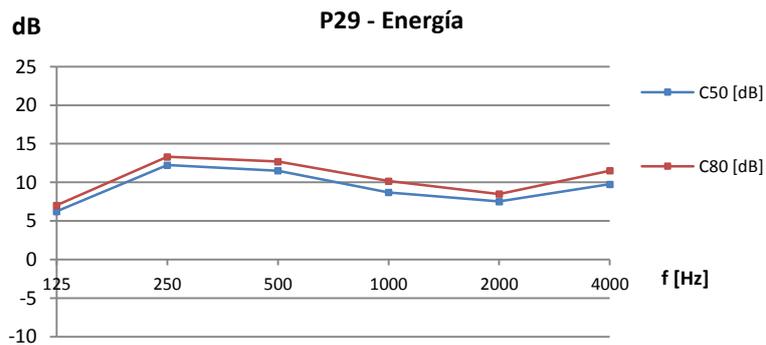
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,17	0,80	0,79	0,88	0,17	0,32
T30 [s]	1,17	0,84	0,74	1,03	0,15	0,30
EDT [s]	0,91	0,16	0,17	0,48	0,07	0,07
RT [s]	1,12	0,80	0,79	0,88	0,98	0,32



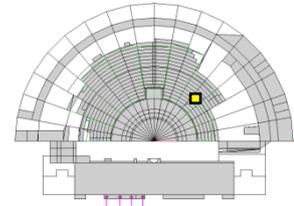
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	6,2	12,2	11,5	8,7	7,5	9,8
C80 [dB]	7,0	13,3	12,7	10,2	8,5	11,5
D50 [-]	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9



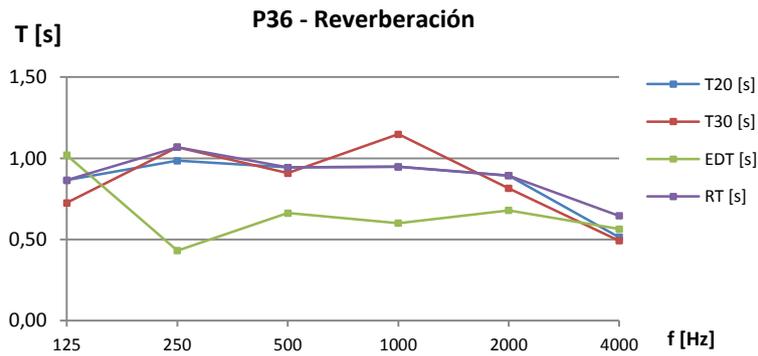
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,69
STI masculino [-]	0,71
RASTI [-]	0,78
ALCONS[%]	2,54



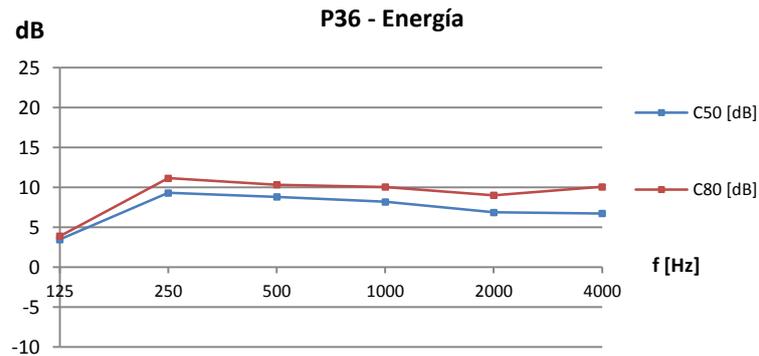
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,87	0,99	0,94	0,95	0,89	0,51
T30 [s]	0,73	1,07	0,91	1,15	0,82	0,49
EDT [s]	1,02	0,43	0,66	0,60	0,68	0,57
RT [s]	0,87	1,07	0,94	0,95	0,89	0,65



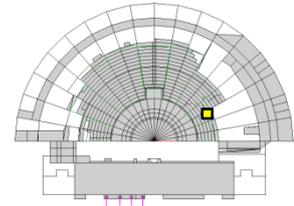
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	3,5	9,3	8,8	8,2	6,9	6,7
C80 [dB]	3,9	11,2	10,3	10,1	9,0	10,1
D50 [-]	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8



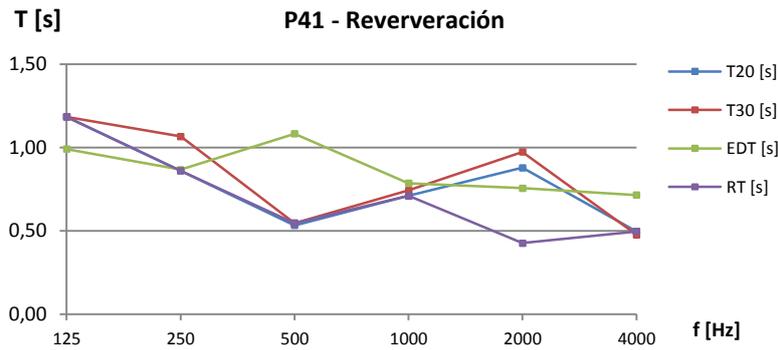
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,75
STI masculino [-]	0,75
RASTI [-]	0,76
ALCONS[%]	2,77



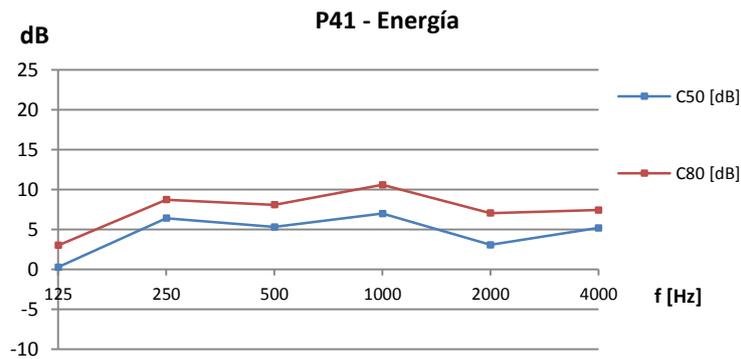
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,19	0,86	0,53	0,71	0,88	0,50
T30 [s]	1,19	1,07	0,55	0,74	0,97	0,48
EDT [s]	0,99	0,87	1,08	0,79	0,76	0,72
RT [s]	1,19	0,86	0,55	0,71	0,43	0,50



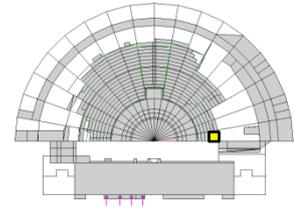
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	0,3	6,4	5,3	7,0	3,1	5,2
C80 [dB]	3,0	8,7	8,1	10,6	7,1	7,4
D50 [-]	0,5	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8



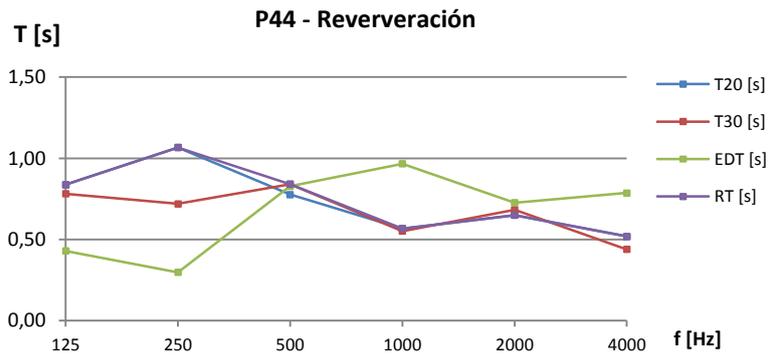
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,61
STI masculino [-]	0,63
RASTI [-]	0,64
ALCONS[%]	5,25



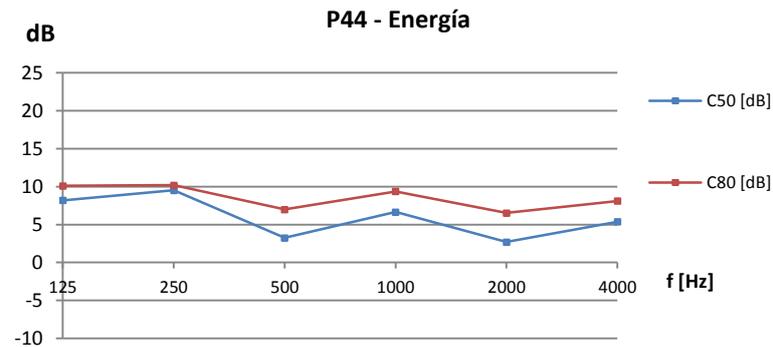
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,84	1,07	0,78	0,57	0,65	0,52
T30 [s]	0,78	0,72	0,84	0,55	0,68	0,44
EDT [s]	0,43	0,30	0,83	0,97	0,73	0,79
RT [s]	0,84	1,07	0,84	0,57	0,65	0,52



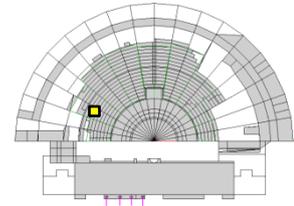
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	8,2	9,5	3,3	6,7	2,7	5,4
C80 [dB]	10,1	10,2	7,0	9,4	6,5	8,1
D50 [-]	0,9	0,9	0,7	0,8	0,7	0,8



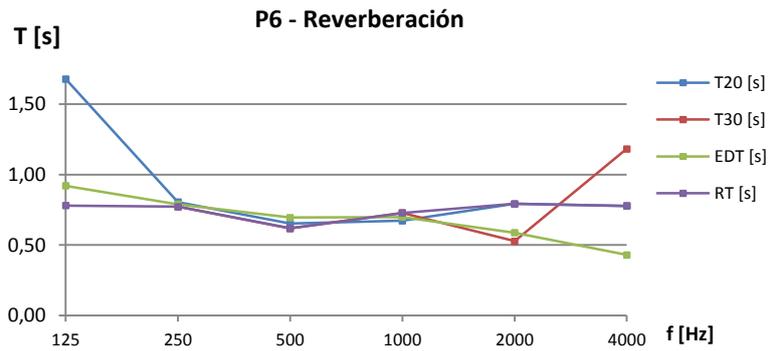
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,64
STI masculino [-]	0,65
RASTI [-]	0,63
ALCONS[%]	5,57



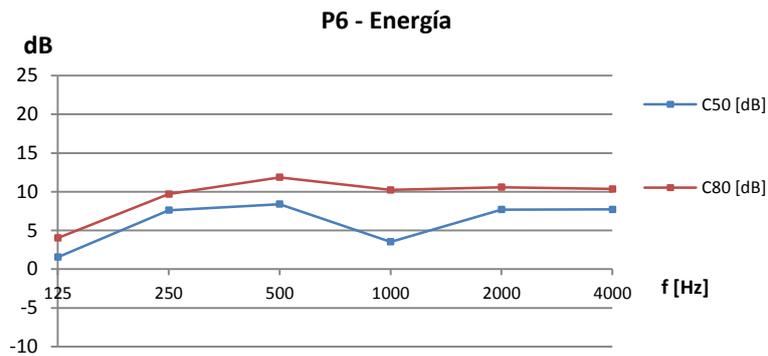
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,68	0,81	0,65	0,67	0,79	0,78
T30 [s]		0,77	0,62	0,73	0,53	1,18
EDT [s]	0,92	0,79	0,70	0,70	0,59	0,43
RT [s]	0,78	0,77	0,62	0,73	0,79	0,78



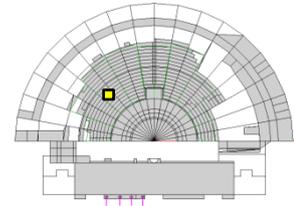
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	1,6	7,6	8,4	3,5	7,7	7,7
C80 [dB]	4,0	9,7	11,9	10,2	10,6	10,4
D50 [-]	0,6	0,9	0,9	0,7	0,9	0,9



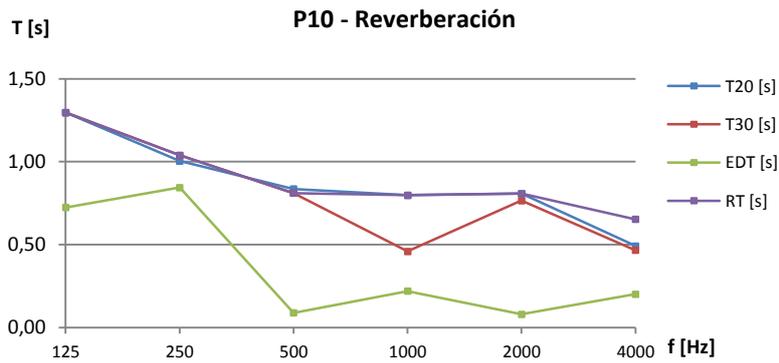
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,73
STI masculino [-]	0,73
RASTI [-]	0,77
ALCONS[%]	2,58



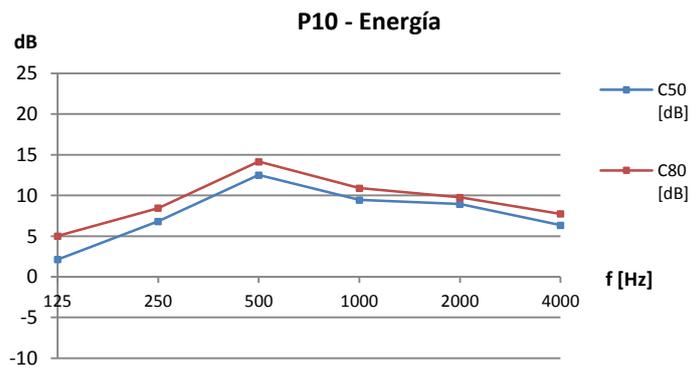
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,30	1,00	0,84	0,80	0,81	0,49
T30 [s]	1,30	1,04	0,81	0,46	0,77	0,47
EDT [s]	0,72	0,85	0,09	0,22	0,08	0,20
RT [s]	1,30	1,04	0,81	0,80	0,81	0,65



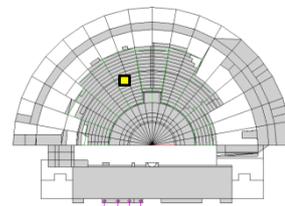
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	2,1	6,8	12,5	9,4	8,9	6,4
C80 [dB]	5,0	8,4	14,2	10,9	9,8	7,8
D50 [-]	0,6	0,8	1,0	0,9	0,9	0,8



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

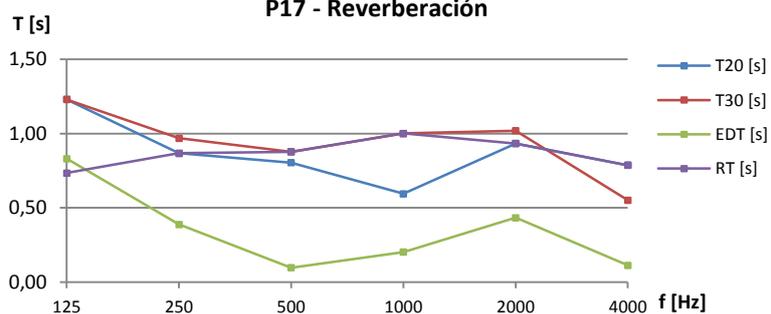
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,72
STI masculino [-]	0,73
RASTI [-]	0,81
ALCONS[%]	2,13



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,23	0,87	0,81	0,60	0,93	0,79
T30 [s]	1,23	0,97	0,88	1,00	1,02	0,55
EDT [s]	0,83	0,39	0,10	0,20	0,43	0,11
RT [s]	0,74	0,87	0,88	1,00	0,93	0,79

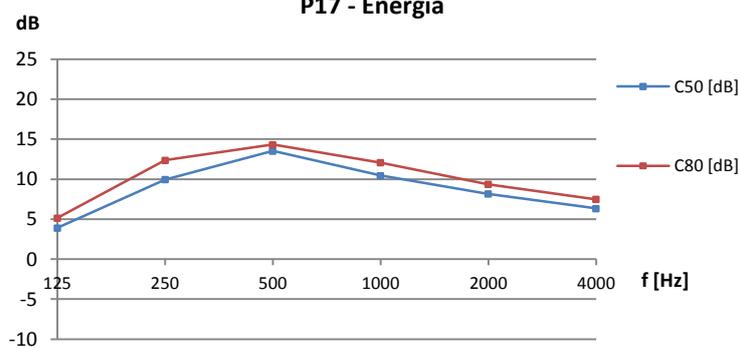
P17 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

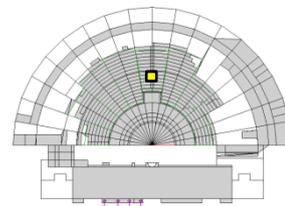
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	3,9	10,0	13,5	10,5	8,2	6,3
C80 [dB]	5,1	12,4	14,3	12,1	9,4	7,5
D50 [-]	0,7	0,9	1,0	0,9	0,9	0,8

P17 - Energía



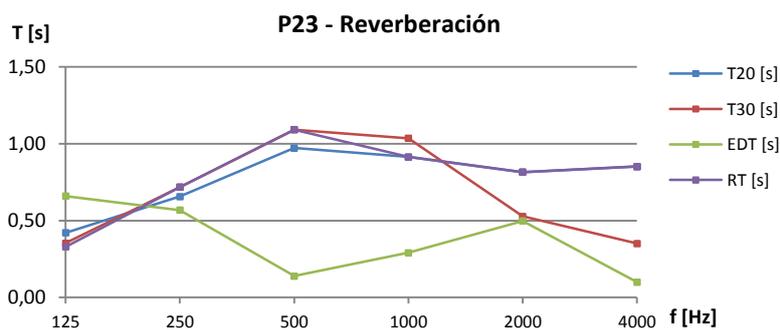
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,74
STI masculino [-]	0,76
RASTI [-]	0,82
ALCONS[%]	1,96



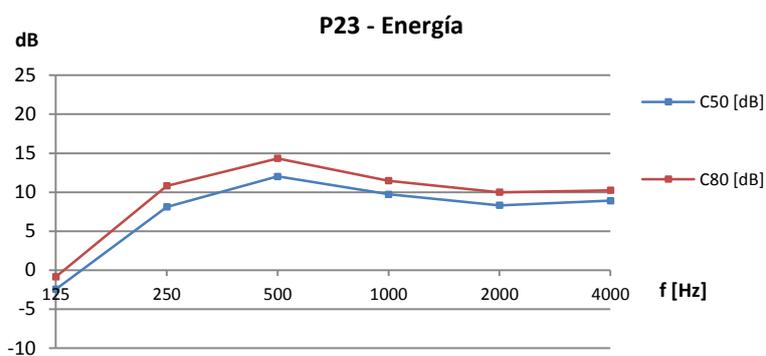
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,42	0,66	0,97	0,91	0,82	0,85
T30 [s]	0,35	0,72	1,09	1,04	0,53	0,35
EDT [s]	0,66	0,57	0,14	0,29	0,50	0,10
RT [s]	0,33	0,72	1,09	0,91	0,82	0,85



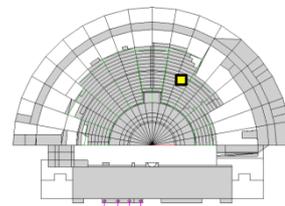
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	-2,5	8,1	12,0	9,7	8,3	8,9
C80 [dB]	-0,9	10,8	14,3	11,5	10,0	10,2
D50 [-]	0,4	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

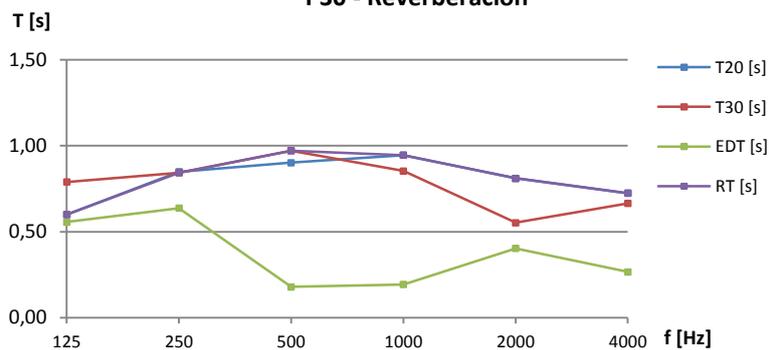
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,77
STI masculino [-]	0,78
RASTI [-]	0,82
ALCONS[%]	2,03



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,60	0,85	0,90	0,95	0,81	0,72
T30 [s]	0,79	0,84	0,97	0,85	0,55	0,67
EDT [s]	0,56	0,64	0,18	0,19	0,40	0,27
RT [s]	0,60	0,84	0,97	0,95	0,81	0,72

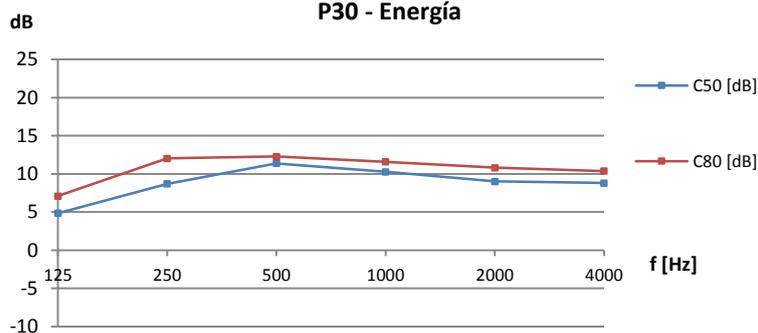
P30 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

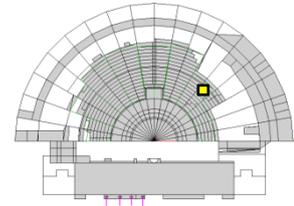
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	4,9	8,7	11,4	10,3	9,0	8,8
C80 [dB]	7,1	12,0	12,3	11,6	10,8	10,4
D50 [-]	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

P30 - Energía



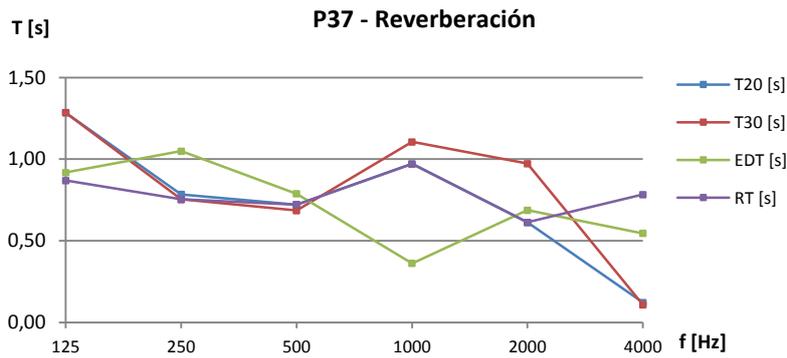
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,79
STI masculino [-]	0,80
RASTI [-]	0,83
ALCONS[%]	1,91



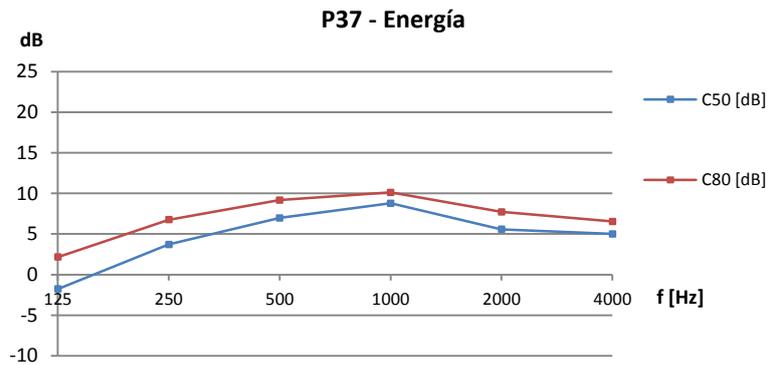
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,29	0,78	0,72	0,97	0,61	0,12
T30 [s]	1,29	0,75	0,69	1,11	0,97	0,11
EDT [s]	0,92	1,05	0,79	0,36	0,69	0,55
RT [s]	0,87	0,75	0,72	0,97	0,61	0,78



PARÁMETROS DE ENERGÍA

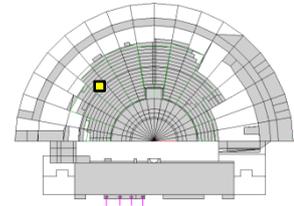
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	-1,8	3,7	7,0	8,8	5,6	5,0
C80 [dB]	2,2	6,8	9,2	10,1	7,7	6,5
D50 [-]	0,4	0,7	0,8	0,9	0,8	0,8



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

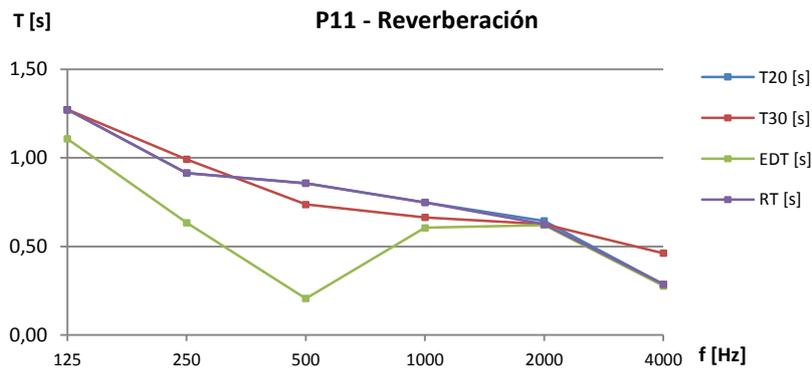
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,65
STI masculino [-]	0,66
RASTI [-]	0,71
ALCONS[%]	3,73

POSICIÓN 11 CAVEA MEDIA



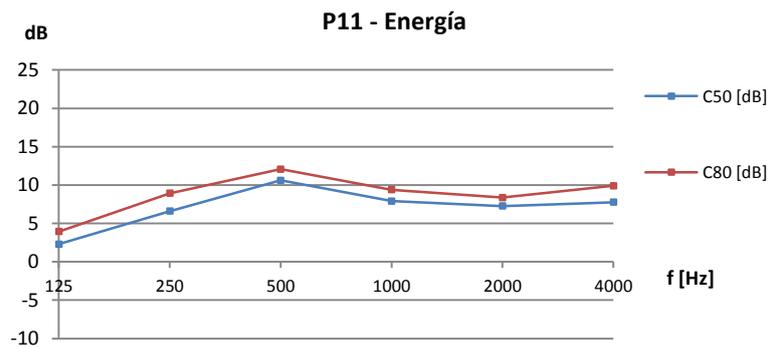
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,27	0,92	0,86	0,75	0,64	0,29
T30 [s]	1,27	0,99	0,74	0,66	0,63	0,46
EDT [s]	1,11	0,63	0,21	0,61	0,62	0,28
RT [s]	1,27	0,92	0,86	0,75	0,63	0,29



