

**ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS DEL ESPACIO
PREHISPÁNICO PARA LA TRANSMISIÓN DEL MENSAJE
ORAL Y MUSICAL**
**Caso de estudio : La Plaza de la Estela de los Dos Glifos en
Xochicalco, Morelos**

Eréndira Anais Carrillo Salas

Tesis para optar por el grado de Maestra en Diseño
Línea de investigación : Arquitectura Bioclimática

Miembros del Jurado :
Dr. Fausto Eduardo Rodríguez Manzo
Director de la Tesis
Mtra. Laura Angélica Lancón Rivera
Dra . Francisca Amelia Zalaquett Rock
Dr. José Roberto García Chávez
Mtro. Salvador Islas Barajas

México D.F.
Julio 2016

"Se estableció el canto, se fijaron los tambores, se dice que así principiaron las ciudades: existía
en ellas la música"

Códice Matritense

*A mis padres, quienes siempre me han impulsado,
gracias por todo su apoyo, cariño y comprensión...*

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas las personas que colaboraron en la elaboración de este documento.

A mi director de tesis, el Dr. Fausto Eduardo Rodríguez Manzo por todo el apoyo y la dedicación vertidos para lograr la conclusión del documento.

A la Universidad Autónoma Metropolitana por las facilidades obtenidas, así como las Maestras Elisa Garay y Laura Lancón, quienes me auxiliaron y asistieron en la utilización, tanto de las herramientas medición como del programa de simulación por computadora.

Al Instituto Nacional de Antropología e Historia, así como al Director del Museo y Zona Arqueológica de Xochicalco, al Arqueólogo José Cuauhtli Alejandro Medina Romero por las facilidades brindadas para realizar el levantamiento y medición acústica en sitio, componentes fundamentales en este trabajo.

A mis compañeros y amigos, Patricia Solis, Erick Plesent, Alejandro Morales y Rodrigo Palomera. Gracias por todo el apoyo para la realización de esta tesis, tanto en dificultades técnicas como en la perspectiva de la investigación.

Al personal del Laboratorio de Bioclimática, en especial al Dr. Víctor Fuentes por el préstamo del equipo necesario para la realización de la medición en sitio.

A mis lectores, gracias por su tiempo y atenciones. A la Dra. Francisca Zalaquett, al Dr. Salvador Islas, a la Maestra Laura Lancón y al Dr. José Roberto García.

A todos ustedes, gracias.

Resumen

En el mundo existen diversos fenómenos acústicos que se presentan en sitios habitados por civilizaciones antiguas. Estos fenómenos son estudiados a través de la *arqueoacústica*¹, eje rector de la investigación.

En el trabajo se propone analizar las condiciones acústicas de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos que permitieron la transmisión adecuada de mensajes orales y musicales.

La metodología experimental comprendió la grabación y caracterización acústica de dos fuentes sonoras (voz masculina en náhuatl y el sonido de un caracol trompeta), la medición acústica en sitio y el levantamiento físico de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos para posteriormente ingresar los datos a un programa de simulación por computadora (CATT Acoustic).

El tratamiento de los datos se llevó a cabo a través de cálculos matemáticos realizados por el programa de simulación, en donde el objetivo fue obtener los parámetros acústicos cuantitativos de una evaluación acústica arquitectónica, así como un análisis de distribución sonora, reportada por medio de un mapa gráfico coloreado para mostrar las intensidades sonoras en la Plaza. De igual manera se presentan los ecogramas obtenidos mediante una fuente de impulso para mostrar la respuesta acústica que se genera por un aplauso y la auralización del espacio.

El presente trabajo comprueba la hipótesis de que en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos era posible transmitir mensajes orales y en cierta medida musicales debido a que la obtención de los valores acústicos se ajustaron a los recomendados.

Palabras clave : Arquitectura / Acústica / Arqueoacústica / Arqueología / Xochicalco

¹ La *arqueoacústica* es una disciplina que surge en 1998 y que aborda diversas disciplinas tales como la arqueología, la antropología, las matemáticas, la ingeniería, la acústica, la historia, la música y la arquitectura y tiene por objetivo conocer las condiciones acústicas de un determinado periodo histórico, así como obtener información acerca de las sociedades a través del estudio de los instrumentos musicales.

Abstract

In the world there are several acoustic phenomena presented in prehistoric and prehispanic sites. These phenomena are studied through a relatively new science (1998) called *archaeoacoustics*¹, which is addressed in this work.

The aim of this work is to determine the acoustic conditions of the Two Glyphs Square in Xochicalco that allowed the proper transmission of speech and musical messages.

The experimental methodology involved the recording and acoustic characterization of two sound sources (náhuatl male voice and the trumpet snail sound), the acoustic measurement on site , the architectural measurement of the of the Two Glyphs Square for later data entry into the simulation program (CATT Acoustic).

The data processing was carried out through mathematical calculations once the values were obtained through the simulation program , where the goal was to obtain quantitative acoustic parameters of acoustics evaluation and also analysis of distribution sound was included through a colored graphical map to show the sound intensities in the Square. Also, the ecograms obtained through an impulse source study are presented as well as the auralization of the space.

This work proves the hypothesis that in the Two Glyphs Square was possible to transmit voice and musical messages, because the acoustic values obtained acoustic were adjusted to recommended.

Keywords: Architecture / Acoustic / Archaeoacoustics / Archaeology / Xochicalco

¹The Archaeoacoustics is a discipline that emerged in 1998 which integrates various fields such as archeology, anthropology, mathematics, engineering, acoustics, history, music and architecture. The aim of this discipline is to know the acoustic conditions of a given historical period and information about societies through the study of musical instruments.

Índice general

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

Abstract

	Página
Introducción	1
1. Arqueoacústica	6
2. La plaza prehispánica ceremonial en el altiplano central durante el Epiclásico	19
2.1 La plaza ceremonial prehispánica	21
2.2 Xochicalco	25
2.3 Arquitectura	27
2.4 La Plaza de la Estela de los Dos Glifos	28
3. Acústica arquitectónica y urbanística	36
3.1 La acústica y el sonido	36
3.2 El sonido en los espacios arquitectónicos y urbanos	40
3.2.1 Acústica arquitectónica	40
3.2.2 Fenómenos acústicos	47
3.2.3 El sonido en el espacio urbano	53
3.3 Transmisión y recepción del mensaje oral y musical	58
3.3.1 El analizador auditivo	63
3.4 Parámetros objetivos de calidad acústica	67
3.4.1 Parámetros objetivos de calidad acústica	67

4.4.1.1 Análisis de datos para la caracterización de las fuentes	119
4.4.2 Direccionalidad	128
4.4.3 Superficies	128
4.4.4 Condiciones ambientales	129
4.4.5 Cálculo acústico CATT	129
5. Análisis y discusión de los resultados	131
5.1 Resultados de la simulación de voz con audiencia o sala llena	132
5.2 Resultados de la simulación de caracol trompeta con audiencia o sala llena	143
5.3 Resultados de la simulación de caracol trompeta con espacio vacío	144
5.4 Tabla resumen	153
5.5 Simulación de ruido por impulso: Fuente al centro de la Plaza	155
5.6 Auralización	158
6. Conclusiones	159
6.1 Descripción del trabajo	159
6.2 Conclusiones del estudio	161
6.3 Aportación	164
6.4 Recomendación a futuras investigaciones	165
Glosario de términos	167
Anexos	168
Bibliografía	184
Curriculum Vitae	188

Índice de figuras

	Página
Fig 0.1	5
Fig 1.1	7
Fig 1.2	7
Fig 1.3	8
Fig 1.4	10
Fig 1.5	12
Fig 1.6	13
Fig 1.7	14
Fig 1.8	17
Fig 1.9	18
Fig 2.1	19
Fig 2.2	20
Fig 2.3	21
Fig 2.4	23
Fig 2.5	24
Fig 2.6	25
Fig 2.7	26
Fig 2.8	28
Fig 2.9	30
Fig 2.10	32
Fig 2.11	33

Fig 2.12	"Dibujo de la piedra del primer Fuego Nuevo hallada en Xochicalco". Fuente: Dibujo calcado por Abel Mendoza H. en el libro de Sáenz, C. "El fuego nuevo", 1967:12.	34
Fig 2.13	"Ceremonia del Fuego Nuevo". Fuente: Códice Borbónico, lámina XXXIV, 1562.	35
Fig 3.1	"Concepto gráfico de longitud de onda". Fuente: https://martinmoreton.wordpress.com/2011/12/19/teoria-y-calculo-de-antenas-parte-1/ , 2015.	39
Fig 3.2	"Ejemplos de oscilaciones de frecuencias 1 y 10 Hz". Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos". Carrión, A. 2001 pp. 29.	39
Fig 3.3	"Comportamiento del sonido en el espacio arquitectónico". Rodríguez (2014:55) dibujo de Elisa Garay.	41
Fig 3.4	"Niveles audibles en función de la frecuencia" Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Carrión, A. , 2001, pp. 36.	43
Fig 3.5	"Niveles audibles en función de la frecuencia junto con las zonas correspondientes a la música y la palabra". Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos" Carrión, A. , 2001, pp. 37.	43
Fig 3.6	"Sonómetro NOR140. Fuente: http://www.norsonic.com/en/products/sound_level_meters/sound_analyser_nor140/Sound+Analyser+Nor140+-+%22MULTI-TOOL%22.9UFRjQYk.ips , 2014.	45
Fig 3.7	"Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante". Carrión 2001:50	47
Fig. 3.8	"Gráfica de tiempo de reverberación óptimo para diversas actividades". Fuente: http://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza/acustica/apuntes/cap04.pdf , 2014.	50
Fig. 3.9	"t20 y t30" Fuente: http://www.ingenieriaacustica.com/ingenieria-acustica-5-parametros-acusticos/ , 2015.	51
Fig. 3.10	"Ejemplo de difracción del sonido alrededor de una barrera acústica instalada delante de una vivienda a modo de protección frente al ruido". Carrión (2001:116).	51
Fig. 3.11	"Comparativa entre los efectos de absorción, reflexión especular y difusión del sonido". Carrión (2001:123).	52
Fig. 3.12	"Curvatura de los rayos sonoros debido al gradiente de temperatura. Fuente: Acústica arquitectónica y urbanística. Sancho, F. et.al". 2008, pp. 316.	55
Fig. 3.13	"Curvatura de los rayos sonoros debido al viento. Fuente: Acústica arquitectónica y urbanística. Sancho, F. et.al." . 2008, pp. 317.	56
Fig. 3.14	"Curvas de criterio de ruido NR. Fuente: "Acústica en los espacios escénicos prehispánicos", pp. 64.	57
Fig. 3.15	"Vista en sección del mecanismo de la voz humana". Fuente: http://mayullantalla.blogspot.mx/2011/02/los-tres-niveles-del-aparato-fonador.html , 2014	59
Fig. 3.16	Contribución frecuencial al nivel de la voz y a la inteligibilidad de la palabra". Carrión (2001:46)	60
Fig. 3.17	"Diagrama de direccionalidad de la palabra hablada Kuttruf (a) sección horizontal, (b) sección vertical" Fuente: Acústica Arquitectónica y Urbanística, Sancho, F. et. al. 2008 pp. 123.	61
Fig. 3.18	Caracol Strombus Gigas, Proyecto arqueoacústico Chavín de Huántar. Fuente: https://ccrma.stanford.edu/groups/chavin/index.html , 2014	62
Fig. 3.19	"Componentes del analizador auditivo". Fuente : http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io1/public_html/oidohumano_archivos/image002.jpg , 2014.	63
Fig. 3.20	"Curvas de Fletcher Munson". Fuente: http://www.duiops.net/hifi/enciclopedia/images/fletchermunson.gif , 2014.	67

Fig. 3.21	“Obtención de %ALCons a partir de RT y $L_D - L_R$. Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos Carrión, A”. , 2001, pp. 67.	71
Fig. 3.22	“Correspondencia de valores %ALCons, STI y RASTI. Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Carrión, A. , 2001, pp. 69. "Modelo 3D en CATT Acoustic". Fuente:	72
Fig. 3.23	http://www.prosoundtraining.com/site/author/pat-brown/efficient-room-modeling-using-google-sketchup/ , 2015.	77
Fig. 3.24	"Coeficientes de absorción y geometría en programa CATT Acoustic V.7". Fuente: Elaboración propia, 2015.	78
Fig. 3.25	"Módulo de directividad" en CATT Acoustic. Fuente: Elaboración propia, 2015.	79
Fig. 3.26	"NPS Nominal a 1m en el eje en dBA en CATT Acoustic". Fuente: Elaboración propia, 2015.	80
Fig. 3.27	"NPS máximo a 1 m en el eje en dBa en CATT Acoustic". Fuente: Elaboración propia, 2015.	80
Fig. 3.28	"Módulo de acústica ambiental en CATT Acoustic". Fuente: Elaboración propia, 2015.	81
Fig. 3.29	"Localización de fuentes y receptores en CATT Acoustic; A0 es fuente 0 y 01 es el receptor 1". Fuente: http://www.caesoft.es/productos/CATT/formacion/formacion_catt.htm , 2015.	81
Fig. 3.30	"Mapeo de auditorio". Fuente: http://www.catt.se/TUCT/TUCToverview.html , 2015.	82
Fig. 3.31	"Full detail calculation (cálculo total detallado) CATT Acoustic" Fuente: Elaboración propia, 2015.	83
Fig. 3.32	"Full detail calculation CATT Acoustic, hoja de resultados numéricos" Fuente: Elaboración propia, 2015.	83
Fig. 3.33	“Esquema representativo de un sistema de auralización monoaural por convulsión”. Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Carrión, A., 2001, pp. 383.	85
Fig. 3.34	“Esquema representativo de un sistema de auralización binaural por convulsión”. Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Carrión, A., 2001, pp. 383.	85
Fig. 4.1	"Diagrama de procedimiento de la prueba". Elaboración propia, 2015.	91
Fig. 4.2	“Localización de equipo de medición en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos”. Elaboración propia, 2014.	95
Fig. 4.3	“Anemómetro marca Kestrel 4200”. Elaboración propia, 2014.	96
Fig. 4.4	“Puntos de medición para caracterización en LADAc, UAM-A”. Elaboración propia, 2014.	97
Fig. 4.5	“Esquema de puntos de medición para caracterización”. Elaboración propia, 2014.	97
Fig. 4.6	“Medición de ruido de impulso en el LADAc de la UAM-A”. Elaboración propia, 2014.	98
Fig. 4.7	“Levantamiento arquitectónico en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos”. Erick Plesent, 2014.	100
Fig. 4.8	"Modelo volumétrico 3D Face la Plaza de la Estela de los Dos Glifos en Autocad". Elaboración propia, 2014.	100
Fig. 4.9	"Modelo volumétrico de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos en Autocad". Elaboración propia, 2014.	101
Fig. 4.10	"Modelo tridimensional de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos en CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	101
Fig. 4.11	“Archivo Master en CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	102
Fig. 4.12	“Coeficientes de absorción de materiales, CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	102
Fig. 4.13	“Localización bi y tridimensional de fuentes y receptores en modelo volumétrico	105

	CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	
Fig. 4.14	"Gráfica de valores de ruido de fondo obtenidos en sitio". Elaboración propia, 2014.	106
Fig. 4.15	"Cuadro de valores de ruido de fondo y condiciones ambientales en CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	107
Fig. 4.16	"Módulo de direccionalidad de 125 Hz en CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	107
Fig. 4.17	"Cuadro de nivel de presión sonora nominal a 1m del eje en dBA en CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	108
Fig. 4.18	"Cuadro de nivel de presión sonora máximo en dBA en CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	108
Fig. 4.19	"Cuadro de definición de parámetros para simulación CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	109
Fig. 4.20	" Comparación de NPS máximos en Fuente A1". Elaboración propia, 2014.	111
Fig. 4.21	" Comparación de NPS máximos en Fuente A2". Elaboración propia, 2014.	111
Fig. 4.22	" Comparación de NPS máximos en Fuente A3". Elaboración propia, 2014.	112
Fig. 4.23	"Ecograma de programa de simulación y línea de NPS de decaimiento de medición en sitio". Elaboración propia, 2014.	113
Fig. 4.24	"Gráfica de coeficiente de correlación de fuente A1". Elaboración propia, 2014.	114
Fig. 4.25	" Gráfica de coeficiente de correlación de fuente A2". Elaboración propia, 2014.	115
Fig. 4.26	" Gráfica de coeficiente de correlación de fuente A3". Elaboración propia, 2014.	115
Fig. 4.27	" Gráfica de curva de decaimiento de NPS, comparación entre medición y simulación". Elaboración propia, 2014.	116
Fig. 4.28	"Grabación de fuente sonora caracol". Dr. Fausto Rodríguez, 2014.	118
Fig. 4.29	"Grabación de fuente sonora de voz en náhuatl. Elaboración propia". 2014.	118
Fig. 4.30	"Medición de NPS para caracterización en el LADAc UAM-A". Elaboración propia, 2014.	119
Fig. 4.31	"Adición de caja simulando audiencia CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	130
Fig. 5.1	"Reporte de resultados de simulación en .txt, programa CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	131
Fig. 5.2	"Reporte gráfico de resultados de simulación, programa CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	131
Fig. 5.3	"Gráfica de valores RASTI de simulación de voz con y sin audiencia". Elaboración propia, 2014.	134
Fig. 5.4	"Gráfica de valores de definición de simulación de voz con audiencia". Elaboración propia, 2014.	135
Fig. 5.5	"Gráfica de valores de claridad de simulación de voz con audiencia". Elaboración propia, 2014.	136
Fig. 5.6	"Gráfica de valores de sonoridad de simulación de voz con audiencia". Elaboración propia, 2014.	136
Fig. 5.7	"Gráfica de valores de tiempo de reverberación de simulación de voz con audiencia". Elaboración propia, 2014.	137
Fig. 5.8	"Gráfica de valores de nivel de presión sonora de simulación de voz con audiencia". Elaboración propia, 2014.	138
Fig. 5.9	"Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A1". Elaboración propia, 2014.	139
Fig. 5.10	"Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A2". Elaboración propia, 2014.	140

Fig. 5.11	"Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A3". Elaboración propia, 2014.	141
Fig. 5.12	"Ecogramas de simulación de voz con audiencia de fuente A2, receptor 2 en cuatro frecuencias". Elaboración propia, 2014.	142
Fig. 5.13	"Gráfica de valores de tiempo de reverberación de simulación de caracol con audiencia". Elaboración propia, 2014.	145
Fig. 5.14	"Gráfica de valores de claridad musical de simulación de caracol con audiencia". Elaboración propia, 2014.	145
Fig. 5.15	"Gráfica de valores de claridad musical de simulación de caracol sin audiencia". Elaboración propia, 2014.	146
Fig. 5.16	"Gráfica de valores de sonoridad media de simulación de caracol sin audiencia". Elaboración propia, 2014.	147
Fig. 5.17	"Gráfica de valores de eficiencia lateral media de simulación de caracol sin audiencia". Elaboración propia, 2014.	147
Fig. 5.18	"Gráfica de valores de nivel de presión sonora de simulación de caracol con audiencia". Elaboración propia, 2014.	148
Fig. 5.19	"Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A1". Elaboración propia, 2014.	149
Fig. 5.20	"Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A2". Elaboración propia, 2014.	150
Fig. 5.21	"Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A3". Elaboración propia, 2014.	151
Fig. 5.22	"Ecogramas de simulación de caracol con audiencia de fuente A2, receptor 2 en cuatro frecuencias". Elaboración propia, 2014.	152
Fig. 5.23	"Ubicación de fuentes y receptores para simulación de ruido de impulso al centro de la Plaza". Elaboración propia, 2014.	155
Fig. 5.24	"Ecogramas de respuesta acústica de receptor 2 producido por fuente A4 de ruido de impulso CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	156
Fig. 5.25	"Ecogramas de respuesta acústica de receptor 2 producido por fuente A4 de ruido de impulso CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	156
Fig. 5.26	"Ecogramas de respuesta acústica de receptor 2 producido por fuente A4 de ruido de impulso CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.	157
Fig. 5.27	Mapeo de intensidad sonora con fuente de impulso A4. CATT Acoustic". Elaboración propia. 2014.	157
Fig. 6.1	Reflexión de ondas sonoras en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos" Elaboración propia, 2014.	162
Fig. 5.29	Mapeo de intensidad sonora de fuente A2 en 500 Hz, CATT Acoustic". Elaboración propia, 2016.	163

Índice de tablas

	Página
T. 3.1	“Niveles de presión sonora correspondientes a actividades comunes”. Carrión (2001:35) 42
T.3.2	“Frecuencias centrales de las bandas de octava estandarizadas según la norma ISO 266, en Hz” Fuente: “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” Carrión, A. , 2001, pp. 41. 45
T. 3.3	“Atenuación del sonido en el aire en dB/100 m en función de la frecuencia del sonido y de la temperatura y humedad del medio ambiente (recomendación ISO R-507)” Fuente: “Acústica arquitectónica y urbanística” Sancho, F. et.al. , 2008, pp. 98. 54
T. 3.4	“Atenuación causada por el terreno en función del grado de vegetación sobre el mismo.” Fuente: “Acústica arquitectónica y urbanística” Sancho, F. et.al. , 2008, pp. 318. 56
T. 3.5	“Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes (en dBA)” Fuente: “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” Carrión, A. , 2001, pp. 43. 58
T. 3.6	Valores de correspondencia entre %ALCons, STI/RASTI y valoración subjetiva". Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos". Carrión, A. , 2001, pp. 69. 73
T. 3.7	“Niveles de voz medidos en campo libre a 1 m de los labios ” Fuente: “Acústica en los espacios escénicos prehispánicos”, pp. 93. 73
T. 3.8	“Características más relevantes del mensaje oral” Fuente: “Acústica en los espacios escénicos prehispánicos”, pp. 65. 73
T. 4.1	"Parámetros de evaluación de salas para lenguaje". Adaptado de Carrión (2001). 88
T. 4.2	"Parámetros de evaluación de salas para música". Adaptado de Carrión (2001). 88
T. 4.3	“Valores máximos de NPS de ruido por impulso y valores ingresados al módulo de direccionalidad en CATT Acoustic. Elaboración propia”. 2014. 98
T. 4.4	"Coeficientes de absorción utilizados". Sancho, 2001 pp. 185. 103
T. 4.5	“Coordenadas de ubicación de fuentes y receptores”. Elaboración propia, 2014. 104
T. 4.6	“Valores de ruido de fondo obtenidos en sitio". Elaboración propia, 2014. 106
T. 4.7	"Promedio de porcentaje de error en valores máximos de NPS de validación". Elaboración propia, 2014. 112
T. 4.8	"Coeficiente de correlación de NPS para receptor 02 en fuente A2 a 1 kHz para validación entre simulación y medición en sitio". Elaboración propia, 2014. 114
T. 4.9	"Promedio de coeficientes de correlación para validación". Elaboración propia, 2014. 116
T. 4.10	“Formato de cálculo para obtener Leq. M. Monroy”. 2014. 120
T. 4.11	“Valores de caracterización de NPS de caracol, posición 1 a 5”. Elaboración propia, 2014. 121
T. 4.12	“Valores de caracterización de NPS de caracol, posición 6 a 10 Elaboración propia”. 2014. 121
T. 4.13	“Valores de caracterización de NPS de caracol, posición 11 a 15 Elaboración propia”. 2014. 122
T. 4.14	“Valores de caracterización de NPS de caracol, posición 16 a 20 Elaboración propia”. 2014. 122

T. 4.15	“Valores de caracterización de NPS de caracol, posición 21 a 24 y valores máximos Leq por frecuencia”. Elaboración propia, 2014.	123
T. 4.16	“Valores de caracterización de NPS de voz, posición 1 a 5”. Elaboración propia, 2014.	124
T. 4.17	“Valores de caracterización de NPS de voz, posición 6 a 10 Elaboración propia”. 2014.	124
T. 4.18	“Valores de caracterización de NPS de voz, posición 11 a 15 Elaboración propia”. 2014.	125
T. 4.19	“Valores de caracterización de NPS de voz, posición 16 a 20 Elaboración propia”. 2014.	125
T. 4.20	“Valores de caracterización de NPS de voz, posición 21 a 24 y valores máximos Leq. Elaboración propia”. 2014.	126
T. 4.21	“Leq NPS máxima de caracol. Elaboración propia”. 2014.	127
T. 4.22	“Leq NPS máxima de voz. Elaboración propia”. 2014.	127
T. 4.23	“Coeficientes de absorción utilizados”. Sancho, pp. 185, 2001.	129
T. 5.1	"Resultados de simulación 1 (Voz)". Elaboración propia, 2014.	132
T. 5.2	"Resultados de simulación 2 (Voz)" Elaboración propia, 2014.	13
T. 5.3	"Resultados de simulación 1 (Caracol)". Elaboración propia, 2014.	143
T. 5.4	"Resultados de simulación 2 (Caracol)". Elaboración propia, 2014.	144
T. 5.5	"Resumen de resultados de parámetros acústicos de evaluación para lenguaje y música". Elaboración propia, 2014.	153

Introducción

Durante las visitas a diferentes zonas arqueológicas o prehistóricas es común descubrir diversos fenómenos acústicos generados a través de distintas fuentes de impulso como pueden ser los aplausos, que dan como resultado un fenómeno que los guías turísticos identifican con sonidos de animales o elementos de la naturaleza. Un ejemplo de ello es el canto del quetzal en la Pirámide de Kukulcán en Chichén Itzá (Lubman, 1998) o el eco producido en la Plaza del Arroyo en Tajín a través de un aplauso. El eco parece surgir detrás del edificio correspondiente y regresar por los costados. Otro fenómeno acústico se presenta por la clara transmisión y recepción de mensajes orales de un lugar a otro en el mismo espacio sin importar las grandes distancias como se percibe en Xel-Ha, en donde se reporta que las conversaciones mantenidas en un extremo de una cueva pueden ser escuchadas claramente a decenas de metros de distancia. Otro ejemplo es el potente refuerzo sonoro que se presenta cuando se emiten sonidos por medio de instrumentos musicales en espacios como la Cueva del Parpalló en España (Jiménez, 2007). Por último en Tulum existe una edificación que posee un techo donde se encuentra un cilindro y un anillo de piedra (Garza, 2008), los guías locales aseguran que cuando los vientos presentan velocidades importantes, es decir, durante el acercamiento de un huracán, es posible escuchar un silbido a cientos de metros de distancia producido por el anillo. Garza escribe que este dispositivo podría constituir una de las primeras “alarmas meteorológicas”.

Este conjunto de fenómenos son estudiados a través de la *arqueoacústica*, (arqueología-acústica) misma que se compone de diferentes disciplinas tales como la arquitectura, la acústica, la física, las matemáticas, la historia, la música, la ingeniería, la antropología y la arqueología.

El interés por abordar el tema de la acústica en sitios prehispánicos proviene del asombro personal de los constructores de las ciudades de antiguas civilizaciones. Es claro que tenían conocimientos profundos acerca de la posición de los astros, de los ciclos estacionales y de las matemáticas, entre otros, conocimientos que mejoraron su calidad de vida en pos de su permanencia en la Tierra y para conocer las variables que nos relacionan como humanos con

nuestro entorno y que impactan en nuestro confort es importante estudiar cómo se percibía el ambiente cotidiano de las sociedades del pasado sin el uso de sistemas electro-acústicos.

Sin embargo el confort acústico en estos sitios ha sido poco estudiado y no se sabe con certeza si se tenía una planeación acústica en el desarrollo de los espacios prehispánicos.

Planteamiento del problema

En México, existen diversas ciudades prehispánicas que poseen efectos acústicos similares tales como el efecto de "barrido acústico" y la inteligibilidad de la palabra a grandes distancias.

Una de éstas ciudades es Xochicalco, en donde subjetivamente es posible apreciar ambos fenómenos en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos.

Sin embargo, diversos arqueólogos han establecido la hipótesis de que en éste espacio, una de las funciones principales era la de transmitir mensajes a toda la población, además de ser el punto de reunión para las personas de menor estrato social o entrada a la ciudad debido a su localización al ser la plataforma de menor altura del complejo.

Es posible determinar por medio de la acústica éste hecho, ya que si era un espacio para comunicar mensajes por medio de la voz o instrumentos musicales en ritos o ceremonias, entonces será posible comprobarlo por medio de herramientas de evaluación acústica.

Hipótesis

La Plaza de la Estela de los Dos Glifos en Xochicalco presenta condiciones acústicas adecuadas para la transmisión de mensajes orales y musicales.

Objetivo principal

Determinar las condiciones acústicas de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos en Xochicalco que permitieron la transmisión adecuada de mensajes orales y musicales en la presencia de dos fuentes sonoras.

Objetivos particulares

1. Conocer los aspectos históricos, ceremoniales, constructivos y de restauración de la Plaza de la Estela de los dos Glifos en Xochicalco.
2. Conocer y determinar los aspectos cuantitativos y cualitativos del campo acústico que forman parte de la evaluación de espacios para lenguaje y música.
3. Definir y analizar la respuesta acústica de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos en Xochicalco a través de valores cuantitativos y gráficos de distribución sonora.

Estructura de la tesis

Una vez definidos los objetivos, hipótesis y problema, se definió el siguiente capitulado.

Capítulo 1: Arqueoacústica (estado del conocimiento)

Capítulo 2: La Plaza Prehispánica Ceremonial en el Altiplano Central durante el Epiclásico

Capítulo 3: Acústica Arquitectónica y Urbanística

Capítulo 4: Medición y simulación en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos

Capítulo 5: Discusión y análisis de los resultados de la simulación

Capítulo 6: Conclusiones

Capítulo 1: Se expone el estado del conocimiento en Arqueoacústica desde que comenzaron las investigaciones nacionales e internacionales de esta disciplina desde el año de 1999 hasta la actualidad.

Capítulo 2: Se describe la forma en la que se configuraba tanto espacial como socialmente la Plaza prehispánica ceremonial en el Altiplano central, categoría a la que pertenece el sitio de caso de estudio.

Capítulo 3: Se exponen los diferentes aspectos que integran una evaluación acústica de salas y a escala urbana, así como los factores subjetivos que intervienen en la recepción de mensajes orales y musicales.

Capítulo 4: Se muestra la forma en la que se diseñó la prueba con base en la investigación arqueológica, arquitectónica, social y acústica para la obtención de los diversos valores cuantitativos y cualitativos. Posteriormente se exhibe el procedimiento de la prueba para validar el modelo por computadora a través de la comparación entre la medición en sitio y la simulación por computadora en igualdad de condiciones y finalmente se muestra la simulación en presencia de las dos fuentes sonoras (voz en náhuatl y caracol trompeta).

Capítulo 5: Se realiza una revisión de cada parámetro obtenido de la evaluación acústica y se discute el valor obtenido contra el recomendado. De igual manera se presenta la discusión de la uniformidad sonora a través de los mapas pseudo-coloreados de intensidad sonora.

Capítulo 6: Se muestra la descripción del trabajo realizado, se presentan las conclusiones generales, así como la aportación de la investigación y la recomendación a futuras investigaciones.

Finalmente se muestran los anexos que incluyen las diferentes gráficas de comparación para el apartado de validación. De igual manera incluyen tablas de cálculo de condiciones climáticas utilizadas en el trabajo.

Durante el proceso de investigación se estudiaron los diversos enfoques metodológicos y sistemáticos de evaluación en Arqueoacústica y aunque existen diversas formas de acercamiento al problema, aún no existe una que involucre un enfoque holístico. En el trabajo se propuso una metodología que considera diversos aspectos para principalmente resaltar la importancia de la investigación arqueológica y antropológica en el diseño de la prueba experimental con base en el análisis de confort acústico.

Aunado a lo anterior, es importante resaltar que Xochicalco no había sido considerado como un “espacio acústico”, aunque es conocido, al igual que en diversos sitios prehispánicos, que en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos (fig. 0.1) se genera el efecto de “barrido acústico” al emitir un aplauso. El presente estudio permite posicionar este sitio como un ejemplo más de evidencia acústica favorable en Plazas Ceremoniales en Mesoamérica.



Fig. 0.1 Plaza de la Estela de los Dos Glifos, vista Norte. Fuente:
https://www.flickr.com/photos/patrice_schmitz/sets/72157627030790344/, consultado en 2016.

Sin el deseo de memoria, se borra la identidad...
Raymundo Mier

Capítulo 1 Arqueoacústica

En el mundo existen diversos fenómenos acústicos producidos en cavidades rocosas naturales: cuevas, cañones, desfiladeros, y en monumentos megalíticos edificados por el hombre: pirámides, menhires o dólmenes, y en general, en sitios donde el uso preponderante fue el ritual-ceremonial.

Ante la pirámide del “Castillo” en Chichén-Itzá se produce el efecto “cola de quetzal”¹ cuando se emite un impulso sonoro y también el de “gotas de lluvia”², (Lubman, 1998) cuando una persona sube las escaleras. En las cuevas del Parpalló, en España, (Jiménez, 2007) en el espacio donde se encuentran las pinturas rupestres se crea la hipótesis de que se percibe una alta inteligibilidad de mensajes orales³. Esto indica que probablemente las personas buscaban y elegían el sitio más adecuado para comunicarse.

De igual manera en cuevas paleolíticas, (Díaz, 2012) donde han sido encontrados litofones, (instrumentos musicales elaborados en piedra; “lythos” piedra y “fono” sonido), al tocarlos o hablar en su interior, se genera una amplificación de las frecuencias emitidas por efecto de la resonancia.

En la zona arqueológica del Tajín, (Garza, 2008) al aplaudir frente a cada uno de los cuatro edificios que limitan la Plaza del Arroyo, se genera un eco que suena como un “trueno” que parece provenir desde la parte posterior de los edificios. (fig. 1.1)

En Malta, en el Hipogeo Hal-Saflieni (monumento megalítico tallado en la piedra con forma circular) si se emite un mensaje oral en “la cámara del oráculo” (que es un nicho en la pared) se “baña” el espacio de sonido debido a la forma circular del recinto. (fig. 1.2)

¹ Eco similar al canto de un quetzal.

² Sonido similar al impacto de gotas de lluvia sobre una superficie porosa. Cuando las personas suben por la pirámide del “Castillo” en la parte inferior frente a la pirámide la gente percibe el sonido de las gotas de lluvia generado por las pisadas de las personas que ascienden por la misma.