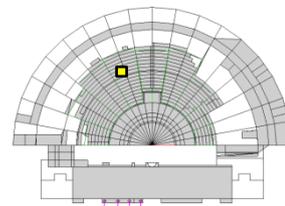
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	2,3	6,6	10,6	7,9	7,3	7,8
C80 [dB]	3,9	8,9	12,1	9,4	8,4	9,9
D50 [-]	0,6	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

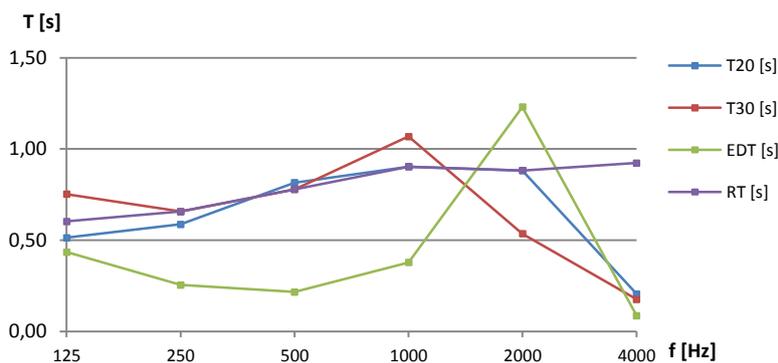
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,71
STI masculino [-]	0,72
RASTI [-]	0,77
ALCONS[%]	2,61



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,51	0,59	0,82	0,90	0,88	0,21
T30 [s]	0,75	0,66	0,78	1,07	0,54	0,18
EDT [s]	0,44	0,26	0,22	0,38	1,23	0,09
RT [s]	0,60	0,66	0,78	0,90	0,88	0,92

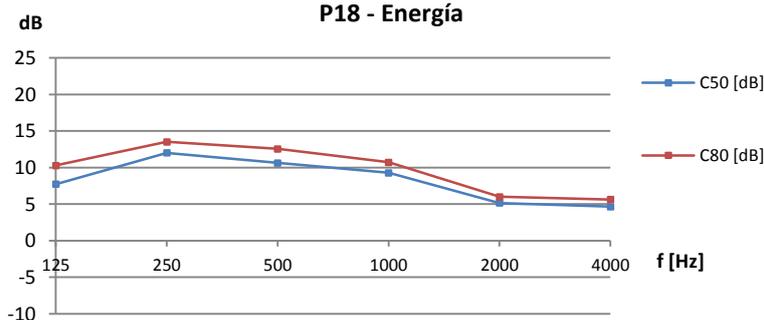
P18 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

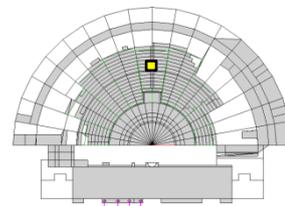
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	7,7	12,0	10,6	9,3	5,2	4,7
C80 [dB]	10,3	13,5	12,6	10,7	6,0	5,6
D50 [-]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7

P18 - Energía



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

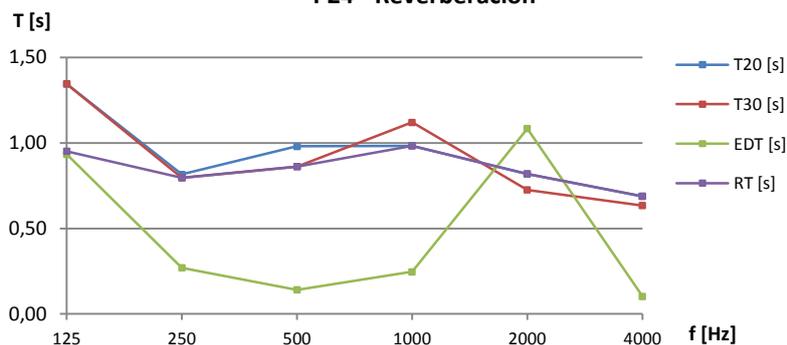
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,70
STI masculino [-]	0,72
RASTI [-]	0,75
ALCONS[%]	2,91



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,35	0,82	0,98	0,98	0,82	0,69
T30 [s]	1,35	0,80	0,86	1,12	0,73	0,63
EDT [s]	0,93	0,27	0,14	0,25	1,08	0,10
RT [s]	0,95	0,80	0,86	0,98	0,82	0,69

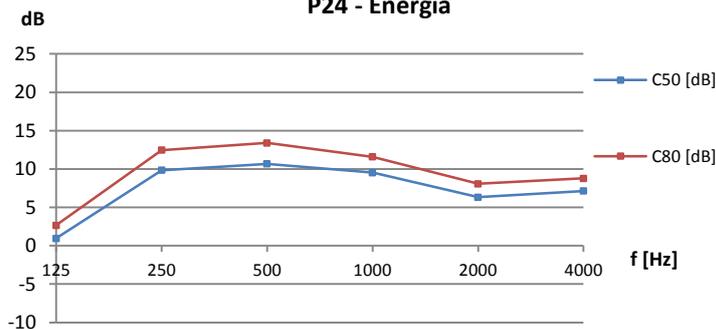
P24 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

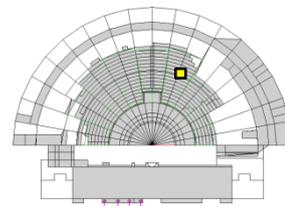
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	1,0	9,8	10,7	9,5	6,3	7,1
C80 [dB]	2,7	12,5	13,4	11,6	8,1	8,8
D50 [-]	0,6	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8

P24 - Energía



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

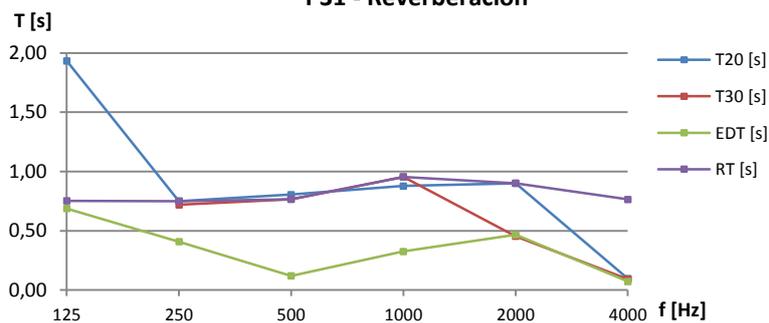
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,73
STI masculino [-]	0,73
RASTI [-]	0,78
ALCONS[%]	2,51



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,93	0,75	0,81	0,88	0,90	0,10
T30 [s]		0,72	0,77	0,96	0,45	0,09
EDT [s]	0,69	0,41	0,12	0,33	0,47	0,07
RT [s]	0,75	0,75	0,77	0,96	0,90	0,77

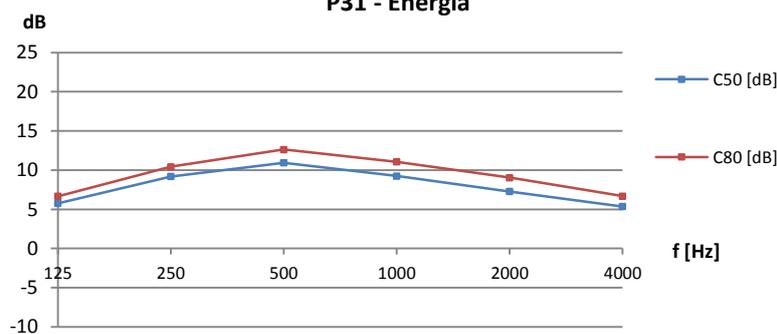
P31 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

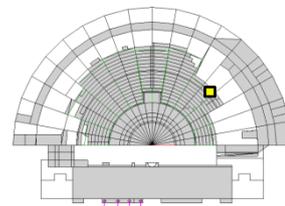
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	5,8	9,2	10,9	9,3	7,3	5,4
C80 [dB]	6,7	10,4	12,6	11,1	9,0	6,7
D50 [-]	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8

P31 - Energía



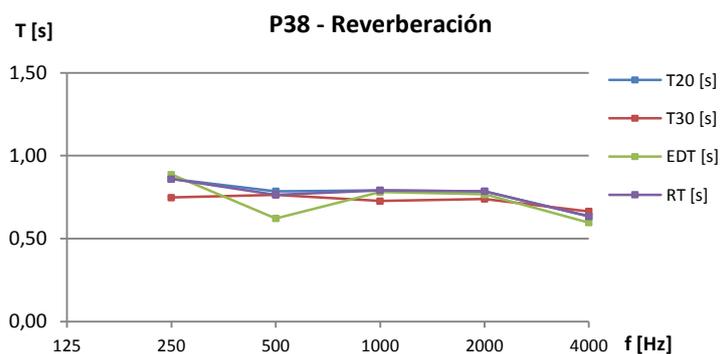
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,7
STI masculino [-]	0,71
RASTI [-]	0,78
ALCONS[%]	2,42



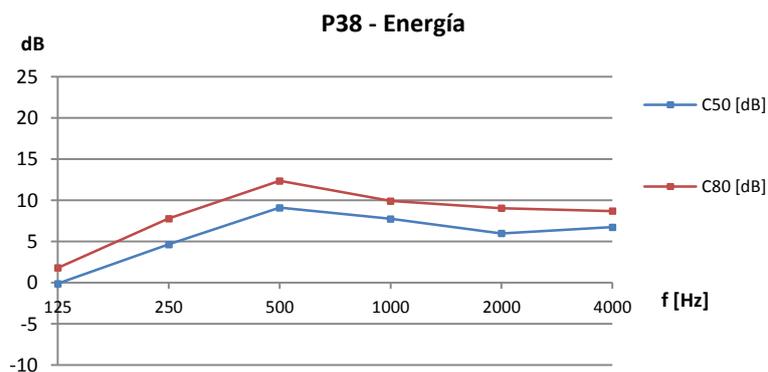
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]		0,86	0,79	0,79	0,79	0,64
T30 [s]		0,75	0,77	0,73	0,74	0,67
EDT [s]		0,89	0,62	0,78	0,77	0,60
RT [s]		0,86	0,77	0,79	0,79	0,64



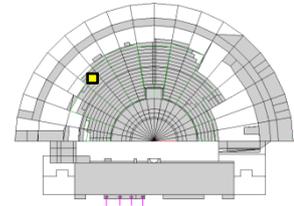
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	-0,1	4,6	9,1	7,7	6,0	6,7
C80 [dB]	1,8	7,8	12,4	9,9	9,0	8,7
D50 [-]	0,5	0,7	0,9	0,9	0,8	0,8



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

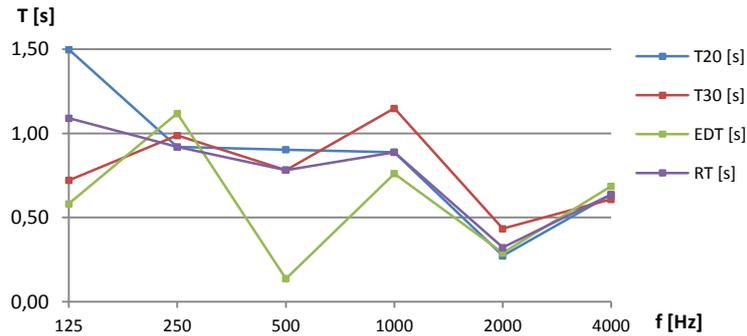
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,70
STI masculino [-]	0,70
RASTI [-]	0,74
ALCONS[%]	3,01



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,50	0,92	0,90	0,89	0,27	0,64
T30 [s]	0,72	0,99	0,78	1,15	0,43	0,61
EDT [s]	0,58	1,12	0,14	0,76	0,29	0,69
RT [s]	1,09	0,92	0,78	0,89	0,32	0,64

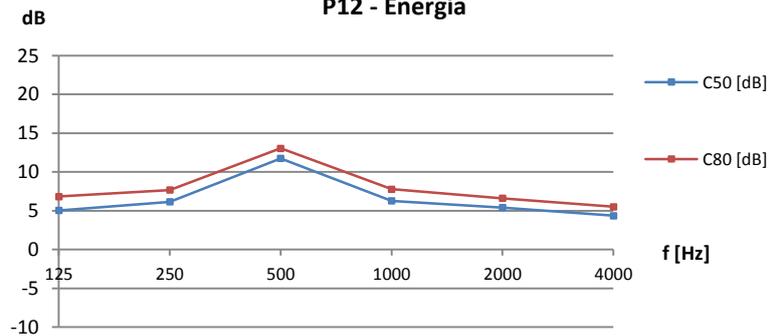
P12 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

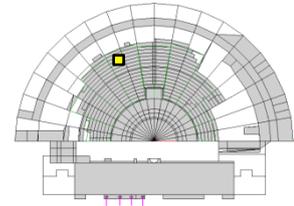
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	5,0	6,2	11,8	6,3	5,4	4,4
C80 [dB]	6,8	7,7	13,1	7,8	6,6	5,5
D50 [-]	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,7

P12 - Energía



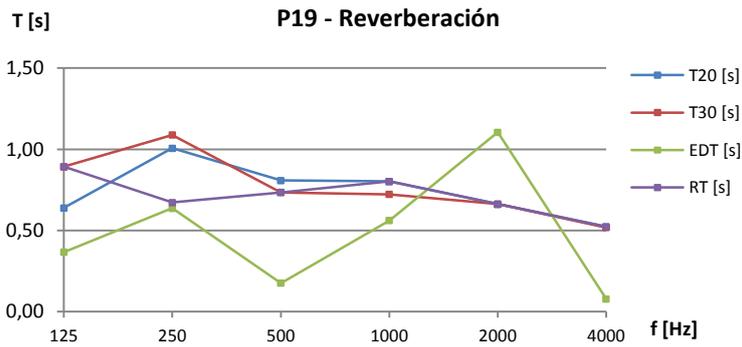
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,64
STI masculino [-]	0,66
RASTI [-]	0,73
ALCONS[%]	3,24



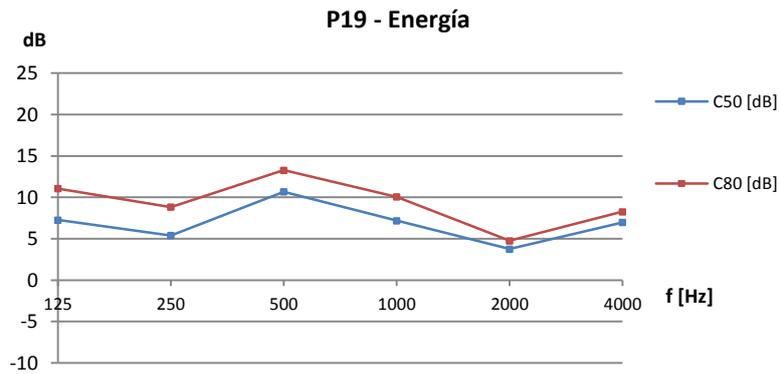
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,64	1,01	0,81	0,80	0,66	0,52
T30 [s]	0,89	1,09	0,74	0,72	0,66	0,52
EDT [s]	0,37	0,64	0,18	0,56	1,11	0,08
RT [s]	0,89	0,67	0,74	0,80	0,66	0,52



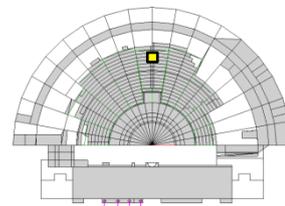
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	7,3	5,4	10,7	7,2	3,8	7,0
C80 [dB]	11,1	8,8	13,3	10,1	4,8	8,3
D50 [-]	0,8	0,8	0,9	0,8	0,7	0,8



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

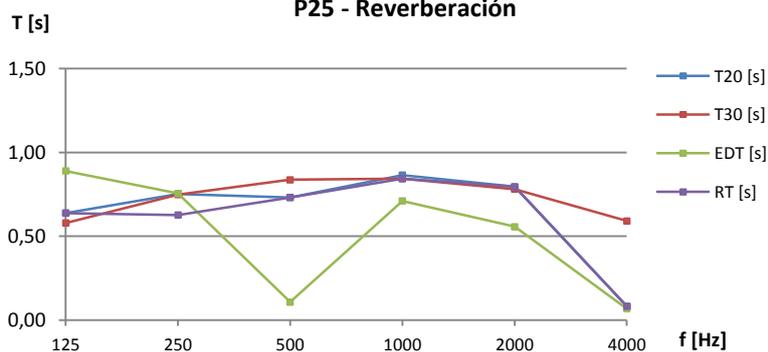
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,67
STI masculino [-]	0,68
RASTI [-]	0,72
ALCONS[%]	3,41



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,64	0,75	0,73	0,87	0,80	0,08
T30 [s]	0,58	0,75	0,84	0,84	0,78	0,59
EDT [s]	0,89	0,76	0,11	0,71	0,56	0,07
RT [s]	0,64	0,63	0,73	0,84	0,80	0,08

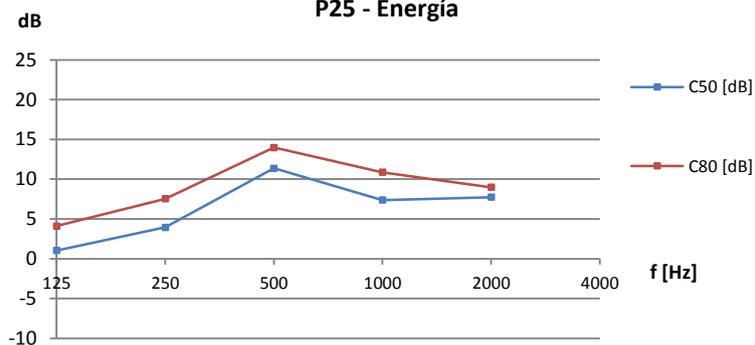
P25 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

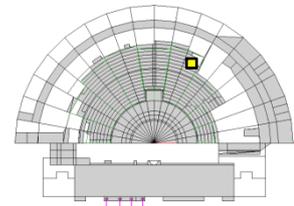
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	1,1	3,9	11,4	7,4	7,8	
C80 [dB]	4,1	7,5	14,0	10,9	9,0	
D50 [-]	0,6	0,7	0,9	0,9	0,9	1,0

P25 - Energía



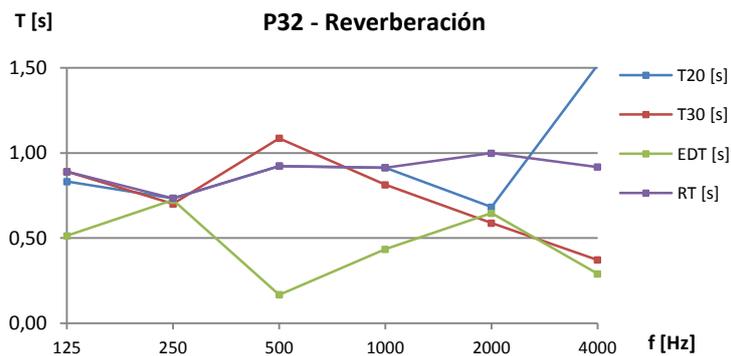
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,73
STI masculino [-]	0,74
RASTI [-]	0,8
ALCONS[%]	2,28



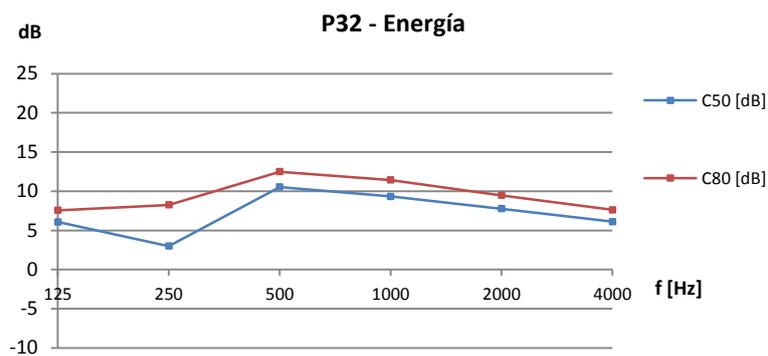
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,83	0,73	0,92	0,91	0,68	1,52
T30 [s]	0,89	0,70	1,09	0,81	0,59	0,37
EDT [s]	0,51	0,72	0,17	0,44	0,65	0,29
RT [s]	0,89	0,73	0,92	0,91	1,00	0,92



PARÁMETROS DE ENERGÍA

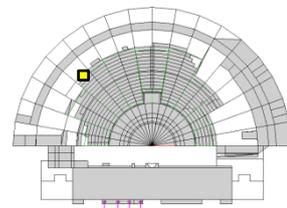
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	6,1	3,0	10,5	9,3	7,8	6,1
C80 [dB]	7,6	8,3	12,5	11,4	9,5	7,6
D50 [-]	0,8	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

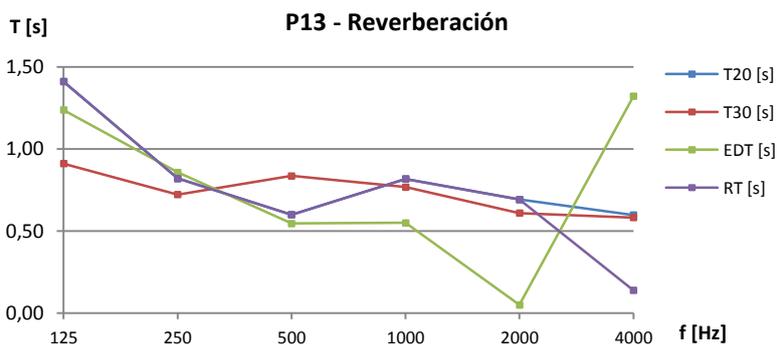
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,74
STI masculino [-]	0,75
RASTI [-]	0,8
ALCONS[%]	2,28

POSICIÓN 13 CAVEA MEDIA



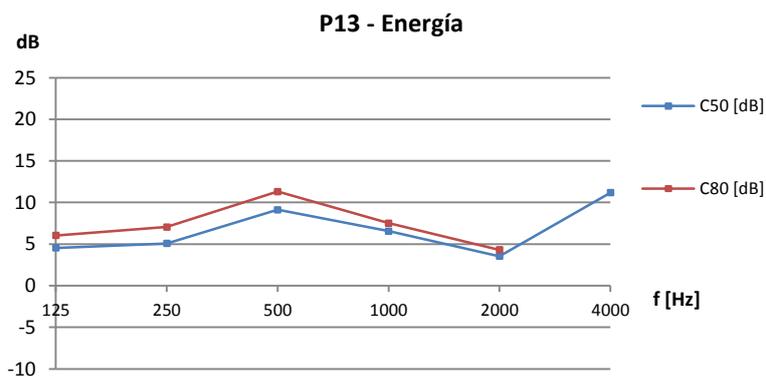
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,41	0,82	0,60	0,82	0,69	0,60
T30 [s]	0,91	0,72	0,84	0,77	0,61	0,58
EDT [s]	1,24	0,86	0,55	0,55	0,05	1,32
RT [s]	1,41	0,82	0,60	0,82	0,69	0,14



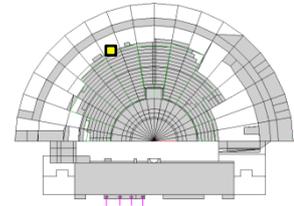
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	4,5	5,1	9,1	6,6	3,5	11,2
C80 [dB]	6,0	7,1	11,3	7,5	4,3	
D50 [-]	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	0,9



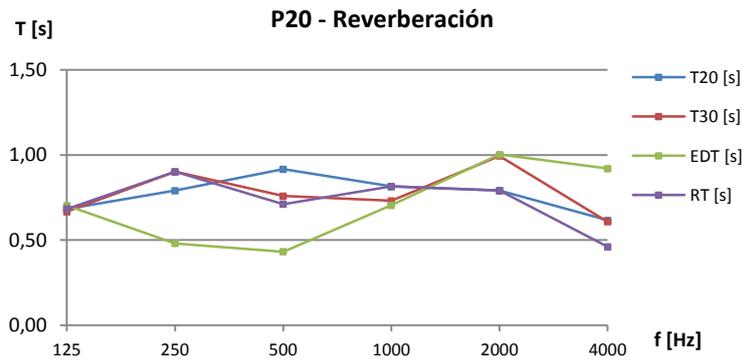
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,54
STI masculino [-]	0,56
RASTI [-]	0,65
ALCONS[%]	4,96



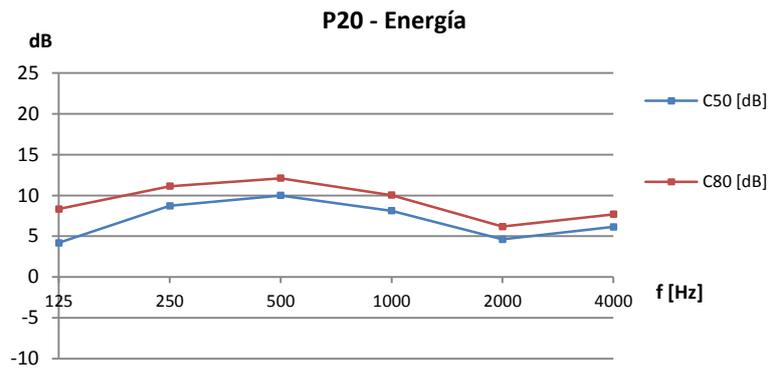
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,68	0,79	0,92	0,82	0,79	0,62
T30 [s]	0,67	0,90	0,76	0,73	1,00	0,61
EDT [s]	0,70	0,48	0,43	0,71	1,00	0,92
RT [s]	0,68	0,90	0,71	0,82	0,79	0,46



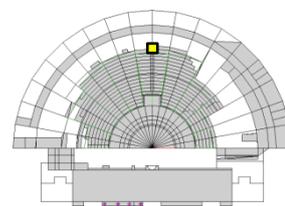
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	4,2	8,7	10,0	8,1	4,6	6,1
C80 [dB]	8,3	11,1	12,1	10,0	6,2	7,7
D50 [-]	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7	0,8