³ Es decir, al pronunciar palabras es posible entenderlas claramente, que en una cavidad rocosa es frecuentemente imposible por el eco y la reverberación.



Fig. 1.1 “Plaza del Arroyo, Tajín”, Fuente:
<http://www.latinamericanstudies.org/tajin/el-tajin-aerial-1.jpg>, consultado en 2014.



Fig. 2.2 “La Cámara del Oráculo, Hipogeo Hal-Saflieni” Fuente:
<http://guiasparaviajeros.com/2012/03/29/excursiones-desde-la-valeta/>, consultado en 2014.

En Camster Round (fig. 1.3), un túmulo que pertenece a *The Grey Cairns of Camster* en Escocia, el investigador Aaron Watson describió el recinto como un resonador de Helmholtz⁴ que:

“posee fuertes frecuencias de resonancia y crean diversos efectos sonoros en su interior y exterior. Así, la reverberación y filtrado que se produce en el interior amplifica en exceso los sonidos, sobre todo las bajas frecuencias y debido al largo y estrecho pasadizo, en el exterior se escuchan las voces distorsionadas en extremo. Las frecuencias medias y altas no consiguen llegar al exterior del túmulo, creando así una difícil distinción de los mensajes sonoros. Este efecto se acentúa si nos situamos en la parte posterior del recinto. Las propiedades de resonancia son tales que, si excitamos la sala con un instrumento de percusión, se consiguen escuchar resonancias de muy baja frecuencia en la cercana cámara de Camster Long, a 200 m de distancia y este sonido no se aprecia en el exterior de la cámara.” (Jiménez, 2007:21)



Fig. 1.3 “Túmulo de Camster Round” Fuente:
<http://www.flickriver.com/photos/tags/camster/interesting/>, consultado en 2014.

De igual manera, es sorprendente la percepción de los sonidos emitidos a través del lenguaje a distancias largas, por ejemplo en los juegos de pelota, donde un visitante emite palabras en un extremo y en el extremo opuesto se “escuchan” con claridad, incluso durante los eventos de luz y

⁴ También llamado absorbente Helmholtz, es un artefacto que tiene por objetivo eliminar un estrecho margen de frecuencias.

sonido en zonas arqueológicas, en donde se utilizan instrumentos prehispánicos como caracoles, tambores o flautas, se genera una amplificación de volumen y pueden ser perceptibles a grandes distancias.

Lo anteriormente descrito se refiere a los efectos acústicos calificados como “curiosos” y es así como surge la *arqueoacústica*.

La *arqueoacústica* tiene el objetivo de proporcionar una explicación científica a fenómenos acústicos en sitios arqueológicos a través de diversas disciplinas tales como: la arqueología, la antropología, las matemáticas, la ingeniería, la acústica, la historia, la música y la arquitectura.

De acuerdo con Clara Garza et. al. (2008), la *arqueoacústica* se ha desarrollado desde diversos puntos de vista, tratando de sistematizar sus objetivos, contenido y métodos para conocer las actividades humanas, religiosas y políticas de las sociedades del pasado. Sin embargo aún no se ha logrado la unificación de métodos que rijan el estudio acústico en zonas arqueológicas.

Entre los diversos enfoques se encuentran el físico, en donde se explica la forma de propagación del sonido así como los valores cuantitativos acústicos; el antropológico, en donde existe una inclinación creciente por comprobar que los espacios fueron diseñados (pirámides) o elegidos (cuevas) conscientemente para lograr ciertas características o efectos acústicos dependiendo del uso del lugar; el arqueológico, en donde se realizan estudios a partir de la evidencia material y/o histórica de instrumentos musicales prehispánicos o prehistóricos para determinar la función del espacio; el musical, en donde se estudian los instrumentos musicales; y por último se encuentra el estudio de los sitios antiguos ligando dos variables principales: la intencionalidad en el diseño y la relación cosmogónica de la sociedad, en donde se pretende explicar y entender la intencionalidad de los fenómenos acústicos dentro de la vida de las civilizaciones pasadas.

A partir de 1998 se han elaborado diversos trabajos en *arqueoacústica*, comenzando con el consultor acústico David Lubman quien presenta el trabajo titulado “Archaeological Acoustic Study of Chirped Echo from Mayan Pyramid at Chichen Itza”. En su hipótesis establece que el efecto de “cola de quetzal”, producido por un ruido de impulso o aplauso frente a las escaleras

del Castillo de Chichén Itzá, es producto de una intencionalidad en el diseño maya. De acuerdo al estudio de Lubman, el efecto acústico que se produce en la pirámide se asocia a la “difracción de Bragg”⁵ y por medio de un sonograma⁶ representa un “barrido acústico”.

Lubman establece el aplauso como una suma de ondas sinusoidales de diferente longitud de onda y frecuencia correspondiente, éstas generan interferencias constructivas cuando chocan las crestas de la onda (en fase), pero se suprime cuando chocan en el valle y la cresta (opuesta en fase). Las frecuencias más bajas presentan mayor retraso de la reflexión (milisegundos) y por lo tanto nuestro aparato auditivo (el oído) interpreta la diferencia como un “barrido”.

Posteriormente Lubman (1999) desarrolló los trabajos “Singing Stairs” (tratando el efecto de “gotas de lluvia” en las escaleras del Castillo), “Mayan Acoustics: Of Rainbows and Resplendent Quetzals” (ampliando la explicación de la Difracción de Bragg en el “Castillo”), finalmente en el año 2002 publicó el trabajo “Acoustical Features of Two Mayan Monuments at Chichen Itzá: Accident or Design?” en donde externa la comprensión cosmogónica del mundo maya reflejada en los efectos acústicos producidos intencionalmente.

El estudio de Lubman consistió en un estudio de señales acústicas centrándose en los aspectos físicos y electrónicos.

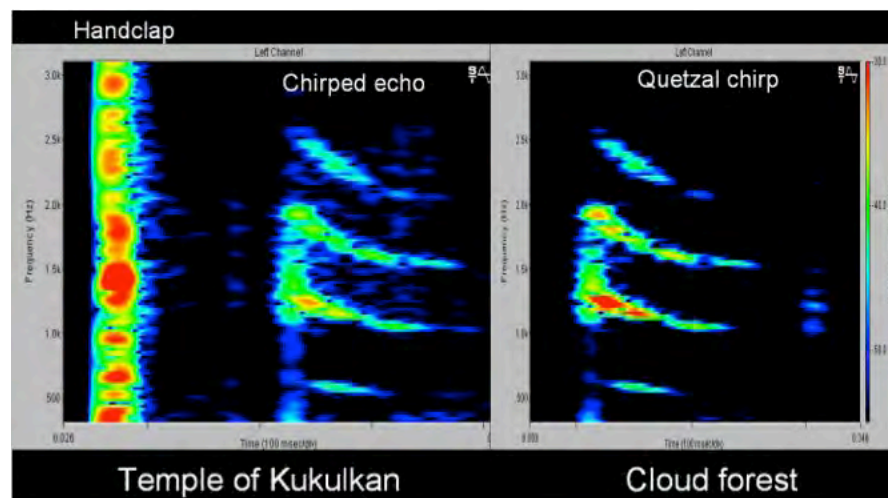


Fig. 1.4 “Sonograma de respuesta acústica de ruido por impulso y sonograma de canto de quetzal”. Fuente: Lubman, David *Mayan Acoustics: Of Rainbows and Resplendent Quetzals*, J. Acoust. Soc. Am. 106”, 1999.

⁵ Difracción de Bragg: permite estudiar las direcciones en las que la difracción de rayos X sobre la superficie de un cristal produce interferencias constructivas.

⁶ Un sonograma es una representación gráfica de las frecuencias que lo componen como función del tiempo.

Concluye la investigación presentando dos sonogramas, uno que representa la respuesta acústica frente a la pirámide del “Castillo” y la segunda representa el canto de un quetzal siendo similares entre ellas (fig. 1.4).

En el año 2002 María Isabel Martínez Cadena⁷, realizó su tesis doctoral “Acústica en los espacios escénicos rituales prehispánicos” estableciendo el objetivo de la siguiente manera:

“El alcance del presente estudio es determinar las variables esenciales para la valoración acústica de este tipo de espacios (semi abiertos), definiendo sus valores cualitativos y cuantitativos. Así como poder definir de manera objetiva las condiciones acústicas que prevalecían en los distintos tipos de Juego de Pelota, y como las modificaciones formales que se dieron a lo largo de su existencia, contribuyeron, o no, a una mejoría de las condiciones acústicas del espacio.” (Martínez, 2002:5)

Este estudio, centrado en los juegos de pelota, se realiza mediante la aplicación de un programa de simulación (CATT Acoustic) para determinar las cualidades acústicas de dichos espacios mediante un proceso de predicción. Aunque los resultados de esta investigación muestran que en los espacios de estudio prevalecían condiciones acústicas adecuadas, resalta el hecho de que en ella no se realizó medición acústica alguna para validar los modelos de simulación.

El investigador José Antonio Cruz Calleja⁸ desarrolla en el año 2002 el trabajo “Fenómenos acústicos en Chichen Itzá” (fig. 1.5) en donde explica por medio de la geometría acústica el comportamiento de las ondas en el juego de pelota donde concluye que:

“La extraordinaria acústica es debida en parte a la geometría del lugar, si observamos un plano del mismo podemos deducir que es simétrico respecto al punto central. Otro factor importante son las propiedades reflejantes de la piedra calcárea con la que fue construida la estructura; es tan reflejante que si batimos las palmas en uno de los templos el sonido es reflejado por la estructura y puede ser escuchado nuevamente como un eco.” (Cruz, s/d, p.4)

⁷ Tesis doctoral en Universidad de Sevilla, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, "Cum Laude" por unanimidad.

⁸ Investigador, departamento de acústica, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica UC.

En este trabajo resalta el enfoque de la investigación ya que pareciera dirigido a contradecir las investigaciones de Lubman. Aclara que los fenómenos eran debidos a la física y geometría del lugar, no a una intencionalidad en el diseño de las civilizaciones antiguas.

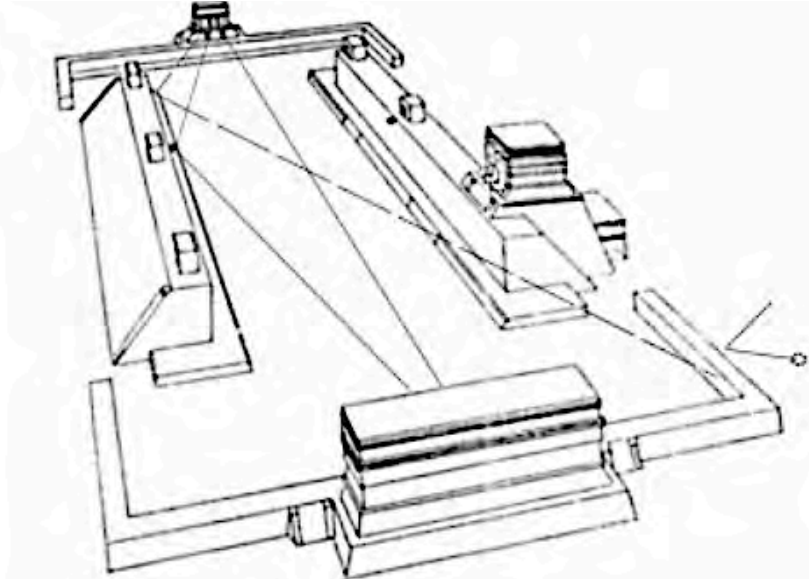


Fig. 1.5 "Mecanismo de refuerzo sonoro presente en la cancha del juego de pelota".
Fuente : http://www.acusticaweb.com/images/PDF/articulos/acustica_en_chichen.pdf.
Consultado en 2014.

Francisca Zalaquett Rock⁹ en el año 2006 realizó la tesis doctoral que lleva por título “Estudio de las representaciones escénicas en los Mayas del periodo clásico. El Grupo Norte de Palenque y su significado social” en donde realiza, entre otros, un análisis acústico para determinar la posibilidad de la ubicación de los músicos dependiendo de la visibilidad y las frecuencias aumentadas dentro de los recintos y calidad acústica en los exteriores.

En este trabajo se muestran estudios para la determinación de las frecuencias de resonancia del estuco (fig. 1.6) que se utilizaba como recubrimiento de las edificaciones. De igual manera presenta una caracterización acústico-musical de silbatos prehispánicos provenientes de excavaciones en Palenque.

⁹ Investigadora, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Estudios Mayas.



Fig. 1.6 "Medición de estuco en cámara sonoamortiguada".
Fuente: Zalaquett, 2006.

Posteriormente en el año 2007, Noé Jiménez¹⁰ realiza el trabajo terminal de carrera en Ingeniería en Telecomunicaciones titulado “Estudio de las Características Acústicas de la Cueva del Parpalló¹¹”, en donde argumenta:

“A simple vista, el recinto sagrado de Parpalló goza de unas características acústicas excepcionalmente adecuadas para la transmisión de mensajes sonoros. El estudio de éstas pretende arrojar algo de luz acerca de las razones de la gran afluencia y cantidad de reuniones y rituales supuestamente llevados a cabo en el interior del recinto, aportando datos científicos que puedan demostrar si las propiedades acústicas de este recinto pudieran haber contribuido a los propósitos funcionales para los que fue usada la cueva.” (Jiménez, 2007: 9)

En este estudio, Jiménez realizó pruebas para determinar las propiedades acústicas de la formación rocosa (fig. 1.7) por medio de programas de simulación por computadora y utilizó un litófono (instrumento de piedra) como fuente sonora principal, basado en las investigaciones arqueológicas que hallaron el instrumento al centro de la cueva.

¹⁰ Noé Jiménez, Ingeniero Técnico de Telecomunicación especialidad Sonido e Imagen y Máster en Ingeniería Acústica por la Universidad Politécnica de Valencia (Campus de Gandía).

¹¹ La Cueva de Parpalló se localiza en Gandía, España y constituye en conjunto con la Cueva de las Malladetes, dos de los yacimientos prehistóricos más importantes de la región mediterránea peninsular de los primeros pobladores de la zona en el Periodo Paleolítico.

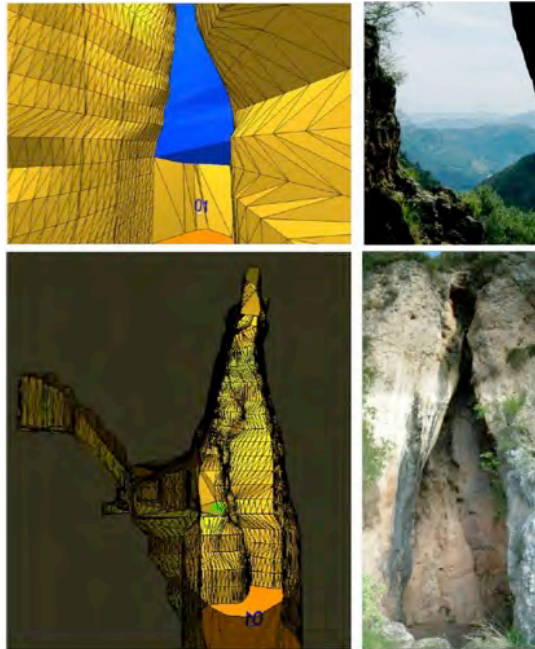


Fig. 1.7 "Cueva de Parpalló, modelo 3d en CATT Acoustic". Jiménez, 2007.

El equipo de la UNAM¹² (2008) integrado por Clara Garza (Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas), Andrés Medina (Facultad de Ciencias), Pablo Padilla (Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas), Alejandro Ramos (Facultad de Ciencias,) y Francisca Zalaquett (Instituto de Investigaciones Antropológicas) elaboraron un artículo para la revista "Estudios de cultura maya Vol. XXXII, en el capítulo de *arqueoacústica* Maya, titulado "La necesidad del estudio sistemático de efectos acústicos en sitios arqueológicos," en donde plantean que:

"es indispensable investigar hasta qué punto los constructores estaban conscientes de estos fenómenos y si los incorporaron en su diseño con la intención de aprovechar los edificios en rituales u otras manifestaciones de carácter colectivo o privado. Desde nuestro punto de vista, este enfoque proporciona una línea de investigación relevante que podría complementar y enriquecer otras, constituyendo una herramienta adicional."

(Garza, 2008, p. 64)

¹² Universidad Nacional Autónoma de México

El enfoque de este documento se centra en el planteamiento de una metodología que entienda el fenómeno auditivo y sonoro a partir de tres ejes principales; el físico (comprendiendo al sonido como un fenómeno natural), el fisiológico y cognitivo, y el de significado como parte de manifestaciones culturales, religiosas y artísticas, entre otras.

Posteriormente en el año 2009, Adrián Tonatiuh Ruíz realizó la tesis que lleva por nombre “Análisis acústico del efecto Cola de Quetzal en El Castillo de Chichén Itzá, Yucatán” bajo la dirección del físico Alejandro Ramos Amézquita para obtener el título de físico de la UNAM.

Ruíz, en la parte teórica, analiza el efecto conocido como “Cola de quetzal” mediante tres modelos; el de D. Lubman (basada en redes de difracción, 1998^a, b y c), el de Declercq et. A. (basado en una teoría derivada de la difracción de Rayleigh 1907) y el modelo de A. Bilsen (basado en el fenómeno psicoacústico de tono por repetición, 2006). Encontró que los tres modelos describen las mismas curvas, sin embargo encontró un error en el modelo de Declercq et. al. Posteriormente propuso un modelo alternativo para simular el efecto acústico, para lo cual realizó grabaciones frente a la pirámide de El Castillo. Emitió una serie de pulsos gaussianos con diferentes características en espectro y duración, las grabó y analizó a través de espectrogramas. Encontró que:

“A grandes rasgos el eco producido se conforma por las partes del barrido que se encuentran dentro de la distribución espectral del pulso. Se encontró también que si la distribución espectral se encuentra debajo de cierta frecuencia determinada por las dimensiones de los escalones, la respuesta consiste en ecos o reflexiones simples; por arriba de tal umbral el pulso es dispersado temporalmente debido a un fenómeno de difracción. Mediante este análisis se encontraron las condiciones necesarias en el espectro del pulso, para que la dispersión temporal derive en un barrido de frecuencias bien definido.

En cuanto al modelo propuesto de N fuentes puntuales, se encontró que para todos los pulsos, las simulaciones del modelo pueden describir las características más generales del eco barrido. Esto confirma que el mecanismo principal que produce el barrido de frecuencias está relacionado directamente con la difracción. La comparación de las simulaciones mostró que en las grabaciones actúan más factores físicos que no son considerados en el modelo. No obstante con un ejemplo donde se agrega la influencia del suelo, se muestra que el modelo propuesto es perfectible.”

(Ruíz, 2009, 2)

El estudio permite conocer los métodos de análisis para determinar la respuesta acústica a través de fuentes de impulso. Ciertamente afirma la necesidad de la conformación de un grupo de

estudio interdisciplinario, ya que son ecuaciones complejas que requieren de un amplio conocimiento físico y matemático.

En el año 2011 Andrés Medina Albores para obtener el título de Matemático en la UNAM presenta el trabajo titulado “Arqueoacústica”, mismo que se desprende del proyecto que lleva el mismo nombre y que involucra a un grupo interdisciplinario de diversos investigadores tales como: Alejandro Ramos, Pablo Padilla, Francisca Zalaquett y Guadalupe Caro. El proyecto se centró principalmente en el estudio de efecto de “cola de quetzal” en Chichén Itzá , sin embargo la tesis realizada por Medina tenía por objetivo principal sentar las bases para la eventual creación de una metodología propia de la Arqueoacústica para proponer una estructura que a través de un manual permitiera dar un curso a nivel universitario.

Principalmente se trataron tres áreas: Arqueología e historia maya; conocimiento fundamental que permite conocer las condicionantes del sitio en varios aspectos como: la religión, ciencia, arte, organización sociopolítica y astronomía, entre otras. El marco teórico físico-matemático, el cual es la base para comprender la forma en la que las ondas sonoras se propagan en un espacio por medio de ecuaciones de onda; y finalmente los métodos numéricos y simulación por computadora (propone el programa FEMLAB), el cual permite realizar el trabajo de forma más efectiva ya que es posible cambiar los valores como la posición de las fuentes e intensidad de los sonidos.

Como conclusión menciona lo siguiente:

“Se llega a dos planteamientos importantes. El primero es que la arqueoacústica requiere de la participación de investigadores y estudiosos de muchas disciplinas, algunas de las cuales se mencionan en la tesis. Asimismo, se proporcionan elementos específicos de la contribución que puede hacer cada especialista. Uno de los objetivos finales de esta disciplina es lograr una visión múltiple, profundizando en cada aspecto de la investigación, para poder relacionarlos e integrarlos en una perspectiva más general y completa.

El segundo planteamiento se refiere a la arqueoacústica en general y a su estado actual. Es claro que el interés por estos temas e investigaciones va en aumento, pero sigue siendo un privilegio de pocos su conocimiento, por lo que se hace énfasis en la necesidad y conveniencia de una mayor y mejor divulgación. Además, es necesario cimentar mejor esta disciplina, comenzando por el desarrollo e implementación de una metodología propia y adecuada.”

(Medina, 2011:5)

En este trabajo propone diversas líneas de investigación pendientes. Postula la importancia dentro de la arqueoacústica el desarrollar una metodología propia que pueda integrar a otras disciplinas, en la parte arqueológica es necesario profundizar la importancia del sonido dentro de las culturas de estudio, en la parte física es indispensable realizar investigaciones acerca de los materiales empleados en el sitio para conocer las características que aporta al sonido tales como la absorción y reflexión, y finalmente en el aspecto de la simulación por computadora (en FEMLAB) es importante realizar auralizaciones.

El trabajo realizado por Medina provee de claridad la forma de acercamiento al problema que representa un estudio en Arqueoacústica, sin duda parte fundamental de la presente tesis.

Posteriormente Díaz-Andreu¹³ (2012) en el artículo “Acoustics and Levantine rock arte: auditory perceptions in La Valltorta Gorge¹⁴” publicado en la revista *Journal of Archaeological Science*, presentaron los resultados de mediciones realizadas dentro de la cueva (9000 al 6000 aC.) a través de grabaciones de voz humana, silbato y aplausos en donde se encontró que la mejor sonoridad corresponde a las zonas de los tres “abrigos” (cavidades) más profusamente decoradas con pinturas (fig. 1.8).



Fig. 1.8 "Barranco de la Valltorta". Fuente: <http://www.venamicasa.com/cultural-activities-for-groups/mediterranean-cave-art/>. Consultado en 2014.

¹³ Margarita Díaz-Andreu es Profesora de Investigación en ICREA (Instituto Catalán de Investigación / Estudios Avanzados) en Arqueología en la Universidad de Barcelona.

¹⁴ El barranco de la Valltorta es un paraje en la provincia de Castellón, España, en donde se encuentran diversos abrigos con pinturas rupestres.

En el año 2013 Aboites¹⁵ y Wilson¹⁶ presentan el artículo “Mediciones acústicas en sitios arqueológicos del estado de Guanajuato” en donde se muestran los resultados de las características acústicas de los sitios arqueológicos Cañada de la Virgen, El Cópore, Peralta y Plazuela en Guanajuato. Se presentan resultados a través de planos “pseudo-coloreados” correspondientes al nivel de intensidad sonora elaborados en un programa de simulación computacional (fig. 1.9).

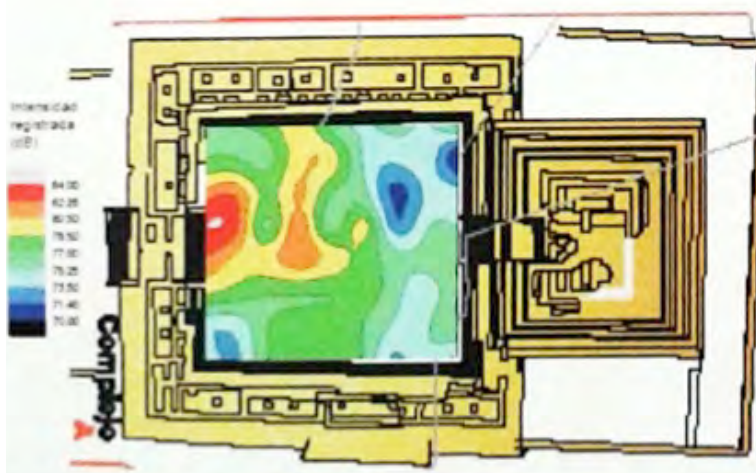


Fig. 1.9 "Mapa bidimensional pseudo-coloreado". Fuente: Aboites y Wilson , 2013.

Las investigaciones que han sido conducidas en sitios arqueológicos precolombinos y prehistóricos han permitido conocer el comportamiento del sonido en estos espacios y ligarlo con los aspectos antropológicos y sociales que conforman la riqueza de las sociedades del pasado, sin embargo es importante mencionar que en cada uno de estos estudios el enfoque ha sido diferente.

En algunas investigaciones no es clara la manera en que relacionan la arqueología con la acústica, aspecto fundamental para realizar las pruebas. Lo anterior es consecuencia de la falta de una metodología clara como expone Garza et. al. (2008), aunque la interdisciplinariedad que compone éste tipo de estudios hace necesaria la intervención de personas especializadas así como un ejercicio de análisis para entrelazar las diversas variables que componen el estudio arqueoaústico.

¹⁵ Centro de investigaciones en óptica A.C., León, México.

¹⁶ Universidad de Ciencia y Tecnología en Lille, Francia.

Capítulo 2 La Plaza Prehispánica Ceremonial en el Altiplano Central durante el Epiclásico

Se le denomina Epiclásico al periodo histórico comprendido entre el 600/700 - 900/1000 d.C. El término fue acuñado por Jiménez Moreno, quien escribió en 1959 el texto titulado "Síntesis de la historia pretolteca de Mesoamérica" donde describe los cambios sociopolíticos mesoamericanos una vez finalizado el periodo Clásico. Sin embargo, diversos investigadores prefieren denominar a éste periodo como Clásico Tardío. El Epiclásico se caracteriza por la pérdida de la supremacía política, militar y comercial de Teotihuacán, hecho que desemboca en la ascensión de diversos grupos situados en las zonas periféricas como Cholula, Xochicalco, Tula, Cacaxtla-Xochitécatl, Teotenango y Cantona (fig. 2.1) (Jiménez, 1966:49), la reorganización territorial a su vez desencadena una competencia entre dichas ciudades-estado (Marcus 1989).



Fig. 2.1 "Zona arqueológica de Cantona". Fuente: <http://www.zonaturistica.com/attractivo-turistico/1665/zona-arqueologica-de-cantona-puebla.html>. Consultado en 2015.

Durante dos siglos y medio se generaron cambios en la interacción cultural, movilidad social, reorganización de los asentamientos, inestabilidad política y la revisión de las doctrinas religiosas (López, 2001:285). Sin embargo ningún nuevo centro de poder logra la hegemonía de

Teotihuacán, por lo que el ambiente de incertidumbre lleva a estos centros a establecerse en zonas estratégicas y construidas con base en una planificación defensiva. Es entonces así como proliferan los asentamientos pluriétnicos (fig. 2.2), la iconografía bélica, los matrimonios entre personas de zonas distantes y se genera una alianza económica y cultural entre el Altiplano Central, la Costa del Golfo y el área maya (Webb, 1978:162) misma que tenía como objetivo la unión de fuerzas en caso de una agresión externa (Hirth 1995:247).

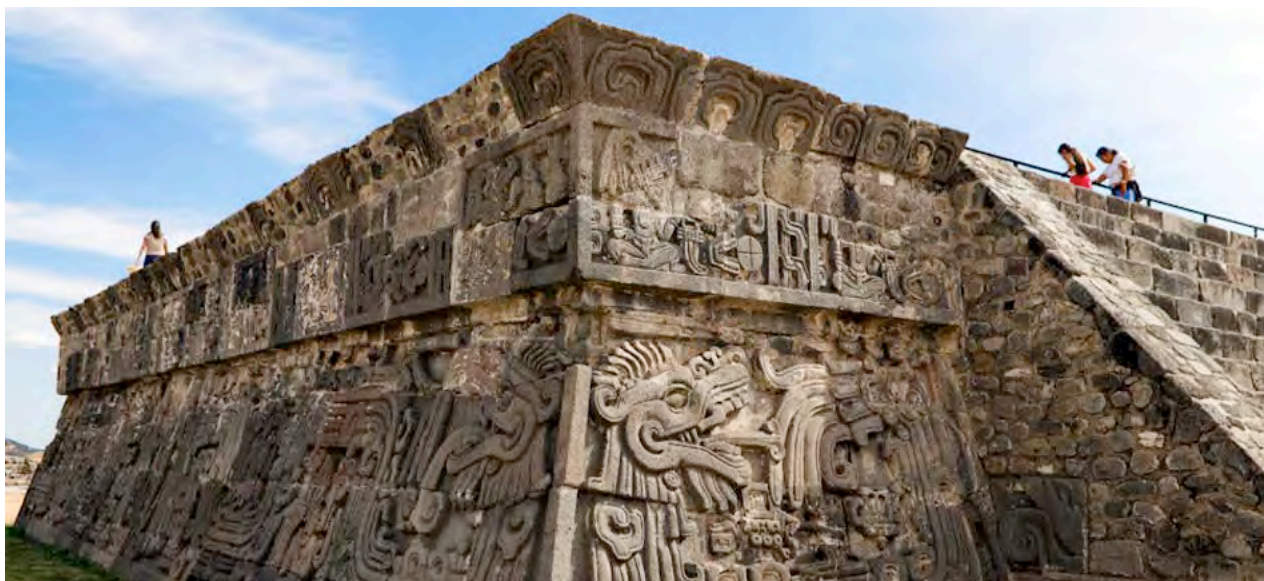


Fig. 2.2 "Pirámide de las serpientes emplumadas. Construcción de múltiple herencia cultural (Teotihuacán, Oaxaca, Maya)".
Fuente: <http://www.visitmexico.com/es/arqueologia-en-xochicalco-morelos>. Consultado en 2015.

Para ello se crearon las ciudades fortalezas que se identifican por presentar grandes basamentos o taludes perimetrales, en ocasiones fosas, edificios que además de delimitar espacios públicos eran útiles como sistemas defensivos (de la Fuente, 1995:102). El diseño de la ciudad prehispánica del Epiclásico combina plataformas, calles, edificios tanto religiosos como civiles y plazas. Éste último elemento relacionaba perfectamente plataformas, edificios, adoratorios y espacios abiertos, siendo ejemplo de ello la Ciudad de Xochicalco.

2.1 La Plaza Ceremonial Prehispánica

La vida del ser humano mesoamericano centraba en el aspecto religioso y todas las culturas fueron politeístas. La observación de los astros se encontraba relacionada con los procesos socioeconómicos de las sociedades agrícolas, por lo que en el cosmos se personificaban diversas deidades. El inicio de la observación de los astros (fig. 2.3) dio origen a la organización del calendario, predicción del clima, la escritura, las matemáticas, la geografía, la arquitectura, entre muchos otros aspectos. De acuerdo con Rios (2014) esto anclaba el entorno, los elementos de la naturaleza y la sociedad como una sola unidad.

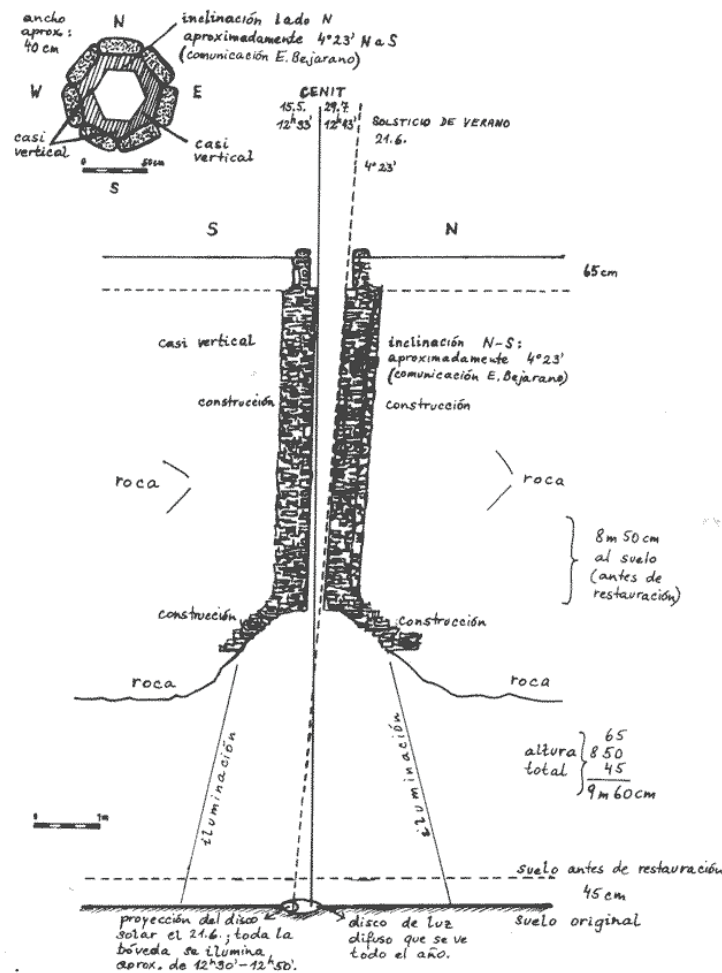


Fig. 2.3 "Corte esquemático del observatorio de Xochicalco" Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/04/html/sec_7.html. Consultado en 2015.

Las personas que aprendieron por tradición oral el movimiento de los astros y la herbolaria, entre otros, fueron denominados especialistas rituales y más tarde se les conoció como sacerdotes, mismos que se transformaron en líderes de los grupos. La sede de la labor intelectual de los sacerdotes y observadores astronómicos son "los espacios sagrados", en donde todo lo que existe alrededor tiene un significado y el objetivo es la representación física del universo.

Las plazas ceremoniales comenzaron con una disposición formal diferente. Anteriormente se construía un templo en donde se colocaba una escultura de alguna deidad, sin embargo en épocas pocas personas podían ser partícipes de una ceremonia, fue entonces cuando, de acuerdo con Rios (2014) se decidió que debía de realizarse en un espacio más amplio y así surgió el concepto de plaza religiosa, entendiendo ahora como un espacio abierto.