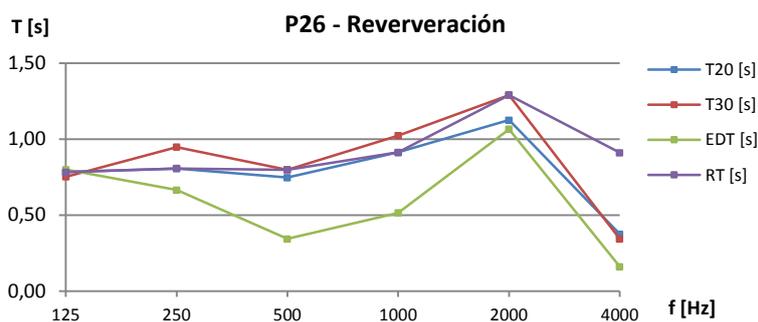
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,68
STI masculino [-]	0,70
RASTI [-]	0,74
ALCONS[%]	3,12



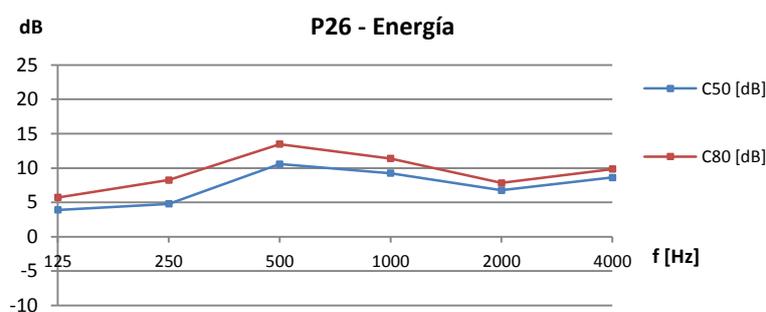
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,78	0,81	0,75	0,91	1,13	0,38
T30 [s]	0,75	0,95	0,80	1,02	1,29	0,34
EDT [s]	0,80	0,67	0,34	0,51	1,07	0,16
RT [s]	0,78	0,81	0,80	0,91	1,29	0,91



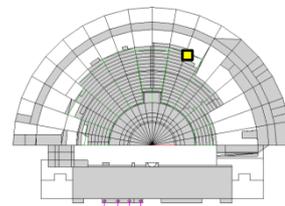
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	3,9	4,8	10,6	9,3	6,8	8,6
C80 [dB]	5,7	8,3	13,5	11,4	7,8	9,8
D50 [-]	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9



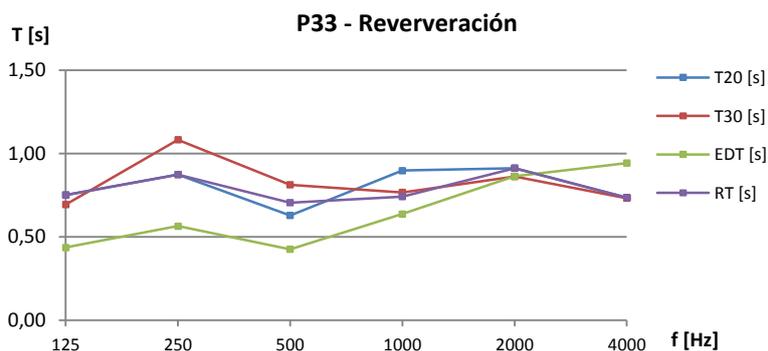
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,75
STI masculino [-]	0,76
RASTI [-]	0,79
ALCONS[%]	2,41



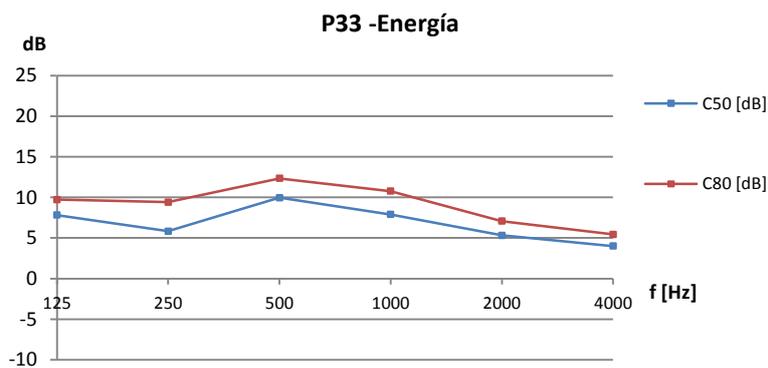
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,75	0,87	0,63	0,90	0,91	0,74
T30 [s]	0,69	1,08	0,81	0,77	0,86	0,73
EDT [s]	0,44	0,57	0,43	0,64	0,86	0,94
RT [s]	0,75	0,87	0,71	0,74	0,91	0,74



PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	7,8	5,8	10,0	7,9	5,3	4,0
C80 [dB]	9,7	9,4	12,3	10,8	7,1	5,5
D50 [-]	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	0,7

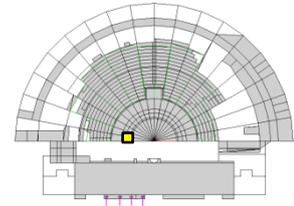


PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,68
STI masculino [-]	0,70
RASTI [-]	0,74
ALCONS[%]	3,17

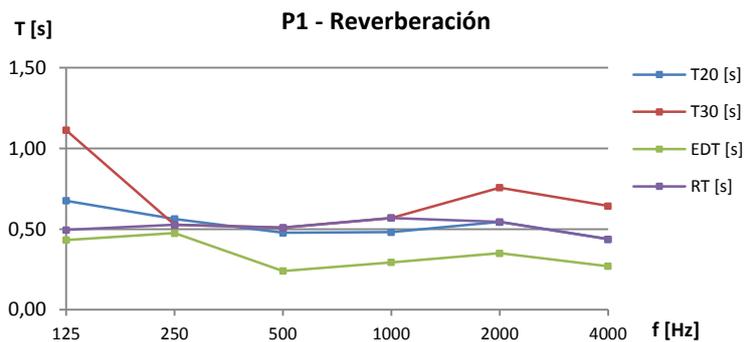
Fuente en orquesta

POSICIÓN 1 ORCHESTRA



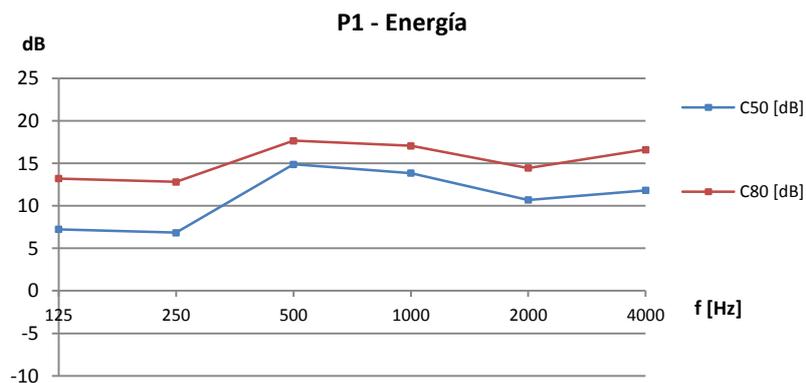
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,68	0,56	0,48	0,48	0,54	0,44
T30 [s]	1,11	0,53	0,51	0,57	0,76	0,64
EDT [s]	0,43	0,48	0,24	0,29	0,35	0,27
RT [s]	0,50	0,53	0,51	0,57	0,54	0,44



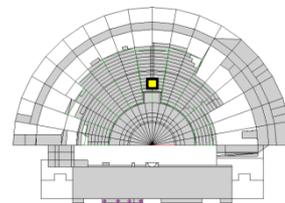
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	7,3	6,8	14,9	13,9	10,7	11,8
C80 [dB]	13,2	12,8	17,7	17,1	14,5	16,6
D50 [-]	0,8	0,8	1,0	1,0	0,9	0,9



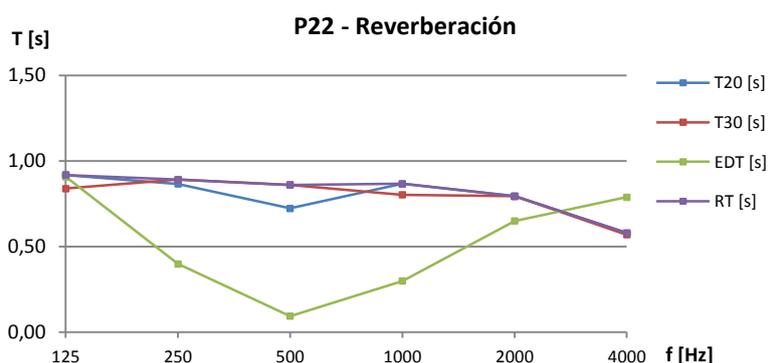
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,85
STI masculino [-]	0,85
RASTI [-]	0,87
ALCONS[%]	1,57



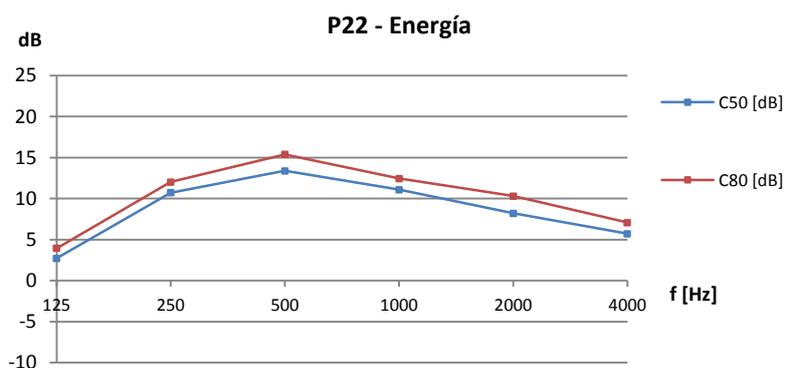
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,92	0,87	0,72	0,87	0,80	0,58
T30 [s]	0,84	0,89	0,86	0,80	0,79	0,57
EDT [s]	0,91	0,40	0,09	0,30	0,65	0,79
RT [s]	0,92	0,89	0,86	0,87	0,79	0,58



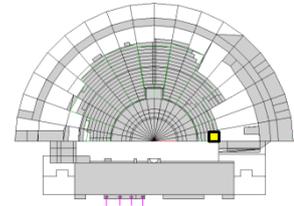
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	2,7	10,7	13,4	11,1	8,2	5,7
C80 [dB]	4,0	12,0	15,4	12,4	10,3	7,1
D50 [-]	0,7	0,9	1,0	0,9	0,9	0,8



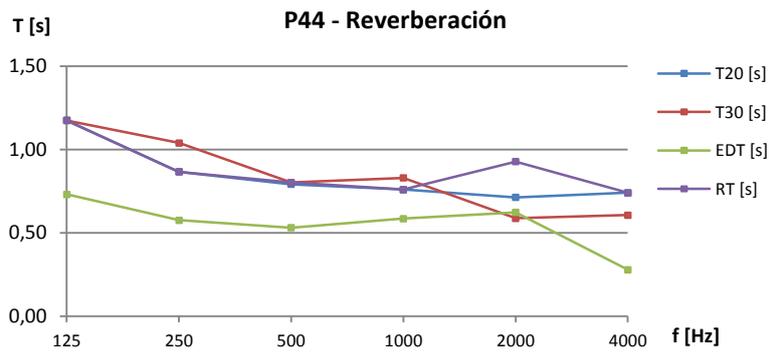
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,77
STI masculino [-]	0,78
RASTI [-]	0,84
ALCONS[%]	1,8



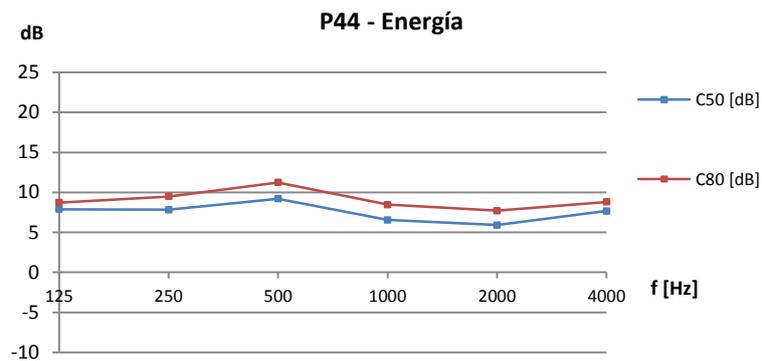
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,18	0,87	0,79	0,76	0,71	0,74
T30 [s]	1,18	1,04	0,80	0,83	0,59	0,61
EDT [s]	0,73	0,58	0,53	0,59	0,62	0,28
RT [s]	1,18	0,87	0,80	0,76	0,93	0,74



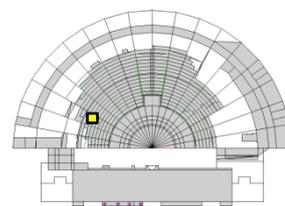
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	7,9	7,8	9,2	6,6	5,9	7,7
C80 [dB]	8,7	9,5	11,3	8,5	7,7	8,8
D50 [-]	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9



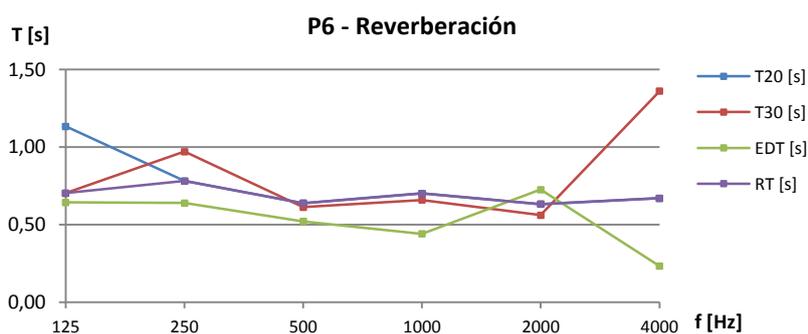
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,70
STI masculino [-]	0,71
RASTI [-]	0,75
ALCONS[%]	2,98



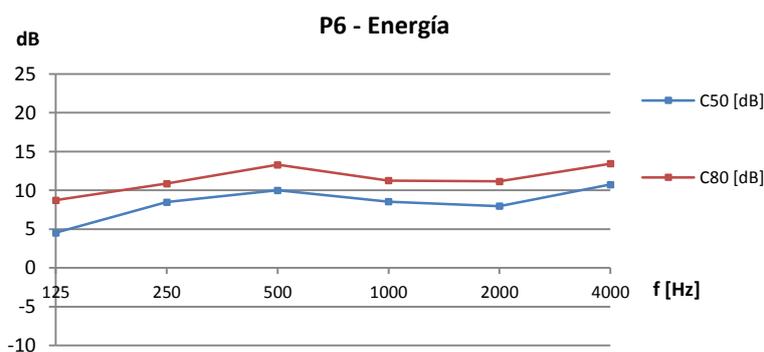
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,13	0,78	0,64	0,70	0,63	0,67
T30 [s]	0,70	0,97	0,61	0,66	0,56	1,36
EDT [s]	0,64	0,64	0,52	0,44	0,73	0,23
RT [s]	0,70	0,78	0,64	0,70	0,63	0,67



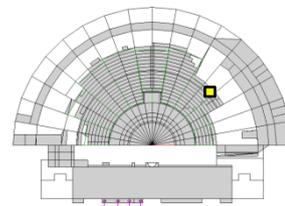
PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	4,5	8,5	10,0	8,6	8,0	10,8
C80 [dB]	8,7	10,9	13,3	11,3	11,2	13,4
D50 [-]	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

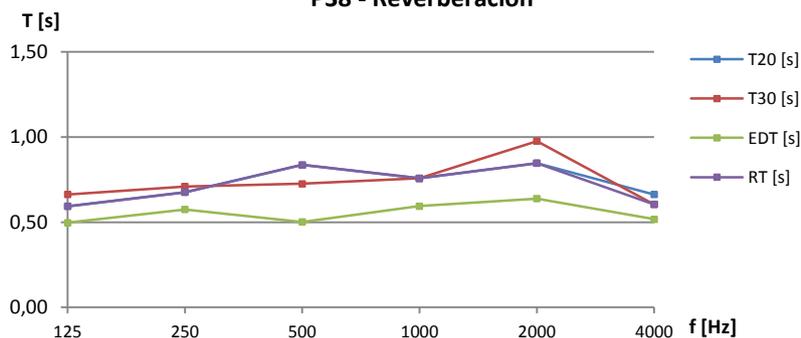
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,80
STI masculino [-]	0,80
RASTI [-]	0,81
ALCONS[%]	2,13



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,59	0,68	0,84	0,76	0,85	0,66
T30 [s]	0,66	0,71	0,73	0,76	0,98	0,61
EDT [s]	0,50	0,58	0,50	0,60	0,64	0,52
RT [s]	0,59	0,68	0,84	0,76	0,85	0,61

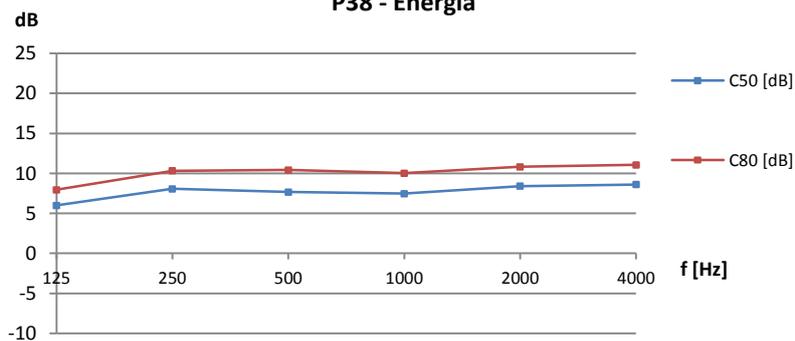
P38 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

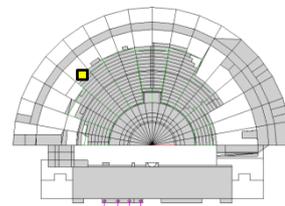
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	6,0	8,1	7,7	7,5	8,4	8,6
C80 [dB]	8,0	10,3	10,4	10,0	10,8	11,1
D50 [-]	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

P38 - Energía



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

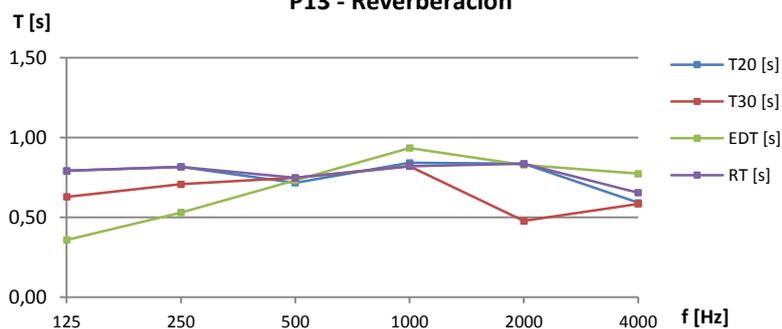
PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,73
STI masculino [-]	0,74
RASTI [-]	0,77
ALCONS[%]	2,6



PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	0,79	0,82	0,72	0,84	0,84	0,59
T30 [s]	0,63	0,71	0,75	0,82	0,48	0,59
EDT [s]	0,36	0,53	0,73	0,94	0,83	0,77
RT [s]	0,79	0,82	0,75	0,82	0,84	0,66

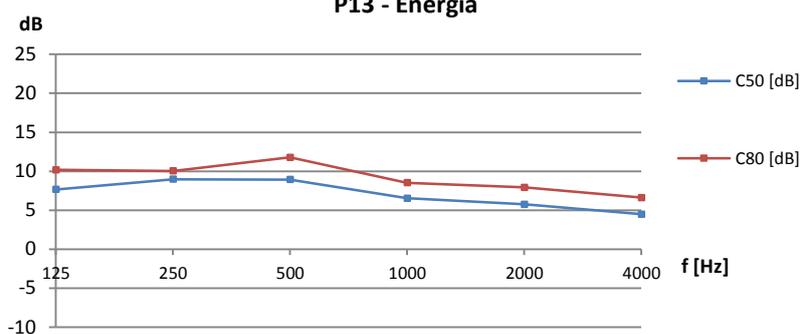
P13 - Reverberación



PARÁMETROS DE ENERGÍA

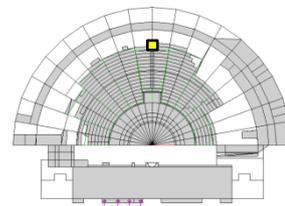
PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	7,7	9,0	8,9	6,5	5,8	4,5
C80 [dB]	10,2	10,0	11,8	8,5	7,9	6,6
D50 [-]	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7

P13 - Energía



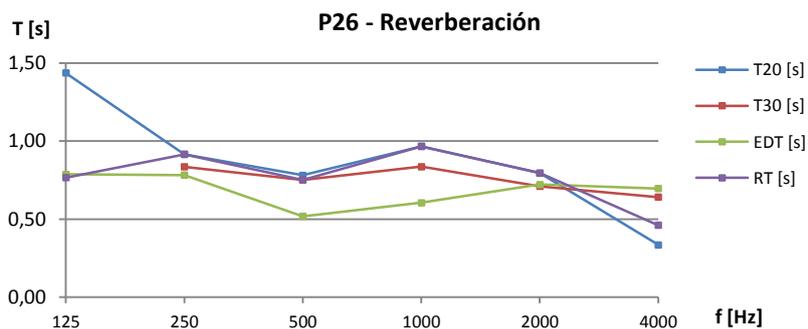
PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,66
STI masculino [-]	0,67
RASTI [-]	0,73
ALCONS[%]	3,23



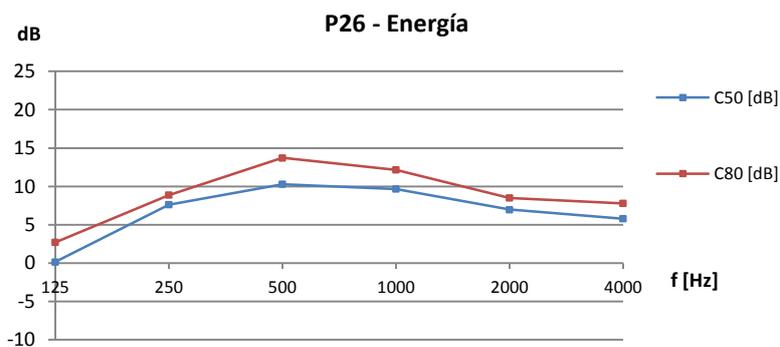
PARÁMETROS DE REVERBERACIÓN

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	1,44	0,92	0,78	0,97	0,80	0,34
T30 [s]		0,84	0,75	0,84	0,71	0,64
EDT [s]	0,79	0,78	0,52	0,61	0,72	0,70
RT [s]	0,77	0,92	0,75	0,97	0,80	0,46



PARÁMETROS DE ENERGÍA

PARÁMETRO/F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB]	0,2	7,6	10,3	9,7	7,0	5,8
C80 [dB]	2,7	8,9	13,7	12,2	8,5	7,8
D50 [-]	0,5	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8



PARÁMETROS DE INTELIGIBILIDAD

PARÁMETRO	VALOR
STI femenino [-]	0,71
STI masculino [-]	0,72
RASTI [-]	0,76
ALCONS[%]	2,76

ANEXO 3. DATOS DE DIFUSIÓN

A3.a: NIVEL DE PRESIÓN SONORA A 1m DE LA FUENTE

A3.b: NIVELES LZeq POR BANDAS DE OCTAVA

A3.c: NIVELES LZeq Y LAeq GLOBALES

A3.a: NIVEL DE PRESIÓN SONORA A 1m DE LA FUENTE

FUENTE EN ESCENARIO		FUENTE EN ORQUESTA	
LZeq (1m)		LZeq (1m)	
Tercios de octava		Tercios de octava	
50Hz	68,13	50Hz	67,62
63Hz	73,26	63Hz	72,53
80Hz	76,29	80Hz	76,36
100Hz	83,21	100Hz	81,94
125Hz	90,58	125Hz	90,48
160Hz	96,32	160Hz	96,54
200Hz	97,07	200Hz	97,5
250Hz	95,47	250Hz	93,76
315Hz	96,03	315Hz	95,9
400Hz	93,39	400Hz	92,64
500Hz	93,08	500Hz	92,83
630Hz	89,72	630Hz	89,5
800Hz	88,39	800Hz	88,57
1kHz	87,27	1kHz	86,61
1.25kHz	87,8	1.25kHz	84,54
1.6kHz	89,04	1.6kHz	86,92
2kHz	85,5	2kHz	87,84
2.5kHz	83,42	2.5kHz	87,4
3.15kHz	84,92	3.15kHz	84,47
4kHz	82,42	4kHz	78,67
5kHz	81,62	5kHz	79,75
6.3kHz	82,56	6.3kHz	75,74
8kHz	81,3	8kHz	75,79
10kHz	81,36	10kHz	76,09
Lzeq Global	104,44	Lzeq Global	104,16

Datos generales

Posición: a 1,90 m de la exedra central del escenario.

Señal: ruido rosa (15 seg).

LAeq (1m): 99,53dB

Tª: 25,8° C

Hora: 13:36h

Fecha: 25/04/2014

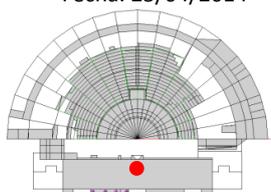


Tabla A3.1 Izquierda, Valores del nivel Lp a 1 m de la fuente en tercios de octava (fuente en escenario).

Datos generales

Posición: a 5,50 m de la exedra central del escenario.

Señal: ruido rosa (15 seg).

LAeq (1m): 99,60dB

Tª: 27,6° C

Hora: 15:26h

Fecha: 25/04/2014

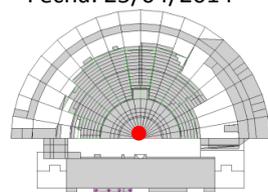
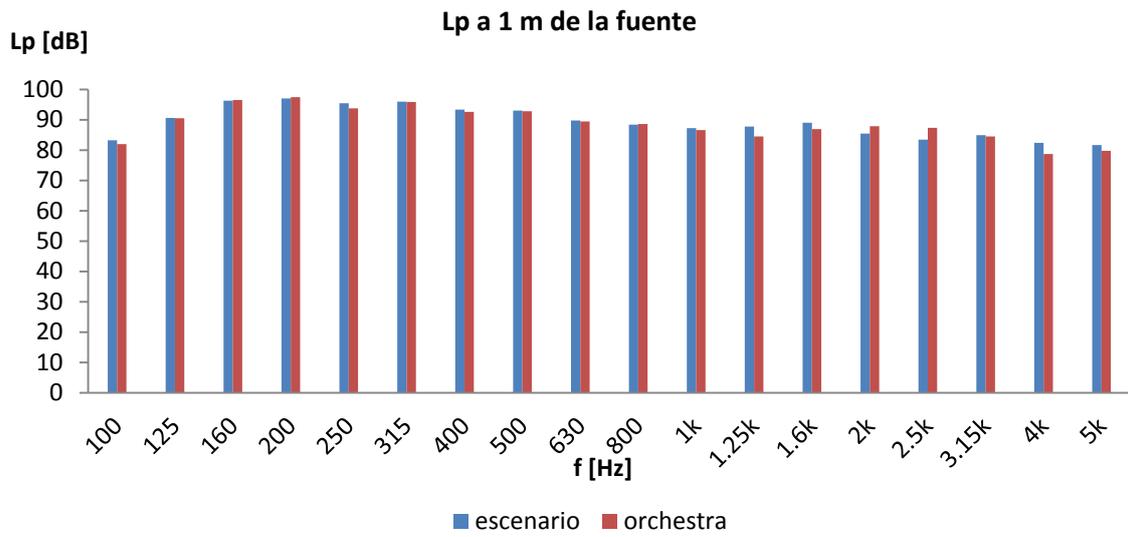


Tabla A3.2.Derecha, Valores del nivel Lp a 1 m de la fuente en tercios de octava (fuente en orquesta).

REPRESENTACIÓN GRÁFICA



Gráfica A3.1 Comparativa de nivel Lp a 1 metro por tercios de octava para dos posiciones de fuente distintas.

A3.b: NIVELES LZeq POR BANDAS DE OCTAVA

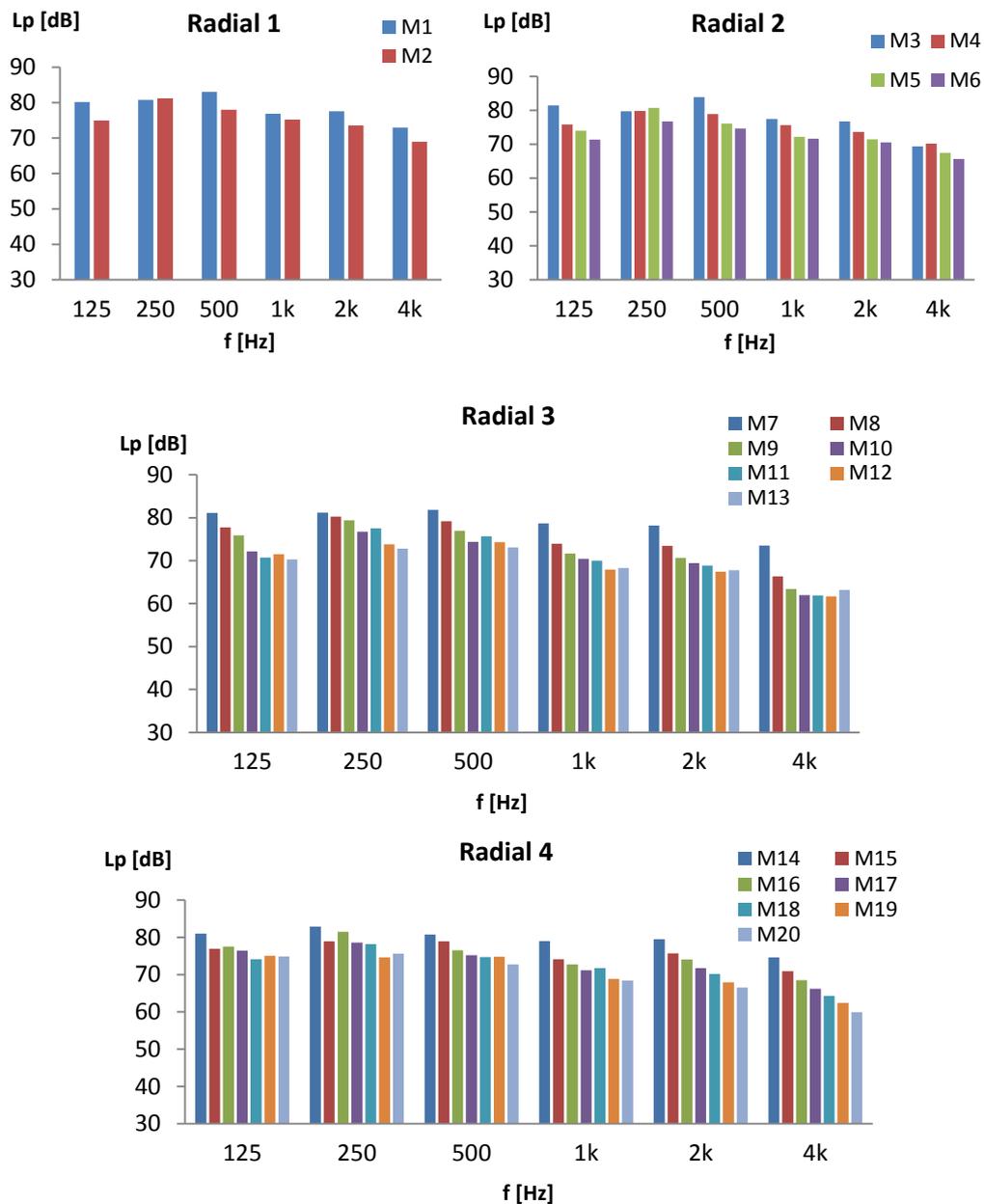
VALORES MEDIDOS

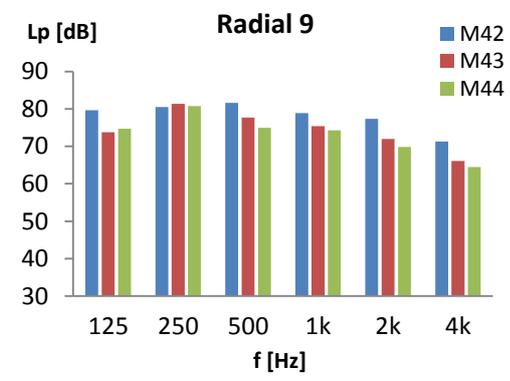
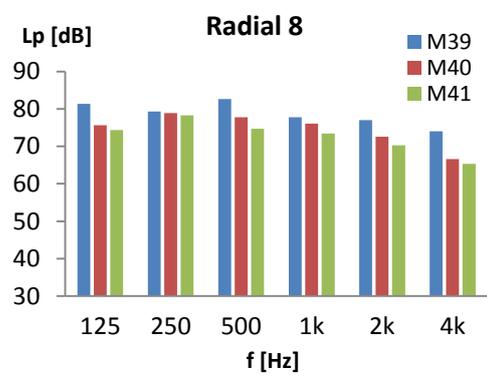
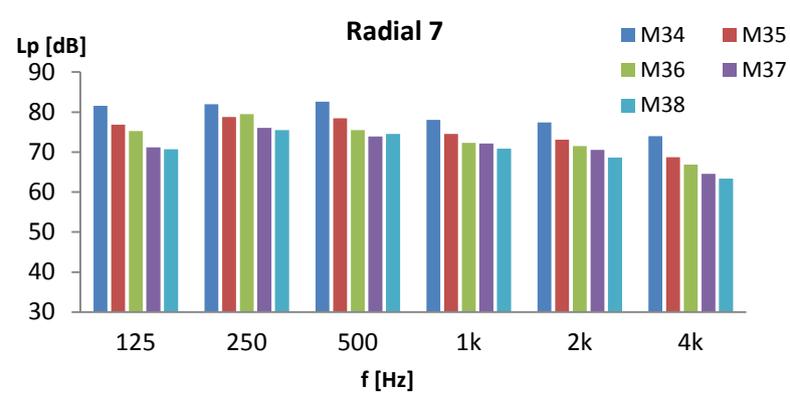
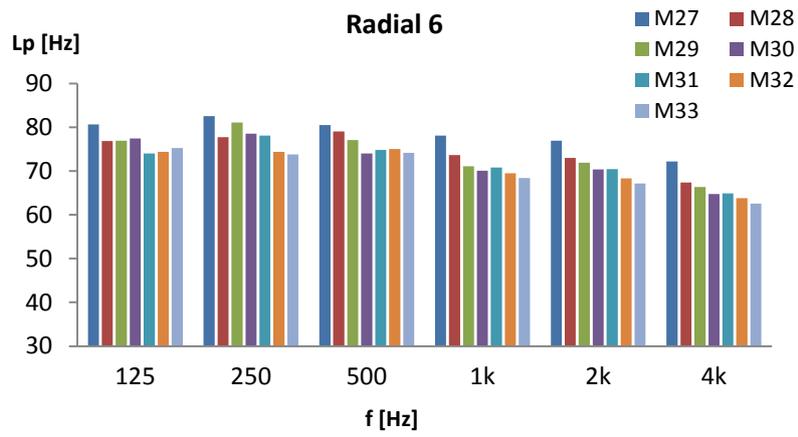
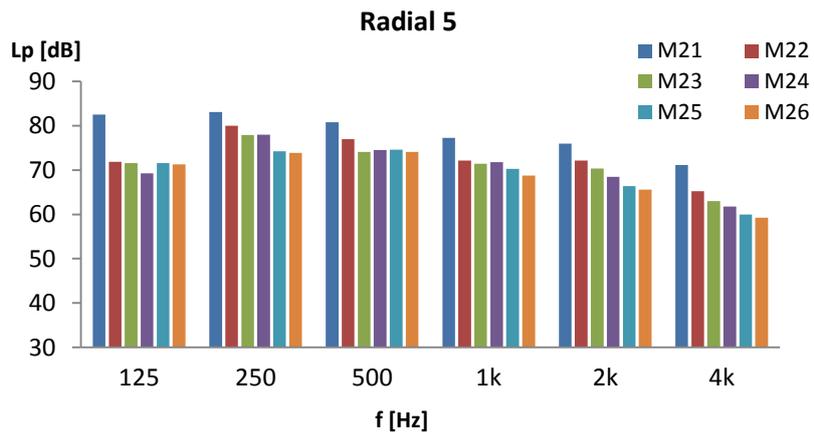
		Lp (dB) - FUENTE EN ESCENARIO							
MEDIDA	DIST. FUENTE (m)	FRECUENCIA							
		63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
M1	8,95	69,5	80,2	80,8	83,1	76,9	77,6	73,0	66,3
M42	9,32	68,5	79,7	80,5	81,6	78,8	77,3	71,3	68,6
M3	10,03	69,6	81,4	79,7	83,9	77,4	76,7	69,4	67,6
M39	10,53	68,1	81,3	79,3	82,6	77,8	77,0	74,0	67,0
M7	11,49	68,0	81,1	81,2	81,8	78,7	78,2	73,5	69,3
M34	11,53	67,9	81,6	82,0	82,6	78,1	77,4	74,0	67,3
M27	11,95	68,9	80,7	82,5	80,5	78,1	76,9	72,2	65,8
M14	11,97	69,0	81,0	82,9	80,7	79,0	79,5	74,7	70,0
M21	12,25	68,0	82,5	83,1	80,8	77,2	76,0	71,2	68,7
M2	13,01	66,3	74,9	81,3	78,1	75,2	73,6	69,0	64,0
M43	13,33	64,7	73,8	81,3	77,7	75,4	72,0	66,1	60,9
M4	14,26	67,4	75,8	79,8	78,9	75,6	73,6	70,2	63,2
M40	14,81	66,4	75,7	78,9	77,8	76,1	72,5	66,6	63,3
M44	15,26	65,0	74,7	80,7	75,0	74,2	69,9	64,4	62,8
M8	16,15	67,3	77,7	80,2	79,2	74,0	73,4	66,3	65,3
M35	16,30	66,9	76,8	78,8	78,4	74,6	73,1	68,7	60,4
M5	16,34	65,6	74,0	80,7	76,1	72,1	71,4	67,5	62,3
M41	16,69	64,3	74,4	78,3	74,7	73,4	70,3	65,3	62,4
M15	17,12	68,1	76,9	78,9	78,9	74,1	75,7	70,9	65,4
M28	17,17	67,4	76,9	77,8	79,0	73,6	73,0	67,4	61,4
M9	18,47	66,8	75,9	79,4	77,0	71,6	70,6	63,4	62,6
M6	18,51	63,1	71,3	76,7	74,7	71,7	70,5	65,6	60,7
M36	18,65	65,4	75,3	79,5	75,5	72,3	71,5	66,9	59,7
M16	19,46	66,2	77,5	81,5	76,6	72,7	74,0	68,5	62,9
M29	19,48	65,9	77,0	81,1	77,1	71,1	71,9	66,4	60,3
M22	19,75	64,1	71,8	80,0	77,0	72,2	72,1	65,2	62,8
M10	20,64	64,1	72,2	76,7	74,4	70,4	69,5	62,0	58,6
M37	20,87	64,7	71,2	76,1	73,9	72,2	70,6	64,5	59,3
M17	21,74	64,0	76,4	78,6	75,2	71,1	71,8	66,2	61,9
M30	21,83	63,5	77,5	78,6	74,0	70,1	70,4	64,8	60,0
M23	21,93	61,9	71,6	77,9	74,1	71,4	70,4	63,0	60,9
M11	22,43	65,0	70,7	77,5	75,7	70,0	68,9	61,9	56,8
M38	22,64	65,2	70,7	75,5	74,5	70,9	68,6	63,4	57,7
M18	23,57	65,4	74,2	78,2	74,7	71,8	70,2	64,3	60,6
M31	23,64	64,8	74,1	78,1	74,8	70,8	70,4	64,9	60,4
M24	23,89	63,9	69,3	78,0	74,5	71,8	68,5	61,7	59,8
M12	24,72	64,8	71,5	73,8	74,3	67,9	67,4	61,7	54,0

M32	25,76	63,8	74,4	74,4	75,0	69,5	68,4	63,8	59,1
M19	25,83	63,8	75,0	74,7	74,8	68,8	67,9	62,4	59,0
M25	26,16	62,5	71,6	74,3	74,6	70,2	66,4	60,0	57,8
M13	27,07	62,1	70,3	72,8	73,1	68,3	67,8	63,2	54,8
M33	28,21	63,7	75,2	73,8	74,2	68,4	67,1	62,6	56,3
M20	28,29	62,5	74,9	75,7	72,7	68,4	66,5	59,9	56,7
M26	28,73	61,4	71,3	73,8	74,1	68,8	65,6	59,2	56,1

Tabla A3.3. Valores en bandas de octava tomados en cada punto de medida.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA





Gráficas A3.2 Representación por radiales de los espectros del nivel de presión sonora [dB] en cada punto de medida. Fuente en escenario.

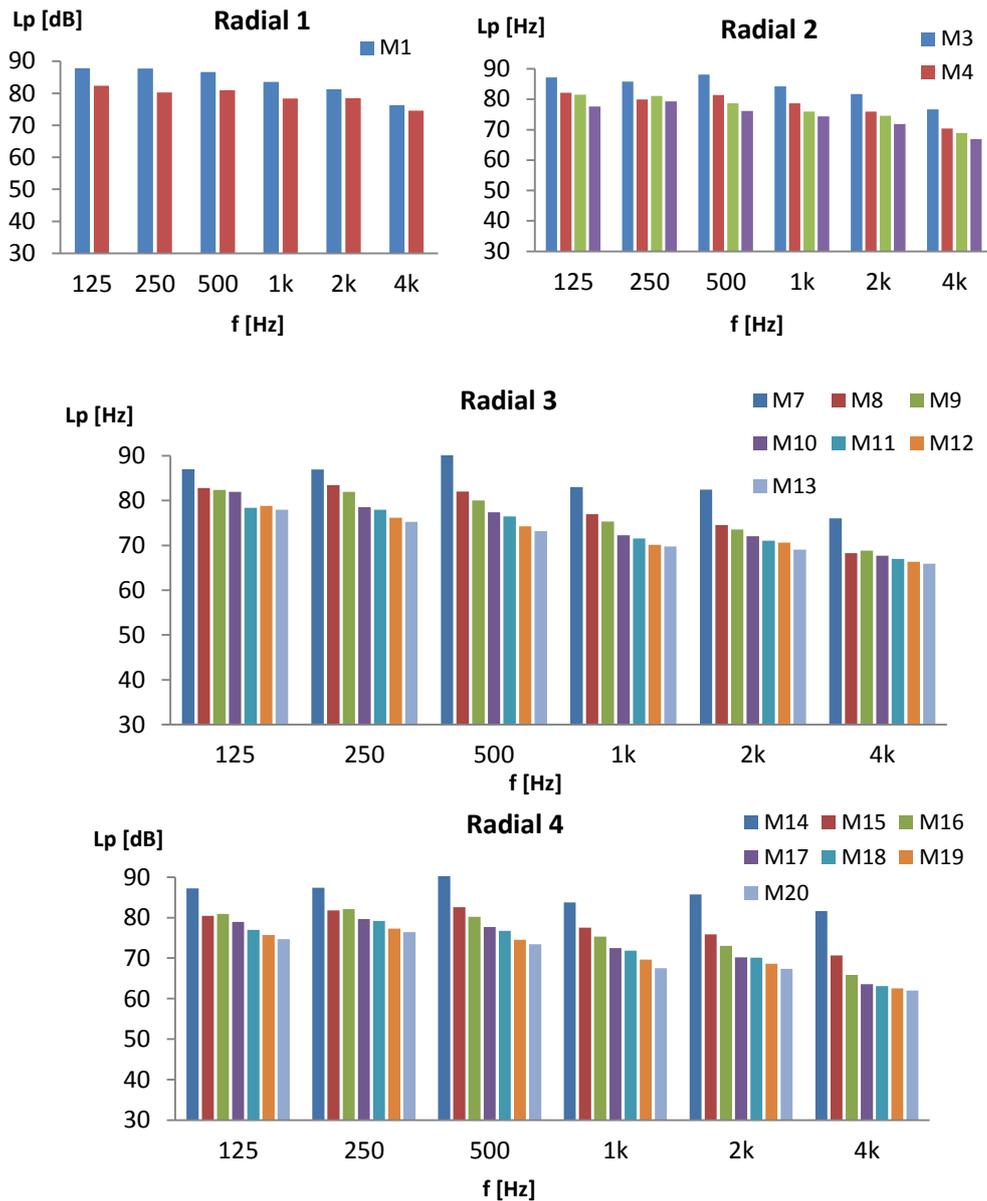
VALORES MEDIDOS

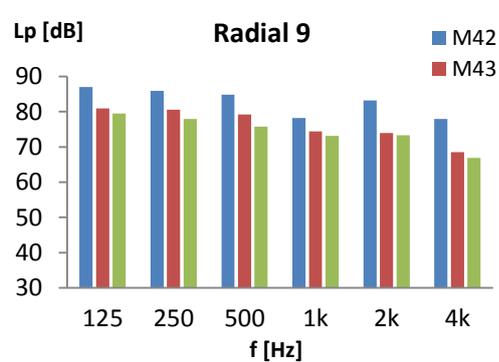
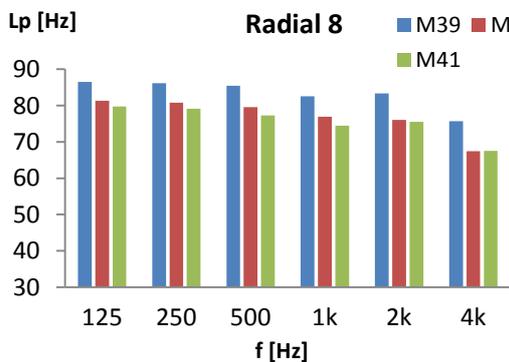
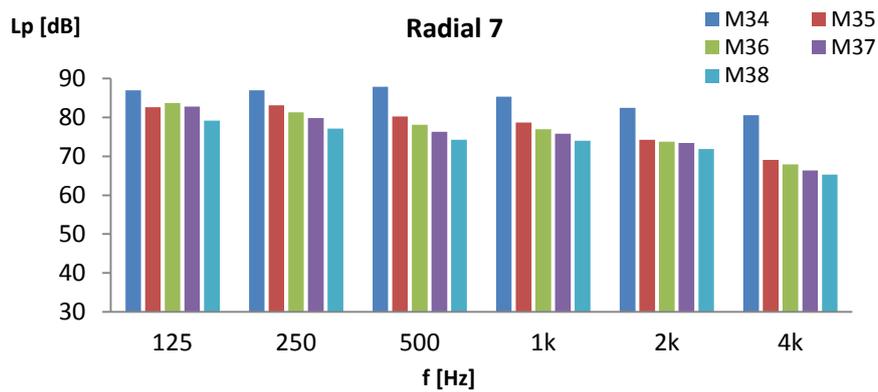
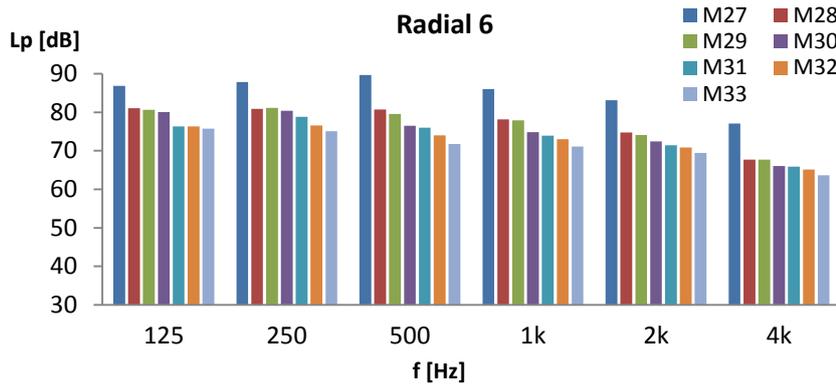
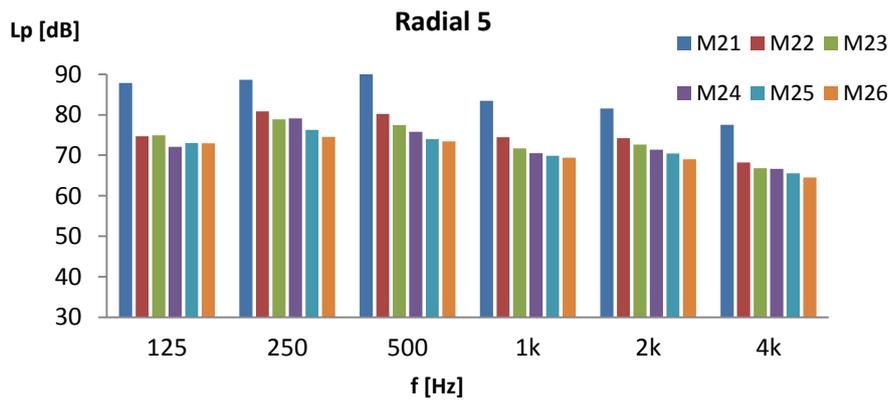
		Lp (dB) - FUENTE EN ORQUESTA							
MEDIDA	DIST. FUENTE (m)	FRECUENCIA							
		63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
M21	4,29	74,5	87,8	88,7	90,9	83,4	81,5	77,6	71,7
M27	4,35	73,6	86,9	87,8	89,7	86,0	83,1	77,0	73,3
M14	4,40	74,3	87,2	87,4	90,7	83,7	85,7	81,7	78,8
M7	4,61	74,6	87,0	87,0	90,4	83,0	82,5	76,0	75,7
M34	4,67	72,6	87,0	87,0	87,8	85,3	82,5	80,6	73,2
M39	5,07	71,9	86,5	86,1	85,4	82,5	83,3	75,7	72,9
M3	5,26	72,9	87,2	85,8	88,1	84,2	81,7	76,7	75,1
M42	5,54	68,8	87,0	85,9	84,8	78,2	83,2	78,0	74,5
M1	5,57	72,0	87,9	87,7	86,6	83,5	81,3	76,3	74,2
M15	9,52	71,6	80,5	81,8	82,6	77,5	75,9	70,6	67,5
M28	9,65	70,3	81,1	80,9	80,7	78,2	74,8	67,7	68,8
M8	9,74	71,7	82,8	83,4	82,0	77,0	74,5	68,3	65,5
M35	9,86	70,7	82,6	83,1	80,2	78,7	74,2	69,1	65,7
M40	10,28	68,0	81,3	80,8	79,6	76,9	76,0	67,4	63,6
M4	10,29	69,6	82,1	79,9	81,4	78,7	76,0	70,3	67,8
M2	10,60	70,5	82,3	80,3	80,9	78,3	78,5	74,6	70,7
M43	10,71	67,2	80,9	80,6	79,2	74,4	74,0	68,5	65,9
M29	12,06	69,0	80,6	81,1	79,5	77,9	74,1	67,7	64,5
M22	12,08	68,2	74,7	80,8	80,2	74,4	74,2	68,2	63,7
M16	12,13	69,4	80,9	82,1	80,2	75,3	73,1	65,9	64,0
M9	12,25	69,9	82,3	82,0	80,0	75,3	73,5	68,8	63,3
M36	12,34	69,6	83,7	81,3	78,1	76,9	73,7	67,9	63,9
M41	12,52	67,3	79,7	79,1	77,3	74,5	75,5	67,5	62,7
M5	12,58	68,7	81,5	81,1	78,6	76,0	74,6	68,9	65,3
M44	12,92	63,4	79,5	77,9	75,8	73,1	73,3	66,9	62,6
M23	14,38	66,1	74,9	78,9	77,4	71,7	72,6	66,8	61,0
M17	14,42	66,0	78,9	79,6	77,7	72,5	70,2	63,6	60,9
M30	14,53	65,4	80,0	80,4	76,4	74,8	72,4	66,0	63,0
M10	14,70	67,1	81,9	78,5	77,4	72,3	72,0	67,7	61,4
M37	14,79	65,8	82,7	79,8	76,3	75,8	73,4	66,4	62,9
M6	15,20	67,0	77,6	79,3	76,2	74,4	71,8	66,9	63,3
M24	16,40	67,1	72,1	79,1	75,8	70,5	71,3	66,6	59,6
M31	16,49	66,5	76,3	78,8	76,0	73,9	71,4	65,8	60,7
M18	16,50	67,6	76,9	79,2	76,7	71,8	70,1	63,1	58,1
M11	16,72	68,4	78,4	78,0	76,5	71,5	71,0	67,0	60,3
M38	16,82	67,7	79,1	77,2	74,3	74,0	71,9	65,3	60,4
M25	18,76	65,5	73,1	76,3	73,9	69,9	70,4	65,5	58,7
M32	18,85	65,0	76,3	76,5	74,0	73,0	70,9	65,1	59,8
M19	18,96	66,5	75,7	77,3	74,5	69,7	68,6	62,6	56,6
M12	19,16	67,6	78,8	76,2	74,3	70,1	70,7	66,4	59,5

M33	21,37	65,8	75,7	75,1	71,8	71,1	69,4	63,6	58,5
M26	21,41	63,9	72,9	74,5	73,4	69,4	69,0	64,5	56,9
M20	21,44	65,8	74,7	76,4	73,4	67,5	67,4	62,0	54,3
M13	21,71	66,9	77,9	75,3	73,2	69,8	69,1	65,9	58,1

Tabla A3.4 Valores en bandas de octava tomados en cada punto de medida.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA





Gráficas A3.3. Representación por radiales de los espectros del nivel de presión sonora [dB] en cada punto de medida. Fuente en orquesta.