El espacio abierto de la plaza, tenía la función de la realización de un conjunto de actos respaldados por la cultura y la tradición para rendir culto o expresar reverencia a sus dioses, siendo éste espacio considerado como la representación física del universo.

Según Mangino (2006), el concepto metafísico del espacio estaba ligado al tiempo. En su libro refiere a Alberto Amador que, en forma de comunicación verbal relata lo siguiente:

"Primero, había un plano sobre el que se situaba a los hombres y a los animales, a la tierra y a las aguas; lo llamaban Anáhuac, que aparte de comprenderlo todo, era dominado por el monstruo Cipactli, mezcla de pez y de caimán. En este plano, también llamado Intlalítcpac o Tlaltítcpac, el tiempo iba transcurriendo y desplazándose en el sentido contrario a las manecillas del reloj, apreciación antagónica respecto de nuestro modo de pensar, según el cual, el tiempo no viaja ni se desplaza, sólo transcurre; somos nosotros quienes nos desplazamos desde la niñez hasta la vejez y de generación en generación a través del tiempo."

(Mangino, 2006:128)

Al viajar en el tiempo, éste se desplaza por cuadrantes ubicados hacia el norte, sur, oriente y poniente, sin embargo no se localizan como en un plano cartesiano, sino girados a 45 grados como aparece en el Códice Mendocino o Mendoza (fig. 2.4).



Fig. 2.4 "Códice Mendocino o Mendoza". Fuente: <http://www.arqueomex.com/S2N3nHistorias97.html>. Consultado en 2015.

En la región norte "Mictlampa, se le asocia con la ausencia de luz o el color negro, en la región oriente "Tlautlahui", se localiza el "Tlalocan" o reino del Dios Tláloc, con el color rojo, al poniente "Tlactipan" con el color azul y al sur "Huitznáhuac", se le asocia con el color blanco. Las cuatro regiones se encuentran ligadas con el espacio arquitectónico, los cuatro rumbos o puntos cardinales poseen significados que precisamente plasman la representación física del universo.

Las plazas religiosas fueron un elemento centralizante para reunir a la gente. El elemento arquitectónico principal era el basamento piramidal y su templo. Al centro de estos espacios se

colocaba el altar para realizar ceremonias a la vista de todos los concurrentes. Su traza era lineal, obedeciendo a los cuatro rumbos y existen diversos ejemplos de diseño arquitectónico con estudio de geometría solar; generalmente existían diversas plazas en cada ciudad debido a la jerarquía que se otorgaba y se accedía a éstas plazas por las esquinas, no de manera directa. En estos espacios generalmente existían monolitos o estelas (fig. 2.5) (elementos tallados en piedra) que frecuentemente indicaban fechas relacionadas con la deidad o a quien se dedicaba el templo.



Fig. 2.5 “Réplica de estela en Xochicalco”. Fuente: Arq. Alejandro Morales Cruz, 2014.

El objetivo principal de estos espacios según Rios (2014) era ser ocupados por la gente para celebraciones religiosas colectivas en donde se manifestaban, ya fuese bailando, cantando, conversando o intercambiando sus costumbres. En diversas ocasiones, cuando el control del espacio no era total, estos espacios se convirtieron en lugares ocupados por el público en general.

Lo anterior permite establecer la importancia de estos espacios por su significado; y por ende, las actividades realizadas en ellas eran parte esencial de la vida de las civilizaciones antiguas.

2.2 Xochicalco

Xochicalco es un sitio arqueológico precolombino ubicado en el municipio de Miacatlán (fig. 2.6) en el Estado de Morelos en México, a 38 km de la Ciudad de Cuernavaca.

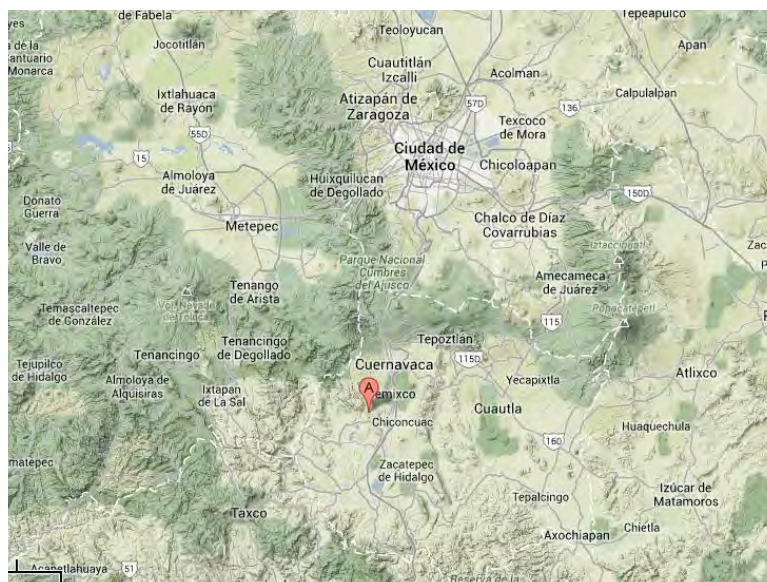


Fig. 2.6 "Localización geográfica de Xochicalco". Fuente: Google maps, Consultado en 2014.

El clima, de acuerdo con González (1994) se clasifica como cálido subhúmedo (Awo) ya que su temperatura promedio anual es de 24 °C, con una máxima en Mayo de 29 °C y una mínima en Diciembre de 22 °C. La temporada de lluvias se presenta de Junio a Septiembre con 1040 mm de precipitación de promedio anual.

El nombre de Xochicalco (González, 1994) está compuesto por las palabras nahuas *xóchi* (tl) flor, *cal* (li) y *co* que es un locativo, que significa "en la casa de las flores".

Según Piña (1989), el sitio de Xochicalco, durante los primeros siglos de la era cristiana ya se encontraba habitado por una población que había comenzado a desarrollar cultura y economía propias a través de la agricultura, caza, pesca, recolección y tejidos, sin embargo postula que la llegada de un grupo más adelantado hizo prosperar el sitio, transformándolo más tarde en uno de los centros religiosos y comerciales más importantes del Altiplano Central.

El arqueólogo Enrique Nalda (Solanes, 1990:21) advierte que el agrupamiento de la población en Xochicalco se habría desarrollado a causa del proceso de militarización que sufrió la sociedad teotihuacana a finales del periodo Clásico, misma que habría comenzado a amenazar diversas regiones con el propósito de obtener sus recursos.

De acuerdo a lo anterior, el arqueólogo Jaime Litvak (Solanes, 1990:29) propone que Xochicalco, aunado a diversos sitios como el Tajín y Cholula, habrían contribuido al declive de Teotihuacán al obstaculizar el libre paso de los productos en el periodo Clásico Tardío.

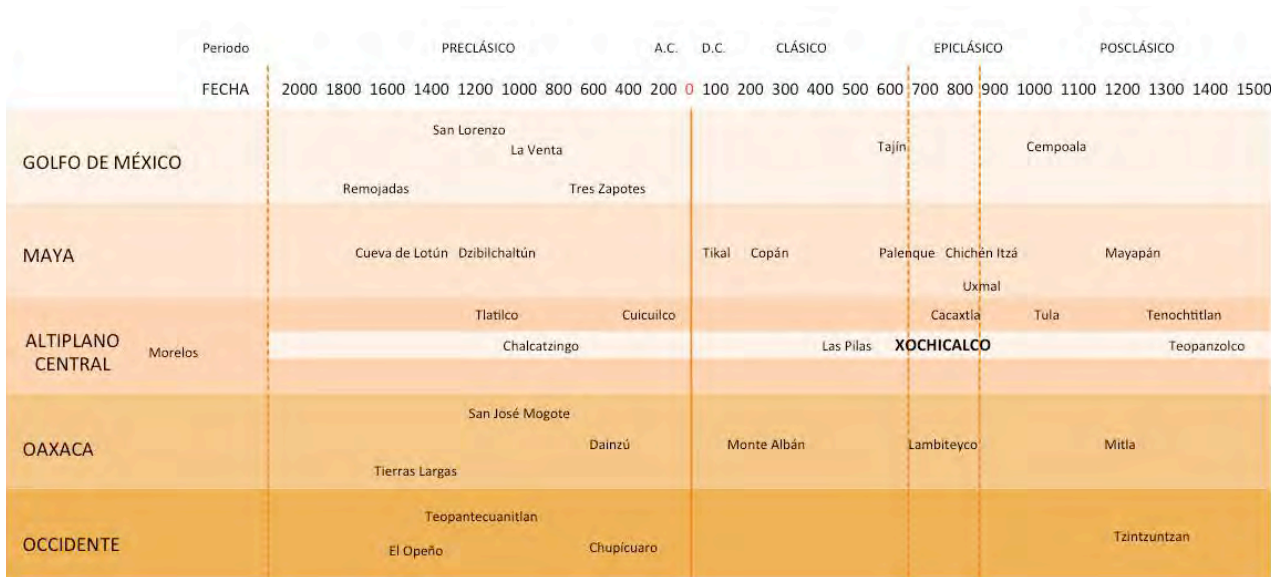


Fig. 2.7 "Periodos arqueológicos". Adaptado de Museo de Sitio de Xochicalco, 2014.

Xochicalco tuvo su esplendor en el periodo denominado "epiclásico" (fig. 2.7), que abarca de año 600 d.C. al 900 d.C. (Jiménez, 1959:32), mismo que hace referencia al periodo que comprende la desintegración del sistema teotihuacano y que como consecuencia desembocó en la organización de ciudades militarizadas o fortificadas tales como Cholula, Tula, Cacaxtla – Xochitécatl, Teotenango y Cantona, que tenían como característica principal la edificación de sus ciudades en zonas potencialmente defensivas como cerros o montañas que permitían la visibilidad completa de la zona en donde se localizaban. Tal es el caso de Xochicalco, el cual fue edificado sobre una colina o cerro constituido por tres elevaciones conocidas como el Cerro de la Malinche, el Cerro de Xochicalco y el Cerro de Coatzin o de la Bodega (Piña, 1989:12). Los Xochicalcas regularizaron la topografía del terreno a manera de plataformas en donde el procedimiento, según Kenneth (1988) consistía en cortar la roca madre para posteriormente reforzarlas con grandes

piedras calizas casi sin trabajar. Lo anterior se realizó para formar prácticamente un solo espacio arquitectónico sobre el que se construyeron diversas edificaciones.

En Xochicalco se afianzaron las tradiciones astronómicas de las grandes culturas mesoamericanas. Sus templos, sitios que además de tener una función ritual, eran también considerados como lugares de servicio, se instruía en escritura, lectura y comprensión del calendario. Esta enseñanza abarcaba la observación de los astros, el desciframiento del calendario de acuerdo con sus festividades y ciencias como las matemáticas y la geometría.

Es por esto que, de acuerdo con Piña (1989), Xochicalco es considerado la ruta de los astrónomos. Señalan que el templo de las Serpientes Emplumadas fue construida para conmemorar el ajuste o corrección de los calendarios de varios pueblos (Garza, s/f¹).

2.3 Arquitectura

En Xochicalco se presentó una herencia cultural múltiple y compleja, tal y como lo explica López Luján :

“Sus construcciones son verdaderas amalgamas de las tradiciones de Teotihuacán, Oaxaca, Occidente, el área maya y la costa del Golfo. Sin embargo los estilos, los símbolos, los artefactos de estas civilizaciones no se presentan como en sus lugares de origen, si no que además de acusar derivaciones e incluso serias transformaciones, en Xochicalco son adaptados a contextos distintos y de gran coherencia.” (López, 2001:15)

La característica estilística principal de Xochicalco es el hibridismo, mismo que se refleja en sus artefactos y edificaciones.

La configuración de Xochicalco, de acuerdo con Fernández (1972) se presenta en cinco estratos o plataformas principales. En el nivel inferior toda la población podía ingresar, trasladarse y permanecer, mientras que en el último nivel o el nivel de mayor altura sólo a los gobernantes y sacerdotes se le concedía el acceso. En el estrato inferior se encuentra la Plaza de la estela de los

¹ Garza, et. al. (s/f) *“Xochicalco, la serpiente emplumada y Quetzalcóatl”* Recuperado de [http://www.oocities.org/mx/arqmeso/endosis/ed2/Art_xochicalco.pdf]

Dos Glifos (fig 2.8, inciso 1), espacio donde se presume se daban mensajes o avisos a la población.

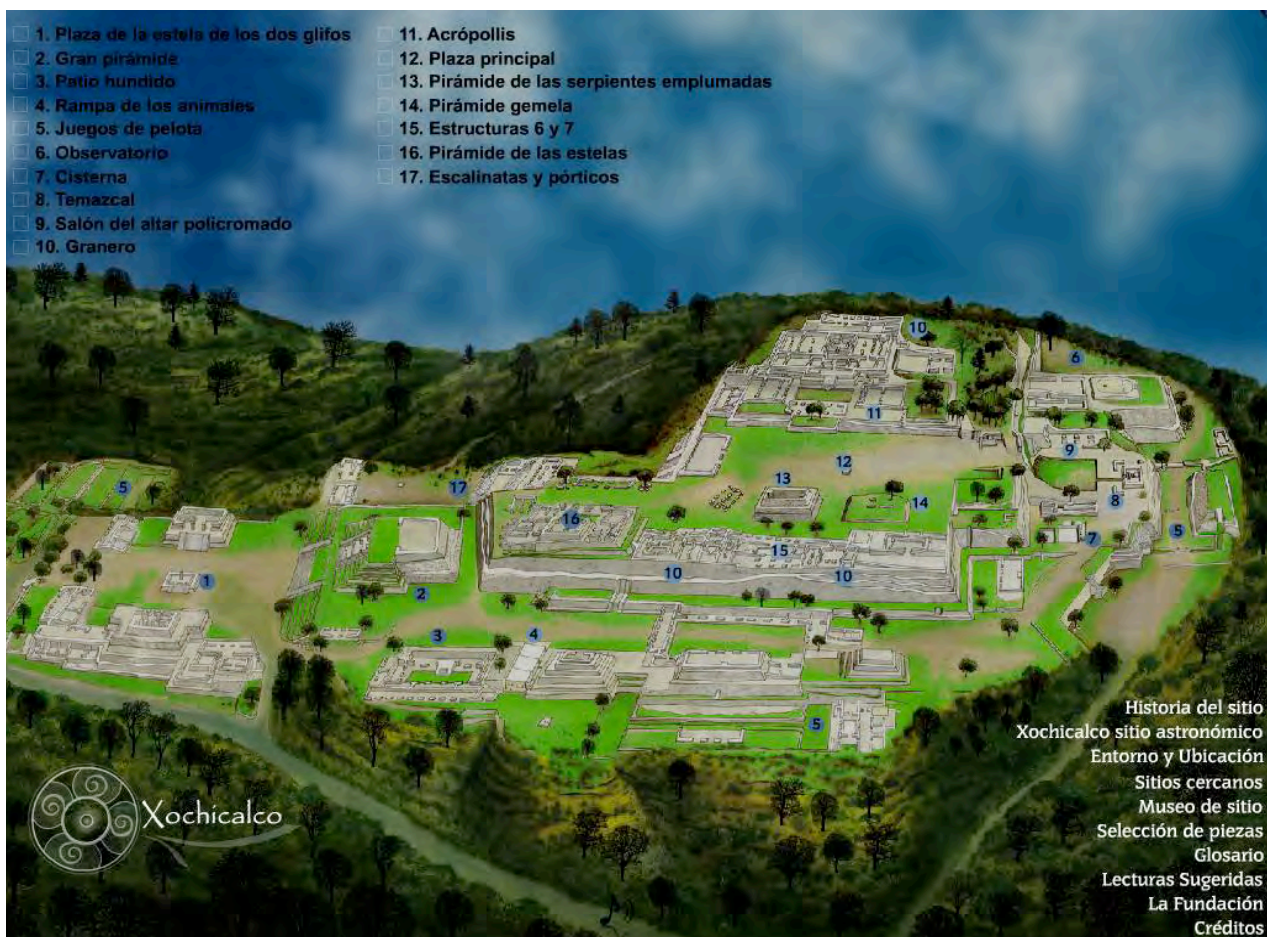


Fig. 2.8 “Mapa de Xochicalco”. Fuente : Cd interactivo, Fundación Cultural Armella Spitalier, 2006.

2.4 La plaza de la Estela de los Dos Glifos

La Plaza de la Estela de los Dos Glifos es un espacio cívico-religioso localizado en la segunda terraza de la Ciudad. Está constituido actualmente de tres edificios reconstruidos y cuatro en estado original.

Desafortunadamente el sitio de Xochicalco fue descubierto y estudiado una vez que la hacienda azucarera de Miacatlán ocupó y destruyó las ruinas para obtener materiales de construcción,

como lo relata Antonio Alzate (a través de Fernández, 1972), quien publicó en 1791 el primer trabajo acerca de Xochicalco en donde muestra diversos esquemas sobre el Templo de las Serpientes Emplumadas así como observaciones del sitio :

“Esta hermosísima arquitectura, que puede compararse a las pirámides de Egipto por su solidez, y en mucha parte por su figura cónica, fue destruida por la avaricia de los dueños o administradores de las haciendas de azúcar.”

(Fernández, 1972:198)

Fue hasta el año de 1962 en que César Sáenz comenzó la primera de seis temporadas de estudio en el sitio, mismas que incluyeron la restauración y reconstrucción de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos. De acuerdo con el Arqueólogo :

“El estado de destrucción de dichos monumentos era muy grande, debido a que en la mayoría de las construcciones de Xochicalco no se usó mezcla a base de cal, como en las zonas mayas, sino que las piedras de pequeño tamaño y forma rectangular o cuadrada sin ángulos y con una especie de pequeña espiga, están cimentadas sobre una amalgama de barro recubierta con una capa general de estuco (mezcla de cal y arena fina)” (Sáenz, 1978:468)

La Plaza de la Estela de los Dos Glifos (fig. 2.9) se localiza en la primer terraza o nivel de la Ciudad de Xochicalco y está constituida por distintas edificaciones. Al norte se localiza la Gran Pirámide, que es la estructura de mayor volumen de la Ciudad. Consta de dos niveles; El inferior, con tres cuerpos escalonados y el superior, de cuatro. Al centro de ambos cuerpos se localizan dos grandes escalinatas con alfardas y en la parte superior se aprecian los restos de una edificación más antigua. En la parte más alta permanecen los vestigios de lo que fue el gran templo.

Al oriente se encuentra un templo que presenta (González, 1994) una forma poco común ya que la mitad de la planta frontal es más ancha que la parte posterior; en la parte superior del basamento, existe un templo con dos cuartos sucesivos y seis pilares que sustentaban el techo. De igual manera se encuentran los vestigios de un área habitacional. Al poniente, en frente de la Estructura Este, se encuentra la estructura Oeste. El edificio posee un basamento de planta cuadrada y su templo también tiene dos aposentos. Al Sur se localizan los restos de dos conjuntos

habitacionales individuales y al centro se localiza la Estela de los Dos Glifos, misma que da el nombre a la Plaza.



Fig. 2.9 "Plaza de la Estela de los Dos Glifos". Fuente: <http://www.eluniversal.com.mx/notas/856940.html>. Consultado en 2014.

En dicha estela, hay dos glifos grabados en bajorrelieve, (González, 1994:41) que corresponden a 10 cañas (ácatl) y 9 "ojo de reptil", que deben corresponder a alguna fecha significativa del pueblo Xochicalca².

Debido a que la Plaza se encuentra al final de la escalinata de acceso, Kenneth (1988:57) deduce que este espacio era accesible a toda la población y de acuerdo con, de la Fuente :

² *"También aparece dentro de las ondulaciones del ofidio la fecha 9 "ojo de reptil", que hace poco ha sido identificada por Caso, como posible signo de "viento". Es muy probable que estos motivos de la pirámide estén íntimamente relacionados con Quetzalcóatl. Caso, cree que la figura humana, debido a la clase de tocado que lleva, puede representar a dicho personaje y que lo que antes había considerado como "ojo de reptil", es el signo del viento, por lo que tendríamos 9" ehécatl" (viento), que es la fecha de nacimiento de Quetzalcóatl, lo que nos indicaría influencia tolteca".* (Sáenz, 1965:77)

“Es considerada esta plaza donde se llevaban a cabo las ceremonias de tipo religioso a las que acudían todas las personas que incluso no vivían en la Ciudad de Xochicalco. Lo que nos hace pensar que esta plaza tenía un carácter religioso, es el hecho de que en ella está ubicada la pirámide más grande de la ciudad - Gran Pirámide”.

(de la Fuente, 1995 :114)

Algunos hechos que reflejan la importancia cívico – religiosa de este sitio, son los artefactos encontrados durante las excavaciones en la Estructura Este en donde se encontraron vasijas con la efigie del Dios de la lluvia "Tláloc". Estos descubrimientos fueron realizados por César Sáenz donde, en el informe de 1963 “Últimos descubrimientos en Xochicalco”, Sáenz reporta:

“En la exploración del templo, encontramos dentro del escombro tres vasijas antropomorfas, en el barro burdo, con la representación hecha por pastillaje del Dios Tláloc. Descubrimos además en la exploración del templo y dentro del escombro una cabeza y pata de tigre, en barro, pintado de rojo, lo que formó parte de una vasija zoomorfa; un fragmento de una figura antropomorfa en piedra gris y un brasero de barro, muy fragmentado, con motivos hechos por la técnica del pastillaje. Al eje de la plataforma superior, de Este a Oeste, en el centro del edificio, practicamos una cala rompiendo el piso de estudio con un ancho aproximado de dos metros, la que iniciamos hacia el fondo junto al muro que delimita el santuario. Encontramos cerca del mismo, a poca profundidad, debajo del piso de estuco, una caja de piedra rectangular conteniendo varias ofrendas. Los cuatro lados de la caja, el fondo y la tapa, estaban formados por losas de piedra bien cortadas. Dichas ofrendas consisten en dos placas de piedra superpuestas, conteniendo cada una de ellas en la superficie una capa de óxido de hierro (limonita). Las placas son de forma rectangular y servían de base a 4 caracoles, 1 concha, 9 valvas de molusco, un caracol (trompeta) fragmentado y cuentas de concha que al desintegrarse el hilo que la unía quedaron "in situ" en forma de collar”.

(Sáenz, 1963: 11)

Lo anterior indica que al igual que Teotihuacán, en Xochicalco se celebraba el culto a Tláloc, deidad de los mantenimientos, el agua de la cavernas, de la vegetación y de los animales. (Garza, s/f)³, lo cual es importante debido a que uno de los artefactos más significativos del culto a ésta deidad eran los caracoles, por lo que seguramente una fuente sonora musical era el sonido de los caracoles trompeta.

³ Garza, et. al. (s/f) “Xochicalco, la serpiente emplumada y Quetzalcóatl” Recuperado de [http://www.oocities.org/mx/arqmeso/endosis/ed2/Art_xochicalco.pdf]

Aunado a lo anterior, la importancia de esta Plaza radica en dos hechos, el primero es que las estructuras Oriente y Poniente ubicadas en la Plaza, que de acuerdo a Sáenz (1967) pudieron servir como casas sacerdotales, son un magnífico ejemplo de los elevados conocimientos astronómicos de los xochicalcas debido a que ambas edificaciones (Morante, 1993) presentan su eje central justo al centro del monumento de la estela y las esquinas de ambas estructuras apuntan hacia los puntos solsticiales. (fig. 2.10) En los equinoccios los marcadores se consideran los cerros contiguos a la Ciudad.

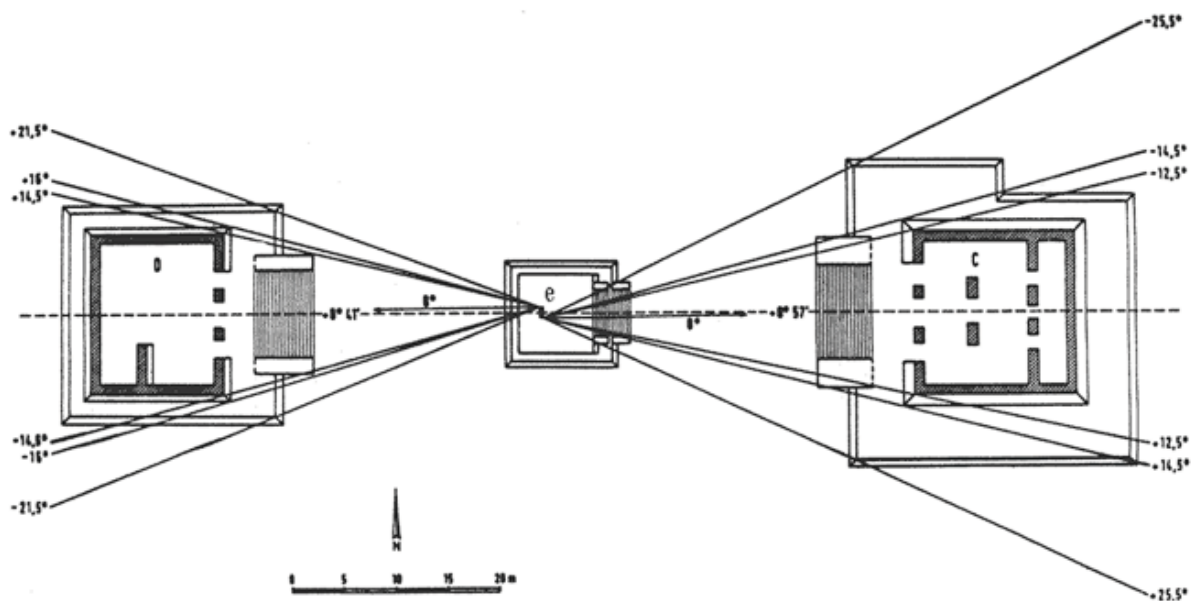


Fig. 2.10 “Proyección de los ejes de solsticio de invierno y verano estudiados por Morante (1993)” Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/04/html/sec_7.html, Consultado en 2014.

El segundo, es que, al igual que la Acrópolis, este espacio poseía gran significación religiosa. Esto se justifica a través de los artefactos hallados en ambos espacios. En el libro “El enigma de Xochicalco” escrito en 1978 por César Sáenz el autor realiza la siguiente observación:

“Hay un parecido muy grande entre la Pirámide de la Serpientes Emplumadas y la estructura C (Plaza de la Estela de los dos glifos), no sólo en su arquitectura, semejante a la del Tajín, Veracruz, y a la de Toluquilla, del estado de Querétaro, si no también, y principalmente, en las ofrendas depositadas en el núcleo de ambas. Así, por ejemplo, las placas de piedra con una capa de limonita se hallan en ambos monumentos, tanto en ofrendas aisladas como asociadas a las entierros. En lo referente a la cerámica hay semejanza y contemporaneidad. En la pirámide se encontraron platos de barro semejantes a los hallados en la Estructura “C”. En lo que más se asemejan las ofrendas de uno y otro monumento es en los

pendientes de jade con representaciones de personajes con tocado en forma de fauces de serpiente, en dos placas de la Estructura "C" y en la del Entierro 1 de la pirámide, cuyos personajes tienen las manos levantadas y colocadas sobre el pecho. Además tanto en la estructura "C" como en la pirámide aparece una que tiene en el extremo de la parte superior del tocado cabezas de perfil a uno y a otro lado del mismo" (Sáenz, 1978: 468)

Debido a que la Acrópolis era el espacio de mayor importancia religiosa en Xochicalco, se puede deducir que la Plaza de la Estela de los Dos Glifos, a la cual toda la población tenía acceso, es un sitio en donde se comunicaban diversos mensajes orales y musicales a través de ceremonias asociadas a Tláloc.

La ceremonia que posiblemente se desarrollaba corresponde a la del "Fuego Nuevo", misma que se presume que se llevó a cabo en Xochicalco debido al hallazgo de una piedra (fig. 2.11 y 2.12) que representa, por medio de un tallado, el símbolo del fuego nuevo.



Fig. 2.11 "Pequeña roca de 1.10 x 1.15 x 0.9 mts, en cuya parte superior lisa aparecen esculpidos los trascendentales símbolos del Primer Fuego Nuevo y la fecha en que se celebró. Xochicalco". Fuente: Sáenz, C. "El fuego nuevo", 1967:17.

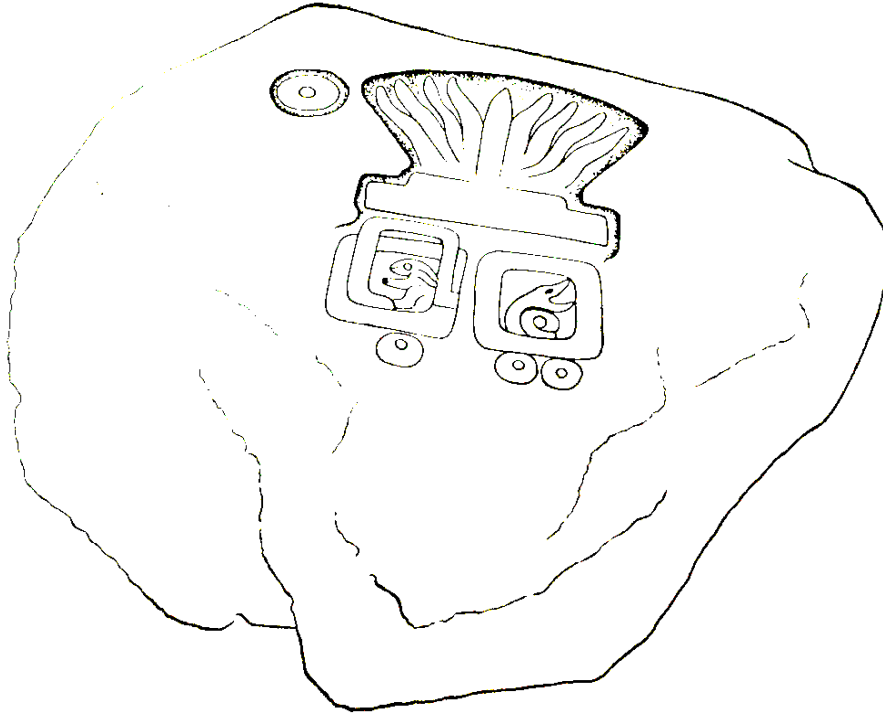


Fig. 2.12 "Dibujo de la piedra del primer Fuego Nuevo hallada en Xochicalco". Fuente: Dibujo calcado por Abel Mendoza H. en el libro de Sáenz, C. "El fuego nuevo", 1967:12.

Las principales fuentes que relatan estos ritos entre los aztecas son el Códice Borbónico (fig. 2.13) y Fray Bernardino de Sahagún (1938) en donde relata que la conmemoración se presentaba cada 52 años por medio de una gran fiesta que se llamaba "toxiuh molpilia" (atadura de los años o átense nuestros años), misma que coincidía con el "xiuhtzitzquilo" que quiere decir se comienza el año nuevo. Los habitantes arrojaban al agua, acequias o lagunas a los ídolos de madera o piedra, así como sus objetos.

En Tenochtitlan se realizaba un sacrificio humano, generalmente un prisionero de guerra, sobre el cual colocaban un madero seco para producir fuego y después arrojaban las entrañas y el corazón del prisionero al fuego.

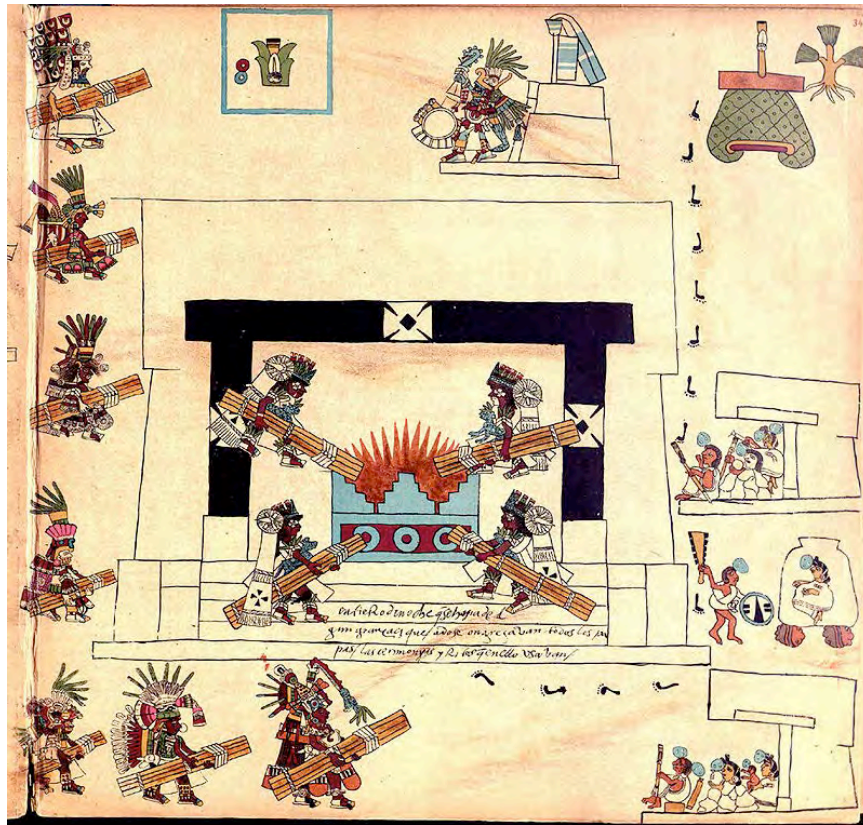


Fig. 2.13 "Ceremonia del Fuego Nuevo". Fuente: Códice Borbónico, lámina XXXIV, 1562.

De acuerdo con Sáenz (1967), se presume que la ceremonia del Fuego Nuevo se instituyó por primera vez en Xochicalco en una especie de concurrencia de varios pueblos en la Acrópolis, debido a los grabados de la Pirámide de las Serpientes Emplumadas, sin embargo en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos, es posible que se realizaran ceremonias en donde el sacerdote se localizaba en el primer descanso de la Gran Pirámide⁴.

Como conclusión, los aspectos anteriormente mencionados arrojan evidencia de la importancia de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos, así como la denominación de este espacio como "ritual ceremonial". De igual manera se muestran los posibles instrumentos utilizados en éste espacio para realizar algún tipo de ceremonia (caracoles) así como la evidencia del tipo de los materiales (estuco y piedra).

⁴ Comunicación escrita de la Arqueóloga Silvia Garza Tarazona.