A3.c: NIVELES LZeq Y LAeq GLOBALES

VALORES MEDIDOS

FUENTE EN ESCENARIO				FUENTE EN ORQUESTA			
NIVELES GLOBALES [dB]				NIVELES GLOBALES [dB]			
MEDIDA	DIST. FUENTE (m)	LAeq	LZeq	MEDIDA	DIST. FUENTE (m)	LAeq	LZeq
M1	8,95	84,3	87,6	M21	4,285	90,5	94,8
M42	9,32	84,0	87,3	M27	4,352	90,9	94,4
M3	10,03	84,3	87,8	M14	4,395	91,9	95,0
M39	10,53	84,3	87,6	M7	4,61	90,2	94,1
M7	11,49	84,6	87,7	M34	4,673	90,3	93,6
M34	11,53	84,6	88,1	M39	5,072	88,7	92,3
M27	11,95	83,6	87,6	M3	5,26	89,5	93,2
M14	11,97	85,1	88,2	M42	5,539	88,0	92,0
M21	12,25	83,4	88,1	M1	5,567	88,9	93,2
M2	13,01	80,9	84,8	M15	9,522	83,6	87,6
M43	13,33	80,2	85,0	M28	9,653	82,8	87,3
M4	14,26	81,2	84,6	M8	9,735	83,1	88,3
M40	14,81	80,4	84,0	M35	9,856	83,0	88,1
M44	15,26	78,6	89,1	M40	10,279	82,3	86,6
M8	16,15	80,6	85,0	M4	10,29	83,5	87,4
M35	16,30	80,3	84,1	M2	10,602	84,4	87,7
M5	16,34	79,1	83,6	M43	10,714	80,9	85,9
M41	16,69	78,2	82,5	M29	12,061	82,2	86,4
M15	17,12	81,5	84,7	M22	12,075	81,3	85,2
M28	17,17	80,1	84,0	M16	12,129	81,6	86,7
M9	18,47	78,6	83,4	M9	12,248	81,7	87,1
M6	18,51	77,4	81,2	M36	12,34	81,6	87,4
M36	18,65	78,7	83,6	M41	12,521	80,7	85,2
M16	19,46	80,4	84,9	M5	12,58	81,5	86,4
M29	19,48	79,3	84,3	M44	12,924	79,2	84,4
M22	19,75	79,2	83,2	M23	14,377	79,2	83,2
M10	20,64	76,5	80,7	M17	14,416	79,0	84,2
M37	20,87	77,2	80,6	M30	14,525	80,0	85,0
M17	21,74	78,3	82,7	M10	14,704	79,4	85,2
M30	21,83	77,4	82,6	M37	14,792	80,5	86,0
M23	21,93	77,3	81,2	M6	15,199	79,4	83,8
M11	22,43	76,6	82,2	M24	16,395	78,3	83,0
M38	22,64	76,3	80,1	M31	16,492	78,9	83,4
M18	23,57	77,4	82,0	M18	16,503	78,3	83,4
M31	23,64	77,3	82,4	M11	16,716	78,4	83,8
M24	23,89	76,9	81,0	M38	16,821	78,6	84,3

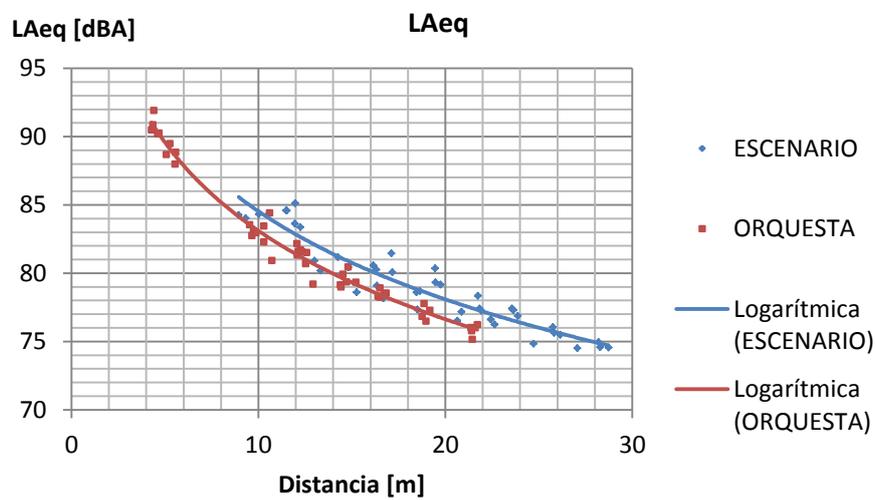
M12	24,72	74,9	79,6
M32	25,76	76,1	80,6
M19	25,83	75,6	80,5
M25	26,16	75,5	79,7
M13	27,07	74,5	79,6
M33	28,21	75,0	81,5
M20	28,29	74,6	80,0
M26	28,73	74,6	79,4

M25	18,76	76,9	80,7
M32	18,85	77,8	81,9
M19	18,956	76,5	81,6
M12	19,159	77,3	82,6
M33	21,37	76,0	80,7
M26	21,405	75,8	79,7
M20	21,442	75,2	80,5
M13	21,708	76,3	81,6

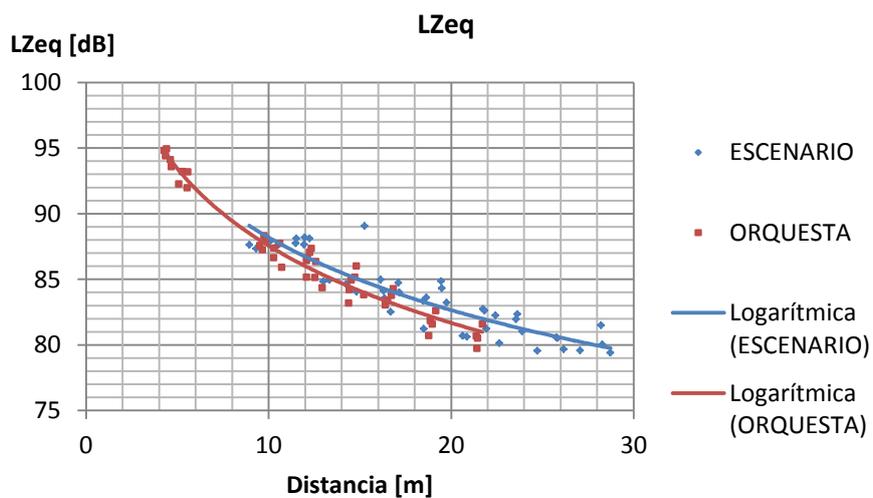
Tabla A3.5.izquierda Niveles LAeq y LZeq globales tomados en cada punto de medida, ordenados por la distancia a la fuente (escenario).

Tabla A3.6.derecha Niveles LAeq y LZeq globales tomados en cada punto de medida, ordenados por la distancia a la fuente (orquesta).

REPRESENTACION GRÁFICA



Gráfica A3.4. Comparativa LAeq con la distancia para dos posiciones de fuente.



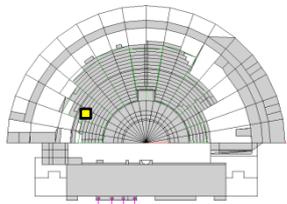
Gráfica A3.5 Comparativa LZeq con la distancia para dos posiciones de fuente.

ANEXO 4. DATOS DE RUIDO DE FONDO

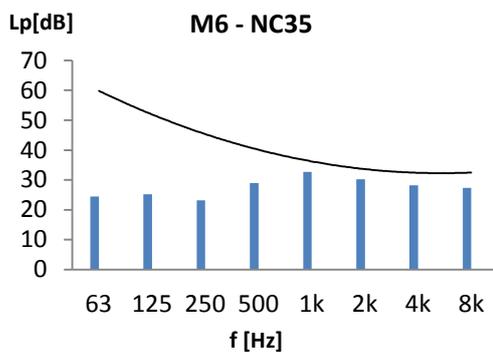
*NIVELES LZeq Y NIVELES LAeq
DATOS GENERALES DE LAS MEDIDAS*

M6 CAVEA IMA

Tercios de octava		Bandas de octava		
f [Hz]	LZeq [dB]	f [Hz]	LZeq [dB]	LAeq [dBA]
50Hz	48,4	63Hz	50,6	24,4
63Hz	44,5	125Hz	41,3	25,2
80Hz	42,6	250Hz	31,8	23,2
100Hz	37,7	500Hz	32,2	29,0
125Hz	37,4	1kHz	32,7	32,7
160Hz	33,4	2kHz	29,0	30,2
200Hz	28,2	4kHz	27,3	28,3
250Hz	26,3	8k	28,5	27,4
315Hz	26,1			
400Hz	25,7			
500Hz	28,3			
630Hz	27,7			
800Hz	28,7			
1kHz	27,6			
1.25kHz	27,4			
1.6kHz	25,6			
2kHz	24,3			
2.5kHz	22,1			
3.15kHz	22,4			
4kHz	22,0			
5kHz	23,0			
6.3kHz	26,8			
8kHz	23,1			
10kHz	13,5			

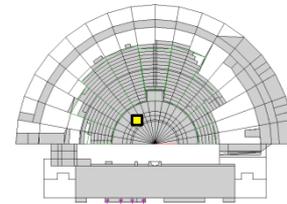


Durac. medida: 1min
Temperatura: 25,5 °C
Humedad: 38%
Veloc. del viento: 2.2-2.9 km/h
Fuentes: Perros
 Cigüeñas
 Cuervos

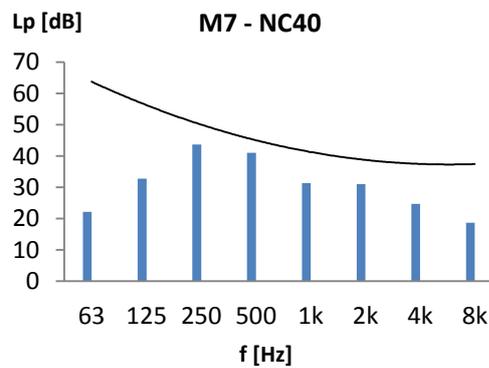


M7 ORCHESTRA

Tercios de octava		Bandas de octava		
f [Hz]	LZeq [dB]	f [Hz]	LZeq [dB]	LAeq [dBA]
50Hz	42,7	63Hz	48,3	22,1
63Hz	43,3	125Hz	48,9	32,8
80Hz	44,4	250Hz	52,2	43,6
100Hz	43,9	500Hz	44,3	41,1
125Hz	43,7	1kHz	31,4	31,4
160Hz	44,7	2kHz	29,8	31,0
200Hz	47,0	4kHz	23,7	24,7
250Hz	48,7	8k	19,7	18,6
315Hz	46,4			
400Hz	42,0			
500Hz	39,3			
630Hz	34,0			
800Hz	28,5			
1kHz	25,7			
1.25kHz	24,6			
1.6kHz	23,8			
2kHz	26,2			
2.5kHz	24,7			
3.15kHz	19,8			
4kHz	18,7			
5kHz	18,2			
6.3kHz	16,1			
8kHz	14,5			
10kHz	14,1			

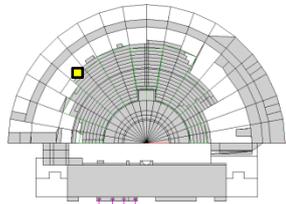


Durac. medida: 1min
Temperatura: 21,1 °C
Humedad: 37%
Veloc. viento:
Fuentes: Avión
 Gallo
 Pájaros

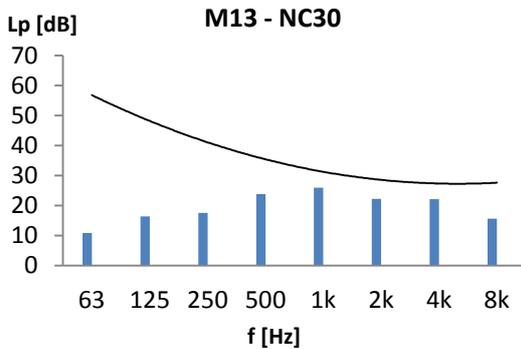


M13 CAVEA MEDIA

Tercios de octava		Bandas de octava		
f [Hz]	LZeq [dB]	f [Hz]	LZeq [dB]	LAeq [dBA]
50Hz	31,6	63Hz	37,1	10,9
63Hz	32,1	125Hz	32,5	16,4
80Hz	33,1	250Hz	26,1	17,5
100Hz	29,2	500Hz	27,0	23,8
125Hz	27,2	1kHz	26,0	26,0
160Hz	26,2	2kHz	21,0	22,2
200Hz	22,4	4kHz	21,1	22,1
250Hz	20,6	8k	16,7	15,6
315Hz	21,0			
400Hz	21,0			
500Hz	23,4			
630Hz	22,0			
800Hz	21,7			
1kHz	21,5			
1.25kHz	20,3			
1.6kHz	18,3			
2kHz	15,1			
2.5kHz	14,2			
3.15kHz	17,5			
4kHz	17,2			
5kHz	13,2			
6.3kHz	11,6			
8kHz	11,7			
10kHz	12,4			

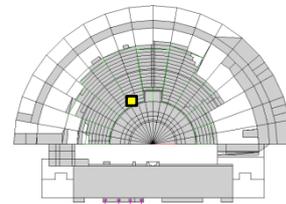


Durac. medida: 1min
Temperatura: 26,1 °C
Humedad: 33%
Veloc. del viento: 3 km/h
Fuentes: Palomas
 Gallo
 Coche

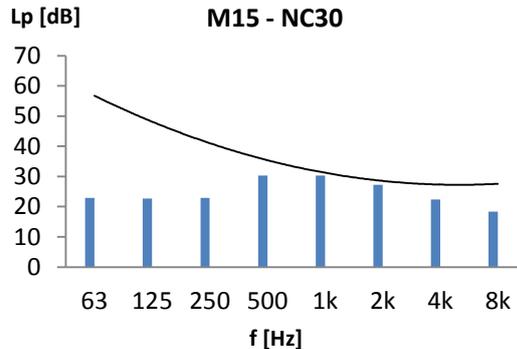


M15 CAVEA IMA

Tercios de octava		Bandas de octava		
f [Hz]	LZeq [dB]	f [Hz]	LZeq [dB]	LAeq [dBA]
50Hz	46,7	63Hz	49,1	22,9
63Hz	44,3	125Hz	38,8	22,7
80Hz	39,4	250Hz	31,5	22,9
100Hz	35,7	500Hz	33,5	30,3
125Hz	34,4	1kHz	30,3	30,3
160Hz	30,7	2kHz	26,0	27,2
200Hz	27,6	4kHz	21,3	22,3
250Hz	26,7	8k	19,5	18,4
315Hz	25,8			
400Hz	30,5			
500Hz	28,2			
630Hz	26,7			
800Hz	26,3			
1kHz	25,6			
1.25kHz	24,5			
1.6kHz	23,0			
2kHz	21,2			
2.5kHz	18,6			
3.15kHz	17,5			
4kHz	16,7			
5kHz	15,1			
6.3kHz	15,7			
8kHz	14,3			
10kHz	13,9			

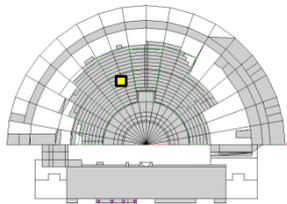


Durac. medida: 1min
Temperatura: 21,7 °C
Humedad:
Veloc. del viento: 0,5 km/h
Fuentes: Coche
 Personas
 Palomas, gallo

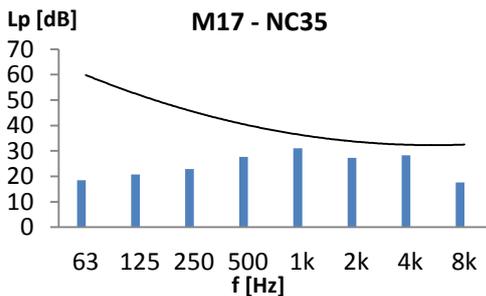


M17 CAVEA IMA

Tercios de octava		Bandas de octava		
f [Hz]	LZeq [dB]	f [Hz]	LZeq [dB]	LAeq [dBA]
50Hz	41,9	63Hz	44,7	18,5
63Hz	40,0	125Hz	36,9	20,8
80Hz	35,6	250Hz	31,5	22,9
100Hz	32,9	500Hz	30,9	27,7
125Hz	33,2	1kHz	31,1	31,1
160Hz	29,2	2kHz	26,1	27,3
200Hz	28,2	4kHz	27,3	28,3
250Hz	26,3	8k	18,7	17,6
315Hz	25,3			
400Hz	24,1			
500Hz	27,5			
630Hz	26,1			
800Hz	26,0			
1kHz	27,9			
1.25kHz	24,4			
1.6kHz	22,8			
2kHz	20,9			
2.5kHz	19,5			
3.15kHz	22,4			
4kHz	23,9			
5kHz	20,6			
6.3kHz	14,5			
8kHz	13,7			
10kHz	13,6			

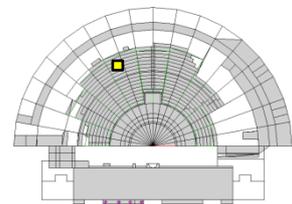


Durac. medida: 1min
Temperatura: 24 °C
Humedad: 36%
Veloc. del viento: 1,5 km/h
Fuentes: Perros
 Coche
 Grajos, Palomas
 Claxon

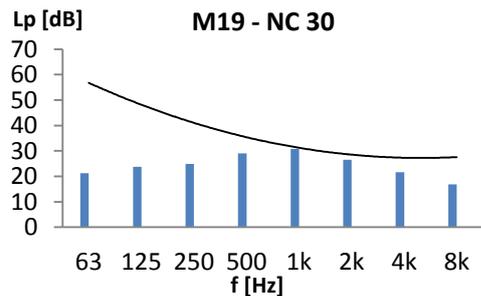


M19 CAVEA MEDIA

Tercios de octava		Bandas de octava		
f [Hz]	LZeq [dB]	f [Hz]	LZeq [dB]	LAeq [dBA]
50Hz	43,9	63Hz	47,5	21,3
63Hz	43,5	125Hz	39,9	23,8
80Hz	39,8	250Hz	33,5	24,9
100Hz	37,1	500Hz	32,3	29,1
125Hz	34,8	1kHz	30,8	30,8
160Hz	32,2	2kHz	25,3	26,5
200Hz	30,4	4kHz	20,6	21,6
250Hz	27,8	8k	18,0	16,9
315Hz	27,4			
400Hz	27,3			
500Hz	28,4			
630Hz	26,6			
800Hz	27,1			
1kHz	26,1			
1.25kHz	24,6			
1.6kHz	22,5			
2kHz	20,3			
2.5kHz	17,8			
3.15kHz	17,1			
4kHz	16,1			
5kHz	13,9			
6.3kHz	13,4			
8kHz	13,1			
10kHz	13,3			

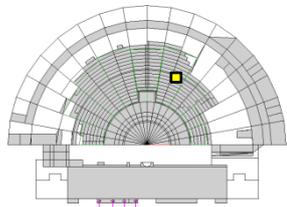


Durac. medida: 1min
Temperatura: 21,3 °C
Humedad: 41%
Veloc. del viento:
Fuentes: Personas
 Pájaros
 Coches

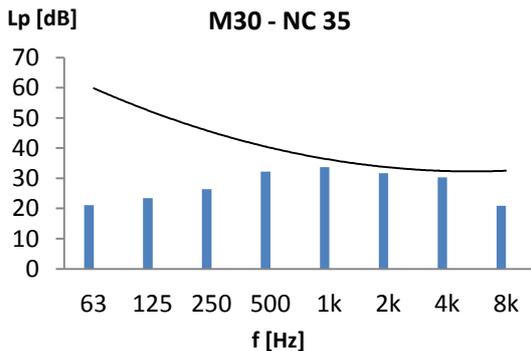


M30 CAVEA IMA

Tercios de octava		Bandas de octava		
f [Hz]	LZeq [dB]	f [Hz]	LZeq [dB]	LAeq [dBA]
50Hz	44,8	63Hz	47,3	21,1
63Hz	41,7	125Hz	39,5	23,4
80Hz	39,4	250Hz	35,0	26,4
100Hz	36,4	500Hz	35,4	32,2
125Hz	33,9	1kHz	33,7	33,7
160Hz	33,3	2kHz	30,5	31,7
200Hz	31,5	4kHz	29,3	30,3
250Hz	29,5	8k	22,0	20,9
315Hz	29,4			
400Hz	31,6			
500Hz	29,7			
630Hz	30,3			
800Hz	29,5			
1kHz	28,6			
1.25kHz	28,7			
1.6kHz	26,9			
2kHz	26,0			
2.5kHz	23,9			
3.15kHz	25,3			
4kHz	25,7			
5kHz	21,7			
6.3kHz	19,6			
8kHz	15,8			
10kHz	14,8			

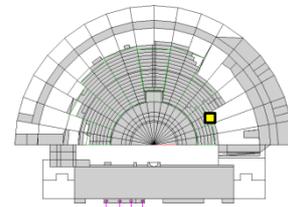


Durac. medida: 1min
Temperatura: 20,2 °C
Humedad: 44%
Velocidad del viento: 2-3,8 km/h
Fuentes: Perros
 Pájaros
 Pitido máq. Excavadora

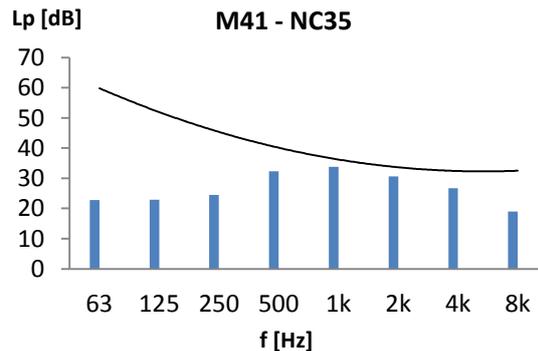


M41 CAVEA IMA

Tercios de octava		Bandas de octava		
f [Hz]	LZeq [dB]	f [Hz]	LZeq [dB]	LAeq [dBA]
50Hz	44,0	63Hz	49,0	22,8
63Hz	42,7	125Hz	39,0	22,9
80Hz	45,5	250Hz	33,1	24,5
100Hz	36,6	500Hz	35,5	32,3
125Hz	32,6	1kHz	33,8	33,8
160Hz	32,1	2kHz	29,5	30,7
200Hz	29,3	4kHz	25,7	26,7
250Hz	28,4	8k	20,1	19,0
315Hz	27,1			
400Hz	28,1			
500Hz	33,2			
630Hz	29,2			
800Hz	29,9			
1kHz	29,5			
1.25kHz	27,4			
1.6kHz	26,8			
2kHz	24,4			
2.5kHz	21,1			
3.15kHz	22,1			
4kHz	21,2			
5kHz	19,0			
6.3kHz	16,7			
8kHz	14,7			
10kHz	14,2			

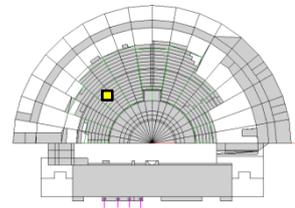


Durac. medida: 1min
Temperatura: 25,1 °C
Humedad: 34%
Velocidad del viento: 1,6 km/h
Fuentes: Coches
 Perros
 Gallo, pájaros



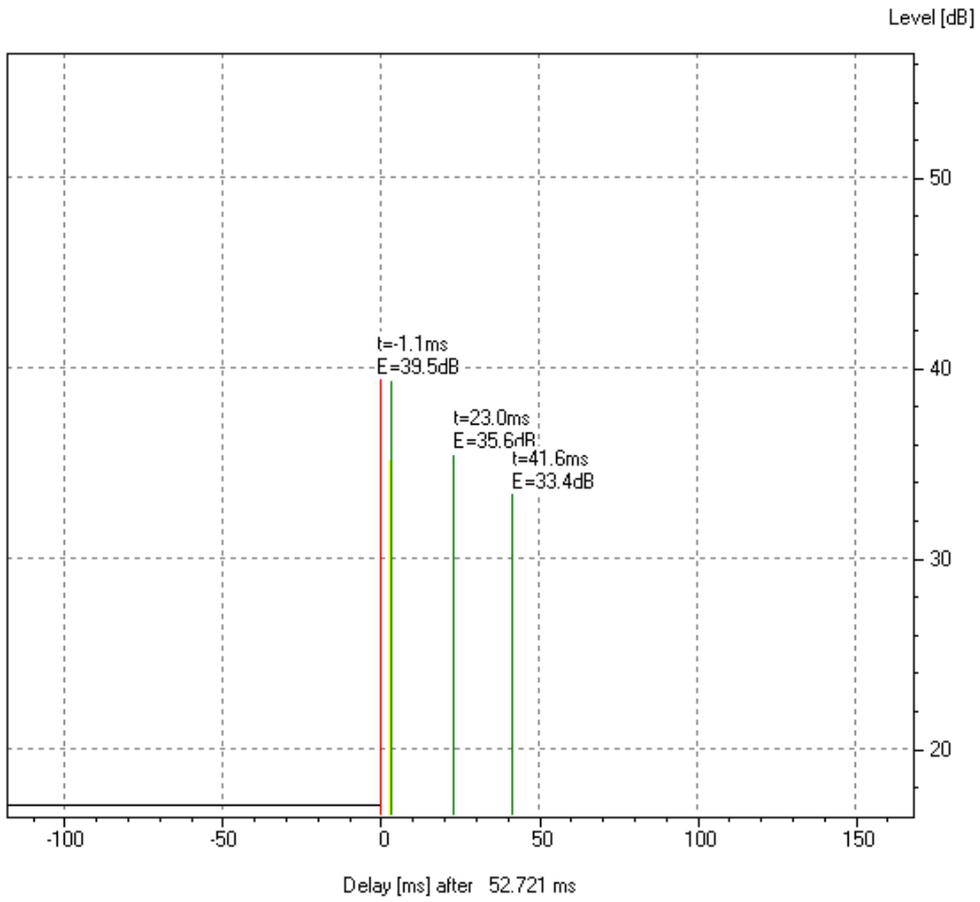
ANEXO 5. SIMULACIÓN EASE

POSICIÓN 9 CAVEA IMA

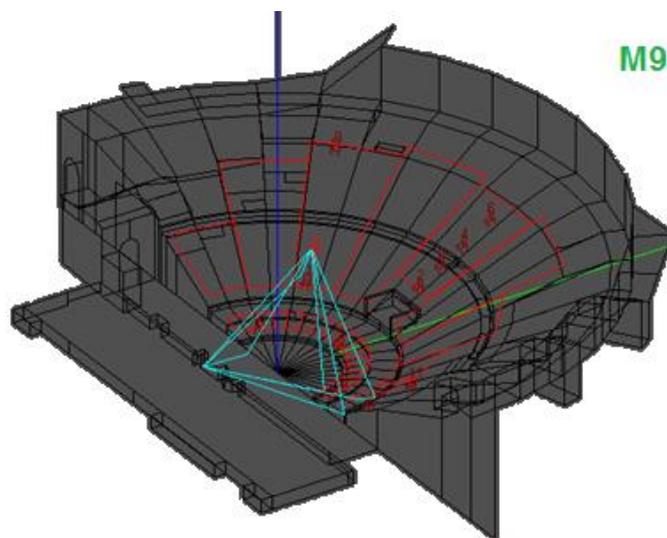


REFLECTOGRAMA

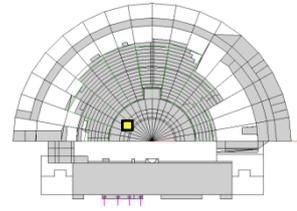
SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

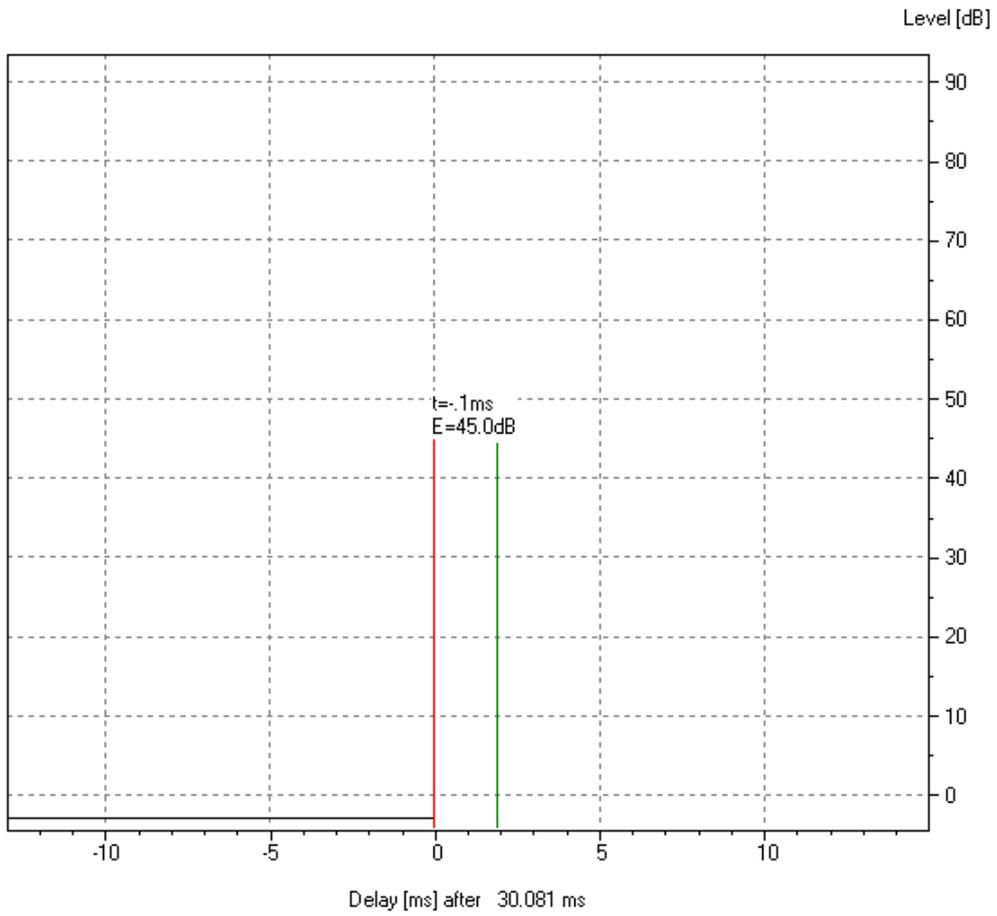


POSICIÓN 3 ORCHESTRA

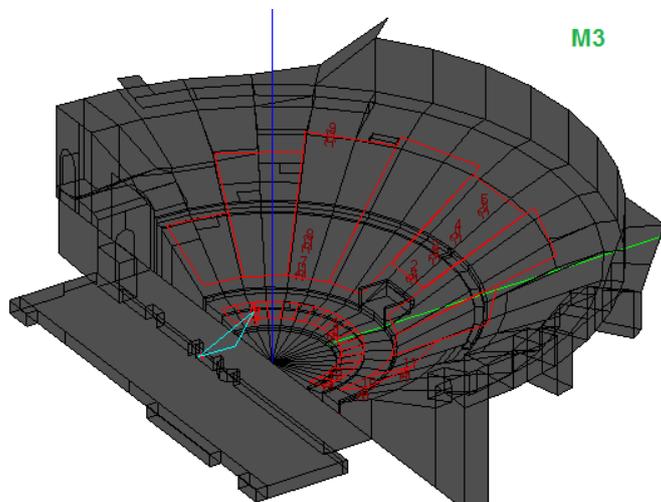


REFLECTOGRAMA

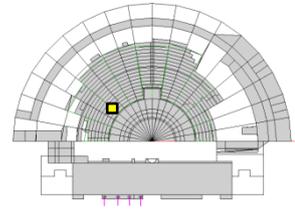
SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

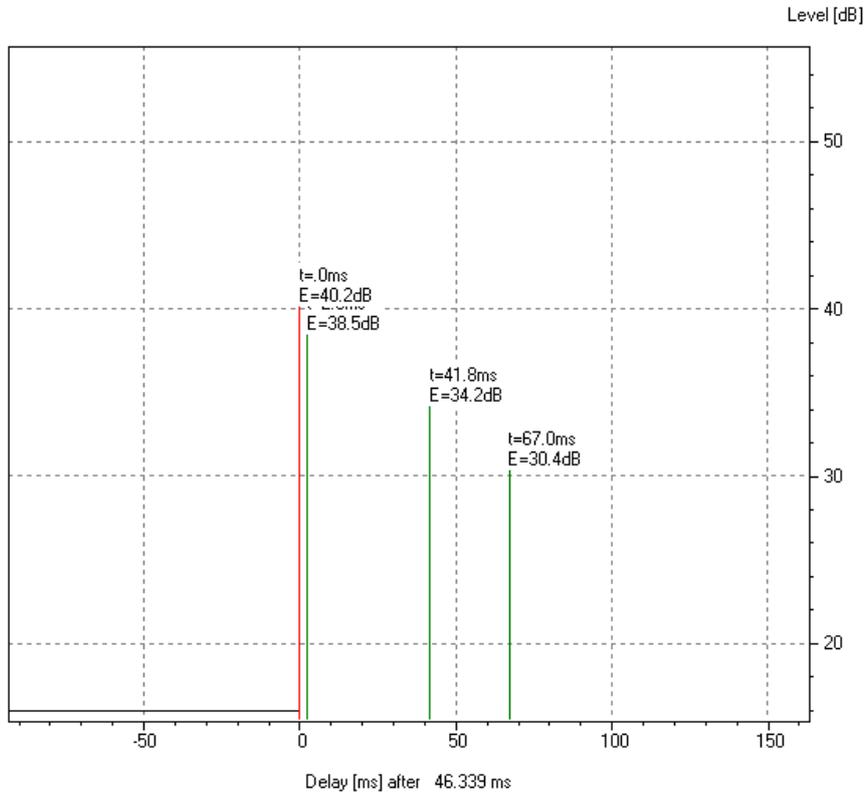


POSICIÓN 8 CAVEA IMA

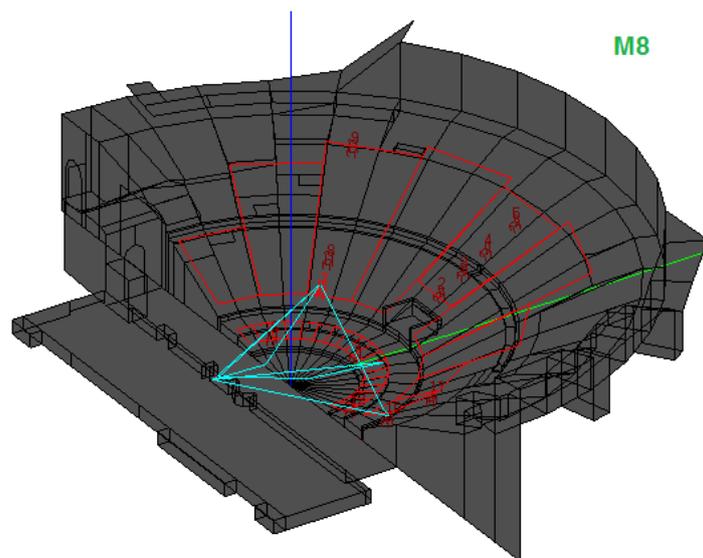


REFLECTOGRAMA

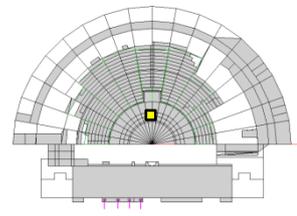
SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

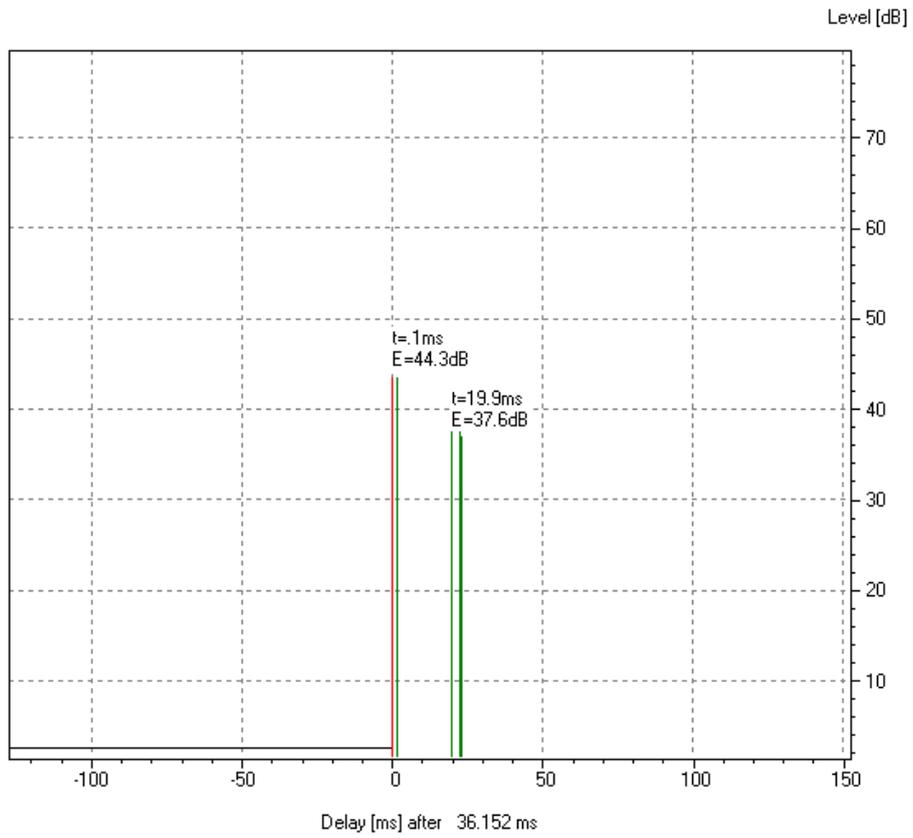


POSICIÓN 21 ORCHESTRA

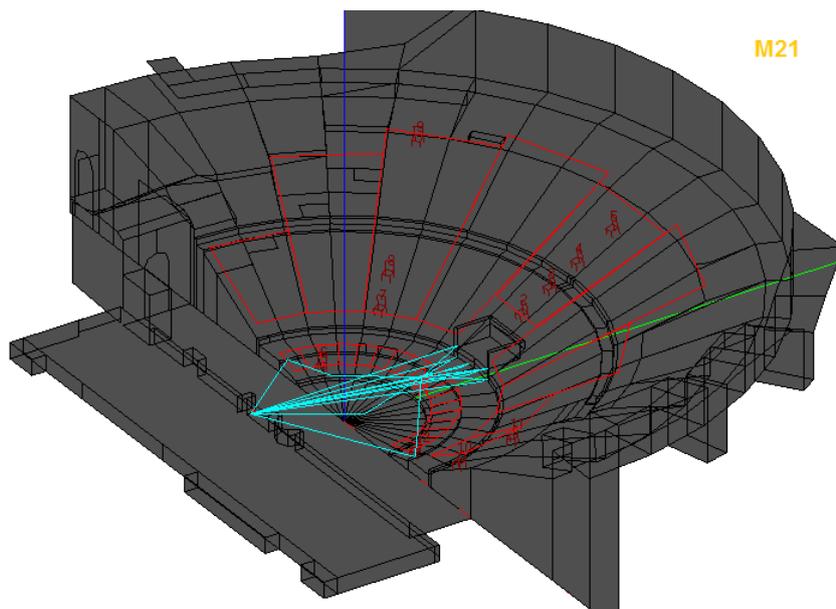


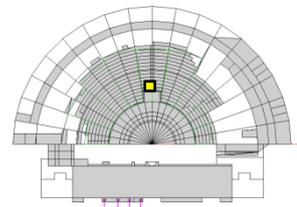
REFLECTOGRAMA

SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

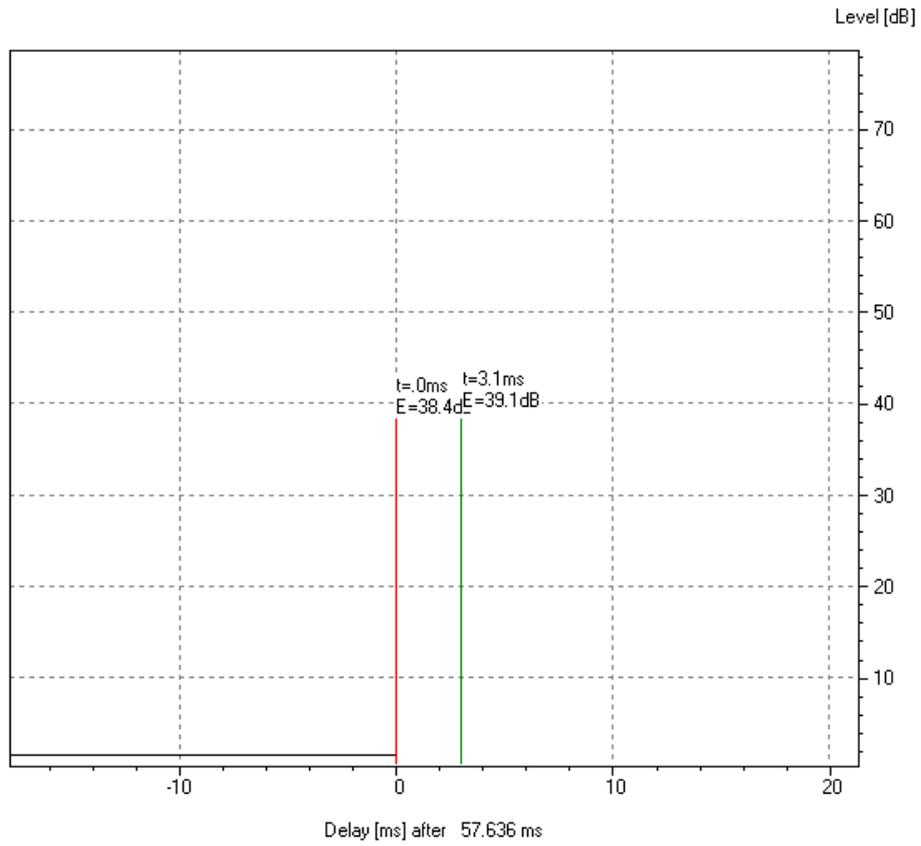




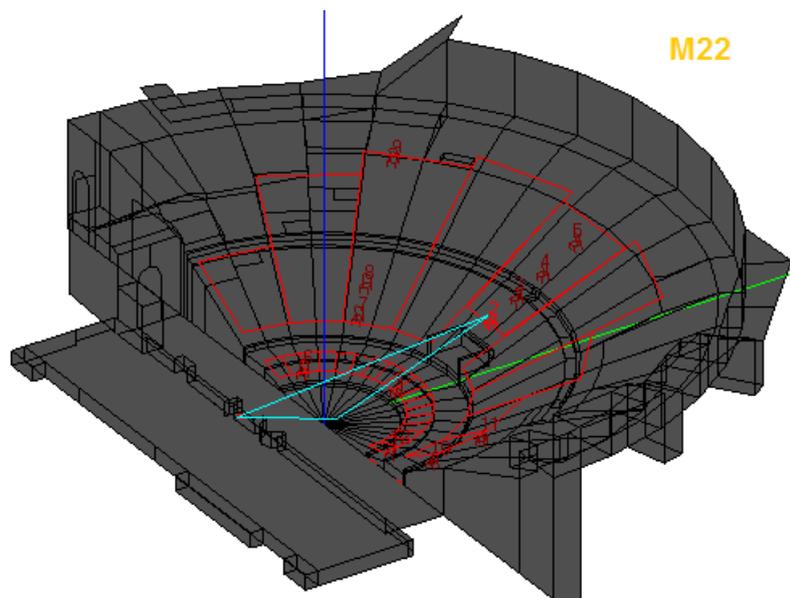
POSICIÓN 22 CAVEA IMA

REFLECTOGRAMA

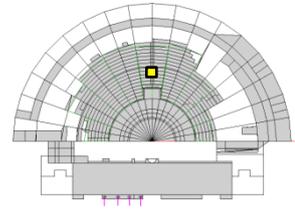
SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

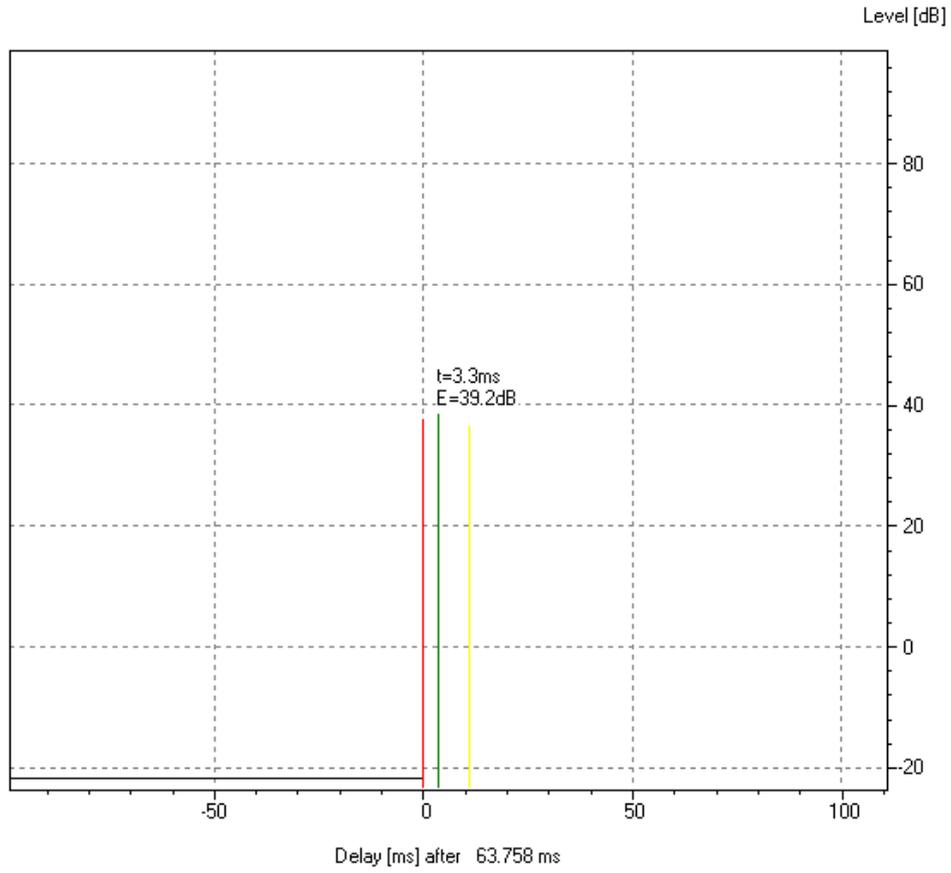


POSICIÓN 23 CAVEA IMA

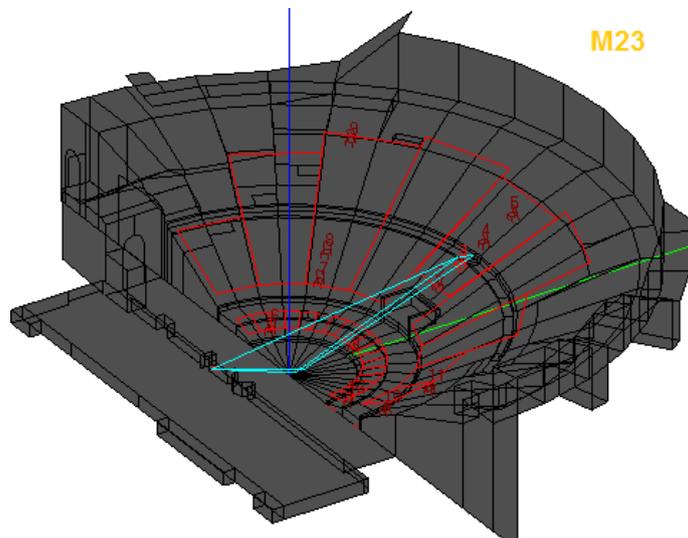


REFLECTOGRAMA

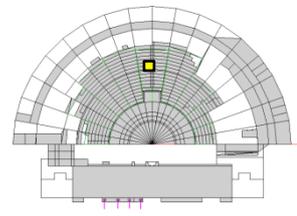
SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

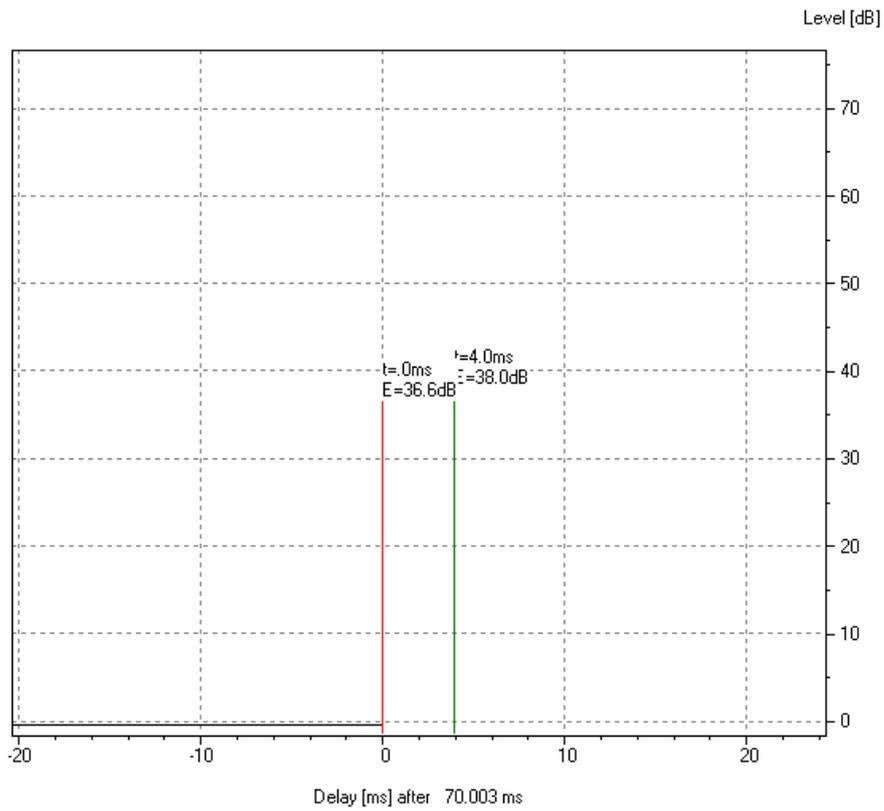


POSICIÓN 24 CAVEA MEDIA

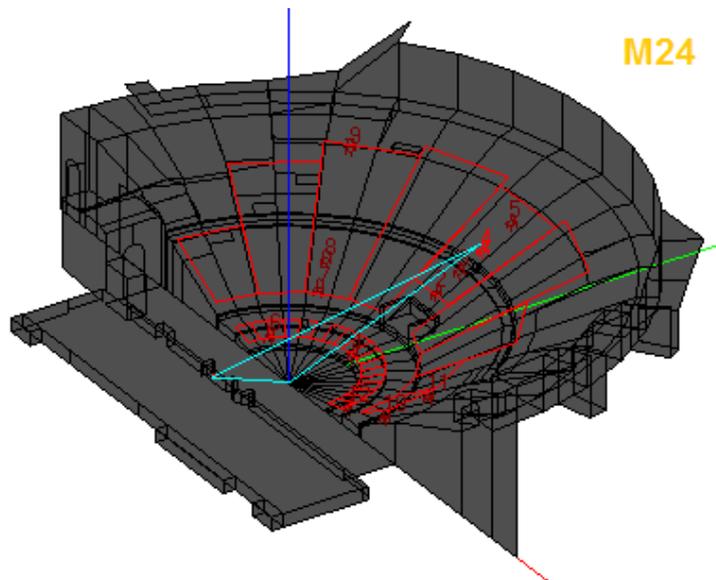


REFLECTOGRAMA

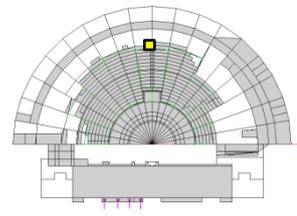
SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