Capítulo 3 Acústica arquitectónica y urbanística

3.1 La acústica y el sonido

Etimológicamente, la palabra acústica proviene del griego Ακουστικός, formada del verbo Ακουειν (akoúein, oír) y el sufijo τικός (-tico, relativo a), "Relativo a la acción de oír", sin embargo en el sentido práctico, la acústica es la rama de la física (Beléndez, 1992:18) que estudia los métodos de propagación de las ondas mecánicas.

Existen diversas ramas en la Acústica; incluyendo la aeroacústica, que estudia la generación del sonido debido al movimiento a grandes velocidades del aire; la acústica física, que analiza los fenómenos sonoros mediante ciencias exactas; la psicoacústica, que estudia la percepción del sonido en los humanos; la bioacústica, que estudia la audición animal; la acústica subacuática, que tiene como principal aplicación la detección de objetos sumergidos; la acústica musical, que estudia la producción del sonido en instrumentos musicales; la electroacústica, que estudia el tratamiento electrónico del sonido; la acústica fisiológica, que estudia el funcionamiento del aparato auditivo u oído; la acústica fonética, que estudia el análisis de las características acústicas del habla y sus aplicaciones; la macroacústica, que estudia los sonidos intensos y dos ramas que se abordarán extensamente en el presente trabajo; la arqueoacústica y la acústica arquitectónica.

La acústica arquitectónica es la rama de la física que se encarga del estudio del fenómeno de la propagación del sonido en espacios, tanto abiertos como cerrados para diversas actividades que incluye el estudio de la geometría de una edificación, así como de los materiales que la componen para lograr el confort acústico de los usuarios.

De acuerdo con Rodríguez (2001) éste último se refiere al estado de bienestar físico y mental que los usuarios experimentan en un lugar o ambiente determinado a través de la percepción auditiva. El concepto de confort auditivo integra diversas variables que influyen para la generación del

mismo, entre las cuales destacan el ambiente, la actividad, el tipo de espacio ya sea ésta abierto o cerrado y la tolerancia del usuario a los diversos componentes del sonido.

Según Carrión (2001), el sonido es una vibración mecánica capaz de producir una sensación auditiva propiciada por el desplazamiento de las ondas a través de un material elástico y denso, sin embargo para que un sonido "exista" es necesaria la presencia de; una fuente sonora, aquella que transmite la vibración; el medio transmisor, el más común es el aire, sin embargo las ondas mecánicas también se desplazan en los líquidos y los sólidos; y el receptor del sonido, el natural es el oído y el artificial el micrófono.

La producción del fenómeno del sonido se presenta cuando una fuente sonora emite energía y ésta es transmitida por medio de vibraciones al medio. El aire, por ejemplo, posee cierta elasticidad, por lo que las moléculas que se encuentran suspendidas vibran y transmiten esa vibración a las moléculas cercanas, generando un cambio en la posición de equilibrio hasta que un receptor percibe el aumento o disminución de la presión por consecuencia del desplazamiento de la onda mecánica.

Un sonido posee propiedades y características físicas entre las cuales destacan; la frecuencia, la velocidad del sonido, la longitud de onda y la amplitud de onda. De acuerdo con Recuero (1999);

Frecuencia: La frecuencia de un fenómeno periódico es el número de veces que un fenómeno se repite por unidad de tiempo, generalmente en segundos. Su unidad es el hertzio (Hz) y se determina por la siguiente expresión (Fór. 1):

$$f = 1 / t \dots ec. 1$$

Donde:

f = Frecuencia (ciclos por segundo o Hz)

t = Periodo de tiempo (segundos)

Periodo: Es el tiempo que necesita una onda mecánica para realizar una oscilación completa. Su unidad es el segundo (Fór. 2)

$$t = 1 / f \dots ec. 2$$

Donde:

f = Frecuencia (ciclos por segundo o Hz)

t = Periodo de tiempo (segundos)

Velocidad del sonido: Es la velocidad a la que las moléculas se transportan por un medio y depende de las características mecánicas del medio portador. La velocidad del sonido es mayor en los sólidos que en los líquidos y mayor en los líquidos que en los gases. En el caso de los gases, la velocidad de la temperatura depende de la temperatura y su expresión es la siguiente (Fór. 3):

$$C = 331 + 0.6 \Delta T \dots ec. 3$$

Donde:

C = Velocidad del sonido (m/s)

331 m/s = Velocidad a 0 °C

ΔT = Incremento o descenso de la temperatura (°C)

Longitud de onda : Es la distancia perpendicular que existe entre partículas que vibran de la misma manera o que tienen la misma fase (Labrada, 1995:22) y se expresa con relación a la velocidad de propagación de la siguiente forma (Fór. 4):

$$\lambda = C / f \dots ec. 4$$

En donde:

λ = Longitud de onda (metros)

C = Velocidad de propagación de la onda sonora (m/s)

F = Frecuencia de la oscilación (Hz)

Amplitud de onda : Es el valor de desplazamiento de máximo a mínimo en la oscilación de una onda sonora (fig. 3.1).

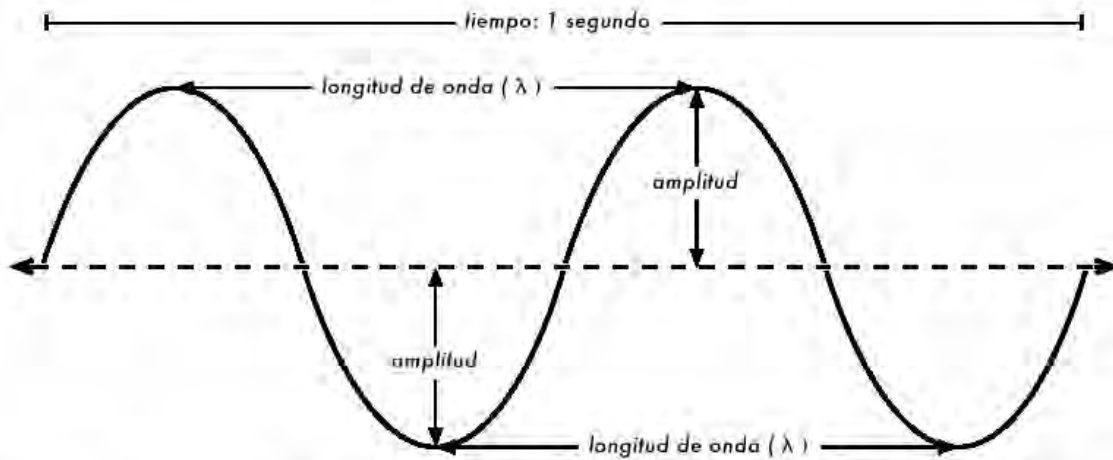


Figura 3.1 "Concepto gráfico de longitud de onda". Fuente: <https://martinmoreton.wordpress.com/2011/12/19/teoria-y-calculo-de-antenas-parte-1/>, 2015.

Aunado a lo anterior, existen conceptos que se utilizan para conocer el comportamiento de un sonido. En acústica arquitectónica los más importantes son : **la presión acústica o sonora** ; que es la oscilación de las partículas sonoras en el espacio. Es decir, cuando la energía se transmite, la trayectoria de la vibración sonora produce zonas de alta y baja presión. A este cambio se le denomina presión sonora y se superpone a la presión atmosférica del aire con un valor directamente proporcional a la energía de la vibración de la fuente. A mayor variación de presión acústica, mayor intensidad del sonido obtenido ; e **intensidad acústica**, que se puede definir como el valor promedio de la energía de una onda sonora en una unidad de área perpendicular a la dirección de propagación por unidad de tiempo (fig. 3.2).

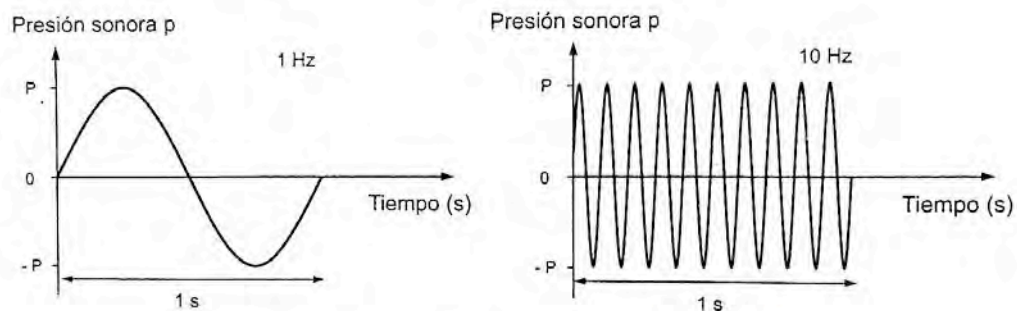


Figura 3.2 "Ejemplos de oscilaciones de frecuencias 1 y 10 Hz". Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos". Carrión, A. 2001 pp. 29.

Cuando una fuente puntual o fija emite un mensaje, el sonido presenta un decremento en su nivel sonoro en función de su distancia, es decir, a mayor distancia recorrida, menor intensidad. La disminución del nivel de presión sonora es de 6 dB al doblarse la distancia (Sancho, 2008:45).

3.2 El sonido en los espacios arquitectónicos y urbanos

3.2.1 Acústica Arquitectónica

De acuerdo con Saad (2011:18) la transmisión del sonido puede ser dividida en dos grupos; el aéreo, en donde el sonido es transmitido de forma directa, es decir, que la fluctuación de la presión del aire en diversas direcciones es perceptible sin que la onda haya coincidido con una superficie y genere una reflexión. A este grupo pertenece el sonido directo, entendido como la fluctuación de la presión del aire en diversas direcciones perceptible sin que la onda haya coincidido con una superficie; y la segunda se clasifica como generación de sonido de impacto. Ésta se presenta cuando las ondas mecánicas que conforman al sonido impactan con una superficie de cualquier material. Dichos fenómenos son la reflexión del sonido, que es la propagación del sonido cuando coincide con una superficie lisa y la energía es enviada en diversas direcciones siempre reduciendo su magnitud, también sucede cuando la longitud de onda es más grande o mucho más pequeña que el objeto contra el cual impacta; la absorción del sonido, que se presenta cuando parte de la energía es captada por el material con el que coincide; la transmisión del sonido, que se presenta cuando la energía "recorre" al material; el sonido disipado en la estructura, que es la energía irradiada por medio de los diversos elementos de la estructura hacia el interior y exterior de la edificación; el sonido conducido por la estructura, que es la energía que se transmite a través de los elementos que conforman el sistema constructivo del recinto y por último a difusión, que ocurre cuando el sonido incide sobre una superficie con quiebres o irregularidades lo que permite que el sonido se distribuya en diversas direcciones (fig. 3.3).

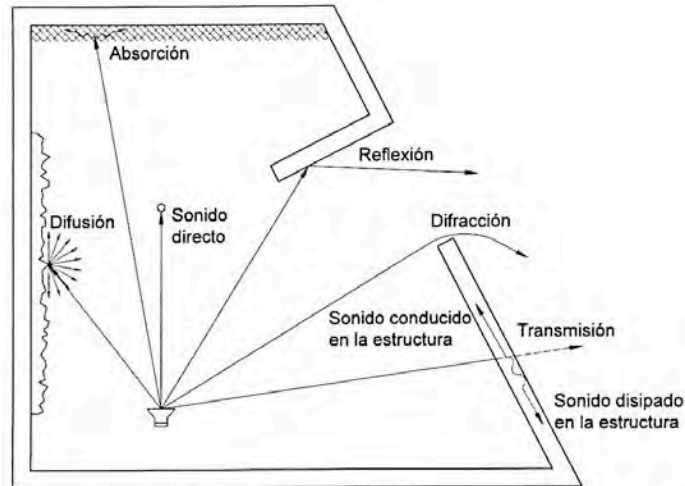


Figura 3.3 "Comportamiento del sonido en el espacio arquitectónico".
Rodríguez (2014:55) dibujo de Elisa Garay.

De igual manera, existen diversos conceptos que permiten conocer la forma en que se comporta el sonido en un espacio, entre ellos la distribución sonora, el campo acústico, el nivel de presión sonora, la percepción del sonido en función de la frecuencia y el decaimiento del sonido.

Como se ha mencionado, el sonido se propaga a través del espacio generando reflexiones al impactar contra las diversas superficies de un recinto que generan diversos fenómenos (Carrión, 2001). El análisis de la distribución sonora permite conocer el comportamiento del sonido de acuerdo a su geometría y características físicas. Es posible entonces, conocer el grado de "uniformidad" del campo acústico una vez determinadas las zonas de máxima y mínima concentración y esto es posible evaluarlo a través del parámetro de nivel de presión sonora.

El nivel de presión sonora (NPS o SPL) es la forma en que se representa la intensidad de los sonidos. Su unidad es el N/m^2 , Pa o dB.

Debido a que nuestro sistema auditivo no responde linealmente a los estímulos, se utiliza la escala logarítmica para representar la presión sonora, de tal manera que la unidad utilizada es el dB. Esta unidad reduce la cantidad de presiones sonoras (ya que la gama de presiones audibles varía de 1 a 5,000,000) de 0 a 135 dB donde 0 representa una presión igual al umbral de audición y 135 dB al umbral aproximado de dolor.

De acuerdo con Carrión (2001) para los humanos existen las siguientes relaciones entre cambios de nivel sonoro y su efecto subjetivo:

1 dB : mínimo cambio de nivel sonoro perceptible

5 dB : cambio de nivel claramente percibido

10 dB : incremento asociado a una sonoridad doble

A continuación se muestran los niveles de presión sonora que corresponden a actividades típicas o comunes (tabla 3.1)

FUENTE SONORA	NIVEL DE PRESIÓN SONORA SPL (dB)	VALORACIÓN SUBJETIVA DEL NIVEL
Despegue avión (a 60 m)	120	Muy elevado
Edificio en construcción	110	
Martillo neumático	100	Elevado
Camión pesado (a 15 m)	90	
Calle (ciudad)	80	
Interior automóvil	70	Moderado
Conversación normal (a 1 m)	60	
Oficina, aula	50	
Sala de estar	40	Bajo
Dormitorio (noche)	30	
Estudio de radiodifusión	20	

Tabla 3.1 “Niveles de presión sonora correspondientes a actividades comunes”. Carrión (2001:35)

La banda de frecuencias audibles para una persona se encuentra entre 20 Hz (sonidos más graves) y 20,000 Hz o 20 kHz (sonidos agudos).

Sin embargo el oído humano no presenta la misma sensibilidad para todo este margen de frecuencias (fig. 3.4).

Es posible obtener de la gráfica la siguiente información :

~ Para niveles bajos de presión sonora, el oído es muy insensible a bajas frecuencias, es decir, el nivel de presión sonora de un sonido grave tiene que ser mucho más elevado que el correspondiente a un sonido de frecuencias medias para que ambos produzcan la misma sonoridad. Por ejemplo, un nivel NPS = 70 dB, a 20 Hz, produce la misma sonoridad que un nivel SPL= 5dB, a 1 kHz (sonoridad= sensación subjetiva de nivel sonoro).

- Para dichos niveles bajos, el oído también presenta una cierta atenuación a altas frecuencias.

- A medida que los niveles aumentan, el oído tiende a responder de forma más homogénea en toda la banda de frecuencias audibles, hasta el punto de que cuando son muy elevados, la sonoridad asociada a tonos puros de diferente frecuencia muy parecida.” (Carrión, 2001:37)

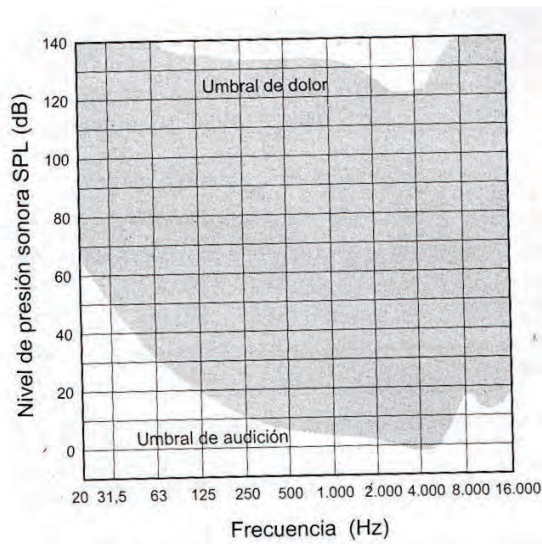


Figura 3.4 “Niveles audibles en función de la frecuencia” Fuente: “Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Carrión, A. , 2001, pp. 36.

En la siguiente gráfica (fig. 3.5) se muestran los decibelios o nivel de presión sonora percibida por un oyente a través del lenguaje y la música en función de las diferentes frecuencias.

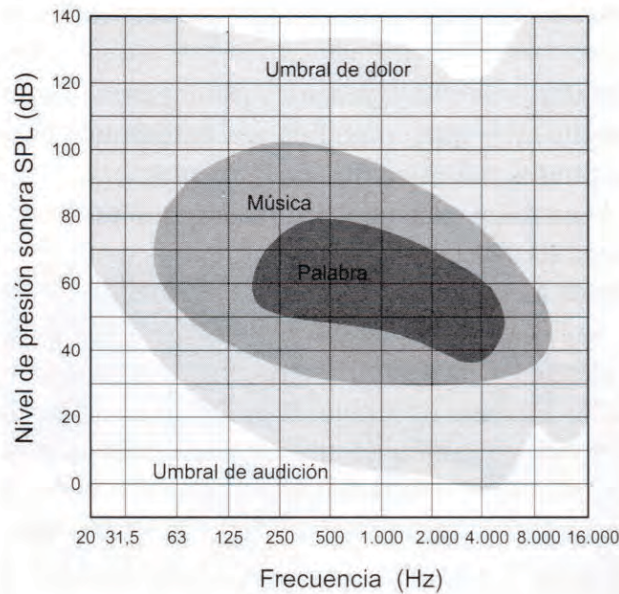


Figura 3.5 “Niveles audibles en función de la frecuencia junto con las zonas correspondientes a la música y la palabra”. Fuente: “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” Carrión, A. , 2001, pp. 37.

De acuerdo a la gráfica, es posible inferir que la capacidad de la persona como receptora del sonido es mucho mayor que como emisora.

La forma en la que se mide el NPS por medio de un instrumento es el sonómetro (fig. 3.6) , que es un equipo que permite cuantificar objetivamente el nivel de presión sonora. Se compone de un elemento sensor primario (micrófono), así como un elemento de presentación o unidad de lectura y circuitos de conversión, manipulación y transmisión de variables (módulo de procesamiento electrónico).

La unidad de procesamiento permite realizar medidas globales, o bien por bandas de frecuencias, con diferentes respuestas temporales (Fast, Slow, Impulse, Peak).

Se consideran dos tipos de ponderaciones :

-Ponderaciones de frecuencia : A, B, C, D, U.

- Ponderaciones de tiempo : S (slow), F (Fast), I (Impulsive) y Peak (Pico).

Debido a la sensibilidad que el oído humano presenta en diferentes frecuencias, se emplean diversas redes de ponderación de acuerdo al fin esperado.

Ponderaciones de frecuencia :

1. A : Es la red de ponderación más comúnmente empleada para la valoración del daño auditivo e inteligibilidad de la palabra.
2. B : Modela la respuesta del oído humano a intensidades medias.
3. C : Utilizada para sonidos de gran intensidad. Actualmente se utiliza para evaluar ruidos en una comunidad, así como en la evaluación de sonidos de baja frecuencia en la banda de frecuencias audibles.
4. D : Se utiliza para analizar el ruido provocado por aviones.
5. U : Utilizada para la medición de sonidos audibles en presencia de ultrasonidos.

Ponderaciones de tiempo :

1. S : El instrumento responde lentamente ante los eventos sonoros. El tiempo efectivo es de aproximadamente 1 s.
2. F : La constante de tiempo es de aproximadamente 0.125 s. y por lo tanto, puede reflejar fluctuaciones poco sensibles a la ponderación S.
3. I : Presenta una constante de tiempo muy pequeña y es generalmente utilizada para conocer la intensidad de sonidos de corta duración.
4. Peak : Es posible cuantificar los niveles "picos de presión" sonora de muy corta duración (50 microsegundos). Permite conocer si posiblemente existiría daño auditivo ante impulsos.

Existen sonómetros que incorporan un conjunto de filtros eléctricos para permitir sólo el paso de frecuencias determinadas. Generalmente se trabaja con bandas de 1 octava que incluye todas las frecuencias comprendidas entre una frecuencia determinada y la frecuencia doble. Dicha denominación, según Carrión (2001) tiene su origen en el lenguaje musical. A continuación se exponen las frecuencias centrales de tales bandas, según prescribe la norma ISO 266.

FRECUENCIAS CENTRALES DE LAS BANDAS DE OCTAVA ESTANDARIZADAS (ISO 266)										
16	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000

Tabla 3.2 "Frecuencias centrales de las bandas de octava estandarizadas según la norma ISO 266, en Hz" Fuente: "Diseño acústico de espacios arquitectónicos" Carrión, A. , 2001, pp. 41.

Las 6 bandas de octava cuyas frecuencias centrales están comprendidas entre 125 Hz y 4000 Hz se utilizan generalmente en la evaluación acústica de recintos (tabla 3.2).



Figura 3.6 "Sonómetro NOR140. Fuente: http://www.norsonic.com/en/products/sound_level_meters/sound_analyser_nor140/Sound+Analyser+Nor140+-+%22MULTI-TOOL%22.9UFRjQYk.ips, 2014.

Otro factor importante es el decaimiento del sonido en donde al propagarse a partir de una fuente lineal, el nivel del sonido decrece 3 dB al doblarse la distancia, sin embargo en forma esférica pierde intensidad a razón de 6 dB cada vez que se dobla la distancia de la fuente.

El decaimiento del sonido a partir de una fuente puntual se calcula con la siguiente fórmula (Fór. 5) :

$$DS = IS - (\text{Log}^2 (D) \times \text{Dec}) \dots ec. 5$$

Donde :

DS = Decaimiento del sonido (dB)

IS = Intensidad sonora (dB)

D = Distancia de la fuente al punto en el recorrido (m)

Dec = Decremento (6dB, constante)

Para comprender el fenómeno que se presenta cuando se emite un sonido a través de una fuente es importante explicar la forma de propagación del sonido. Las ondas sonoras pueden llegar a un receptor por medio de sonido directo y reflejado. El sonido reflejado se compone de dos tipos: todas aquellas reflexiones que viajan inmediatamente después del sonido directo denominadas reflexiones tempranas y las reflexiones tardías, aquellas que constituyen la "cola reverberante".

Las reflexiones tempranas no exceden los 100 ms desde la llegada del sonido directo y no exceden el orden de tres, es decir, inciden tres veces sobre cualquier superficie. Las reflexiones tardías, lógicamente exceden los 100 ms.

La manera más habitual de representar las reflexiones son los ecogramas (fig. 3.7), que es una gráfica que representa en el eje vertical el nivel de presión sonora y en horizontal el tiempo. Lo que muestra es el tipo de decaimiento que presenta el nivel energético.

La propagación del sonido depende igualmente de la configuración arquitectónica.

Lo que determina la calidad acústica, "característica que define el grado acústico adecuado de un espacio para una actividad específica" (Rodríguez, 2002:197) es la geometría, dimensiones y proporciones, así como los materiales empleados. Una adecuada combinación de estos elementos

favorecen las reflexiones tempranas, sin embargo, aunado a lo anterior, existen dos fenómenos importantes en el desempeño acústico; la reverberación y la absorción.

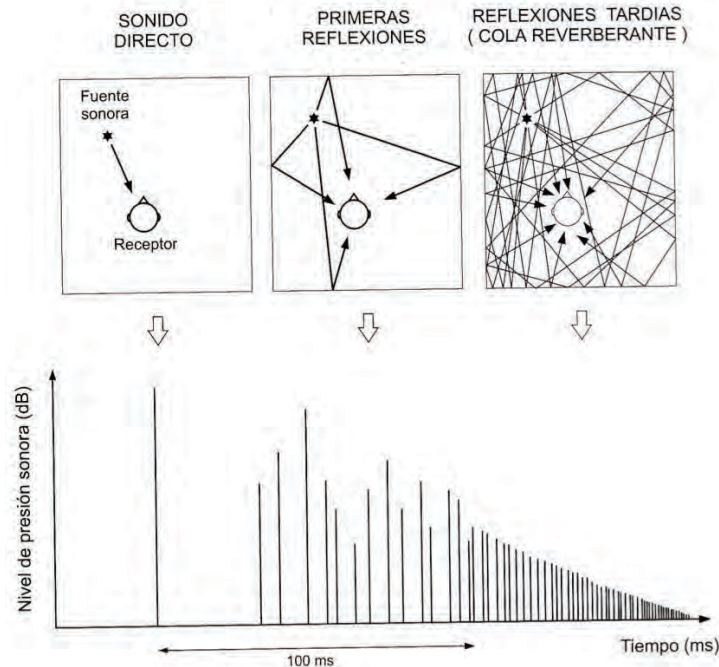


Figura 3.7 “Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante”. Carrión 2001:50

3.2.2 Fenómenos acústicos

Existen fenómenos acústicos que representan indicadores importantes para la evaluación acústica; la reverberación, absorción, difracción, difusión y resonancia.

En el tema de la absorción, que es la transformación de energía sonora en calor, existen dos fenómenos. El primero es la absorción del sonido por efecto del medio de propagación (aire, fluido o sólido) y el segundo la absorción del sonido producida por la incidencia del rayo sonoro sobre una superficie.

El grado de absorción del sonido de un material se representa mediante el coeficiente de absorción (α) la cual se define como la relación entre la energía absorbida por dicho material y la energía incidente sobre el mismo.

$$\alpha = \text{Energía absorbida} / \text{Energía incidente}$$

Donde :

α = Coeficiente de absorción

Los valores del coeficiente se sitúan teóricamente en cero cuando un material es completamente reflejante y uno cuando es totalmente absorbente. Este valor cambia dependiendo de la frecuencia del rayo sonoro incidente.

Para que exista un adecuado comportamiento acústico en un espacio, tanto la geometría como los materiales son fundamentales.

Para conocer la absorción de los materiales se puede utilizar la siguiente expresión (Fór. 6) :

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n \dots ec. 6$$

Donde :

A= Absorción

La unidad es el Sabin (Absorción de 1 m de ventana abierta), para realizar la operación se deben de sumar todas las absorciones individuales.

Una vez calculada la absorción (A) es posible calcular el coeficiente medio (α) de absorción a través de la siguiente expresión (Fór. 7):

$$\alpha = A / S \dots ec. 7$$

Donde la suma de superficies (Fór. 8:

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_N \text{ (Suma de superficies) } \dots ec. 8$$

Con objetos o personas (Fór. 9):

$$\overset{m}{\overset{A}{\hat{A}}} = a_1 n_1 + a_2 n_2 + \dots + a_n n_n = \sum_{j=1}^m a_j n_j \dots ec. 9$$

Donde :

a_i = absorción equivalente a cada unidad (objeto o persona)

n_i = número de unidades

Finalmente, la absorción de los sólidos total será (Fór. 10):

$$A_{\text{total}} = A + \bar{A} \dots ec. 10$$

Para los materiales, existe el coeficiente de reducción acústica NRC, el cual indica su grado de absorción.

El NRC (Carrión, 2001:72) de un material se calcula generalmente con la media aritmética de las frecuencias de 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz y 2kHz.

El grado de absorción de un material depende de su espesor (a mayor espesor, mayor absorción), de su porosidad (más porosidad, más absorción) y su densidad (menor densidad, menor absorción).

Otros factores importantes a considerar son las distancias a las que se encuentran los materiales, es decir, la configuración arquitectónica.

Por otra parte, de acuerdo con Rodríguez (2014) parte la reverberación es un fenómeno temporal de persistencia del sonido después que la emisión de una fuente ha sido interrumpida. Por lo tanto el tiempo de reverberación, que varía con la frecuencia, es el tiempo en que un sonido decae 60 dB con respecto a su intensidad inicial desde que la el sonido de la fuente ha cesado.

La fórmula para calcular el tiempo de reverberación es la siguiente (Fór. 11):

$$T_r = 0,161 \cdot V / A \cdot a \dots ec. 11$$

Donde :

T_r = Tiempo de reverberación

V = volumen del recinto

A = superficie del recinto

a = absorción total del sonido

El tiempo de reverberación óptimo recomendado se presenta a través de la siguiente gráfica (fig. 3.8), misma que relaciona tiempo en el eje y y volumen en el eje x .

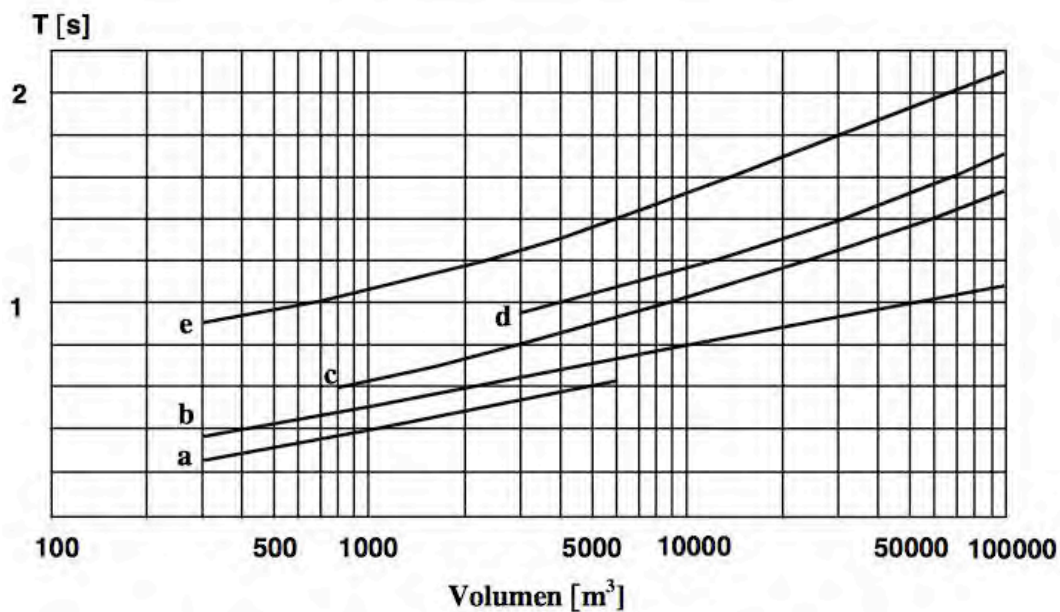


Figura 4.2. Tiempo de reverberación óptimo en función del volumen de una sala (según L. L. Beranek). (a) Estudios de radiodifusión para voz. (b) Salas de conferencias. (c) Estudios de radiodifusión para música. (d) Salas de conciertos. (e) Iglesias.

Figura 3.8 “Gráfica de tiempo de reverberación óptimo para diversas actividades”. Fuente: <http://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza/acustica/apuntes/cap04.pdf>, 2014.

De manera que,

"La reverberación es directamente proporcional al volumen del espacio e inversamente proporcional a la absorción presente en el espacio y que se manifiesta en los materiales y elementos incluidos; de ésta forma, a mayor volumen espacial, habrá mayor T , y a mayor presencia de los materiales y elementos absorbentes habrá menor T ." (Rodríguez, 2014:57)

Un recinto con un T_r grande, se conoce comúnmente como "vivo", mientras que si es pequeño se conoce como "apagado o sordo".

Existen dos tipos de T_r que se consideran en las normas; el T_{20} y T_{30} . Se recomiendan para la extrapolación de datos. El T_{20} es el tiempo que decrece en nivel de presión sonora en una frecuencia de -5 a 25 dB y el T_{30} , el que decrece de -5 a 35 dB (fig. 3.9).

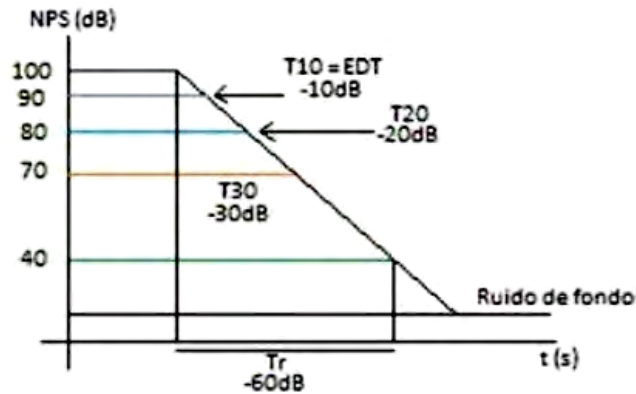


Figura 3.9 "t20 y t30" Fuente:

<http://www.ingenieriaacustica.com/ingenieria-acustica-5-parametros-acusticos/>, 2015.

Por otra parte se encuentra la difracción, fenómeno que se produce generalmente en frecuencias bajas y disminuye a frecuencias altas (Carrión, 2001:88). Ocurre cuando existe un obstáculo entre una fuente y un receptor y básicamente modifica la dirección de su trayectoria (fig. 3.10).

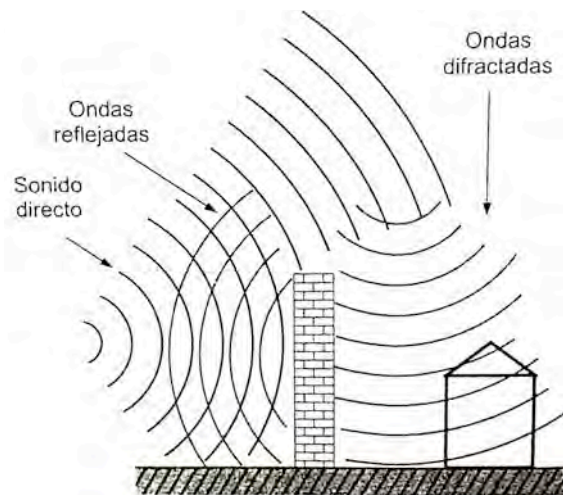


Figura 3.10 "Ejemplo de difracción del sonido alrededor de una barrera acústica instalada delante de una vivienda a modo de protección frente al ruido". Carrión (2001:116).

La difusión del sonido es otro fenómeno que se consigue colocando elementos espaciales que tienen como finalidad dispersar en diversas direcciones y de forma uniforme el sonido (fig. 3.11). A continuación se muestra un esquema comparativo del efecto producido por tres tipos diferentes de superficies.

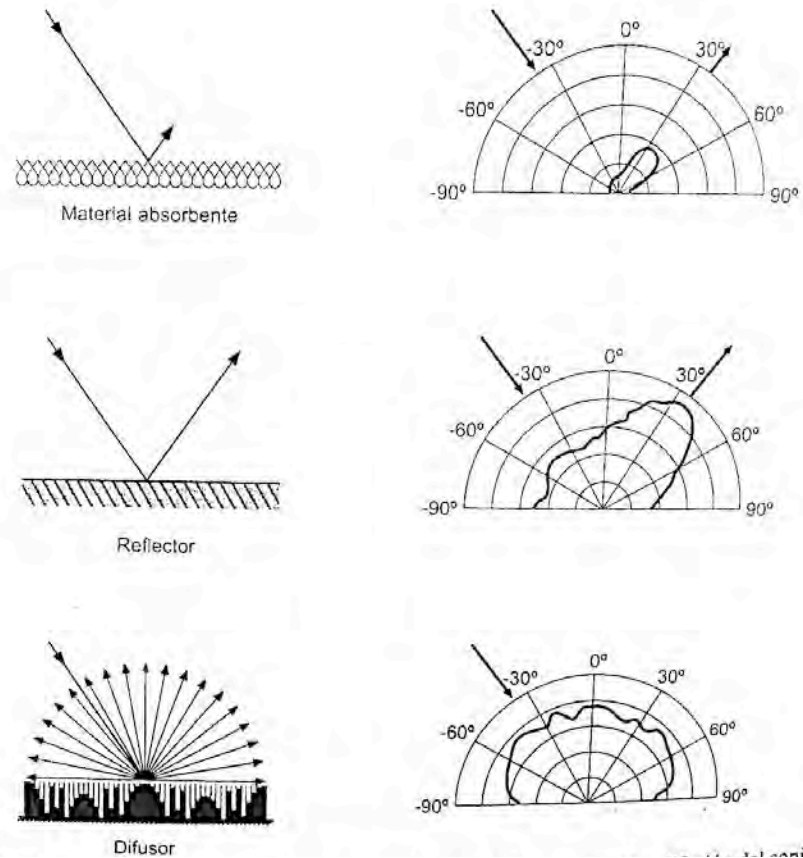


Figura 3.11 “Comparativa entre los efectos de absorción, reflexión especular y difusión del sonido”. Carrión (2001:123).

Por último, existe el fenómeno de resonancia. Es la interacción entre las ondas sonoras y elementos del espacio arquitectónico (Rodríguez, 2014). El fenómeno se presenta cuando la longitud de onda coincide con la dimensión de algún elemento, lo cual permite que se amplifique o disminuya generando diversos efectos en la materia. Un ejemplo común son los puentes que por efecto del viento entran en resonancia y se derrumban debido a la falta de un estudio específico para éste fin.

3.2.3 El sonido en el espacio urbano

Existen dos tipos de fenómenos en el espacio urbano; el primero es el sonido directo, cuando una fuente emite un mensaje y no existen estructuras alrededor y por lo tanto no es posible registrar ese mensaje a través de reflexiones; y el segundo es cuando existen estructuras alrededor y por lo tanto permite la recepción del mensaje por medio de esas reflexiones además del sonido directo.

Sin embargo, en el comportamiento acústico en espacios urbanos inciden además diversos factores ambientales tales como el viento, la lluvia, la humedad, la temperatura, así como también el espacio artificial.

De acuerdo con Sancho (2008) existen diversos tipos de atenuación en un espacio urbano. Uno de ellos es la absorción atmosférica, que es la atenuación del sonido por acción del aire (isotrópico¹ y en calma) y depende de la frecuencia del sonido, la humedad relativa del aire y la temperatura ambiente.

La Organización Internacional de Normalización (ISO) en la norma R507 (1970) recomienda los valores de atenuación dependiendo de los factores antes mencionados (tabla 3.3).

EL SONIDO		ATENUACIÓN (dB / 100m)								
Frec.	Temp	HUMEDAD RELATIVA %								
Hz	°C	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	-10	0.75	0.56	0.41	0.32	0.26	0.22	0.2	0.18	0.17
	-5	0.62	0.4	0.29	0.23	0.2	0.18	0.17	0.16	0.16
	0	0.44	0.28	0.22	0.19	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15
	5	0.34	0.24	0.21	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15	0.15
500	10	0.27	0.22	0.2	0.18	0.17	0.16	0.15	0.15	0.14
	15	0.25	0.22	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.14
	20	0.25	0.21	0.19	0.18	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14
	25	0.24	0.21	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13
	30	0.23	0.2	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13
1000	-10	1.38	1.53	1.35	1.07	0.88	0.75	0.65	0.57	0.51

¹ Con características idénticas en todas las direcciones.

	-5	1.7	1.34	0.97	0.77	0.63	0.53	0.47	0.42	0.39
	0	1.48	0.96	0.69	0.55	0.47	0.42	0.39	0.38	0.36
	5	1.14	0.73	0.55	0.47	0.43	0.4	0.39	0.37	0.36
	10	0.88	0.59	0.48	0.45	0.42	0.4	0.38	0.36	0.35
	15	0.7	0.52	0.47	0.44	0.41	0.38	0.37	0.35	0.34
	20	0.61	0.51	0.46	0.42	0.4	0.38	0.36	0.34	0.33
	25	0.58	0.5	0.45	0.41	0.39	0.37	0.35	0.34	0.32
	30	0.57	0.49	0.44	0.41	0.38	0.36	0.35	0.33	0.32
	-10	1.73	2.61	3.05	3.07	2.88	2.55	2.22	1.95	1.75
	-5	2.92	3.44	3.2	2.65	2.16	1.85	1.6	1.4	1.26
	0	3.81	3.23	2.38	1.89	1.55	1.32	1.15	1.03	0.94
2000	5	3.8	2.52	1.86	1.47	1.22	1.06	0.97	0.91	0.88
	10	3.02	1.96	1.45	1.17	1.04	0.97	0.93	0.89	0.86
	15	2.41	1.55	1.21	1.07	1	0.95	0.91	0.87	0.84
	20	1.86	1.29	1.13	1.04	0.98	0.92	0.88	0.84	0.81
	25	1.56	1.23	1.12	1.03	0.96	0.91	0.87	0.84	0.81
	30	1.39	1.21	1.09	1	0.94	0.89	0.85	0.82	0.79
	-10	2.31	3.36	4.47	5.53	6.1	6.28	6.25	6.05	5.71
	-5	3.75	5.63	6.8	6.98	6.7	6.08	5.37	4.72	4.22
	0	6.2	7.7	7.41	6.34	5.22	4.45	3.9	3.43	3.08
	5	8.35	8	6.25	4.93	4.1	3.47	3.04	2.7	2.45
4000	10	9.1	6.58	4.9	3.85	3.21	2.76	2.46	2.28	2.16
	15	8.07	5.28	3.88	3.11	2.65	2.42	2.27	2.18	2.11
	20	6.3	4.12	3.12	2.65	2.44	2.31	2.22	2.14	2.06
	25	5.09	3.4	2.79	2.56	2.41	2.29	2.19	2.1	2.02
	30	4.19	3.06	2.72	2.53	2.38	2.25	2.15	2.07	2.01
	-10	2.9	4.11	5.32	6.6	7.89	8.82	9.32	9.48	9.46
	-5	4.51	6.54	8.71	10.09	10.53	10.44	10.01	9.29	8.48
	0	7.21	10.54	11.62	11.34	10.24	8.9	7.71	6.84	6.19
	5	10.98	12.79	11.86	9.81	8.07	6.95	6.05	5.35	4.84
5940	10	13.94	12.71	9.65	7.73	6.38	5.47	4.8	4.3	3.95
	15	14.72	10.44	7.81	6.18	5.18	4.5	4.05	3.79	3.6
	20	12.58	8.27	6.15	4.97	4.31	3.97	3.77	3.63	3.52
	25	10.26	6.76	5.17	4.44	4.09	3.9	3.74	3.61	3.49
	30	8.26	5.6	4.64	4.28	4.04	3.85	3.69	3.54	3.42

Tabla 3.3 “Atenuación del sonido en el aire en dB/100 m en función de la frecuencia del sonido y de la temperatura y humedad del medio ambiente (recomendación ISO R-507)” Fuente: “Acústica arquitectónica y urbanística” Sancho, F. et.al. , 2008, pp. 98.

Otro tipo de absorción es la generada por acción del viento y la temperatura, en donde es posible considerar reforzamientos o atenuaciones de la propagación del sonido según el gradiente² de temperatura (fig. 3.12) y viento (fig. 3.13) dependiendo si es positivo o negativo.

El gradiente positivo se considera cuando existe una inversión de temperatura y las ondas sonoras de desplazan hacia el nivel del suelo. De manera contraria; el gradiente negativo se presenta cuando la propagación del sonido se desplaza hacia la atmósfera. Éste último puede generar sombras acústicas, lo cual quiere decir que los niveles sonoros son inferiores.

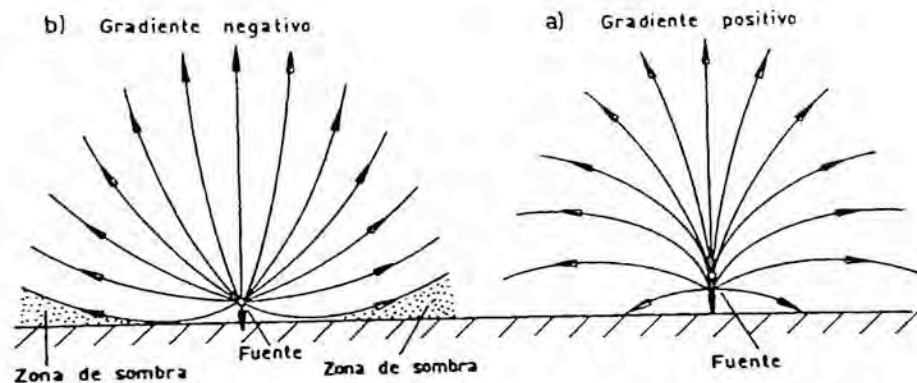


Figura 3.12 “Curvatura de los rayos sonoros debido al gradiente de temperatura. Fuente: Acústica arquitectónica y urbanística. Sancho, F. et.al”. 2008, pp. 316.

De acuerdo con Sancho (2008) la sombra acústica es aquella en las que no se percibe el sonido directo o reflejado debido a la geometría del espacio o por algún obstáculo presente en el mismo (personas y objetos, entre otros). La presencia de este fenómeno produce campos acústicos no homogéneos o discontinuos ocasionando una percepción errónea del sonido.

Por otra parte, la acción del viento de igual manera reduce los niveles de presión sonora o incluso zonas de sombra acústica siempre y cuando existan velocidades de 10 a 20 km/h en donde causando una reducción de 20 a 30 dB/km.

Otro factor incidente en la atenuación de los NPS es causada por obstáculos naturales, que son aquellos que incluyen el terreno como por ejemplo la vegetación.

² Variación de dirección de un elemento meteorológico.

Se considera un obstáculo natural el césped, los arbustos o los árboles debido a que representan porosidad y por lo tanto son elementos absorbentes y difractores. La atenuación puede ser apreciable en frecuencias altas y vegetación uniforme, sin embargo si el terreno es compacto la atenuación es casi imperceptible.

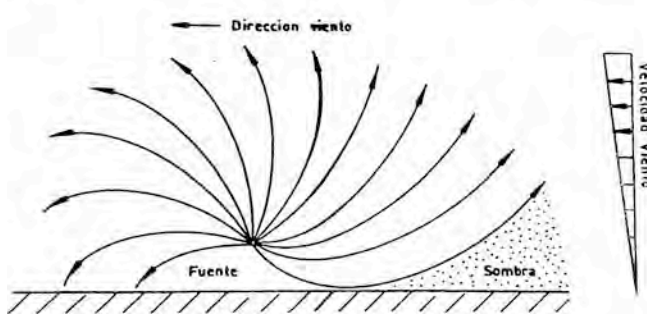


Figura 3.13 “Curvatura de los rayos sonoros debido al viento.
Fuente: Acústica arquitectónica y urbanística. Sancho, F. et.al.” .
2008, pp. 317.

La atenuación que causan las “pantallas vegetales” conformadas por árboles, matorrales o arbustos es poco considerable, sin embargo si la vegetación es densa, de aproximadamente 100 m de profundidad, el valor de reducción sonora puede ser de hasta 5 dB (tabla 3.4).

TIPO DE RECUBRIMIENTO	ATENUACIÓN dB/100m a 1000 Hz
Ninguno	2 a 5
Hierba escasa	3 a 6
Arbustos	12 a 15
Césped tupido	15 a 20

Tabla 3.4 “Atenuación causada por el terreno en función del grado de vegetación sobre el mismo.” Fuente: “Acústica arquitectónica y urbanística” Sancho, F. et.al. , 2008, pp. 318.

Las pantallas acústicas (barreras o paredes no porosas, de suficiente masa, mínimo 20 kg/m^2) que se localiza entre una fuente y el receptor) pueden también producir una atenuación y se puede calcular mediante el número de Fresnel N.

El último factor incidente, de acuerdo con Sancho (2008), es el ruido de fondo, mismo que se puede definir como cualquier sonido molesto que interfiere en el desarrollo de cualquier actividad

humana y que no es deseado. En física se puede decir que corresponde a cualquier variación aleatoria de la presión acústica.

Existe la clasificación de dos tipos de ruidos aleatorios que generalmente se utilizan para realizar mediciones y simulaciones para determinar el comportamiento acústico de un espacio: El ruido blanco, que presenta una distribución uniforme de energía acústica en función de las frecuencias y se mide en Hz, es constante en todo el rango audible; y el ruido rosa, en donde predominan las frecuencias bajas audibles con espectro continuo cuyo nivel por tercio de banda es constante.

En la búsqueda de una relación entre la frecuencia subjetiva al ruido de fondo en diversos espacios, se han creado índices de ruido de fondo en función del uso de un recinto (Carrión, 2001:102), entre ellos se encuentran: el nivel de presión sonora lineal, nivel sonoro continuo equivalente, niveles percentiles, curvas de valoración NR (Noises reduction), curvas de valoración PNC (Preferred noises criteria) y las curvas NC (Noise criteria).

En la norma ISO-1966 las curvas de valoración NR son las que generalmente son utilizadas para los estudios acústicos (tabla 3.5).

Las curvas de valoración NR (fig. 3.14) permiten asociar un determinado espectro de ruido con un único número medido en bandas de octavas que se construyen a partir de 100 Hz.

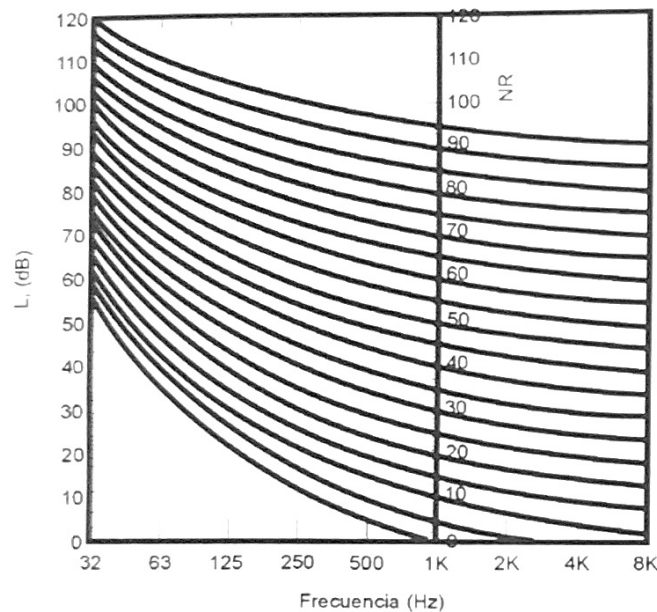


Figura 3.14 “Curvas de criterio de ruido NR. Fuente: “Acústica en los espacios escénicos prehispánicos”, pp. 64.

TIPOS DE RECINTO	CURVA NC RECOMENDADA	EQUIVALENCIA EN dBA
TEATROS	15 - 25	28 - 38
SALAS DE CONFERENCIAS / AULAS	20 - 30	33 - 42
BIBLIOTECAS	30 - 35	42 - 46

Tabla 3.5 “Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes (en dBA)” Fuente: “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” Carrión, A. , 2001, pp. 43.

Para realizar una valoración acústica de un espacio urbano, es importante considerar todos los posibles factores de atenuación anteriormente descritos, y complementarlos con los parámetros específicos para la evaluación objetiva de espacios dependiendo de la actividad si se trata de espacios semi-abiertos.

3.3 Transmisión y recepción del mensaje oral y musical

El mensaje es el objeto de la comunicación, en el caso de estudio, éste se compone de sonidos y para que un mensaje oral o musical exista, es necesaria la presencia de un emisor, un receptor y medio de transmisión (aire).

La voz humana es un mecanismo capaz de generar diversos tonos de frecuencias, intensidad, sonoridad, duración, timbre y forma de onda, esto variable en cada persona.

De acuerdo con Labrada (1995), existen tres elementos básicos en la producción del lenguaje hablado: Los órganos de respiración, los órganos de fonación y los órganos de articulación (fig. 3.15).

Los órganos de respiración son aquellos que suministran energía a través de la expiración o expulsión del aire de los pulmones. El aire inhalado se conduce a través de la laringe en donde intervienen los órganos de fonación. Esta corriente de aire hace vibrar las cuerdas vocales y los “músculos gemelos”, que son órganos elásticos, generan una oscilación con un contenido armónico. Posteriormente intervienen los órganos de articulación que son la lengua, los labios, las mandíbulas y los dientes que generan el lenguaje hablado a través de dos elementos; las vocales y las consonantes.

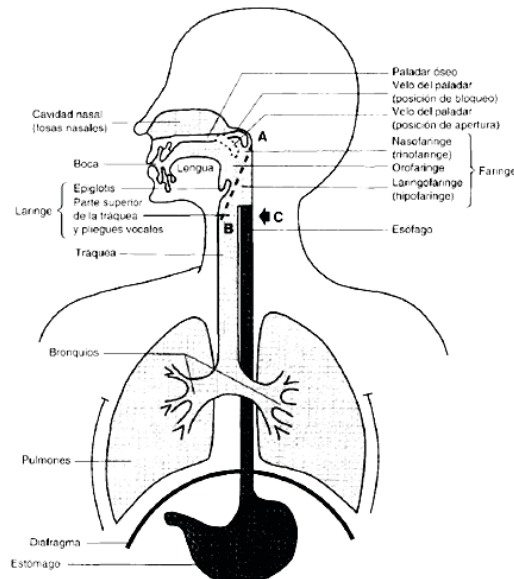


Figura 3.15 “Vista en sección del mecanismo de la voz humana”. Fuente: <http://mayullantalla.blogspot.mx/2011/02/los-tres-niveles-del-aparato-fonador.html>, 2014

Las vocales son sonidos relativamente largos a diferencia de las consonantes que generalmente no requieren de intervención de las cuerdas vocales sin embargo son las que contienen la mayor parte de la información racional.

Según Sancho (2008) la palabra consiste en una sucesión de sonidos variables constantemente en frecuencia e intensidad. La potencia media varía con el intervalo de tiempo, sin embargo los valores promedio para mujeres es de $18 \mu\text{W}$, mientras que para los hombres es de $34 \mu\text{W}$ promediado en un minuto (incluyendo pausas).

Los valores promedio de presión acústica, a un metro de los labios, para hombres se considera de 64 dB, mientras que para mujeres es de 60 dB. Sin embargo estos valores son variables durante el curso de una conversación cuya separación suele ser de 30 dB, 12 dB como valor máximo y 18 dB en el valor mínimo.

La potencia de la palabra se distribuye entre 100 Hz y 10,000 Hz, siendo el mayor entre 100 Hz y 800 Hz que representan las frecuencias con mayor energía, mismas que concentran los sonidos de las vocales constantes sonoras.

En las frecuencias altas se desarrollan la mayoría de las constantes, que son sonidos de corta duración y poca energía, sin embargo su comprensión es fundamental para la inteligibilidad de la palabra.

La inteligibilidad de la palabra se entiende por la capacidad que presenta un escucha para comprender un mensaje hablado.

El grado de inteligibilidad varía con el nivel sonoro (volumen) en el cual se recibe el mensaje. Otros factores determinantes son: El ambiente sonoro (ruido o silencio); características del medio de transmisión; del acento y pronunciación del locutor.

Aunado a lo anterior, el grado de inteligibilidad de la palabra depende de las consonantes, mientras que las vocales aportan menor información.

Por otra parte la contribución a la inteligibilidad de la palabra depende también de la frecuencia, siendo la de 500 Hz la de mayor aportación (fig. 3.16).

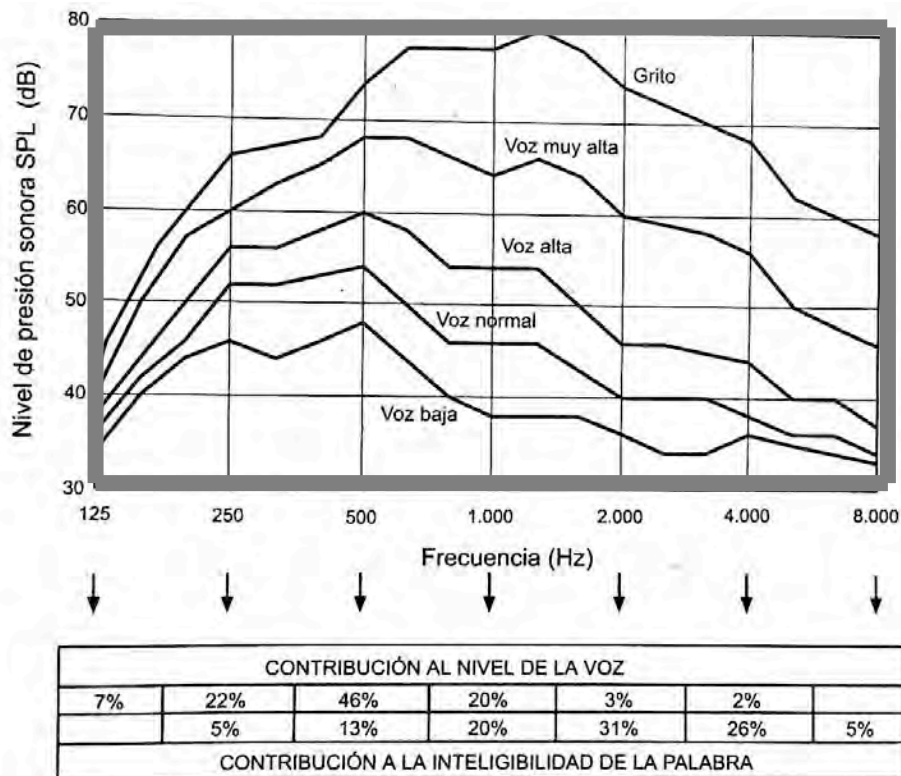


Figura 3.16 “Contribución frecuencial al nivel de la voz y a la inteligibilidad de la palabra”. Carrión (2001:46)

Sin embargo existe otro factor del que depende la correcta inteligibilidad de la palabra llamado patrón de radiación de la voz.

Según Sancho (2008) la energía del habla no es irradiada uniformemente alrededor del orador debido a la sombra acústica que produce el cuerpo y la cabeza, sin embargo en la siguiente gráfica (fig. 3.17) se muestra el diagrama de direccionalidad que muestra una irradiación uniforme en frecuencias bajas, a diferencia de las altas.

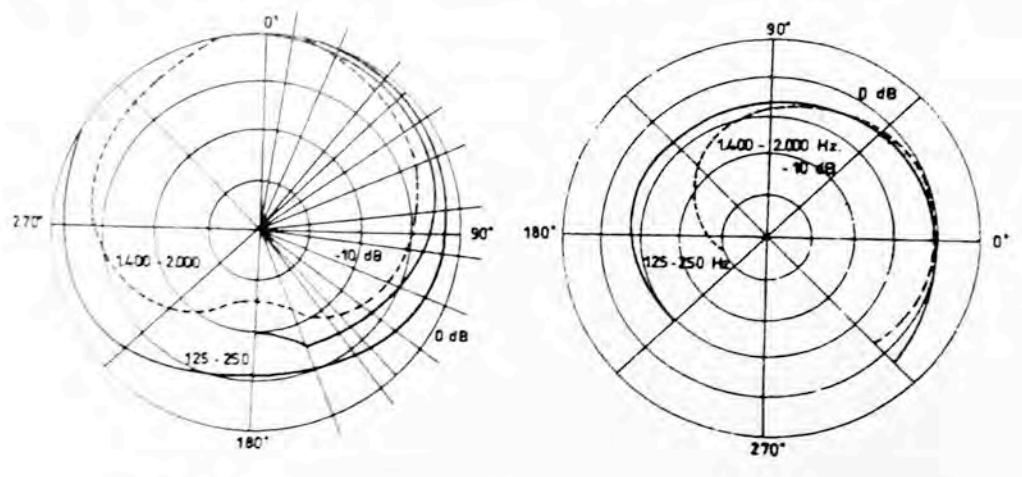


Figura 3.17 “Diagrama de direccionalidad de la palabra hablada Kuttruf (a) sección horizontal, (b) sección vertical” Fuente: Acústica Arquitectónica y Urbanística, Sancho, F. et. al. 2008 pp. 123.

La forma en que se expresa la directividad de una fuente es mediante el factor Q , mismo que depende de la relación entre el NPS en una dirección y el nivel que se obtendría si la fuente no fuera directiva. A mayor NPS, mayor Q en esa dirección.

Por otra parte los sonidos musicales presentan un espectro relativamente simple, periódico y ordenado (excepto por los instrumentos de percusión).

La música en general, está basada en escalas y frecuencias determinadas. En los sonidos musicales se encuentran frecuencias con números enteros que corresponden a la frecuencia fundamental y sus armónicos.

Se diseñan para producir sonidos con frecuencias fundamentales que dan una impresión subjetiva de tono. La presencia y número de armónicos otorga al sonido la calidad musical o timbre.

En el caso de los instrumentos de viento, que son columnas resonantes de aire, la frecuencia fundamental, depende de la longitud del conducto que según Sancho (2008) (Fór. 12 y 13):

$$f = c / 4 l \quad (\text{tubo cerrado en un extremo}) \dots ec. 12$$

$$f = c / 2 l \quad (\text{abierto en ambos extremos}) \dots ec. 13$$

Donde:

c = velocidad del sonido en el aire

l = longitud del tubo

El caracol trompeta se clasifica (Cabrera, et. al., 2002:34) como un aerófono de soplo verdadero y se obtiene del caracol *Strombus Gigas* (fig. 3.18). Siempre se trataban de buscaban los de mayor tamaño ya que genera un sonido más grave y un timbre "profundo"(no siempre era así). Generalmente lo tocaban las personas de sexo masculino y lo utilizaban para establecer una especie de comunicación entre la población y las deidades para atraer la lluvia principalmente.



Figura 3.18 Caracol *Strombus Gigas*, Proyecto arqueoacústico Chavín de Huántar. Fuente: <https://ccrma.stanford.edu/groups/chavin/index.html>, 2014.

Debido a que no se sabe con exactitud como era la música prehispánica, realmente no existen parámetros de recomendación acústica como para, por ejemplo, la orquesta sinfónica, música clásica, barroca, romántica, S. XX y ópera Wagneriana entre otros.

Sin embargo, la forma de ejecutar el instrumento ha sido transmitida de generación en generación y se conoce que se crea el sonido al "soplar" por la abertura de origen del caracol excitando el instrumento por el tiempo que dura una exhalación.

3.3.1 El analizador auditivo

El oído es el receptor universal del sonido y posee una gran capacidad para percibir, analizar, procesar y memorizar, separada e integralmente diferentes características de la ondulación sonora.

De acuerdo con Sancho (2008), el analizador auditivo se compone por un órgano que toma datos (oído externo y medio), un órgano de conversión analógica-digital (oído interno) y el ordenador central (cerebro) (fig. 3.19).

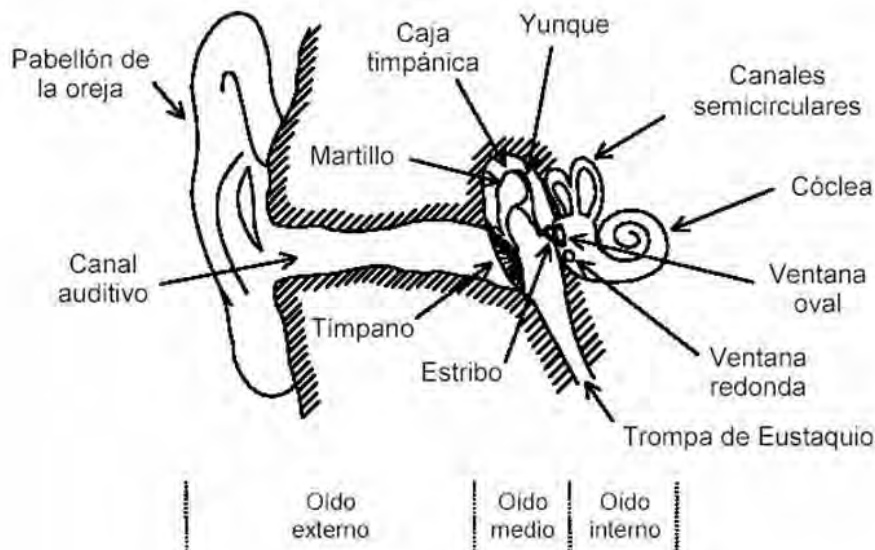


Figura 3.19 “Componentes del analizador auditivo”. Fuente : http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io1/public_html/oidohumano_archivos/image002.jpg , 2014.

El oído externo se compone del pabellón de la oreja, el canal auditivo y el tímpano. El pabellón recolecta datos para que posteriormente el canal auditivo conduzca a través de su zona de resonancia (entre 2,000 y 6,000 Hz.) las diferentes frecuencias hasta el tímpano, que es una membrana de aproximadamente 7 cm², sensible a las variaciones de presión, mismas que convierte en desplazamientos mecánicos.

"El oído medio es una cavidad conectada al exterior por medio de un canal denominado trompa de Eustaquio, normalmente cerrado excepto al bostezar o tragar. Su función es permitir la entrada de aire y mantener el equilibrio entre la presión atmosférica exterior y la interior del tímpano. Dentro de esta cavidad se encuentran huesos pequeños llamados martillo, yunque y estribo que permiten la transmisión de la vibración al oído interno o ventana oval, que se constituye por canales semicirculares y cóclea o caracol" (Labrada, 1995:34)

El canal semicircular o aparato vestibular envía al cerebro la información del equilibrio mientras que el caracol, conformado por un laberinto óseo que contiene un líquido acuoso, propaga las vibraciones a través de la membrana basilar (de 35 cm. de longitud aproximadamente) y de un gran número de conductores nerviosos que trasladan al cerebro información por medio del nervio auditivo. El cerebro, de acuerdo con Labrada (1995) procesa la información y realiza un trabajo de diferenciación para generar la sensación auditiva compuesta de diversas tonalidades (frecuencias), timbre, intensidad y procedencia de fuentes.

La audición se compone de procesos distintos que no permiten encontrar una relación simple y única entre las magnitudes físicas por medio del analizador auditivo. (Sancho, 2008:37) Para que una sensación auditiva sea producida, es necesario que las frecuencias recibidas se encuentren en una determinada banda y que la amplitud sea superior a un determinado valor para cada una de ellas. Aunado a lo anterior, debe existir una alinealidad en la respuesta del oído, tanto en la frecuencia como en la amplitud.

Un sonido se caracteriza físicamente por su frecuencia y su amplitud, mismas que generan sensaciones audibles distintas (Sancho, 2008:40):

Tono o sensación de agudeza: Depende de la frecuencia, por lo tanto a mayor frecuencia, mayor sensación de agudeza del sonido.

Sonoridad o sensación de intensidad: Depende de la presión acústica. A mayor presión, mayor sensación de intensidad del sonido.

Según Sancho (2008) existe una gama de intensidades audibles que varían de acuerdo a cada persona y a su edad, sin embargo se han establecido rangos de audición promedio.

El límite inferior de frecuencias audibles que percibe el oído promedio de un ser humano depende de la amplitud del sonido y de la clase de onda. Normalmente este límite se establece alrededor de los 16 Hz.

El límite superior depende de la persona y se reduce conforme al incremento de la edad. Una persona de 40 años con un oído promedio percibe de 15,000 Hz. a 20,000 Hz. De acuerdo a esto se puede decir que el rango audible se establece de 16 Hz. a 20,000 Hz.

Para percibir la variación de tonos es importante mencionar que aunque el tono de un sonido es proporcional a la frecuencia, esta proporción no es directa, es decir, el oído no percibe estos cambios de manera gradual o lineal. Por ejemplo, cuando se incrementa la frecuencia de 1,000 a 2,000 Hz. (aumento de octava o duplicación de la frecuencia) el oído no percibe un incremento similar del tono, pues para hacerlo es necesario aumentar de 2,000 Hz. a 4,000 Hz y esta variación es acentuada conforme se incrementa la edad de la persona, es decir, se pierde gradualmente sensibilidad sobre todo en frecuencias altas.

De igual manera, existen valores de presión acústica tan bajos que el oído no es capaz de percibir. Es a partir de un cierto valor de presión acústica que aparece la sensación sonora, mismo que es conocido como umbral de la sensación sonora o límite inferior de la audición y éste no es el mismo para todas las frecuencias, es decir, para producir una sensación sonora de un tono de 50 Hz. es necesaria una intensidad de 250,000 veces mayor que para uno de 1,000 Hz.

Por otra parte, si se aumenta el valor de la presión acústica de un sonido, en un cierto nivel comienza a producir una sensación de molestia, comúnmente llamada umbral del dolor o límite superior de la audición.

De acuerdo con Labrada (1995), debido a que el oído no responde linealmente a los incrementos de presión acústica, si no que lo realiza de acuerdo a una expresión logarítmica, se adoptó internacionalmente la unidad llamada “bell”, misma que se refiere a los diversos niveles de amplitud sonora, potencia o intensidad. Sin embargo la unidad “bell” es muy grande, así que en el campo acústico se utiliza su décima parte, el “decibel”.