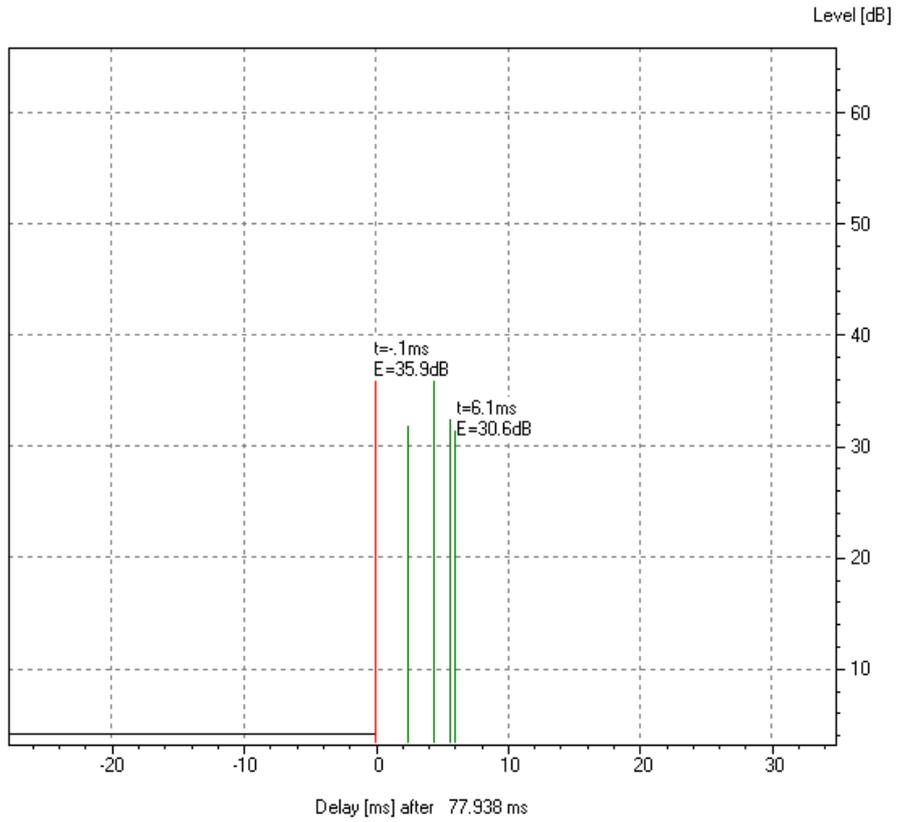


POSICIÓN 26 CAVEA MEDIA

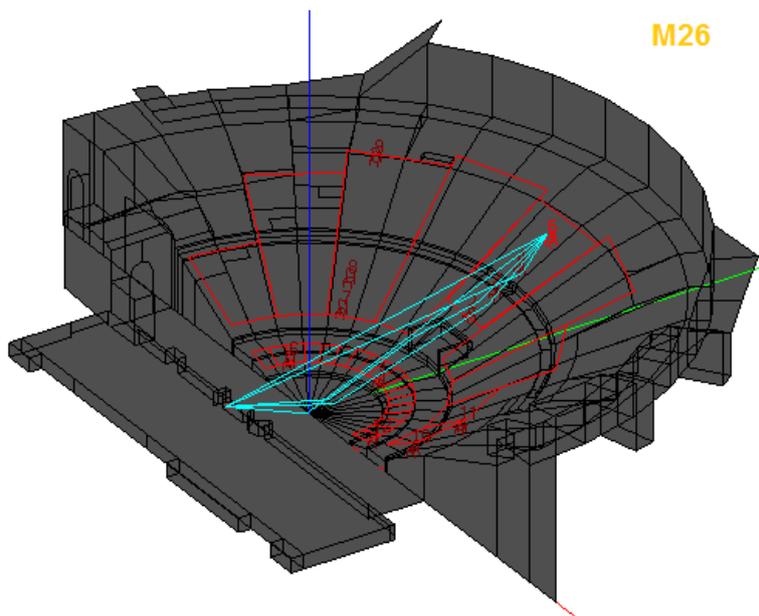


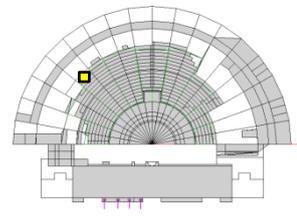
REFLECTOGRAMA

SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

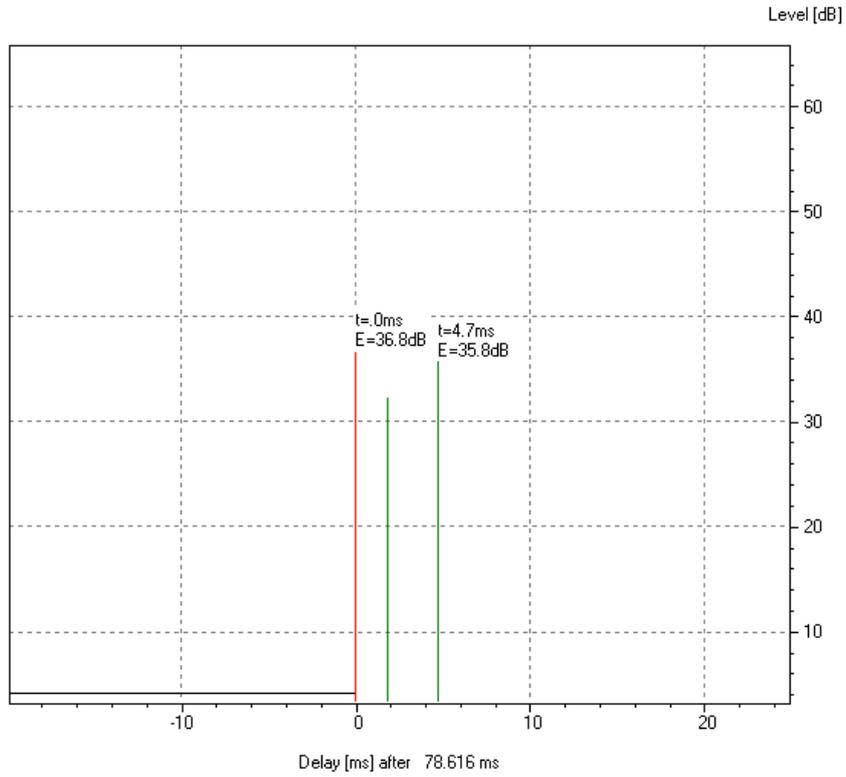




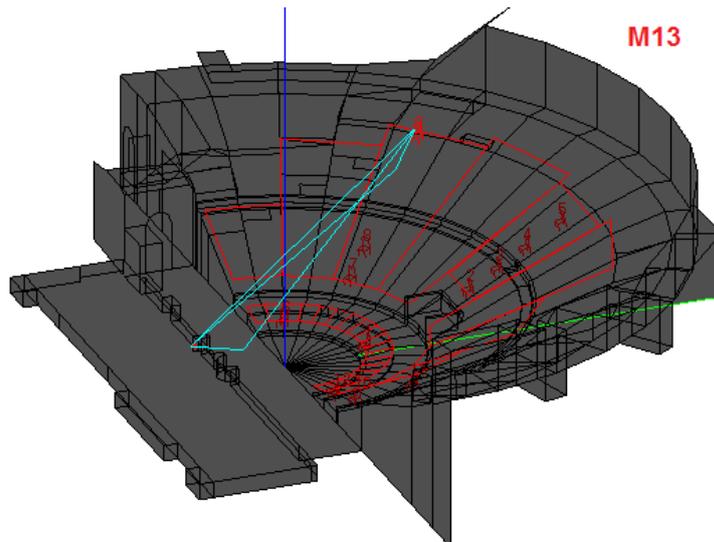
POSICIÓN 13 CAVEA MEDIA

REFLECTOGRAMA

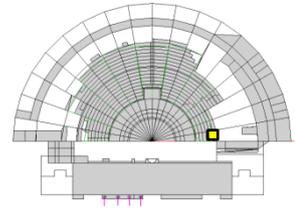
SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

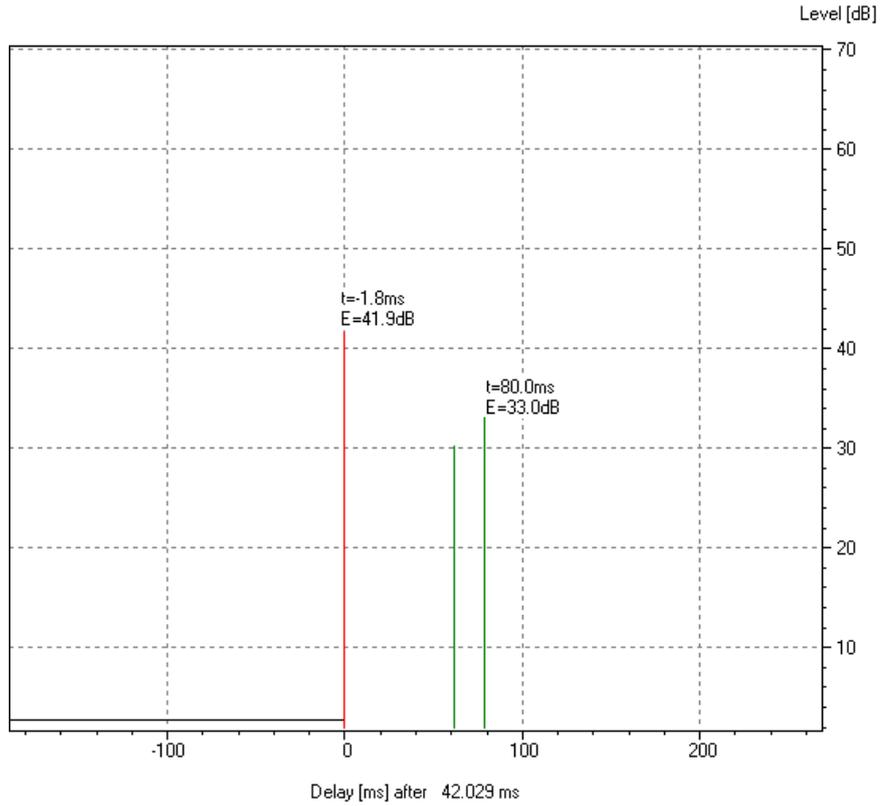


POSICIÓN 44 CAVEA IMA

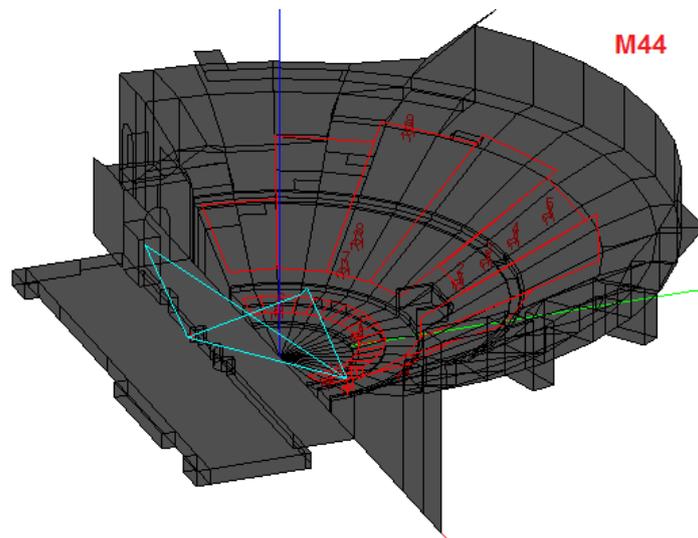


REFLECTOGRAMA

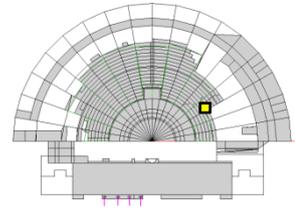
SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

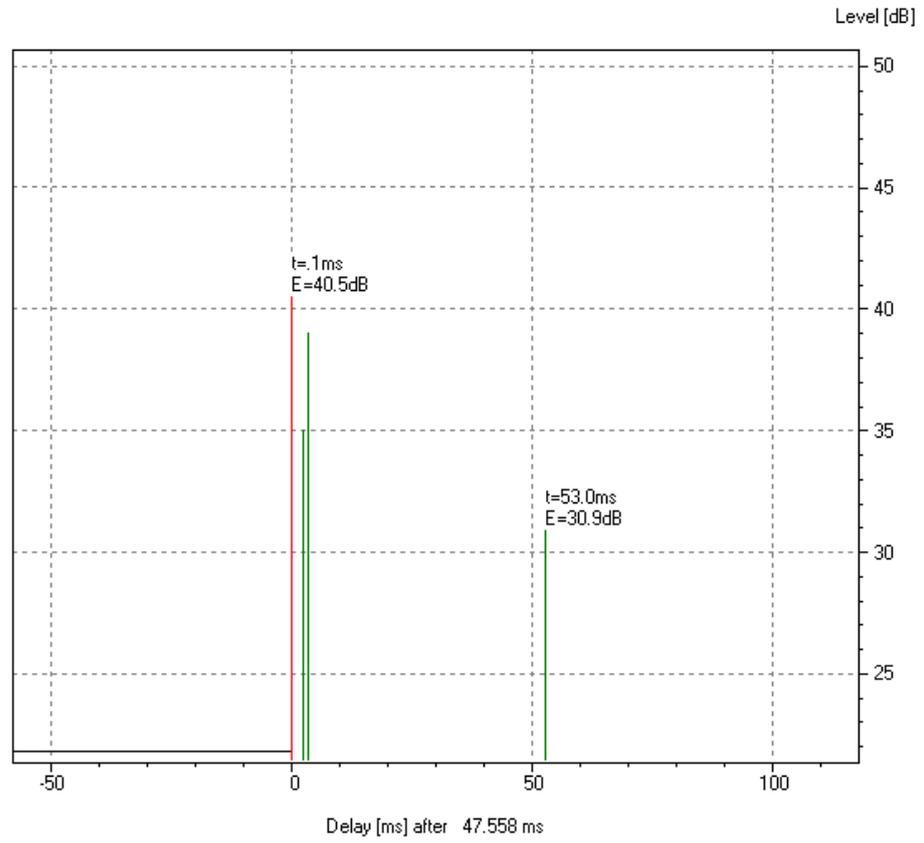


POSICIÓN 41 CAVEA IMA

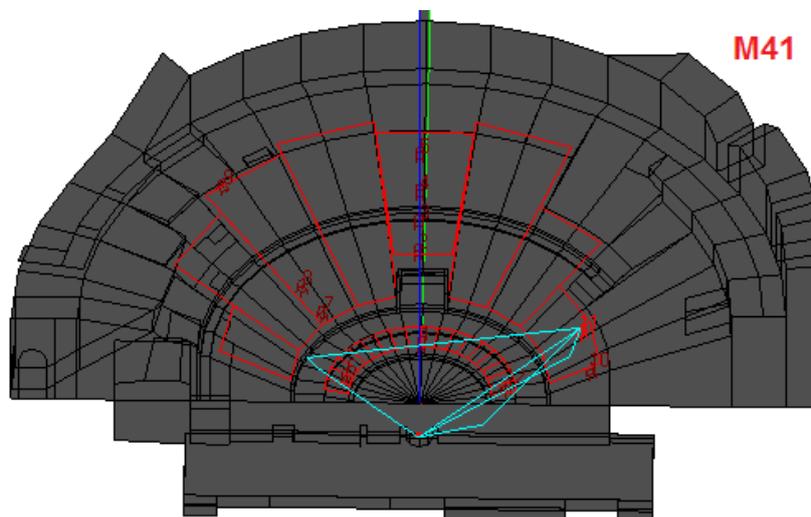


REFLECTOGRAMA

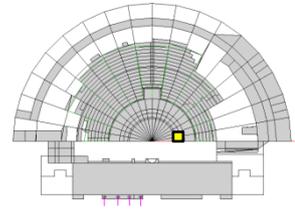
SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

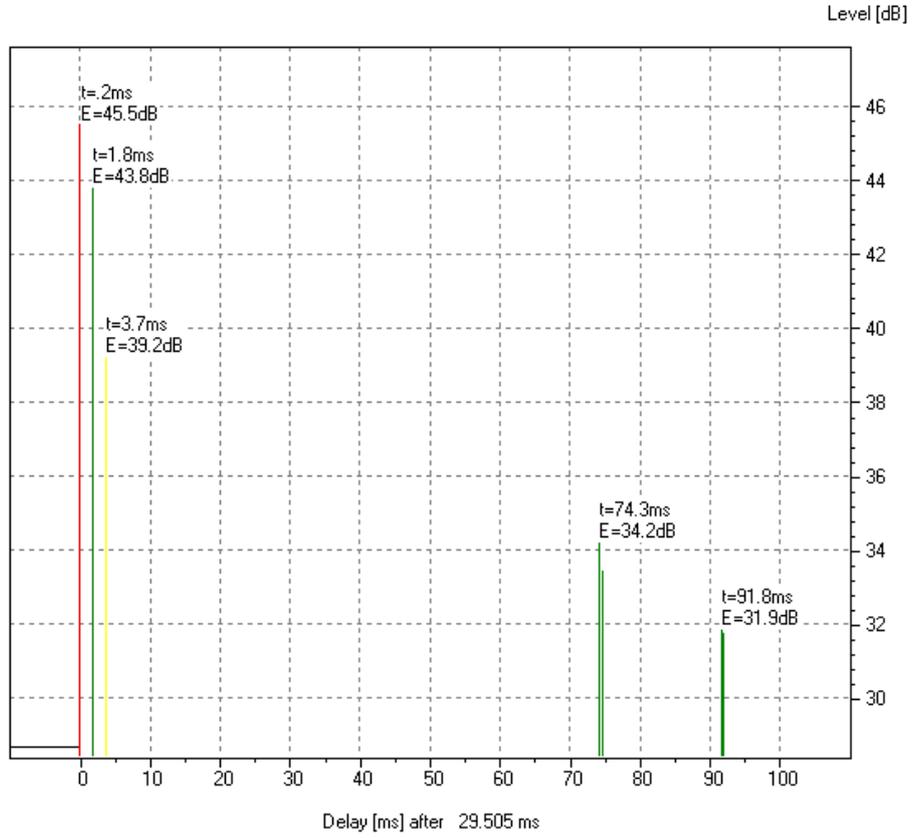


POSICIÓN 42 ORCHESTRA

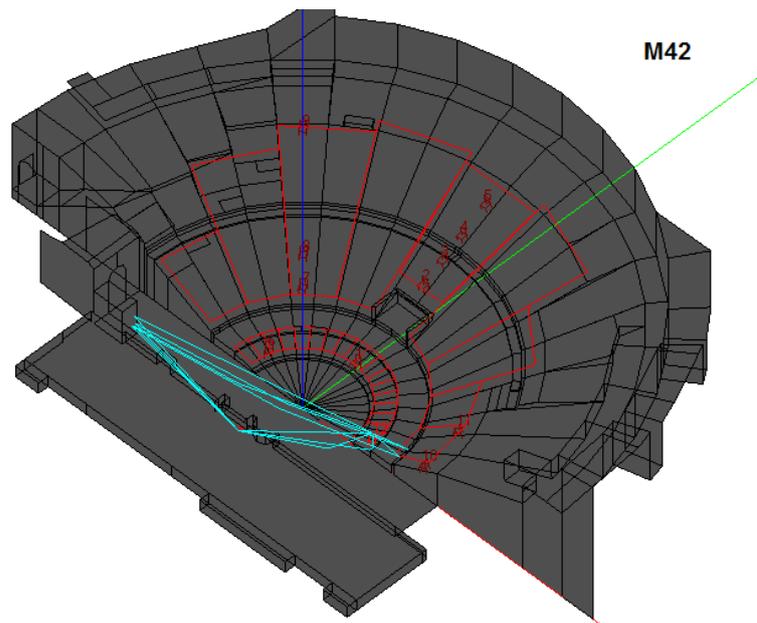


REFLECTOGRAMA

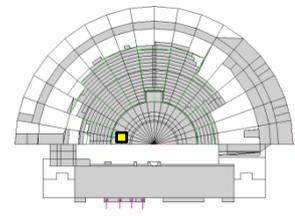
SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS

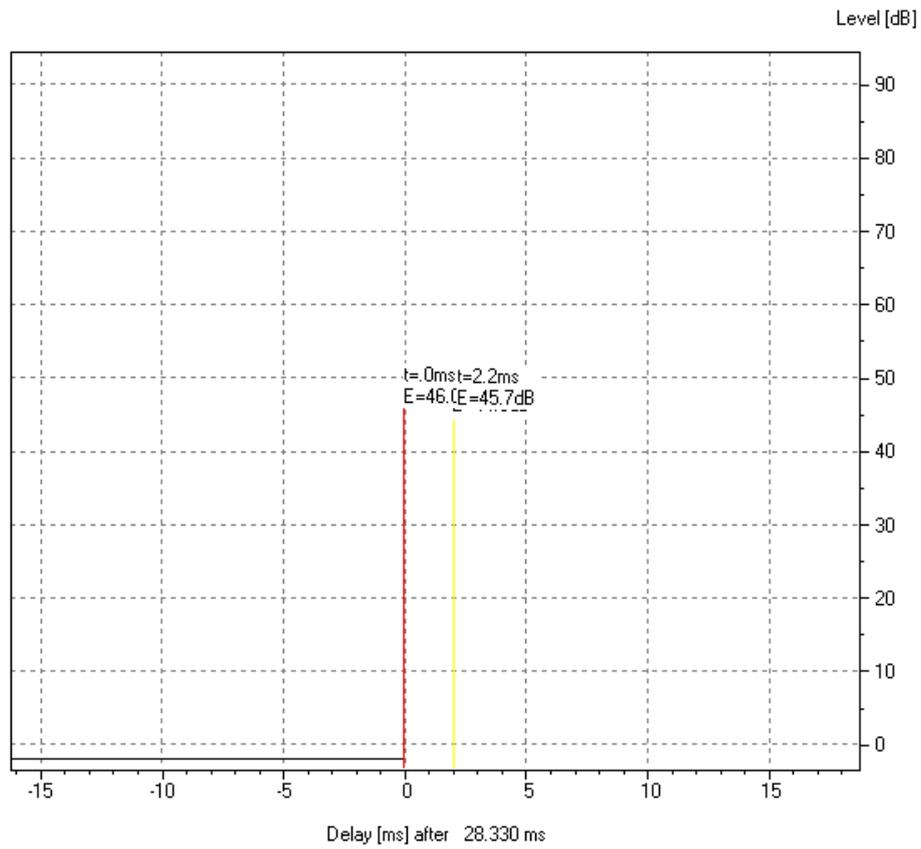


POSICIÓN 1 ORCHESTRA

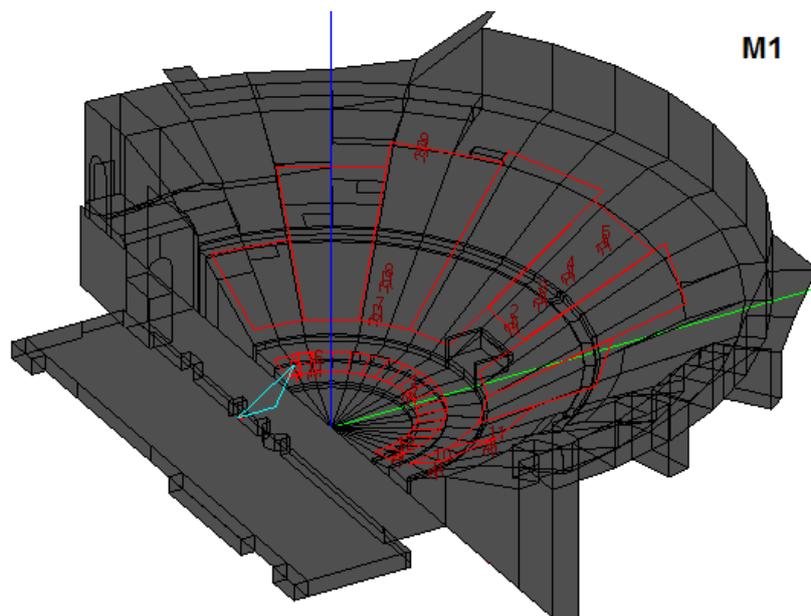


REFLECTOGRAMA

SPL vs. Delay at 1000 Hz



TRAZADO DE RAYOS



ANEXO 6. RELACIÓN DE TABLAS, IMÁGENES Y GRÁFICAS

Capítulo 1. Introducción

Imágenes

Imagen 1.1 Partes de un teatro griego [1].....	13
Imagen 1.2 Vista del Teatro de Epidauro.....	14
Imagen 1.3 Gradas del Teatro de Epidauro.....	15
Imagen 1.4 Teatro griego a la izquierda, teatro romano a la derecha [1].....	15

Capítulo 2. El Teatro Romano de Medellín

Imágenes

Imagen 2.1 Localización del Municipio de Medellín. [Google Earth].....	21
Imagen 2.2 Teatro estado original.....	28
Imagen 2.3 Teatro actual. A la derecha encontramos un modelo del estado actual del teatro.....	29

Capítulo 3. Metodología.

Tablas

Tabla 3.1. Resumen de medidas y parámetros.....	33
Tabla 3.2. Resumen configuración de respuesta al impulso.....	39
Tabla 3.3 Configuración de medidas de difusión.....	40
Tabla 3.4 Configuración de medida de ruido de fondo.....	40
Tabla 3.5 Lp a 1m, Lp globales y diferencia entre Lp para cada posición de fuente.....	42

Imágenes

Imagen 3.1 Sonómetro B&K 2250.....	34
Imagen 3.2 Fuente B&K Omnipower 4296.....	35

Imagen 3.3 Amplificador de potencia 2716.....	36
Imagen 3.4 Sistema inalámbrico Samson Stage 5.....	36
Imagen 3.5 Conexión de respuesta al impulso.....	37
Imagen 3.6 Configuración Dirac.....	38
Imagen 3.7 Configuración de las señales MLS en Dirac.....	38
Imagen 3.8 Conexión para medida de difusión.....	39
Imagen 3.9 Posiciones de la fuente.....	41
Figura 3.10 Puntos de medida.....	43
Imagen 3.11 Puntos de medida de ruido de fondo.....	43

Gráficas

Gráfica 3.1 Respuesta en frecuencia B&K Omnipower 4296. [Catálogo Brüel & Kjaer].....	35
Gráfica 3.2 Comparativa de respuesta en frecuencia de la fuente en dos posiciones distintas.....	42

Capítulo 4. Análisis y resultados.