El decibel es una unidad que mide la manera en como el oído percibe las variaciones del amplitud real de los sonidos (Labrada, 1995) y matemáticamente su valor relativo o de nivel de presión sonora de expresa de la siguiente manera (Fór. 14):

$$NPS = 20 \log (P1/P0) \dots ec. 14$$

En donde:

NPS: Nivel de presión sonora

P1= Valor real, en un instante de la presión sonora

P0= Presión de referencia, que toma del umbral de audición

Entonces se puede concluir que el umbral de la audición corresponde a un nivel de presión sonora de 0 dB, debido a que (Fór. 15):

$$NPS = 20 \log [0.0002 / 0.0002] = 20 \log 1 \quad \therefore \log 1 = 0 \text{ dB} \dots ec. 15$$

y el umbral máximo audible (Fór. 16):

$$NPS = 20 \log [200 / 0.0002] = 20 \log (1000) \quad \therefore 20 \cdot 6 = 120 \text{ dB} \dots ec. 16$$

Según Sancho (2008), debido a que el decibel ofrece cierta proporcionalidad con la sensación de sonoridad en una banda de frecuencias y en otras no se utilizó una nueva unidad fisiológica que sensación percibida por el ser humano considerando la intensidad del sonido y frecuencia. A esta unidad se le denomina fon, fonio o fono y numéricamente es igual al nivel de intensidad en dB de un tono de 1,000 Hz.

En la tabla de Fletcher – Munson se observan curvas de igual sonoridad de audición humana para diferentes niveles de presión acústica. En la gráfica (fig. 3.20) se indica que a bajos y altos

niveles de intensidad, el oído humano presenta pérdidas de sensibilidad. Entre 1,000 y 2,000 Hz. la apreciación subjetiva del balance se aproxima con mayor exactitud a la realidad.

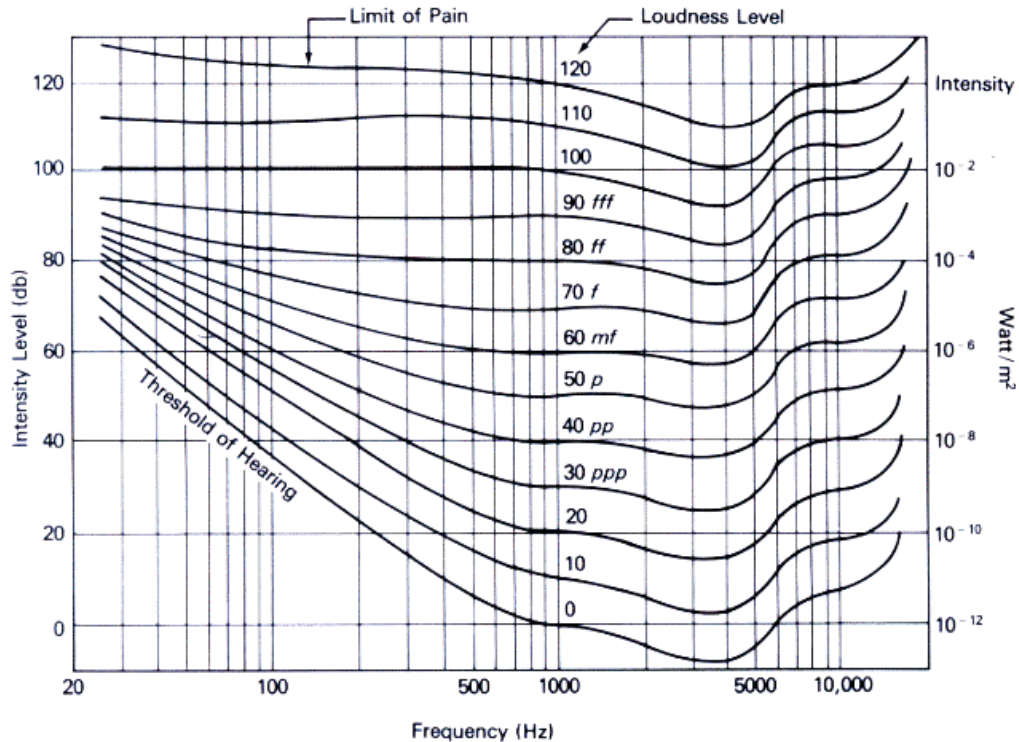


Figura 3.20 “Curvas de Fletcher Munson”. Fuente: <http://www.duiops.net/hifi/enciclopedia/images/fletchermunson.gif>, 2014.

3.4 Parámetros objetivos de calidad acústica

El oído humano tiene la capacidad de integrar todas las reflexiones del sonido directo en un tiempo de 50 ms y percibir las como un sonido directo e incluso tales reflexiones pueden mejorar la inteligibilidad o comprensión del mensaje oral ya que pueden predecir un aumento de sonoridad, por esta razón, los parámetros de evaluación para lenguaje se presentan en base 50.

3.4.1 Evaluación acústica para mensaje oral

De acuerdo con Carrión (2001), las primeras reflexiones en un espacio cerrado puede ser benéfico para los parámetros de inteligibilidad y sonoridad, sin embargo para cuantificar el peso específico de las primeras reflexiones se utilizan los tres parámetros; claridad, definición y

sonoridad. Cuanto mayor sea el valor de los parámetros, mayor será la inteligibilidad y sonoridad, aunque existen parámetros recomendados.

La Claridad de voz (C_{50}) es el grado de facilidad con el que se perciben las palabras y la definición acústica de acuerdo a Carrión es:

“La relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la que llega después de los primeros 50 ms” (Carrión, 2001 : 183)

Se calcula en cada una de las bandas de frecuencia situadas entre 125 Hz y 4 kHz (Fór 17). :

$$C_{50} = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía a partir de 50 ms}} \quad \dots ec. 17$$

Donde :

C_{50} = Claridad de voz (en dB)

Según L. G. Marshall (2005) el valor representativo de C_{50} o “Speech average” se calcula a través de la media aritmética ponderada entre los valores correspondientes a las bandas de 500Hz, 1kHz, 2 kHz y 4 kHz.

De acuerdo con Carrión (2001) los factores de ponderación son : 15%, 25%, 35% y 25% respectivamente (Fór. 18):

C_{50} (speech average) = 0.15 . C_{50} (500 Hz) + 0.25 . C_{50} (1 kHz) + 0.35 . C_{50} (2 kHz) + 0.25 . C_{50} (4 kHz) *...ec. 18*

El valor recomendado de C_{50} se determina por medio de la siguiente fórmula (Fór. 19):

$$C_{50} (\text{“speech average”}) > 2 \text{ dB} \quad \dots ec. 19$$

Mayor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en tanto que el valor C_{50} sea mayor a 2 dB.

La definición "D" es el grado de facilidad con el que se entienden los sonidos de un mensaje oral.

Según Carrión (2001) (Fór. 20) :

"Según Thiele, la definición D (del alemán "Deutlichkeit") es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms de la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz : " (Carrión, 2001: 184)

$$D = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía total}} \quad \dots ec. 20$$

El valor recomendado "D" debe de presentar (Fór. 21):

$$D > 0.5 \quad \dots ec. 21$$

Entre mayor el valor de "D", mayor inteligibilidad y sonoridad. En condiciones óptimas, el valor "D" debería presentar una variación muy pequeña.

De igual manera se puede calcular a través de la siguiente fórmula una vez obtenida la claridad C₅₀ (Fór. 22):

$$D = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{C_{50}}{10}}} \quad \dots ec. 22$$

La sonoridad "Gmid" es el grado de amplificación que produce un espacio sobre un mensaje oral emitido. De acuerdo con Martínez, (2001), la sonoridad (Speech Sound Level) indica el grado de ampliación producido en un espacio por la emisión del sonido de una fuente oral.

La sonoridad se obtiene a través de la contribución energética del sonido directo, las primeras reflexiones y el sonido reverberado.

La sonoridad (Sound speech level) según Barrón (Carrión, 2001:45) en un punto se define como la diferencia entre el nivel de presión sonora existente emitida por una fuente oral y un nivel de referencia de 39 dB, nivel que una persona puede producir al aire libre a una distancia de 10 m.

De acuerdo con Barrón los niveles óptimos de sonoridad son :

$4 \leq S_{\text{mid}} \leq 8$ dB, para una orientación frontal del actor

$2 \leq S_{\text{mid}} \leq 6$ dB, para una orientación lateral del actor

La inteligibilidad del mensaje oral, de acuerdo con Marshall (2006) es una medida directa de la fracción de palabras o enunciados entendidos por un receptor.

En la percepción de la palabra se incluyen diversos factores como físicos, lingüísticos y psíquicos.

Para que un mensaje sea comprendido, el sonido debe de presentar una intensidad superior al ruido de fondo, así como un campo reverberante y absorción de los materiales adecuado. De igual manera es importante que no se pierda la comprensión de palabras por efectos incluso del aire.

Otro factor importante para la inteligibilidad es el tiempo de reverberación, mismo que para salas destinadas a lenguaje o habla es recomendable que el valor sea pequeño, ya que esto permitirá que las reflexiones sean limitadas y por lo tanto el sonido de las palabras podrá ser apreciado claramente.

Existen diversos parámetros utilizados para conocer la proporción de palabras o sílabas correctamente entendidas en un espacio por el receptor (Martínez, 2005:39), entre las cuales se encuentran el nivel sonoro ponderado (LA), el índice de articulación (IA), la pérdida de articulación de consonantes (%ALCons), el nivel de interferencia de la conversación (SIL), la relación señal / ruido (S/R), el índice de transmisión de la voz (STI) y el índice rápido de transmisión de la voz (RASTI). Los métodos que se explicarán a continuación serán el %ALCons, STI y RASTI.

A principios de la década de los años 70, el investigador holandés V.M.A. Peutz realizó una serie de pruebas que dividió en dos partes y a partir de las cuales estableció una fórmula matemática que permite conocer la inteligibilidad del habla, así como pruebas estadísticas, según Carrión, (2001).

El trabajo consistió en una serie de pruebas en donde se emitían "logatomos" (palabras sin significado conformadas por consonante – vocal – consonante) y donde las personas tomaban notas, mismas que eran procesadas estadísticamente para conocer que porcentaje de las palabras

se comprendieron. A este valor le denominó %ALCons (Articulation Loss of Consonants) Entre mayor es el porcentaje de ALCons, menor es la inteligibilidad del habla.

En la segunda parte del trabajo se desarrolló una fórmula matemática para determinar el %ALCons a partir del conocimiento del tiempo de reverberación (RT) y de la diferencia entre los niveles de presión sonora del campo directo (L_D) y del campo reverberante (L_R).

En la siguiente gráfica (fig. 3.21) se muestra la relación del %ALCons con RT y $L_D - L_R$:

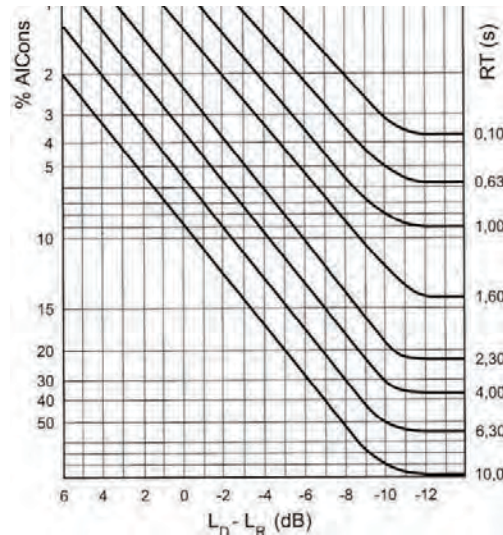


Figura 3.21 “Obtención de %ALCons a partir de RT y $L_D - L_R$. Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos Carrión, A”. , 2001, pp. 67.

De la observación de la gráfica se puede inferir lo siguiente :

1. Cuanto más cerca esté situado el receptor de la fuente sonora ($L_d - L_r$, mayor), menor será el valor de %ALCons, es decir, mayor inteligibilidad.
2. Cuanto menor sea el RT, igualmente menor será el %ALCons, es decir, mayor inteñgibilidad.
3. El valor de %ALCons va aumentando a medida que el receptor se aleja de la fuente hasta una distancia : $r = 3,16 D_c$. Para distancias $r > 3,16 D_c$, equivalentes a $(L_d - L_r) < -10$ dB, el valor de %ALCons tiende a ser constante. Ello significa que, a partir de dicha distancia, la inteligibilidad de la palabra ya no empeora.” (Carrión, 2001:67)

Para el cálculo matemático del valor $L_D - L_R$, se emplea la siguiente fórmula (Fór. 23) :

$$L_D - L_R = 10 \log (Q \cdot R / r^2) - 17 \dots ec. 23$$

Donde :

log = Logaritmo decimal.

Q = Factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada. (Q = 2 en el caso de la voz humana, considerando la dirección frontal del orador)

R = Constante de la sala. (m²)

r = Distancia del punto considerado a la fuente sonora. (m)

RT y R dependen del coeficiente medio de absorción (α) así como el volumen (V) y la superficie total (S_t), sin embargo a nivel práctico el valor α se considera el correspondiente a la banda de 2 kHz debido a que es la de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

El ruido de fondo es un parámetro que incide sustancialmente en la pérdida de la inteligibilidad, sin embargo, si el ruido de presenta como mínimo 12 dB por debajo del nivel de la señal, éste será despreciable.

El índice STI (Speech Transmission Index) definido por Houtgast y Steeneken, permite cuantificar la inteligibilidad de la palabra con valores entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima).

De acuerdo con Carrión, (2001) se ha comprobado que existe una correlación adecuada entre los valores de %ALCons, STI y RASTI (fig. 3.22). Dicha correspondencia se muestra en la siguiente gráfica:

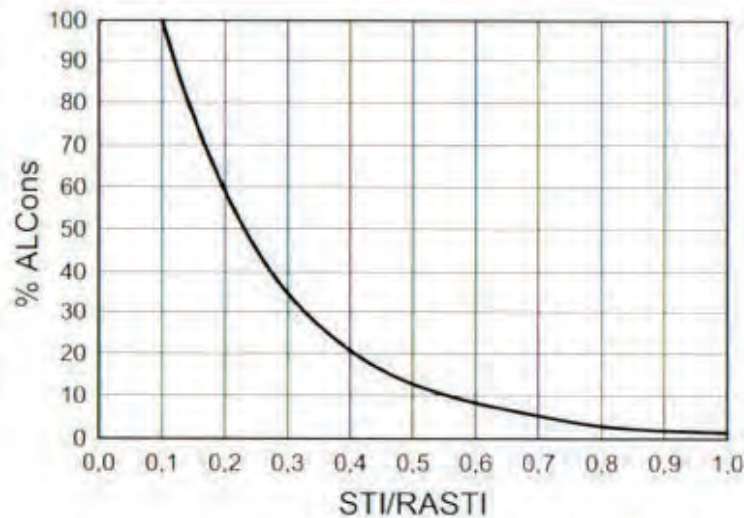


Figura 3.22 “Correspondencia de valores %ALCons, STI y RASTI.
Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Carrión, A. ,
2001, pp. 69.

Los valores de correspondencia son los siguientes (tabla 3.6) :

%ALCons	STI / RASTI	VALORACIÓN SUBJETIVA
1.4% - 0%	0.88 - 1	Excelente
4.8% - 1.6%	0.66 - 0.86	Buena
11.4% - 5.3%	0.5 - 0.64	Aceptable
24.2% - 12%	0.36 - 0.49	Pobre
46.5% - 27%	0.24 - 0.34	Mala

Tabla 3.6 “Valores de correspondencia entre %ALCons, STI/RASTI y valoración subjetiva”. Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Carrión, A. , 2001, pp. 69.

Para el cálculo de inteligibilidad oral, existen valores determinados para una voz masculina y femenina (tabla 3.7) :

TIPO DE CONVERSACIÓN	MASCULINA dB (A)	FEMENINA dB (A)
Voz baja	55	50
Voz normal	58	55
Voz elevada	65	62
Voz fuerte	75	71
Gritando	88	82

Tabla 3.7 “Niveles de voz medidos en campo libre a 1 m de los labios ” Fuente: “Acústica en los espacios escénicos prehispánicos”, pp. 93.

Las características relevantes del mensaje oral son las siguientes (tabla 3.8):

SONIDO	DURACIÓN (PROMEDIO)	CONTENIDO FRECUENCIAL DOMINANTE	NIVEL (PROMEDIO)	CONTRIBUCIÓN A LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA
Vocales	± 90 ms	Bajas frecuencias	Nivel de vocales ± nivel de las	baja
Consonantes	± 20 ms	Altas frecuencias	consonantes ± 12 dB	Alta

Tabla 3.8 “Características más relevantes del mensaje oral” Fuente: “Acústica en los espacios escénicos prehispánicos”, pp. 65.

Aunado a los parámetros anteriores, se suma el tiempo de reverberación. Al ser un indicador que se utiliza tanto para lenguaje como para música, se explicará en el apartado siguiente.

3.4.2 Evaluación acústica para música

Los siguientes parámetros tienen como finalidad establecer valoraciones subjetivas para salas de conciertos aunque en la actualidad aún no se ha logrado establecer una correspondencia entre lo subjetivo y lo objetivo debido al comportamiento complejo de las ondas sonoras en un espacio para usos específicos (musical y oral).

Sin embargo se han considerado los siguientes parámetros para evaluar la correcta recepción del mensaje emitido a través del caracol.

En una composición musical, la claridad es el grado de separación de los diferentes sonidos que la integran (Carrión, 2001). La claridad musical media C_{80} se define como la relación entre la energía sonora desde la llegada del sonido directo durante los primeros 80 ms y la que se recibe posteriormente calculada en cada banda entre 125 Hz y 4 Hz. Se expresa en escala logarítmica (Fór. 24) :

$$C_{80} = \frac{\text{Energía hasta 80 ms}}{\text{Energía a partir de 80 ms}} \quad \dots ec. 24$$

“La elección del intervalo temporal de 80 ms se debe a que, cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído junto con el sonido directo y, por tanto, contribuyen a aumentar la claridad musical. Constituyen, pues, las denominadas primeras reflexiones.” (Carrión, 2001: 225)

Beranek (1962) recomienda para una sala vacía que el valor C_{80} para bandas de 500 Hz, 1kHz y 2 kHz se localice entre :

$$-4 \leq C_{80} \leq 0 \text{ dB}$$

Marshall propone el siguiente valor de claridad musical para salas ocupadas :

$$-2 \leq C_{80} \leq +2 \text{ dB}$$

Al igual que con el lenguaje , la claridad musical depende del intérprete.

La sonoridad G_{mid} (strenght factor), según Lehmann (1976), es la diferencia que existe entre el nivel de presión sonora L_p producido por una fuente omnidireccional en un punto específico de un espacio y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m (nivel de referencia). Los niveles se miden por bandas de

frecuencias de octava (entre 125 Hz y 4 kHz) aplicando la misma potencia a la fuente sonora. El nivel de referencia de cada banda de frecuencias es de 69 dB.

Los valores recomendados para sonoridad en una sala vacía para bandas entre 500 Hz y 1 kHz debe ser según Beranek :

$$4 \leq G_{\text{mid}} \leq 5.5 \text{ dB}$$

Sin embargo, en la actualidad los programas de simulación acústica desarrollan el cálculo de sonoridad a través de la fórmula de Lehmann, quien define la sonoridad como la diferencia entre el nivel total de presión sonora L_p producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto de una sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m (nivel de referencia) (Fór. 25) :

$$G_{\text{mid}} = \frac{G(500 \text{ Hz}) + G(1 \text{ kHz})}{2} \quad \dots \text{ec. 25}$$

Donde :

G = Sonoridad (dB)

G_{mid} = Sonoridad media (dB)

$p_a(t)$ = Presión sonora de referencia

Habitualmente se utiliza el valor obtenido como promedio de los valores correspondientes a las bandas de 500 hz y 1 kHz (Fór. 26) :

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \quad \dots \text{ec. 26}$$

La eficiencia lateral (LF_{E4}) (Lateral energy fraction) se define según A. H. Marshall (1994) como la relación entre la energía que el receptor escucha dentro de los primeros 80 ms desde la llegada

del sonido directo (sin considerar el sonido directo) y la energía recibida en diversas direcciones en ese intervalo de tiempo.

Su fórmula es la siguiente (Fór. 27) :

$$LF = \frac{\text{Energía lateral hasta 80 ms (excluyendo el sonido directo)}}{\text{Energía total hasta 80 ms}} \quad \dots ec. 27$$

Generalmente se utiliza el valor de eficiencia lateral medio que comprende las bandas de frecuencia de octava entre 125 Hz y 1 kHz y es representado por LF_{E4} (Fór. 28):

$$LF_{E4} = \frac{LF (125 \text{ Hz}) + LF (250 \text{ Hz}) + LF (500 \text{ Hz}) + LF (1 \text{ kHz})}{4} \quad \dots ec. 28$$

El valor de LF_{E4} para una sala vacía debe de cumplir con lo siguiente :

$$Lfe4 \geq 0.19$$

Mientras mayor sea el valor de LF_{E4} , mayor será el grado de espacialidad del sonido.

Por último, el campo reverberante de acuerdo a Carrión (2001) es aquel en donde predomina el sonido reflejado y esto ayuda a la correcta inteligibilidad de la palabra.

El tiempo de reverberación es el tiempo transcurrido desde que una fuente emisora interrumpe su emisión hasta que el NPS cae en 60 dB.

Los valores recomendados para el Tr :

$$\text{Lenguaje} \quad 0.7s \leq Tr \leq 1.2s$$

$$\text{Música} \quad 1.6s$$

El uso de los parámetros mencionados generalmente se emplean en espacios cerrados, sin embargo puede explorarse su utilidad para evaluar espacios semi-abiertos.

3.5 Programa de simulación por computadora (CATT Acoustic)

CATT Acoustic (Computer aided theatre technique) es un programa de predicción de comportamiento acústico con base en teoría geométrica (fig. 3.23).

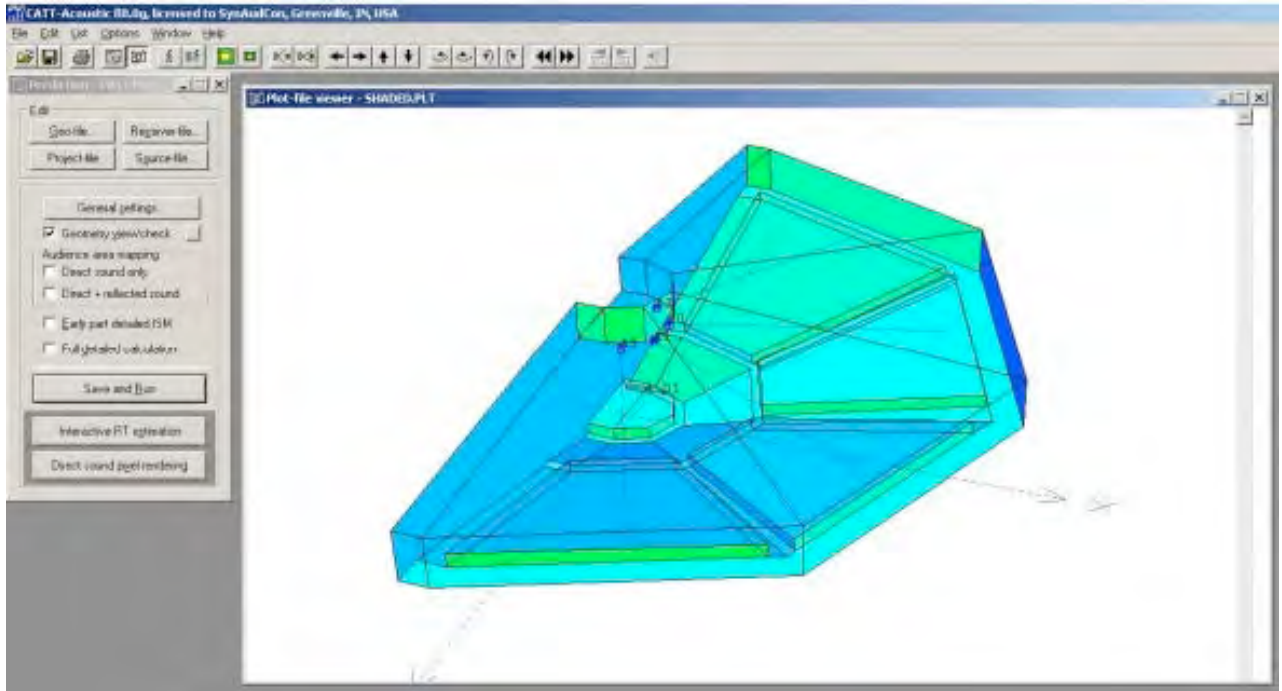


Figura 3.23 "Modelo 3D en CATT Acoustic". Fuente: <http://www.prosoundtraining.com/site/author/pat-brown/efficient-room-modeling-using-google-sketchup/>, 2015.

Está compuesto por tres tipos de modelo : El de fuentes de imagen (ISM), mismo que trata el frente de onda de presión como un rayo óptico utilizando los principios de reflexión, difracción y refracción. El método de trazado de rayos (RTM) que se utiliza para el mapeado de audiencia, que es un trazado de rayos en todas direcciones desde una fuente para analizar las incidencias sobre receptores esféricos y por último del modelo de trazado cónico (RTC) que combina el trazado de conos, rayos y fuentes de imagen y su función es trazar un cono en vez de un rayo.

El programa se compone de tres módulos: predicción, adición de fuentes múltiples y post-procesos. Sin embargo en la investigación sólo se utilizó el de predicción ya que los módulos adicionales se aplican para fuentes electroacústicas.

El módulo de predicción se conforma de tres apartados:

1. Geometría : Se integra por la configuración geométrica o modelo, coeficientes de absorción, directividad, valores climáticos, localización de fuentes y receptores

Para realizar una predicción en CATT Acoustic es necesario ingresar un modelo 3D, mismo que puede ser elaborado en Sketch up o Autocad, entre otros, e ingresarlo. De otra manera es posible dibujar el modelo en el programa directo, sin embargo se deben ingresar la ubicación de los volúmenes por medio de coordenadas, lo cual puede ser más tardado.

Una vez que el modelo se ha ingresado al programa, se procede a determinar las condiciones para la evaluación en el archivo Maestro o "Master" (fig. 3.24). El primer parámetro se compone de los coeficientes de absorción de los materiales, mismos que se pueden investigar en diversos libros de acústica. Se ingresan los valores en las diferentes frecuencias.

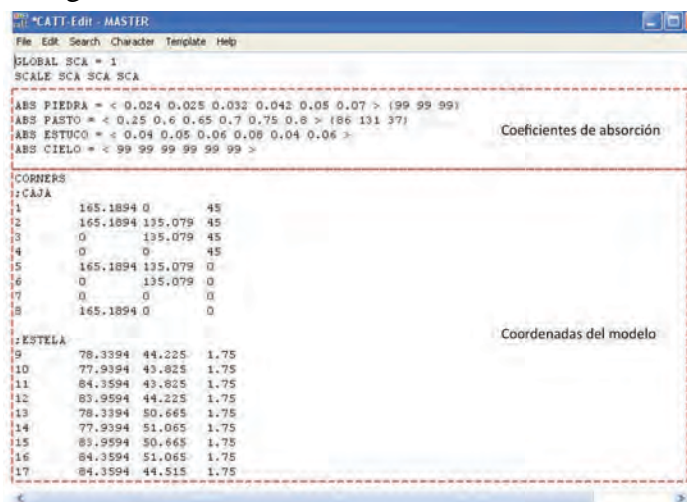


Figura 3.24 "Coeficientes de absorción y geometría en programa CATT Acoustic V.7". Fuente: Elaboración propia, 2015.

El segundo parámetro es el módulo de directividad. La directividad es el registro del nivel de presión sonora (NPS) en todos los ángulos que conforman una circunferencia. En el programa ésta se representa en un gráfico que es un círculo que tiene como nivel máximo de -50 dBA. La manera de obtener estos datos puede ser de dos maneras; la primera es tomar los valores que el programa tiene precargados y la segunda es obtener estos valores de una fuente sonora real en una cámara sonoamortiguada, anecóica o semianecóica para caracterizar la fuente. Éste último

consiste en colocar al centro la fuente y a 1 m de distancia y a cada 15 grados registrar con un sonómetro el NPS para posteriormente ingresar los datos al programa. Debido a que la escala del módulo de directividad (fig. 3.25) consta de un máximo NPS de -50 es necesario realizar la conversión, de tal manera que si el máximo NPS es de 80 dBA, éste corresponde a -50 y se realiza una regla de tres para las demás direcciones. Es importante recalcar que este proceso se debe realizar en las frecuencias de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2kHz, 4 Khz, 8 kHz y 16kHz, ya que el programa las necesita para realizar la predicción.

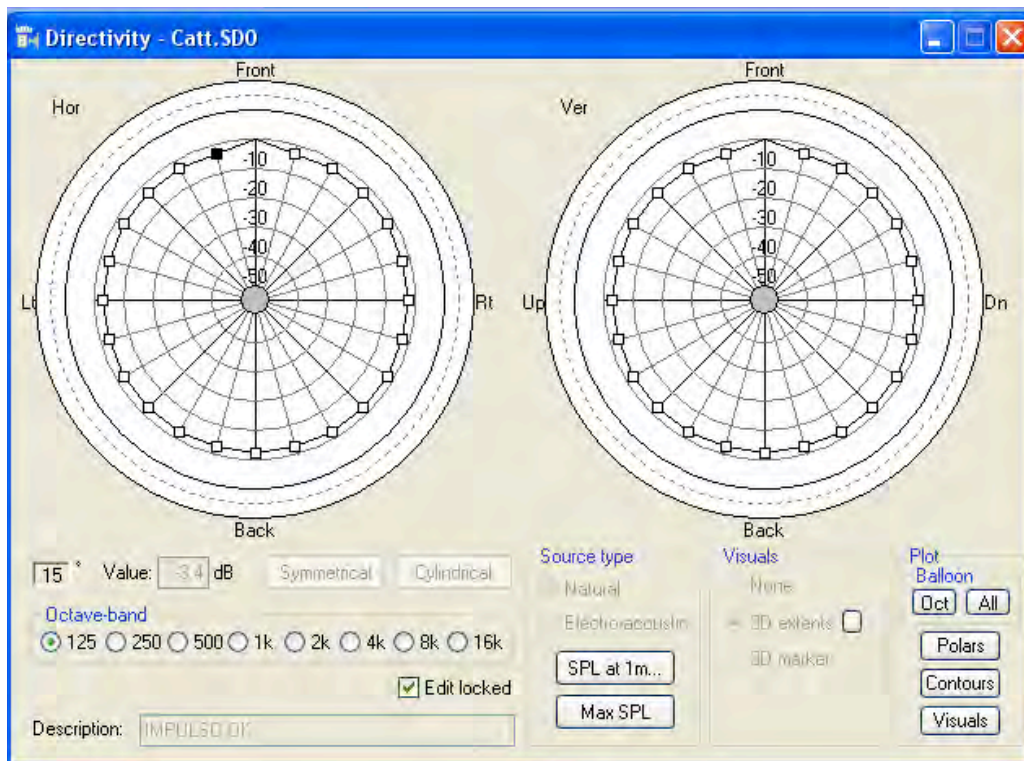


Figura 3.25 "Módulo de directividad" en CATT Acoustic. Fuente: Elaboración propia, 2015.

De igual manera se ingresan los valores numéricos a un metro en cada eje por cada frecuencia. Esto para niveles promedio y máximos (fig. 3.26 y 3.27).

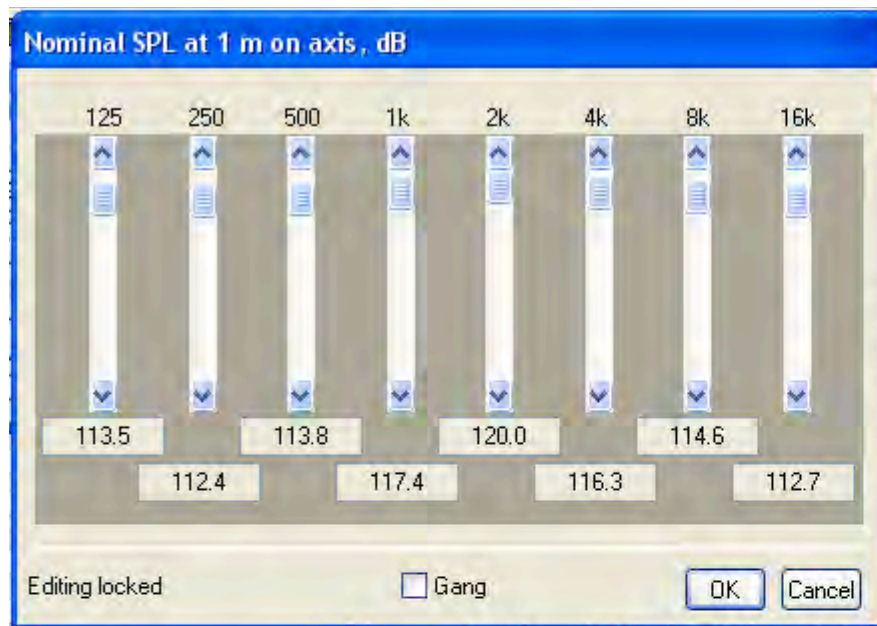


Figura 3.26 "NPS Nominal a 1m en el eje en dBA en CATT Acoustic". Fuente: Elaboración propia, 2015.

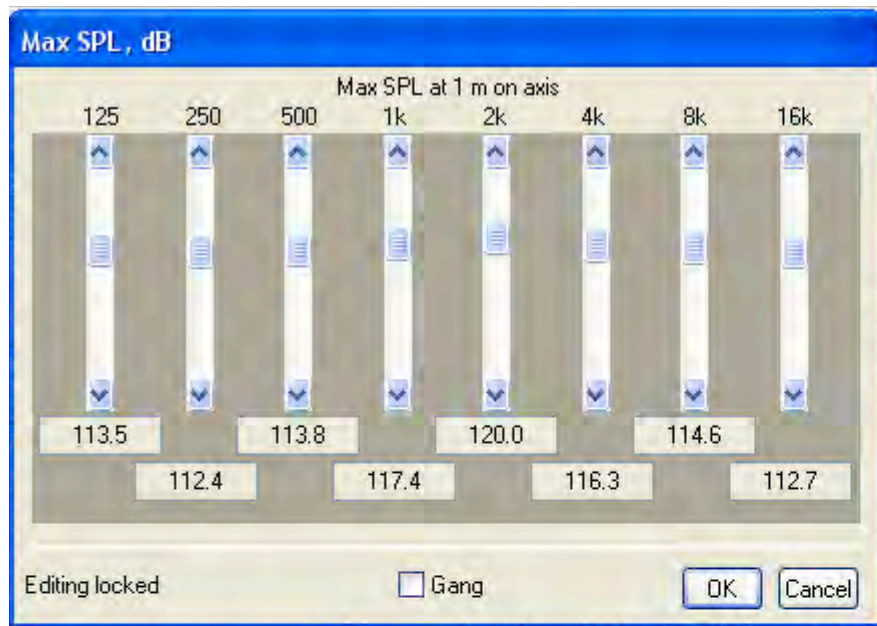


Figura 3.27 "NPS máximo a 1 m en el eje en dBa en CATT Acoustic". Fuente: Elaboración propia, 2015.

Posteriormente se ingresan los valores de temperatura, humedad y velocidad del viento, así como el ruido de fondo (fig. 3.28). Éste último se puede obtener en el sitio midiendo con un sonómetro los dBA de ruido ambiental.

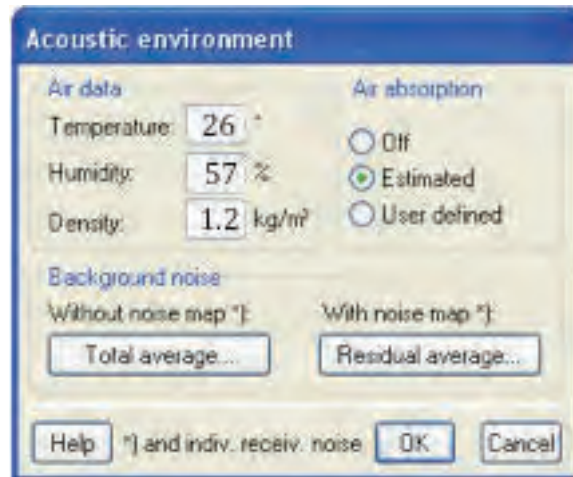


Figura 3.28 "Módulo de acústica ambiental en CATT Acoustic". Fuente: Elaboración propia, 2015.

Por último se ubica la localización de las fuentes y los receptores, (fig. 3.29) los cuales se ingresan de la misma forma que la volumetría, por medio de coordenadas.

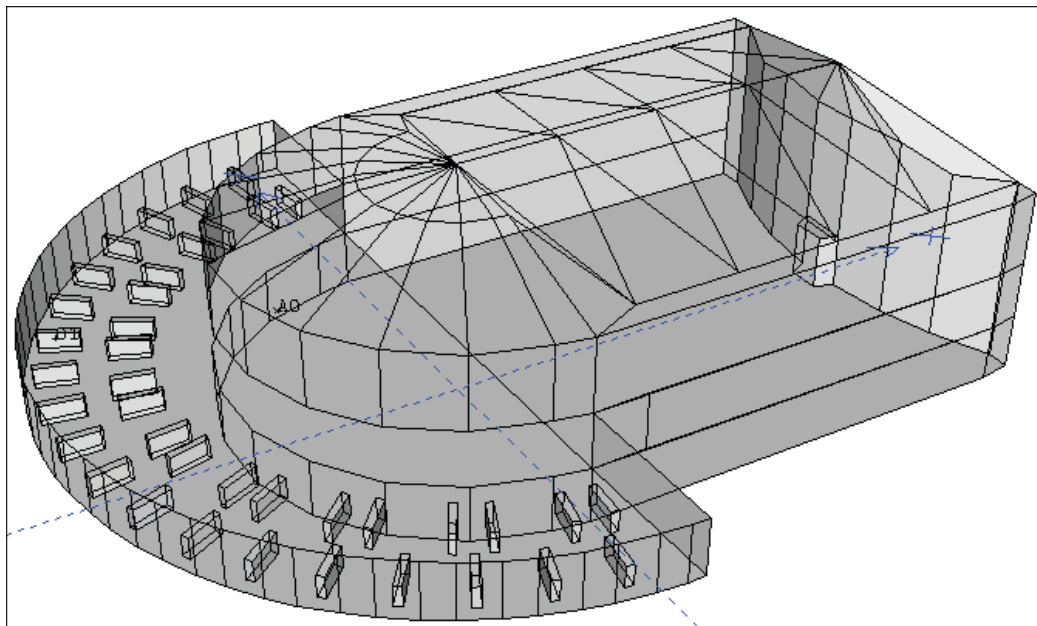


Figura 3.29 "Localización de fuentes y receptores en CATT Acoustic; A0 es fuente 0 y 01 es el receptor 1". Fuente: http://www.caesoft.es/productos/CATT/formacion/formacion_catt.htm, 2015.

2.- Mapeado de la audiencia: El módulo permite conocer los valores de la presión sonora, definición, claridad, tiempo de reverberación, nivel o grado de inteligibilidad y eficiencia lateral . Realiza el estudio para todas las fuentes y receptores y lo presenta por medio de colores en función del NPS y numéricamente (fig. 3.30).

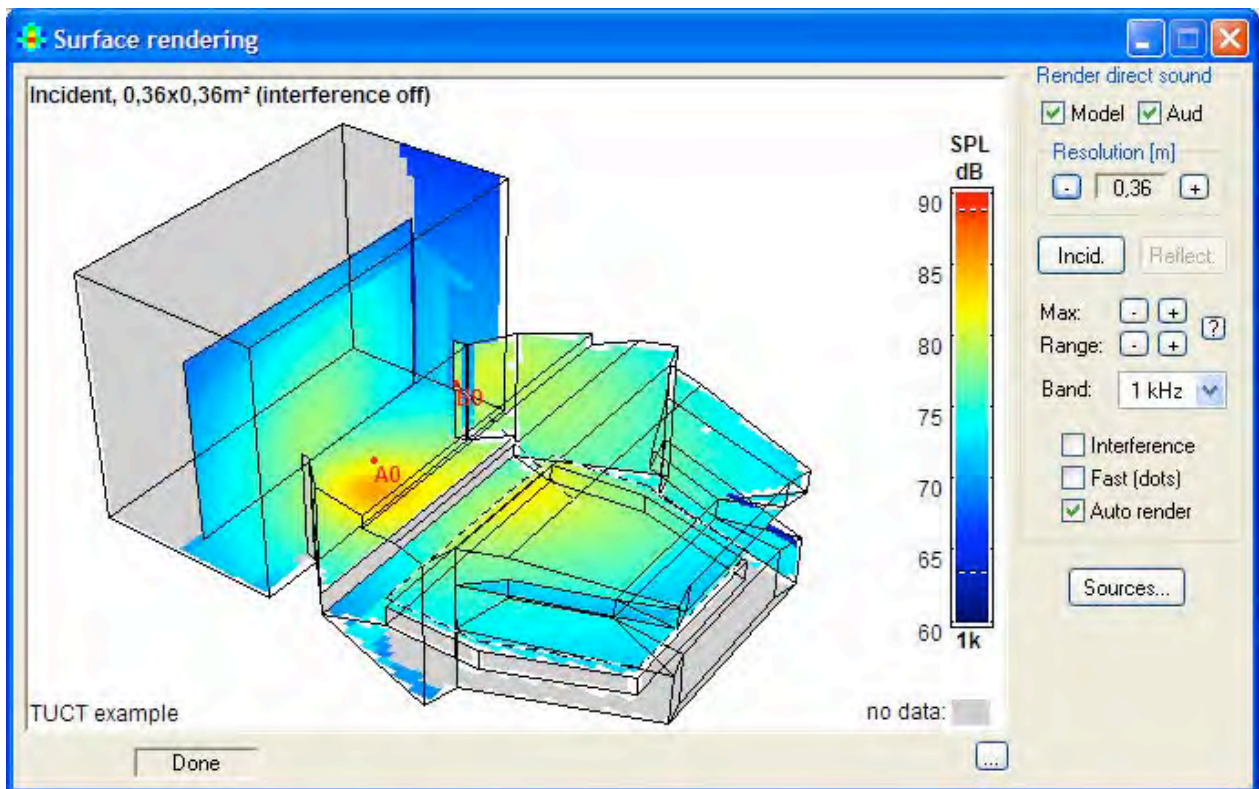


Figura 3.30 "Mapeo de auditorio". Fuente: <http://www.catt.se/TUCT/TUCToverview.html>, 2015.

3.- Cálculo total detallado: Muestra los valores de sonoridad, RASTI y eficiencia lateral, ecogramas y además de los valores de los parámetros que permite conocer el módulo de mapeado de audiencia (fig. 3.31 y 3.32).

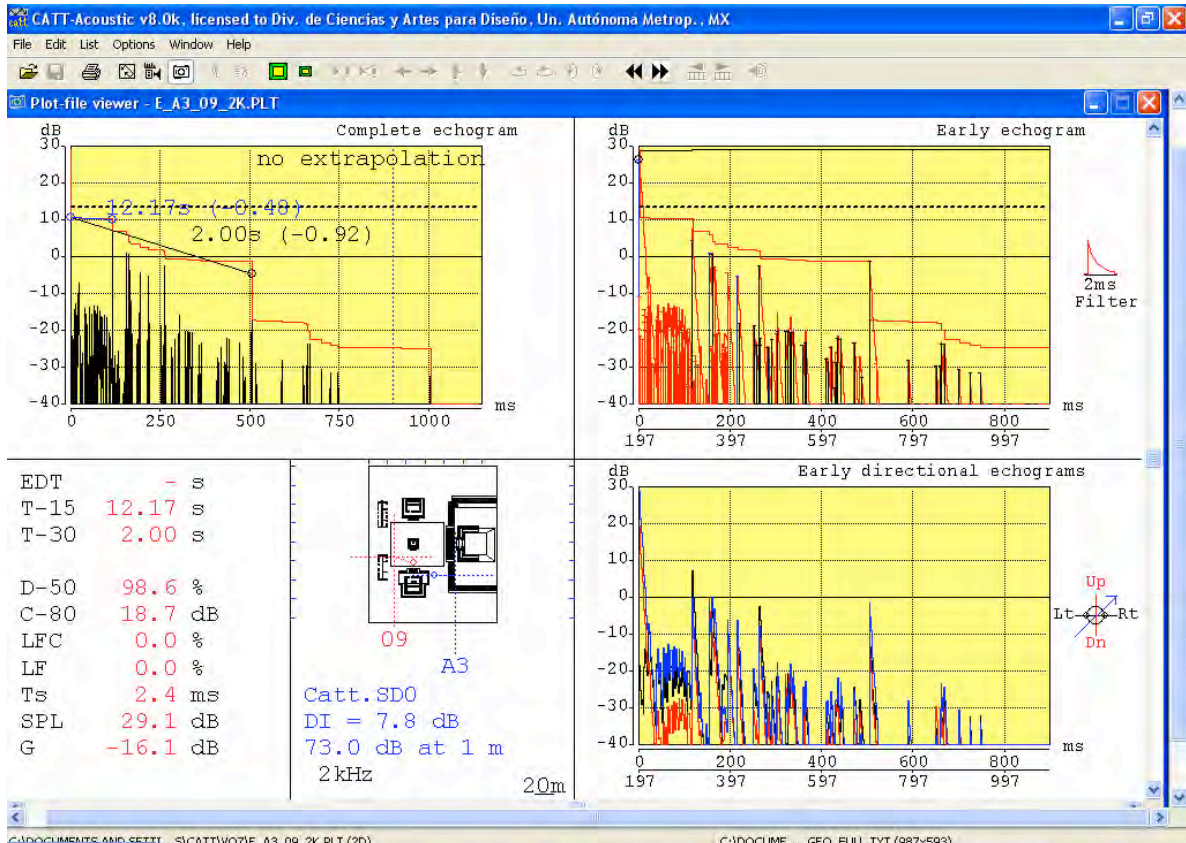


Figura 3.31 "Full detail calculation (cálculo total detallado) CATT Acoustic" Fuente: Elaboración propia, 2015.

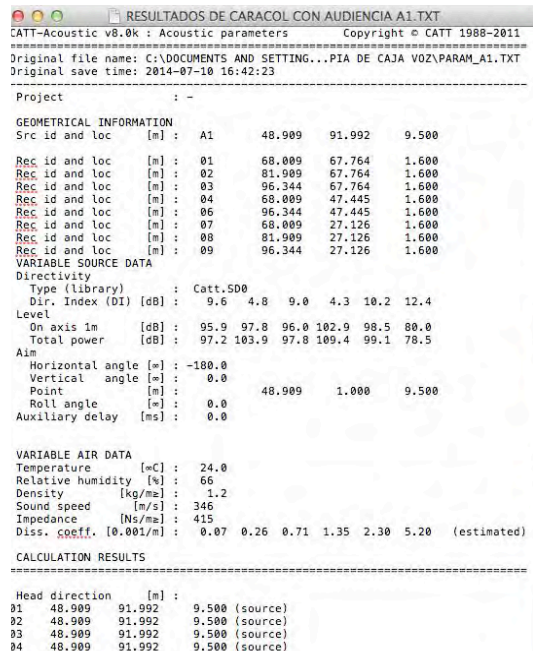


Figura 3.32 "Full detail calculation CATT Acoustic, hoja de resultados numéricos" Fuente: Elaboración propia, 2015.

De igual manera, el programa de simulación permite la predicción de sonido dentro del espacio en auralización.

La auralización es un término introducido por Mendel Kleiner, investigador de la Universidad Tecnológica de Chalmers, en 1990.

De acuerdo con Carrión (2001), es un sistema de creación de sonido virtual que, como su nombre lo indica, permite realizar una escucha, en cualquier punto de un recinto, de un mensaje oral o musical. Es preferible realizar la escucha con auriculares que a través de altavoces.

Existen dos tipos de sistemas de auralización; por convolución y mediante una unidad de reverberación digital.

Ambos sistemas se basan en el conocimiento previo de la denominada respuesta impulsional $h(t)$. Ésta respuesta, en un punto cualquiera del espacio estudiado, contiene toda la información sobre el campo sonoro. La $h(t)$ depende de la geometría del espacio, así como de sus materiales y la posición de la fuente sonora.

Para que la auralización sea lo más "real" posible, se deben conocer dos respuestas impulsionales :

$hR(t)$ = Respuesta impulsional en el oído derecho del receptor

$hL(t)$ = Respuesta impulsional en el oído izquierdo del receptor

Cuando se conocen ambas respuestas, entonces es posible obtener una auralización de tipo binaural o estéreo.

Sistema de auralización por convolución

1. Auralización monoaural: El sistema monoaural calcula la señal auralizada $y(t)$ por convolución de la respuesta impulsional $h(t)$ a partir de una señal de voz o instrumento $x(t)$ grabada previamente en un ambiente sonoamortiguado (denominada señal de excitación). La convolución se efectúa por medio de un procesador digital de señal DSP (Digital Signal Processor).

El esquema del proceso es el siguiente (fig. 3.33):

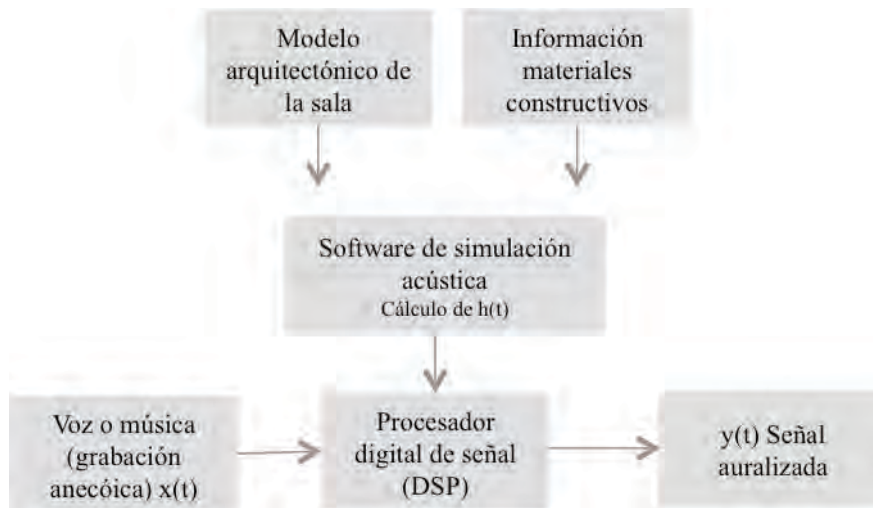


Figura 3.33 “Esquema representativo de un sistema de auralización monoaural por convulsión”. Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Carrión, A., 2001, pp. 383.

2. Auralización binaural (estéreo): La señal auralizada posee dos componentes :

$y_R(t)$: Canal derecho

$y_L(t)$: Canal izquierdo

Ambas se obtienen por convulsión de las respuestas impulsionales $h_R(t)$ y $h_L(t)$, respectivamente por medio de la fuente o señal de excitación $x(t)$.

El procedimiento representativo se esquematiza de la siguiente manera (fig. 3.34):

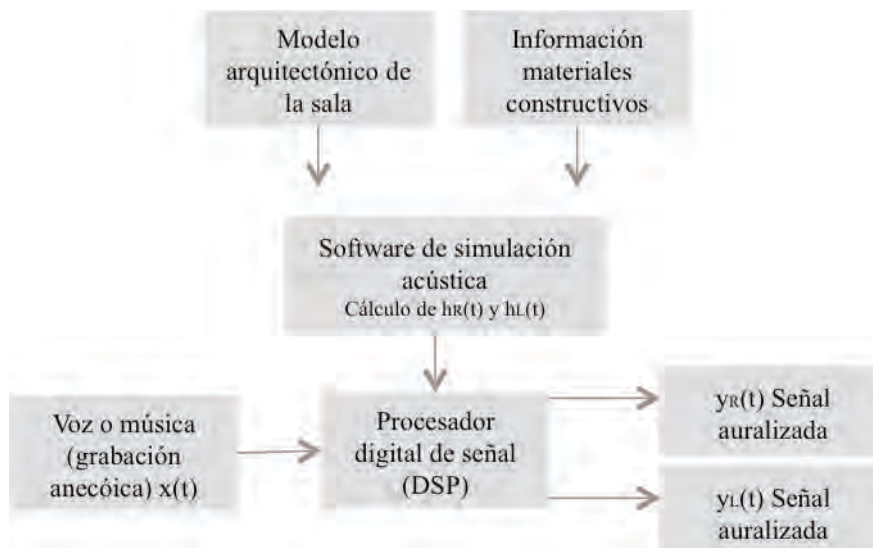


Figura 3.34 “Esquema representativo de un sistema de auralización binaural por convulsión”. Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Carrión, A., 2001, pp. 383.

Existe también el sistema de auralización mediante una unidad de reverberación digital, que tiene un procedimiento similar al de auralización binaural, sin embargo, a través de los valores numéricos de diversos parámetros modula la señal.

Como conclusión, el programa de simulación CATT Acoustic proporciona datos de predicción del comportamiento del sonido de un determinado espacio a través de valores de parámetros de evaluación de salas, mapeos y auralización.

Sin embargo es necesario tener criterio para el manejo del programa. Conocer todos los factores que influyen en la predicción para inicialmente establecer la volumetría, valores de coeficientes de absorción correctos y datos climáticos lo más cercano a la realidad.

Son diversos los factores que influyen, si el estudio es especial (donde no existen ciertos parámetros estudiados) se requiere de trabajo de laboratorio para realizar una predicción acertada. Entre dichos trabajos destacan la caracterización de los sonidos, la determinación del coeficiente de absorción de los materiales y el registro del nivel de ruido de fondo, entre otros.

Capítulo 4 Medición y simulación en La Plaza de la Estela de los Dos Glifos

El objetivo de la investigación es conocer las cualidades acústicas de la Plaza. Para ello se establecieron los parámetros de evaluación de acústica aplicables a recintos tanto para lenguaje y música, mismos que se obtuvieron por medio de mediciones acústicas en sitio y simulaciones por computadora.

4.1 Método

Para la comprobación de la hipótesis se realizó un trabajo de tipo analítico, ya que la naturaleza del problema incluye aspectos arquitectónicos, acústicos y antropológicos. Se consultaron fuentes impresas y electrónicas de Xochicalco para conocer el sitio en tiempo, espacio, arquitectura, ceremonias posibles realizadas y opiniones de diversos arqueólogos. Lo anterior permitió resolver distintos aspectos para la realización del análisis, tales como la ubicación de la fuente, los tipos de fuente, los materiales y las condiciones ambientales; aspectos fundamentales para la prueba.

Para determinar el diseño de la prueba se realizó un trabajo que consistió en la investigación documental de Xochicalco, en la cual se consultó el material disponible de Xochicalco para determinar los materiales de construcción, instrumentos que se utilizaron en la plaza, condiciones ambientales de temperatura y humedad, uso de la plaza y posición de las fuentes, es decir, dónde se ubicaba el gobernante para comunicar el mensaje.

También se realizó la investigación documental de acústica en la cual se consultaron diversos autores que evalúan por medio de fórmulas las condiciones acústicas de espacios abiertos y cerrados (explicadas en el capítulo anterior) que se resumen en las siguientes tablas (tabla 4.1 y 4.2):

LENGUAJE

Parámetro acústico	Audiencia /vacío	Valor recomendado	Unidad	Descripción
Tiempo de reverberación RT (500 Hz a 1 kHz)	Espacio con audiencia	$0.7 \leq Rt \leq 1.2$	s	Tiempo transcurrido desde que una fuente emisora interrumpe su emisión hasta que el NPS cae en 60 dB.
Claridad de la voz C50 (speech average)	Espacio con audiencia	$C50 > 2$	dBA	Grado de facilidad para comprender un mensaje oral
Definición D (125 Hz a 4 kHz)	Espacio con audiencia	$D > 0.5$ (50%)	s/u	Grado de facilidad para comprender los sonidos de un mensaje oral
RASTI	Espacio con audiencia	$RASTI \geq 0.65$ (65%)	s/u	Grado de inteligibilidad de la palabra
Sonoridad media Gmid (500 Hz a 2 kHz)	Espacio con audiencia	$4 \leq Smid \leq 8$ dB (orientación frontal actor) $2 \leq Smid \leq 6$ dB (orientación lateral actor)	dBA	Grado de amplificación que produce un espacio sobre el mensaje oral emitido

Tabla 4.1 "Parámetros de evaluación de salas para lenguaje". Adaptado de Carrión (2001)

MÚSICA

Parámetro acústico	Audiencia /vacío	Valor recomendado	Unidad	Descripción
Tiempo de reverberación RT (500 Hz a 1 kHz)	Espacio con audiencia	1.6	s	Tiempo transcurrido desde que una fuente emisora interrumpe su emisión hasta que el NPS cae en 60 dB.
Claridad musical media C80 (music average) (500 Hz a 2 kHz)	Espacio con audiencia	$-4 \leq C80 \leq 0$	dBA	Grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical.
	Espacio vacío	$-2 \leq C80 \leq +2$	dBA	
Sonoridad media Gmid (500 Hz a 1 kHz)	Espacio vacío	$4 \leq Gmid \leq 5.5$	dBA	Grado de amplificación producido por la sala
Eficiencia lateral media LFE (125 a 1 kHz)	Espacio vacío	$LFE \geq 0.19$	s/u	Impresión espacial del sonido. (amplitud aparente de la fuente sonora)

Tabla 4.2 "Parámetros de evaluación de salas para música". Adaptado de Carrión (2001)

De igual manera se consultaron documentos de normatividad vigente para evaluaciones acústicas, mismas que permitieron conocer el desarrollo de una caracterización de sonido en una cámara sono-amortiguada, el formato de reporte de pruebas y determinar los niveles de ruido ambiental.

a) NOM-AA-62 Acústica - Determinación de los niveles de ruido ambiental: De acuerdo con esta norma, para la obtención de valores acústicos de una zona es posible elegir diversas posibilidades de tiempo, entre ellas, 24 horas, 7 días, 30 días o más. En esta investigación consideramos una prueba de un día para medición en sitio y simulación anual o promedio (temperatura y humedad) en el programa de simulación por computadora.

De igual manera de esta norma se consideró la sección de selección de instrumentos. La norma indica que es posible utilizar sonómetros para la realización de las mediciones, por lo que en sitio se utilizó un sonómetro o analizador de sonido marca NORSONIC modelo 140.

Las mediciones se realizaron en ponderación de frecuencia A y en modo "Peak" en cuatro frecuencias; 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz con el un sonómetro NOR140. (fig. 4.3).

b) ISO 3382 Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters: Se utilizó uno de los dos métodos de evaluación acústica propuesto en la norma (método de respuesta de impulso integrado y ruido rosa).

El método de respuesta de impulso integrado establece que la respuesta al impulso se puede medir directamente utilizando una fuente de impulso: como un disparo de pistola o cualquier otra fuente que no sea reverberante, siempre y cuando su espectro sea lo suficientemente amplio como para cumplir el requisito. Por otra parte la fuente de impulso deberá ser capaz de producir un nivel de presión acústica de pico suficiente para garantizar una curva de caída a partir de al menos 45 dB por encima del nivel de ruido de fondo en la banda de frecuencia correspondiente.

No se utilizó el método de ruido rosa, ya que el sitio no cuenta con electricidad, por lo que resultó complicado colocar la fuente de ruido en la pirámide.

c) ISO 26101: 2012 Acoustics - Test methods for the qualification of free field environments: Se retomaron los datos de los cuales se compone el formato de llenado de un reporte acústico tales como; localización, fecha, hora, temperatura, humedad, velocidad de viento, croquis con localización de fuentes y receptores, tiempo de duración de cada medición y NPS.

4. Conocer el programa de simulación acústica CATT Acoustic: Fue necesario manejar el programa para tener conocimiento de los valores que se necesitan ingresar al mismo, así como los valores que comprende la evaluación.

Para la realización del diseño de la prueba fue necesario conocer diversos aspectos desde los cuales partiría la misma, tales como los materiales a emplear, fuentes sonoras y su localización.

Para ello la historia de la reconstrucción de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos nos indica los materiales a utilizar en la simulación por computadora, para determinar los coeficientes de absorción de los mismos, así como la justificación de la recreación de dos escenarios en la simulación por computadora. Para validar las condiciones actuales del sitio en el modelo de simulación se consideró la piedra como acabado real. Una vez validado el modelo se utilizó la piedra con recubrimiento de estuco, que era el acabado original de la época.

Las excavaciones realizadas por el Arqueólogo César Sáenz permitieron establecer el tipo de fuentes sonoras que posiblemente fueron utilizadas durante las ceremonias. En la región del Altiplano central, a pesar de la herencia multicultural, existía el predominio de la lengua náhuatl, por lo que para la fuente sonora del mensaje oral esto fue considerado.

Por otra parte se eligió el sonido del caracol trompeta o *Strombus Gigas*, ya que un ejemplar fue hallado en uno de los basamentos de la Plaza (como se mencionó en el capítulo 2), lo que evidencia el posible culto a Tláloc.

Finalmente, la información obtenida a través de la Arqueóloga Silvia Garza Tarazona permitió conocer la posible ubicación de las personas que participaban en los ritos, así como el lugar desde el cual se emitía el mensaje oral y musical quien por medio de una comunicación escrita estipuló que posiblemente la población en tiempos antiguos se ubicaba en la explanada y se comunicaba un mensaje por un tlatoani desde el primer descanso de la Gran Pirámide. Es así como con el previo conocimiento de los factores anteriormente descritos fue posible determinar el procedimiento a seguir para realizar la prueba (fig. 4.1).

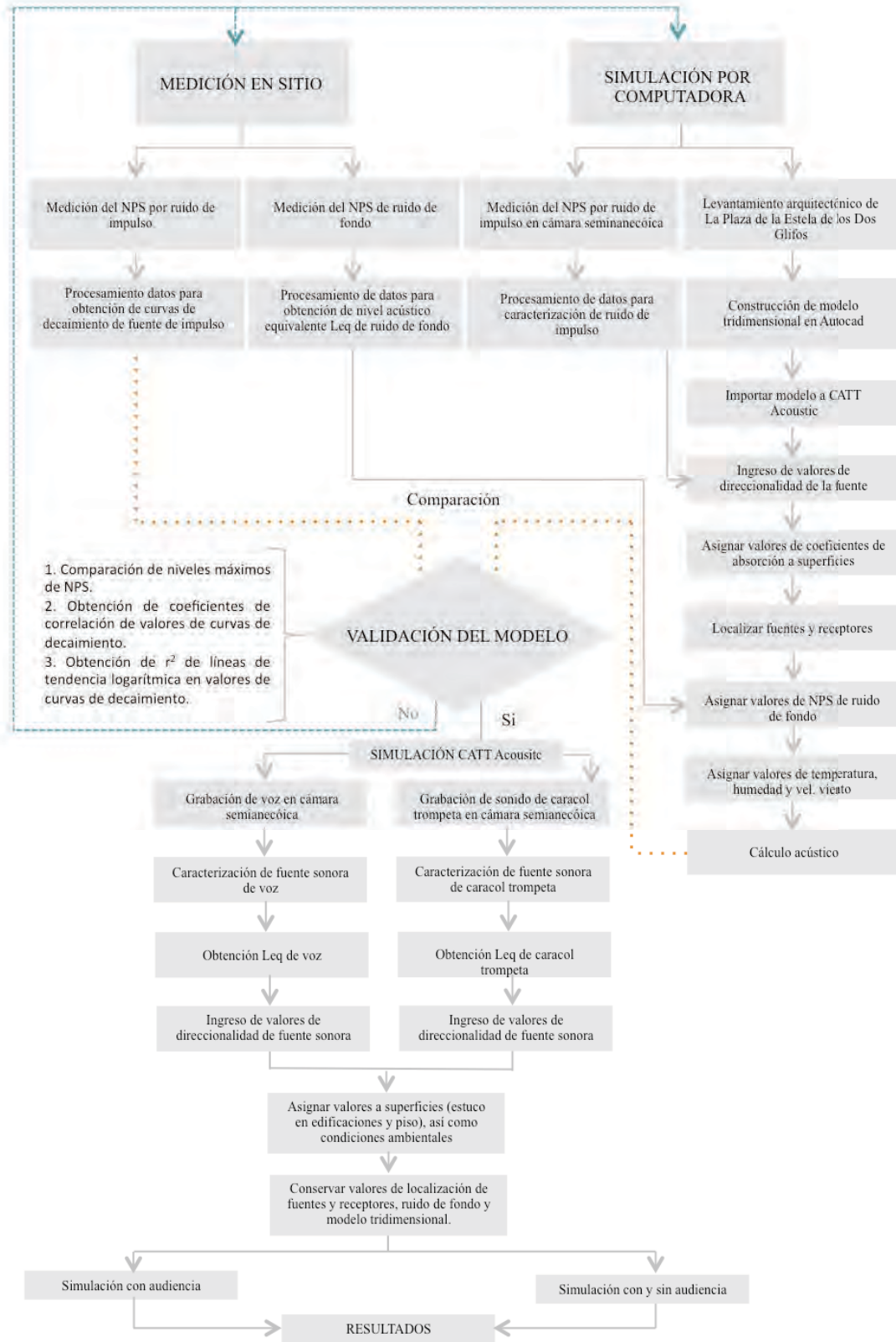


Fig. 4.1 "Diagrama de procedimiento de la prueba". Elaboración propia, 2015.

4.2 Diseño de la prueba

El objetivo principal de la prueba es obtener los valores de los parámetros acústicos que usualmente se utilizan para la evaluación de salas, a través del programa de simulación CATT Acoustic, para ello fue necesario establecer las siguientes etapas:

- 1) Validar la simulación por medio de la comparación de la medición en sitio con el programa CATT Acoustic.
- 2) Obtener los resultados de la simulación para los dos tipos de fuentes sonoras.

La validación constó del siguiente procedimiento

1.- Realizar la medición en sitio: El objetivo de realizar la medición en sitio es comparar la respuesta acústica que presenta este espacio contra la simulación. Éstas deben de ser cercanas ya que así será posible validar que la simulación en presencia de las dos fuentes sonoras sea válido.

La medición consta de emitir un ruido de impulso (en este caso el disparo de una pistola de competencia) desde el primer descanso de la pirámide (ya que ahí se transmitía el mensaje oral) y medir la respuesta acústica de espacio en diferentes puntos de la Plaza ceremonial por medio de un sonómetro para obtener las curvas de decaimiento y su NPS en dBA de diversas frecuencias. De igual manera se registra con el sonómetro el nivel de ruido de fondo ya que estos valores se ingresan al programa de simulación. Se procesan los datos para obtener el promedio y así poderlas comparar.

2.- Grabación y caracterización de ruido de impulso: Esto se realizó en la cámara semianecóica del Laboratorio de Diseño Acústico de la UAM-A y consta de emitir el disparo al centro de la misma y medir su NPS con el sonómetro. Posteriormente estos datos se procesan y se ingresan al programa de simulación, o que es llamado caracterización.

3.- Simulación por computadora: Una vez obtenida la caracterización y el ruido de fondo en el sitio se realiza la simulación. Para ello se debe elaborar un levantamiento 3D en ingresar diversos valores, explicados más ampliamente en el siguiente apartado.

4.- Análisis de datos de la simulación: Se realizan dos tipos de análisis. Se comparan los puntos máximos en dBA de cada medición y se analiza por coeficiente de correlación; posteriormente se analizan todas las curvas de decaimiento para observar su correspondencia. Si presentan un porcentaje favorable de más del 90% se puede proceder a la simulación final.

3. Simulación por computadora

En la cámara semi-anecóica se caracterizó la misma fuente de impulso que se utilizó en la medición. Posteriormente se realizó el levantamiento arquitectónico de la plaza y se modeló en 3D para ingresarlo a CATT Acoustic. Una vez realizado esto, se ingresaron los valores de los coeficientes de absorción de los materiales y se localizaron las fuentes y los receptores. Finalmente se caracterizaron las dos fuentes sonoras en la cámara sonoamortiguada.

La simulación por computadora final consta de ingresar al módulo de direccionalidad los valores de voz y posteriormente de caracol, dependiendo de la que se requiera realizar. Se modifican valores como el coeficiente de absorción y condiciones ambientales para así obtener los valores de acústica de salas y poder interpretar los resultados.