Tablas

Tabla 4.1 Resumen Respuesta al impulso.....	45
Tabla 4.2 Resumen Difusión.....	45
Tabla 4.3 Resumen Ruido de fondo.....	46
Tabla 4.4. Valores medios TR para las dos posiciones de fuente, y TR global.....	54
Tabla 4.5 Relación de parámetros de respuesta al impulso.....	62
Tabla 4.6 Valores Difusión en R5.....	63
Tabla 4.7 Fuentes percibidas de ruido de fondo.....	72

Imágenes

Imagen 4.1 Posiciones para el análisis de la reverberación.....	47
Imagen 4.2 Aditus maximus occidental.....	49

Imagen 4.3. Situación del teatro(1).....	56
Imagen 4.4 Situación del teatro(2).....	59
Imagen 4.5 Posiciones parámetros de inteligibilidad.....	61
Imagen 4.6 Distribución sonora 125 Hz.....	65
Imagen 4.7 Distribución sonora 500 Hz.....	66
Imagen 4.8 Distribución sonora 1 kHz.....	66
Imagen 4.9 Distribución sonora 4 kHz.....	67
Imagen 4.10 Posiciones de las medidas de ruido de fondo.....	70
Imagen 4.11 Google Earth. Localización de carreteras cercanas al teatro.....	73

Gráficas

Gráfica 4.1 Comparativa TR M1.....	47
Gráfica 4.2. Comparativa TR M6.....	50
Gráfica 4.3 Comparativa TR M13.....	50
Gráfica 4.4. Comparativa TR M22.....	51
Gráfica 4.5 Comparativa TR M26.....	52
Gráfica 4.6 Comparativa TR M38.....	52
Gráfica 4.7 Comparativa TR M44.....	53
Gráfica 4.8 Comparativa TR promedio.....	55
Grafica 4.9 Comparativa TR a 1kHz.....	56
Gráfica 4.10 C50 fuente en escenario.....	58
Gráfica 4.11 C50 Fuente en orchestra.....	58
Gráfica 4.12. Coeficientes de absorción acústica para la madera ordinaria.....	60
Gráfica 4.13 Distribución %AICons.....	61
Gráfica 4.14 Divergencia esférica a 1 kHz.....	63
Gráfica 4.15. Comparativa divergencia real y teórica.....	64
Gráfica 4.16 Niveles Lp Globales – Lzeq.....	68
Gráfica 4.17 Niveles Lp Globales – LAeq.....	69
Grafica 4.18 Ruido de fondo del Teatro Romano de Medellín.....	71

Capítulo 5. Levantamiento del Teatro Romano de Medellín en EASE.

Tablas

Tabla 5.1 Valores medios de humedad y temperatura.....	88
Tabla 5.2. Valores promedios en bandas de octava para el ruido de fondo del Teatro Romano de Medellín. Medidas in situ – Bloque I.....	89

Imágenes

Imagen 5.1 Esquema básico del modelo original del Teatro Romano de Medellín.....	78
Imagen 5.2. Estado actual del Teatro Romano de Medellín, vista desde el escenario.....	79
Imagen 5.3 Estado actual del Teatro Romano de Medellín, vista desde M22.....	79
Imagen 5.4 Esquema básico de la construcción del recinto en EASE.....	81
Imagen 5.5 Modelo EASE del estado actual del Teatro Romano de Medellín, representación de puntos y caras.....	82
Imagen 5.6 Modelo EASE del estado actual del Teatro Romano de Medellín.....	82
Imagen 5.7 Cavea de granito.....	83
Imagen 5.8. Suelo de la orquesta, de mármol.....	84
Imagen 5.9 Terreno descubierto.....	84
Imagen 5.10 Gradas reconstruidas en madera.....	85
Imagen 5.11 Suelo del escenario.....	86
Imagen 5.12 Vista de la pasarela periférica.....	86
Imagen 5.13 Estructura básica de los muros (argamasa ciclópea).....	87
Imagen 5.14 Al fondo, muro perimetral construido en argamada ciclópea.....	87
Imagen 5.15 EASE; áreas de audiencia.....	88
Imagen 5.16 Configuración EASE.....	88
Imagen 5.17 Configuración del ruido de fondo en base a las medidas in situ.....	89

Gráficas

Gráfico 5.1. Coeficientes de absorción de granito abujardado.....	83
---	----

Grafica 5.2 Coeficientes de absorcion marmol envejecido.....	84
Gráfica 5.3 Coeficientes de absorción terreno descubierto.....	84
Gráfica 5.4 Coeficientes de absorción madera ordinaria.....	85
Gráfica 5.5 Coeficientes de absorción entarimado de madera de pino valsaín.....	86
Gráfica 5.6 Coeficientes de absorción de la pasarela.....	86
Gráfica 5.7 Coeficientes de absorción argamasa ciclópea.....	87

Capítulo 6. Validación del modelo EASE.

Tablas

Tabla 4.4 Valores medios TR.....	94
Tabla 3.5 Respuesta en frecuencia de la fuente en el escenario.....	96
Tabla 6.1 Comparación de resultados in situ/EASE.....	98

Imágenes

Imagen 6.1 Modelo de recinto sin simplificar EASE.....	92
Imagen 6.2 Modelo de recinto simplificado EASE.....	92
Imagen 6.3 Modelo EASE del recinto simplificado.....	92
Imagen 6.4 Valores TR EASE para un volumen de 2500 m ³	94
Imagen 6.5 y 6.6. Modelo EASE predefinido para fuente omnidireccional.....	95
Imagen 3.1 Respuesta en frecuencia de fuente B&K Omnipower 4296. [Catálogo Brüel & Kjaer].....	95
Imagen 6.7. Respuesta en frecuencia de la fuente en EASE.....	96
Imagen 6.8 Niveles EASE.....	97
Imagen 6.9. Reflectograma M44.....	100
Imagen 6.10 Trazado de rayos M44.....	100
Imagen 6.11 Reflectograma M42.....	101
Imagen 6.12. Trazado de rayos M42.....	102

Gráficas

Gráfica 6.1 Comparativa TR in situ y TR EASE.....	94
---	----

Gráfica 6.2. Comparativa de la respuesta en frecuencia de la fuente. In situ/EASE.....	96
Gráfica 6.3. Diferencia de niveles por ambos métodos.....	98

Capítulo 7. Análisis y resultados.

Imágenes

Imagen 5.15 EASE; áreas de audiencia.....	103
Imagen 7.1 Valores en frecuencia de voz de mujer.....	105
Imagen 7.2 Simulación de niveles SPL directo.....	106
Imagen 7.3 Reflectograma M1.....	108
Imagen 7.4 Trazado de rayos M1.....	109
Imagen 7.5. Reflectograma M13.....	110
Imagen 7.6 Trazado de rayos M13.....	111
Imagen 7.7 Reflectograma M26.....	111
Imagen 7.8 Trazado de rayos M26.....	112
Imagen 7.9 Reflectograma M44.....	113
Imagen 7.10. Trazado de rayos M44.....	113

Gráficas

Gráfica 7.1 Absorción en el área de audiencia para 2 pers/m ²	104
Gráfica 7.2 Absorción en el área de audiencia en las gradas de madera para 2 pers/m ²	104
Gráfica 7.3 Representación frecuencial de voz de mujer.....	105
Gráfica 7.4 Distribución de valores SPL directo.....	106

Capítulo 8. Conclusiones

Tablas

Tabla 8.1. Valores %AlCons recomendados.....	122
--	-----

Imágenes

Imagen 4.5 Posiciones parámetros inteligibilidad.....	123
Imagen 8.1.Trazado de rayos M3.....	123
Imagen 8.2 Reflectograma M3.....	124
Imagen 8.3 Trazado de rayos M44.....	125
Imagen 8.4 Reflectograma M44.....	125

Gráficas

Grafica 4.18 Ruido de fondo del Teatro Romano de Medellín.....	118
Gráfica 4.8 TR promedio.....	120
Gráfica 8.1 Comparación de los tiempos de reverberación de teatros griegos y romanos [Img tomada de Acoustic Technology, Technical University of Denmark].....	121
Gráfica 8.2 Distribución de los valores %Alcons.....	122

Pliego de condiciones

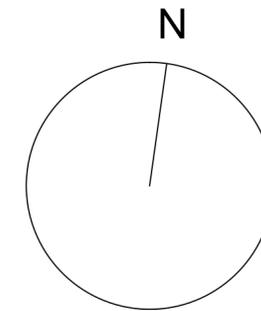
Tablas

Tabla PC1. Requisitos Ordenador portátil.....	137
---	-----

Presupuesto

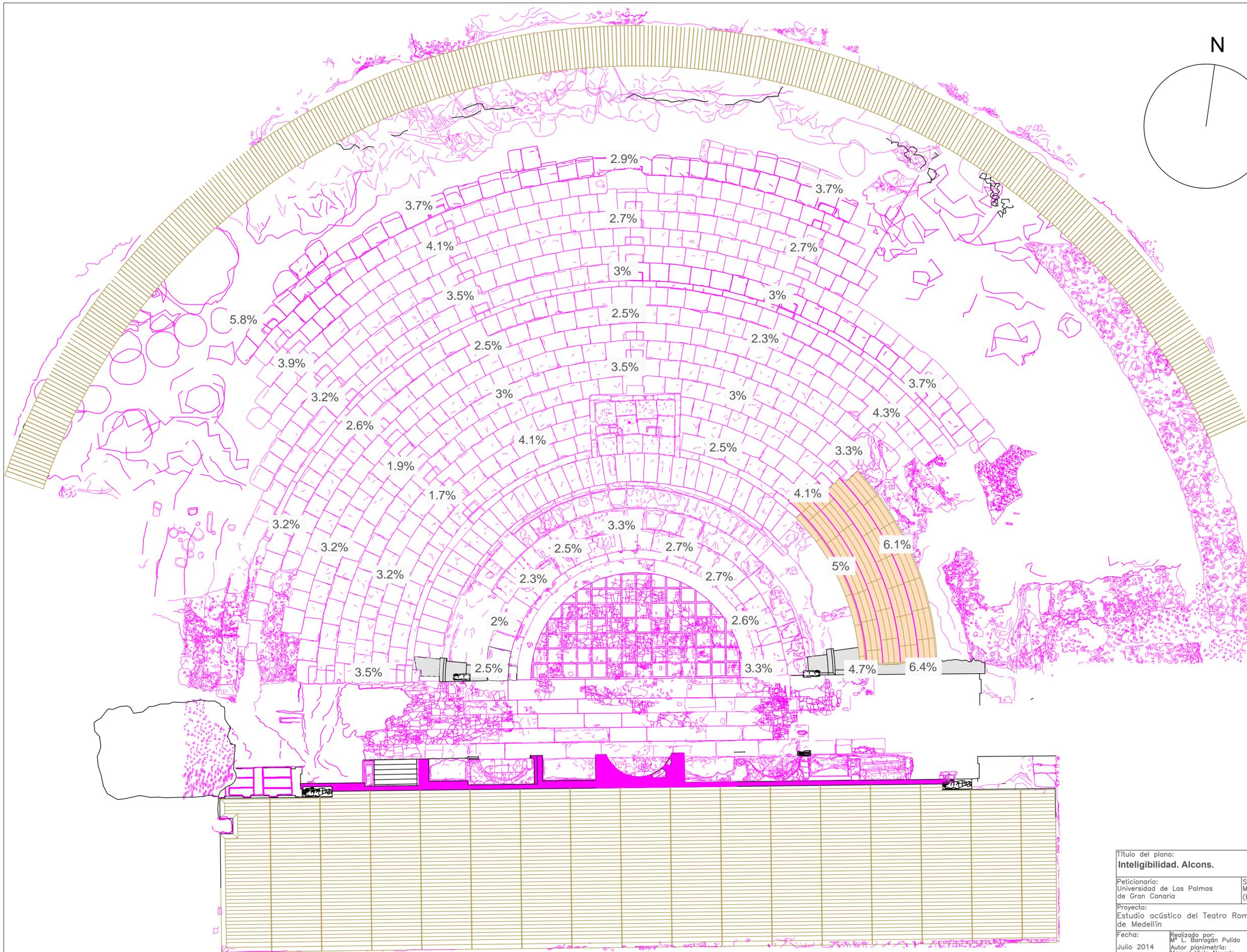
Tablas

Tabla P1. Costes de herramientas hardware.....	143
Tabla P2. Costes recursos software.....	144
Tabla P3. Valor del factor de corrección.....	144
Tabla P4. Costes de ejecución material.....	145
Tabla P5. Costes del material fungible.....	146
Tabla P6. Costes totales del TFG.....	147

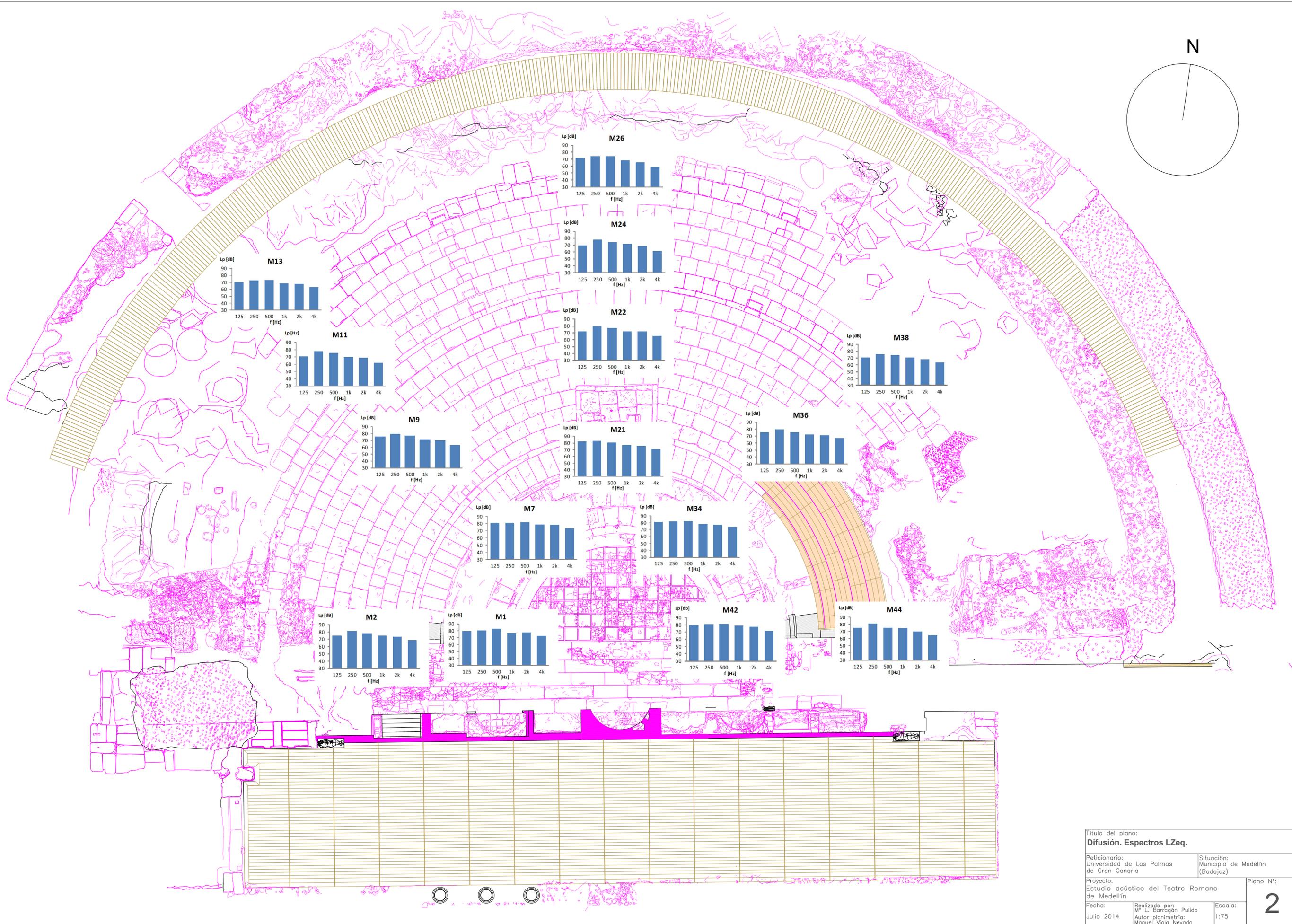
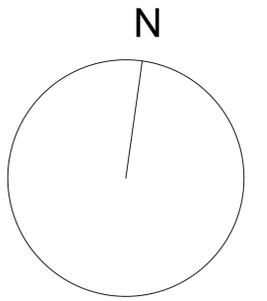


PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK

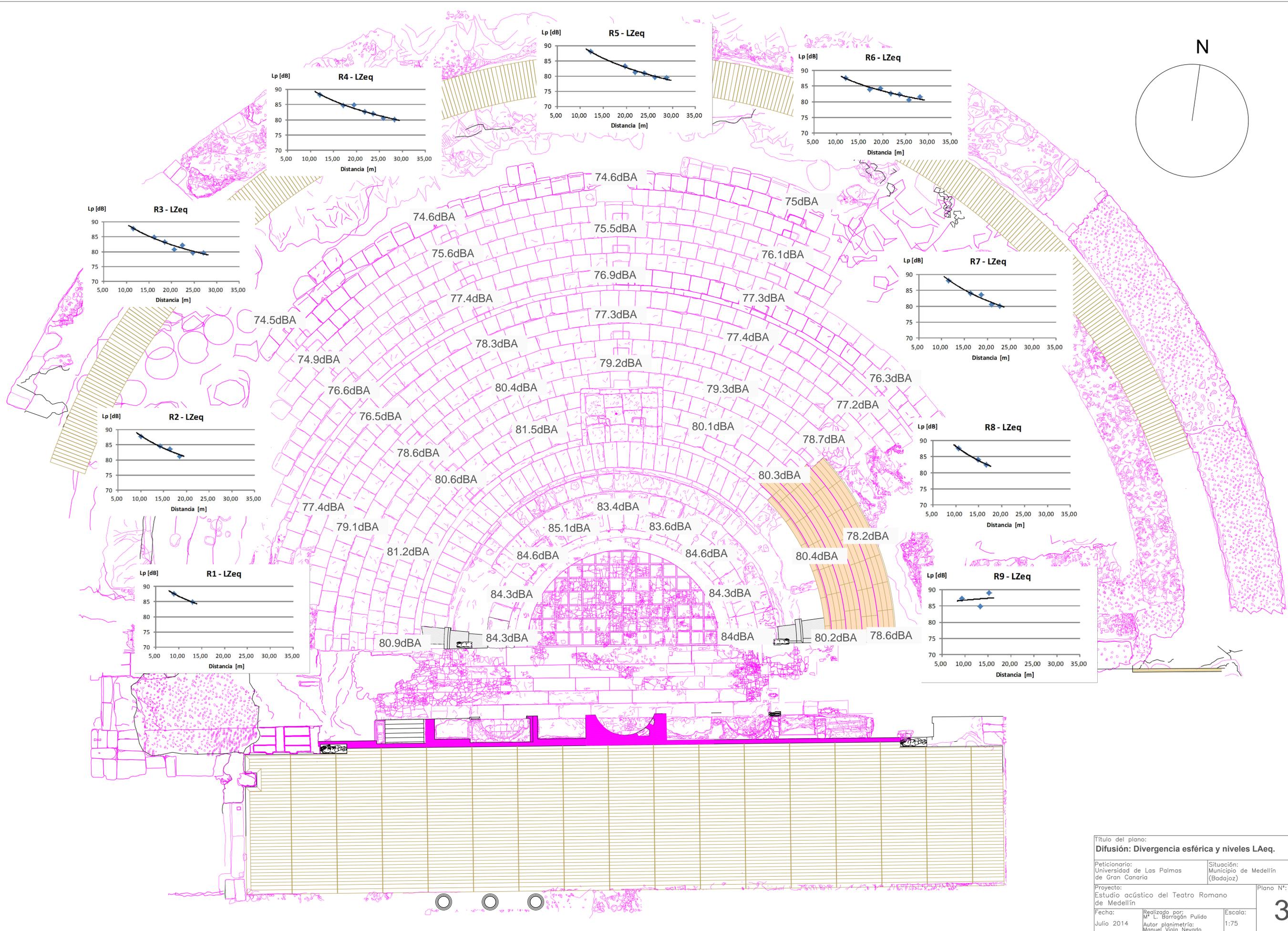
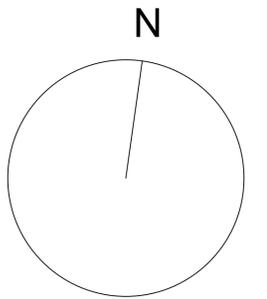
PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK



Título del plano: Inteligibilidad. Alcons.		
Peticionario: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	Situación: Municipio de Medellín (Badajoz)	
Proyecto: Estudio acústico del Teatro Romano de Medellín		Plano N°: 1
Fecha: Julio 2014	Realizado por: M ^a L. Barragán Pulido Autor planimetría: Manuel Viola Nevada	Escala: 1:100



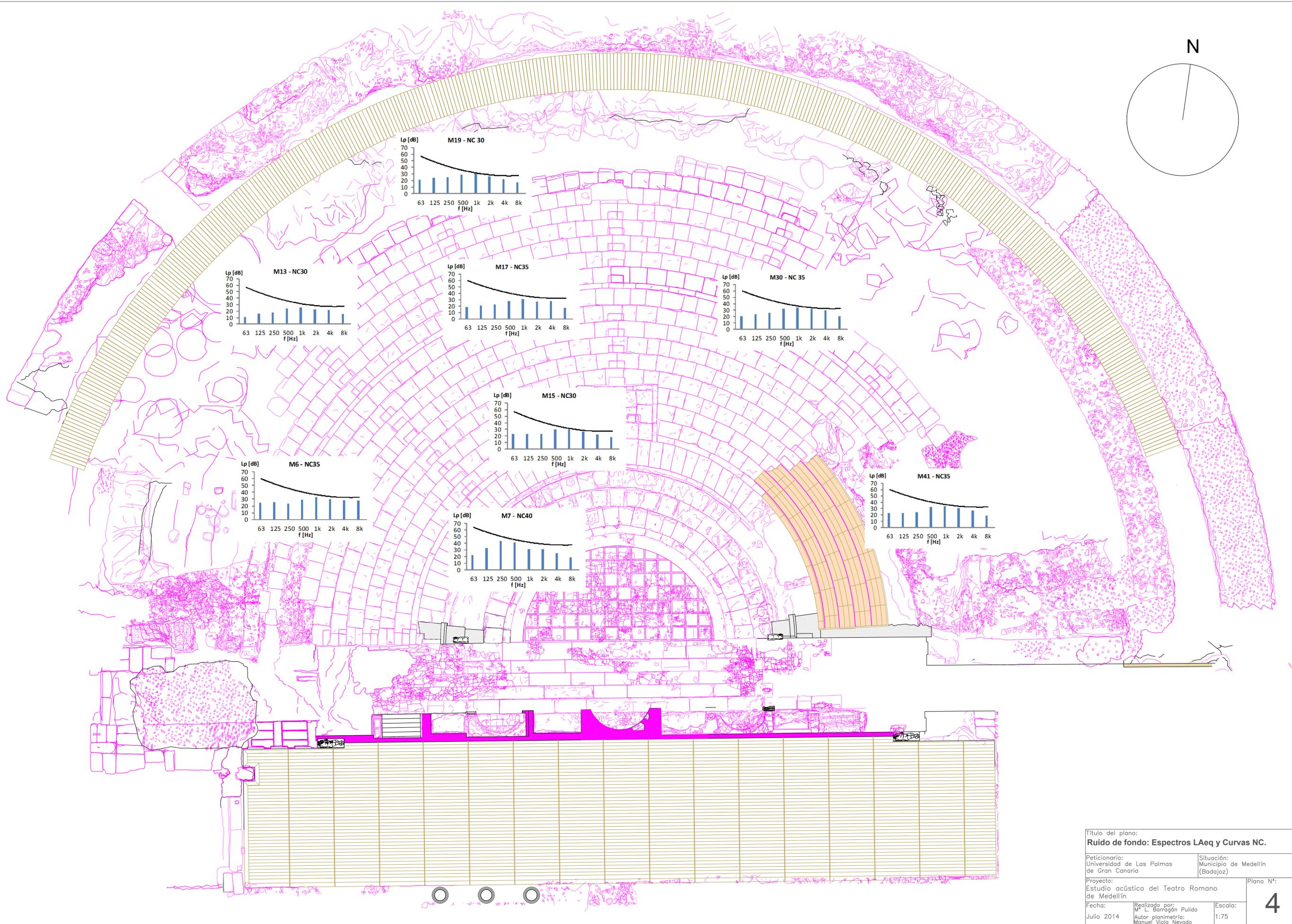
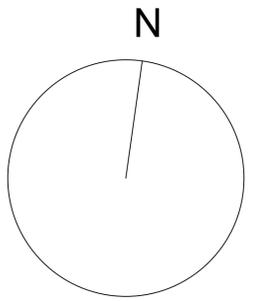
Título del plano: Difusión. Espectros LZeq.		
Peticionario: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	Situación: Municipio de Medellín (Badajoz)	
Proyecto: Estudio acústico del Teatro Romano de Medellín	Plano N°: 2	
Fecha: Julio 2014	Realizado por: M ^a L. Barragán Pulido Autor planimetría: Manuel Viala Nevada	Escala: 1:75



Título del plano: Difusión: Divergencia esférica y niveles LAeq.		
Peticionario: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	Situación: Municipio de Medellín (Badajoz)	
Proyecto: Estudio acústico del Teatro Romano de Medellín	Plano N°: 3	
Fecha: Julio 2014	Realizado por: M ^a L. Barragán Pulido Autor planimetría: Manuel Viola Nevado	Escala: 1:75

PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK

PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK



Título del plano: Ruido de fondo: Espectros LAeq y Curvas NC.		
Peticionario: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria	Situación: Municipio de Medellín (Badajoz)	
Proyecto: Estudio acústico del Teatro Romano de Medellín	Plano N°: 4	
Fecha: Julio 2014	Realizado por: M ^o L. Barragán Pulido Autor planimetría: Manuel Vaia Nevado	Escala: 1:75