4.3 Validación de la simulación

4.3.1 Medición en sitio

Se realizó para obtener curvas de decaimiento y NPS por medio de ruido de impulso.

En cualquier prueba de deben de determinar los puntos de medición necesarios para que el modelo sea válido. En este caso se empleó la NOM-AA-62 en la cual se menciona que para obtener los puntos mínimos de medición en un espacio se debe de aplicar la siguiente fórmula:

$$d = 2 \sqrt{(V / (tr \times c))} \dots ec. 4.1$$

Donde:

V= Volumen de la Plaza

c = Velocidad del sonido

tr = tiempo de reverberación tentativo

Que en el caso específico de la Plaza:

Velocidad del sonido (Fór. 30):

$$V = 331 + 0.6 (\text{Temperatura}) \dots ec. 4.2$$

$$V = 331 + 0.6 (24.7)^*$$

$$V = 345.8 \text{ m/s}$$

Volumen de la Plaza (For. 31):

$$L \times A \times h \dots ec. 4.3$$

Largo y ancho: 60 m

Altura: 8 m

$$\text{Volumen: } 60 \times 60 \times 8^{***} = 28,800 \text{ m}^3$$

Distancia mínima entre puntos de medición:

$$D = 2\sqrt{(28,800 / 345.8 \times 0.95^{**})}$$

$$D = 18.73 \text{ m (por lo que se determinaron 9 puntos de medición)}$$

*Temperatura mes de Abril de acuerdo a datos de CONAGUA.

** Datos de acuerdo a tabla de parámetros acústicos del lenguaje (Saad, 2011) en donde se especifica el valor del tiempo de reverberación entre 0.7 y 1.2 s.

*** Altura hasta el primer descanso de la pirámide.

La medición se realizó de tal forma de obtener las curvas de decaimiento y los niveles sonoros en campo por lo que se elaboró lo siguiente:

- Se establecieron los 3 puntos de localización de la fuente o emisor en el primer descanso de la Gran Pirámide (A, B y C de fig. 4.2).

- Se marcaron los 9 puntos de medición en la Plaza y se colocó el sonómetro sobre el tripié a 1.60 m de altura en el punto 1.
- Se realizó el disparo y se registraron los niveles sonoros con el sonómetro.
- Se posicionó el sonómetro en otro punto y se repitió el proceso hasta la obtención del registro de los 9 puntos de medición.

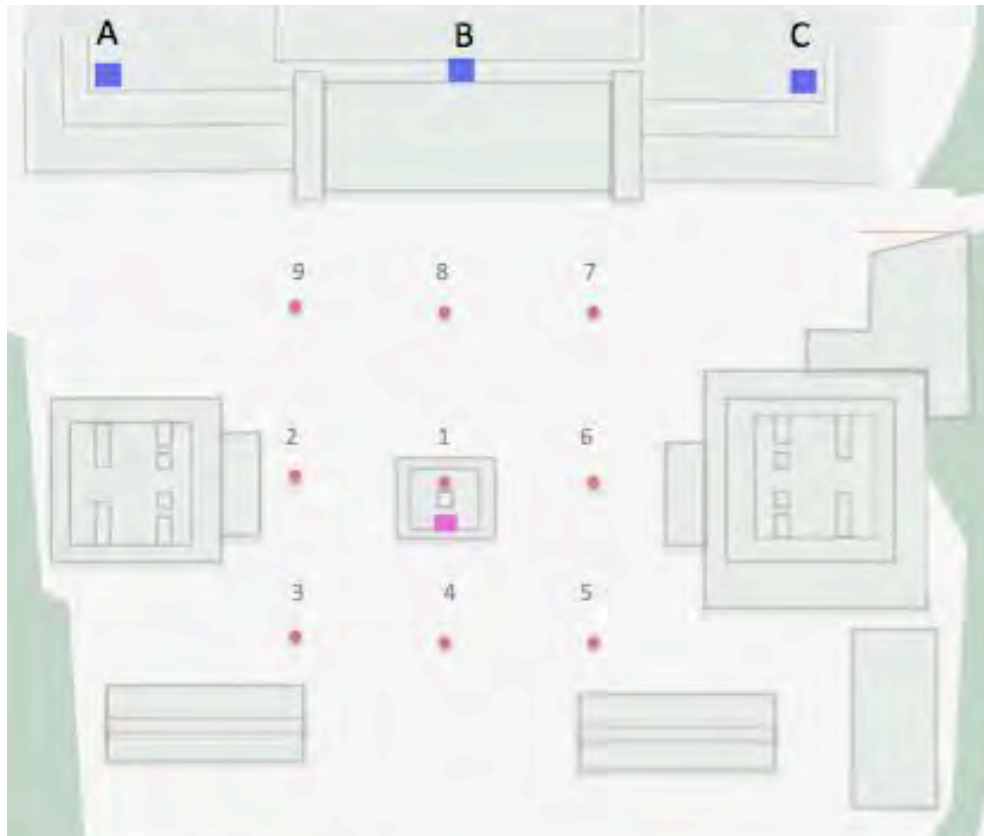


Fig. 4.2 “Localización de equipo de medición en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos”. Elaboración propia, 2014.

A,B,C: Localización de la fuente (disparo)

1 – 9 :Puntos de medición de sonómetro

Anemómetro al centro de la plaza

NOTA: Se utilizó un anemómetro (fig. 4.3) para medir la temperatura y viento durante la medición proporcionado por el laboratorio de Arquitectura Bioclimática, modelo Kestrel 4200 (Pocket Air Flow Tracker).



Fig. 4.3 “Anemómetro marca Kestrel 4200”. Elaboración propia, 2014.

2. Medición en sitio para obtener nivel de ruido de fondo

En el sitio, al centro de la Plaza se registró el nivel de ruido de fondo con el sonómetro en una duración de 10 segundos. Posteriormente se promedió y los valores se ingresaron al programa de simulación.

La medición acústica en sitio se realizó de acuerdo a la metodología establecida anteriormente en el diseño de la prueba. Se emitió un ruido de impulso en tres diferentes localizaciones en el primer descanso de la Gran Pirámide durante 10 s y se registraron los NPS en 9 puntos de Plaza en 16 frecuencias (fig. 4.3). Se obtuvieron los valores de decaimiento de NPS por frecuencia, mismos que se muestran en las gráficas del apartado de validación.

También se registró el nivel de ruido de fondo, datos que se muestran más adelante.

4.3.2 Grabación y caracterización del ruido de impulso

Para la validación entre la medición realizada en sitio y el programa de simulación, fue necesario realizar la caracterización del ruido de impulso con la misma fuente que se utilizó en la medición. En este caso fue una pistola de competencias.

La caracterización de los sonidos se realizó en la cámara sonoamortiguada del LADAc en la UAM-A (fig. 4.4). Se marcaron veinticuatro puntos formando un círculo alrededor del centro a 1 m de distancia. Es decir, un punto cada 15° (fig. 4.5).

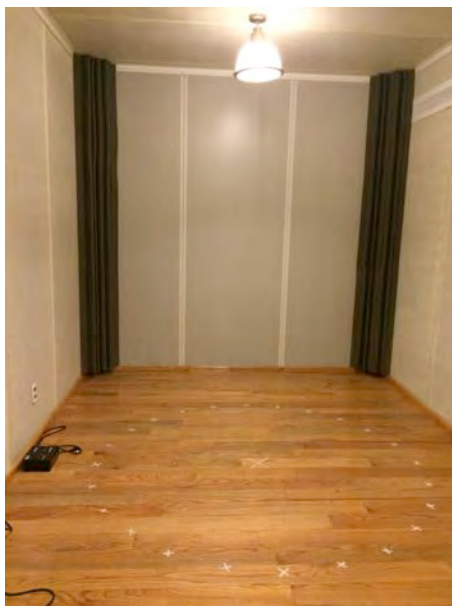


Fig. 4.4 “Puntos de medición para caracterización en LADAc, UAM-A”.
Elaboración propia, 2014.

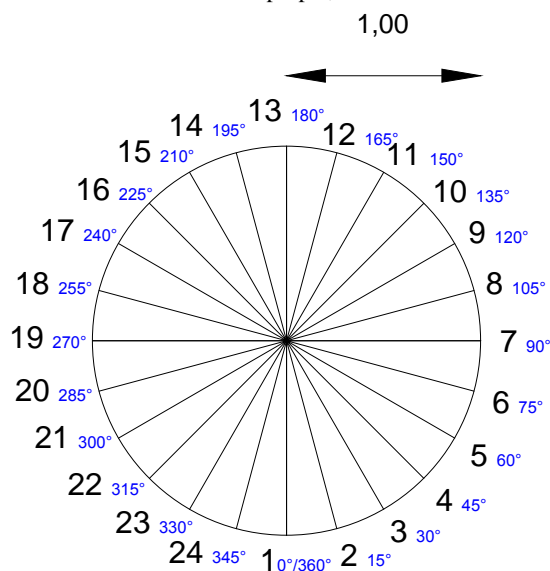


Fig. 4.5 “Esquema de puntos de medición para caracterización”. Elaboración propia, 2014.

Se emitió un disparo y se registró por medio del sonómetro el NPS en todas las diferentes posiciones (fig. 4.6).



Fig. 4.6 “Medición de ruido de impulso en el LADAc de la UAM-A”. Elaboración propia, 2014.

Sin embargo los datos obtenidos fueron los mismos en todos los ángulos, esto debido a que un disparo es una fuente omnidireccional (tabla 4.3).

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1.0 kHz	2.0 kHz	4.0 kHz	8.0 kHz	16.0 kHz
dBA	113,5	112,4	113,8	117,4	120,7	116,3	114,6	112,7
CATT	-3,0	-3,5	-3,0	-1,0	0,0	-1,5	-2,5	-3,5

Tabla 4.3 “Valores máximos de NPS de ruido por impulso y valores ingresados al módulo de direccionalidad en CATT Acoustic. Elaboración propia”. 2014.

Debido a que el módulo de direccionalidad presenta una escala de -50 dBA, es necesario como se ha explicado en el Capítulo 3, inciso 3.4.3 realizar una conversión para escalar los valores obtenidos, de tal manera que si el Leq máximo en este caso es de 120,7 a éste valor se le asigna cero y correspondientemente se generan los demás valores. Si 120,7 es a 0, 112,7 es a -3.5.

Una vez obtenidos los valores de direccionalidad de las fuentes se procedió a ingresarlos al programa de simulación.

4.3.3 Simulación por computadora

Se realizó la simulación por computadora en las mismas condiciones que la medición en sitio; es decir, se consideraron los materiales con los que las edificaciones están construidas actualmente, los datos climáticos presentes durante la medición (viento, temperatura y humedad), directividad del ruido de impulso, ruido de fondo y geometría, lo anterior para tener la posibilidad de comparar los valores de NPS entre la medición en sitio y la simulación.

Se realizó el siguiente procedimiento:

1. Modelado 3D
2. Ingresar los coeficientes de absorción de las superficies
3. Localización de fuentes y receptores
4. Ruido de fondo
5. Condiciones ambientales
6. Cálculo acústico CATT
7. Obtención de resultados

4.3.3.1 Modelado 3D

Para construir el modelo por computadora fue necesario realizar el levantamiento arquitectónico de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos (fig. 4.7). Se utilizó un distanciómetro digital y se registraron las dimensiones de las seis estructuras que incluyeron: la Gran Pirámide, las estructuras C y D, los conjuntos habitacionales (aunque no han sido restaurados) y la estructura de la Estela. Se tuvo especial cuidado en dimensionar correctamente las superficies reflejantes de las estructuras. De igual manera se tomó el registro de los materiales existentes para determinar posteriormente los coeficientes de absorción sonora correctos.



Fig. 4.7 “Levantamiento arquitectónico en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos”. Erick Plesent, 2014.

Se dibujó el plano arquitectónico en Autocad, se realizó el modelo 3D (fig. 4.8 y 4.9) y se dibujó cada cara con la herramienta 3D Face.

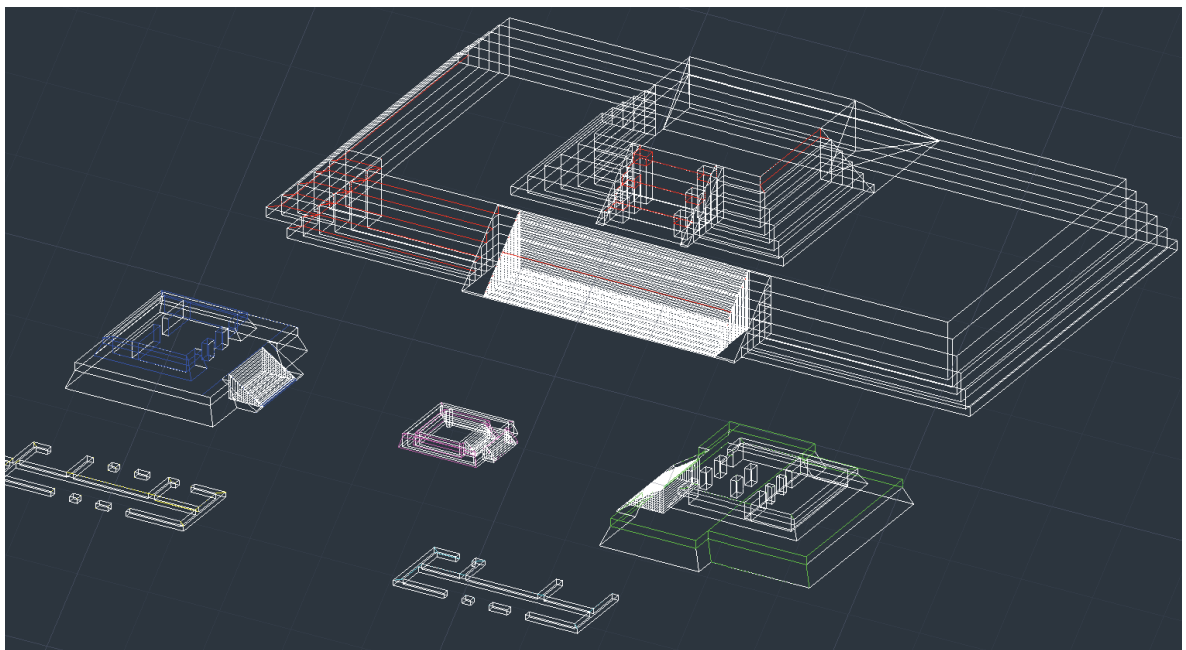


Fig. 4.8 "Modelo volumétrico 3D Face la Plaza de la Estela de los Dos Glifos en Autocad". Elaboración propia, 2014.

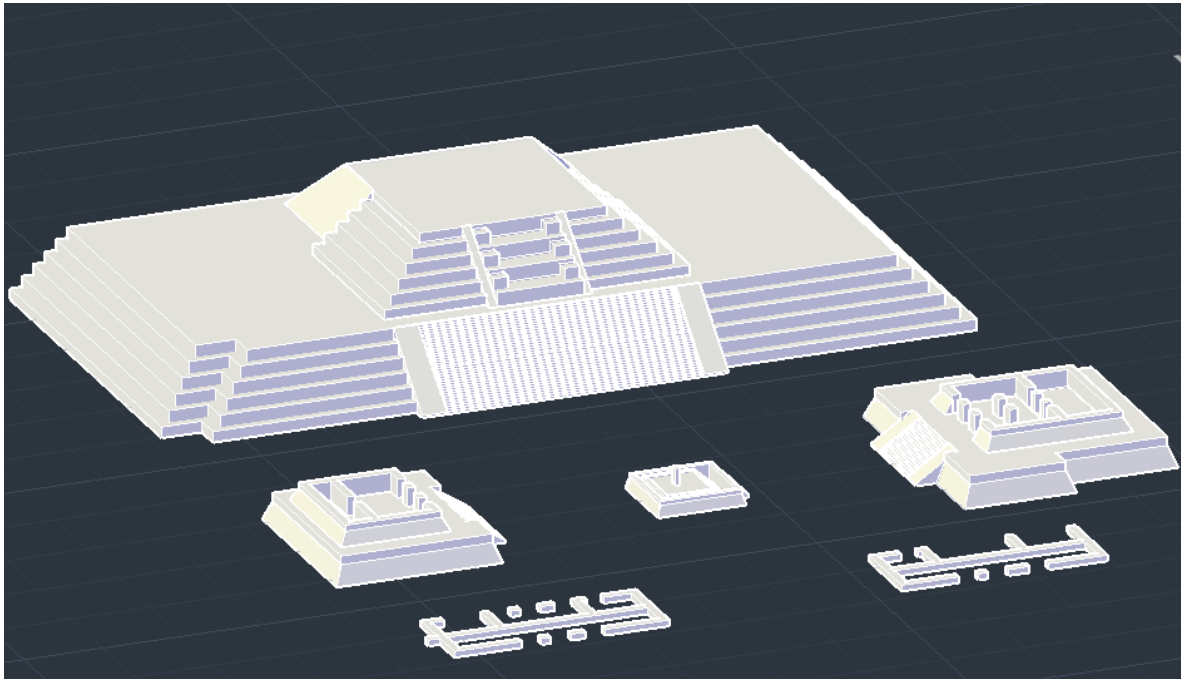


Fig. 4.9 "Modelo volumétrico de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos en Autocad". Elaboración propia, 2014.

Posteriormente se importaron las estructuras (de manera individual) al programa CATT Acoustic (fig. 4.10).

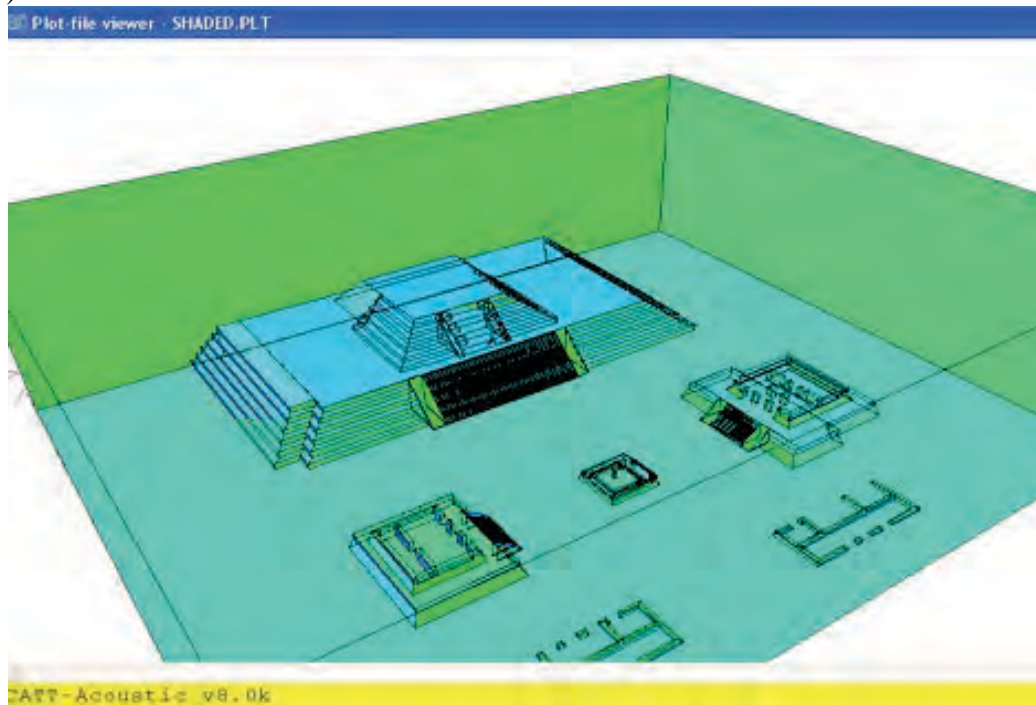


Fig. 4.10 "Modelo tridimensional de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos en CATT Acoustic".
Elaboración propia, 2014.

Se realizó la programación de puntos y planos consecutivos (fig. 4.11) para integrar las edificaciones en un solo modelo, incluyendo los materiales de los que estaría compuesta cada cara. El modelo consta de 703 planos (planes) y 1139 puntos (corners).

The screenshot shows the 'CATT-Edit - MASTER' application window. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Search', 'Character', 'Template', and 'Help'. The main window displays a list of planes under the heading 'PLANES'. The list is organized into two sections: ':CAJA' and ':ESTELA'. Each entry in the list consists of a plane number in brackets, followed by a status (NO), a name (NAME), a character (backslash or slash), and a series of numbers representing corner IDs, ending with a material name in all caps and a closing bracket. The materials listed are 'CIELO' for the CAJA section and 'PIEDRA' for the ESTELA section.

Plane	Status	Name	Char	1	2	3	4	Char	Material
[1	NO	NAME	\	1	2	3	4	\	CIELO
[2	NO	NAME	/	5	2	3	6	/	CIELO
[3	NO	NAME	/	7	4	1	8	/	CIELO
[4	NO	NAME	/	8	1	2	5	/	CIELO
[5	NO	NAME	\	3	6	7	4	\	CIELO
:ESTELA									
[6	NO	NAME	/	9	10	11	12	/	PIEDRA
[7	NO	NAME	/	13	14	10	9	/	PIEDRA
[8	NO	NAME	/	15	16	14	13	/	PIEDRA
[9	NO	NAME	/	12	11	16	15	/	PIEDRA
[10	NO	NAME	/	17	18	19	20	/	PIEDRA
[11	NO	NAME	/	18	21	22	19	/	PIEDRA
[12	NO	NAME	\	20	23	22	19	\	PIEDRA
[13	NO	NAME	/	17	24	21	18	/	PIEDRA
[14	NO	NAME	/	25	26	27	28	/	PIEDRA
[15	NO	NAME	/	25	28	29	30	/	PIEDRA
[16	NO	NAME	/	16	31	32	14	/	PIEDRA
[17	NO	NAME	/	28	27	33	29	/	PIEDRA
[18	NO	NAME	/	29	33	34	30	/	PIEDRA
[19	NO	NAME	/	30	35	31	16	/	PIEDRA
[20	NO	NAME	/	11	36	37	17	/	PIEDRA
[21	NO	NAME	/	10	38	36	11	/	PIEDRA
[22	NO	NAME	/	14	32	38	10	/	PIEDRA
[23	NO	NAME	/	32	39	40	38	/	PIEDRA
[24	NO	NAME	/	38	40	41	36	/	PIEDRA
[25	NO	NAME	/	36	41	42	37	/	PIEDRA
[26	NO	NAME	/	35	43	44	31	/	PIEDRA
[27	NO	NAME	/	31	44	39	32	/	PIEDRA
[28	NO	NAME	/	45	46	47	48	/	PIEDRA
[29	NO	NAME	/	49	50	46	45	/	PIEDRA
[30	NO	NAME	/	51	52	50	49	/	PIEDRA
[31	NO	NAME	/	48	47	52	51	/	PIEDRA
[32	NO	NAME	/	53	54	55	56	/	PIEDRA
[33	NO	NAME	/	57	58	59	60	/	PIEDRA
[34	NO	NAME	/	45	61	62	49	/	PIEDRA
[35	NO	NAME	/	48	63	61	45	/	PIEDRA
[36	NO	NAME	/	51	64	63	48	/	PIEDRA
[37	NO	NAME	/	49	62	64	51	/	PIEDRA

The status bar at the bottom of the window shows the file path: C:\Documents and Settings\CIAD\E...s\catt\Copia de CAJA VOZ\MASTER.GEO

Fig. 4.11 "Archivo Master en CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.

4.3.3.2 Superficies

La Plaza de la Estela de los Dos Glifos se reconstruyó con piedra volcánica unida con lodo arcilloso (Garza, 1995), que es una argamasa compuesta de una arcilla caliza natural llamada tepetatillo. Para realizar la validación entre la medición y la simulación se utilizaron coeficientes de absorción de los materiales existente en el sitio, (tabla 4.4 y fig. 4.12) que son pasto en el piso de la Plaza y piedra volcánica para las edificaciones. Por último, el modelo cuenta con una caja que tendrá una superficie absorbente al 99.99% para simular el campo abierto.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN

MATERIAL EN SITIO	MATERIAL DE REFERENCIA	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
PASTO	Grava, suelo flojo y húmedo	0,25	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
PIEDRA VOLCÁNICA	Ladrillo, muro visto	0,024	0,025	0,032	0,042	0,05	0,07
CIELO	-----	99	99	99	99	99	99

Tabla 4.4 "Coeficientes de absorción utilizados". Sancho, 2001 pp. 185.

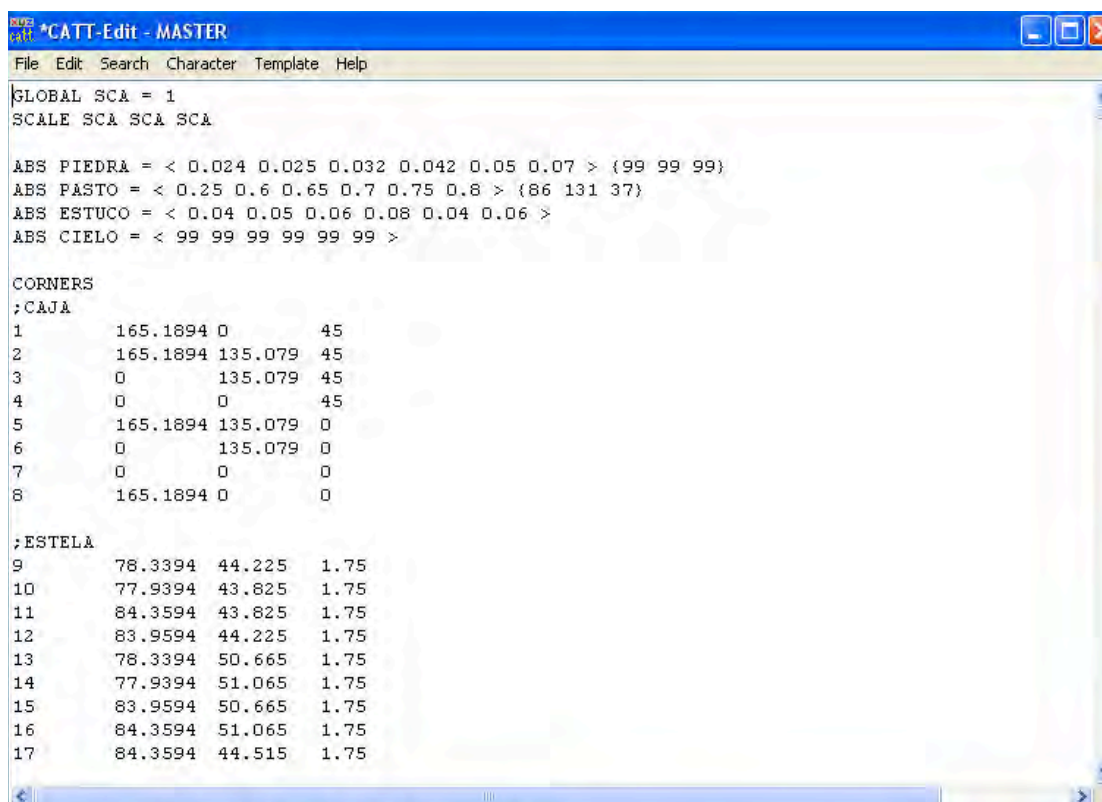


Fig. 4.12 "Coeficientes de absorción de materiales, CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.

4.3.3.3 Localización de fuentes y receptores

El volumen en Autocad se exportó al programa CATT Acoustic con las mismas coordenadas. Para realizar la validación del programa con respecto a la medición en el sitio fue necesario que las fuentes y receptores se encuentren localizadas en la misma posición, por lo que se trazaron en el plano arquitectónico los puntos de medición y emisión sonora, ambos se colocaron con las mismas coordenadas (tabla 4.5).

Coordenadas de ubicación
Puntos de medición

1		2		3	
X	68.0094	X	81.9094	X	96.3444
Y	67.7638	Y	67.7638	Y	67.7638
Z	1.6	Z	1.6	Z	1.6
4		5		6	
X	68.0094	X	81.9094	X	96.3444
Y	47.445	Y	47.445	Y	47.445
Z	1.6	Z	1.6	Z	1.6
7		8		9	
X	68.0094	X	81.9094	X	96.3444
Y	27.1262	Y	27.1262	Y	27.1262
Z	1.6	Z	1.6	Z	1.6

Fuentes

A		B		C	
X	48.9094	X	81.9094	X	114.9094
Y	91.9915	Y	91.9915	Y	91.9915
Z	7.9	Z	7.9	Z	7.9

Tabla 4.5 "Coordenadas de ubicación de fuentes y receptores". Elaboración propia, 2014

Al igual que en la medición, los receptores se ubicaron al centro de la Plaza (01-09), mientras que los emisores (A1, A2 y A3) se localizaron en el primer descanso de la Gran Pirámide (fig. 4.13).

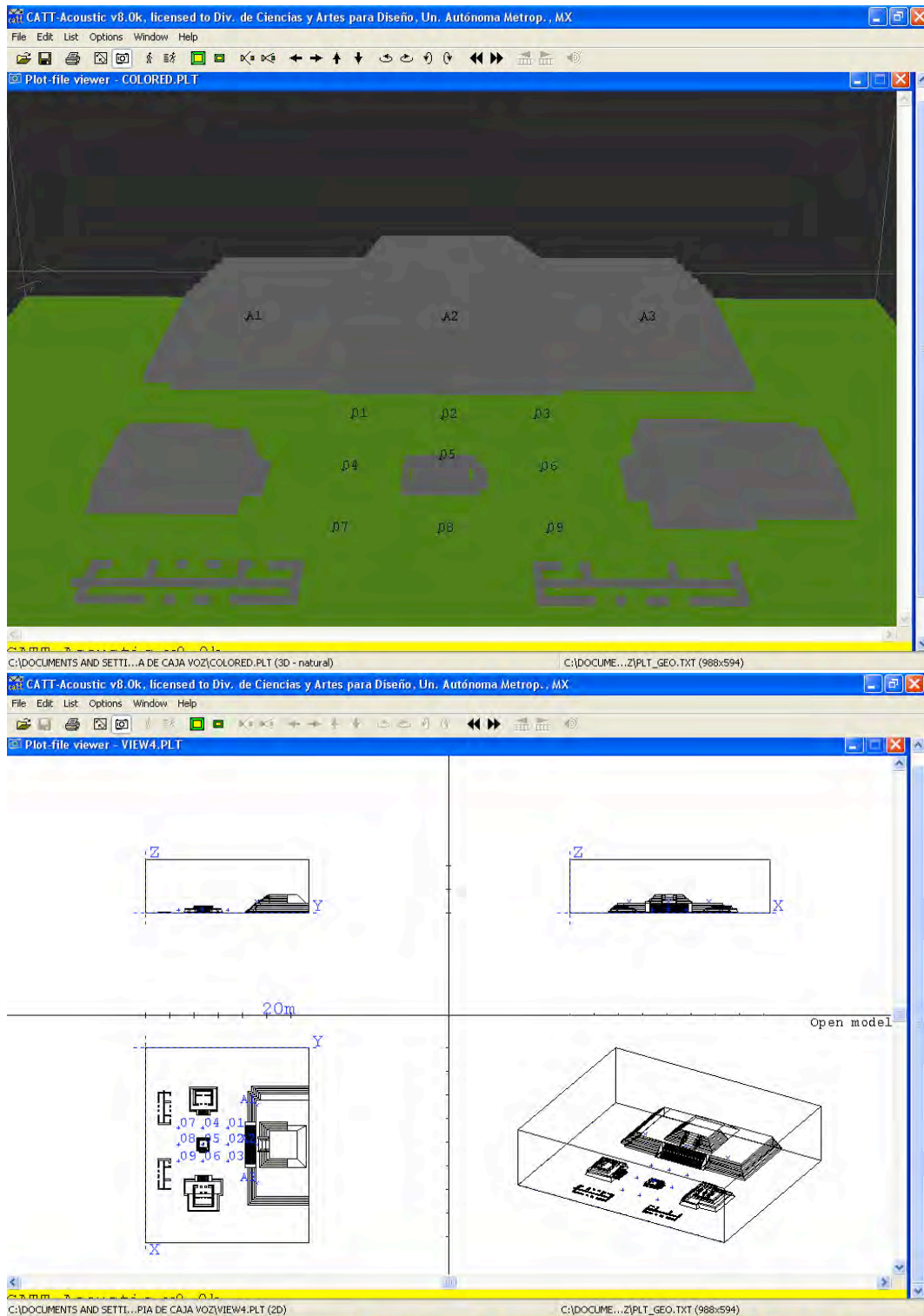


Fig. 4.13 “Localización bi y tridimensional de fuentes y receptores en modelo volumétrico CATT Acoustic”.
Elaboración propia, 2014.

4.3.3.4 Ruido de fondo

En CATT Acoustic es posible integrar el ruido de fondo para el cálculo STI (speech transmission index o índice de transmisión de lenguaje) en el módulo de ambiente acústico. En la medición en sitio se tomó registro del ruido de fondo, se obtuvo el nivel acústico equivalente de la misma forma que para la caracterización (tabla no. 4.10, Monroy) y posteriormente se integraron los valores para la simulación (tabla 4.6 y fig. 4.14).

Leq ruido de fondo

ARCHIVO	0150	ARCHIVO	0136	Leq	
(Durante la medición)		(Antes de la medición)			
125 Hz	25,54 dBA	125 Hz	34,70 dBA	125 Hz	32,19 dBA
250 Hz	18,76 dBA	250 Hz	26,06 dBA	250 Hz	23,80 dBA
500 Hz	12,79 dBA	500 Hz	22,45 dBA	500 Hz	19,89 dBA
1.0 kHz	11,65 dBA	1.0 kHz	16,60 dBA	1.0 kHz	14,80 dBA
2.0 kHz	10,81 dBA	2.0 kHz	15,10 dBA	2.0 kHz	13,47 dBA
4.0 kHz	10,95 dBA	4.0 kHz	20,81 dBA	4.0 kHz	18,23 dBA
8.0 kHz	13,16 dBA	8.0 kHz	13,72 dBA	8.0 kHz	13,45 dBA
16.0 kHz	15,71 dBA	16.0 kHz	15,88 dBA	16.0 kHz	15,80 dBA
MÁX Leq	25,54 dBA	MÁX Leq	34,70 dBA	MÁX Leq	32,19 dBA

Tabla 4.6 "Valores de ruido de fondo obtenidos en sitio". Elaboración propia, 2014

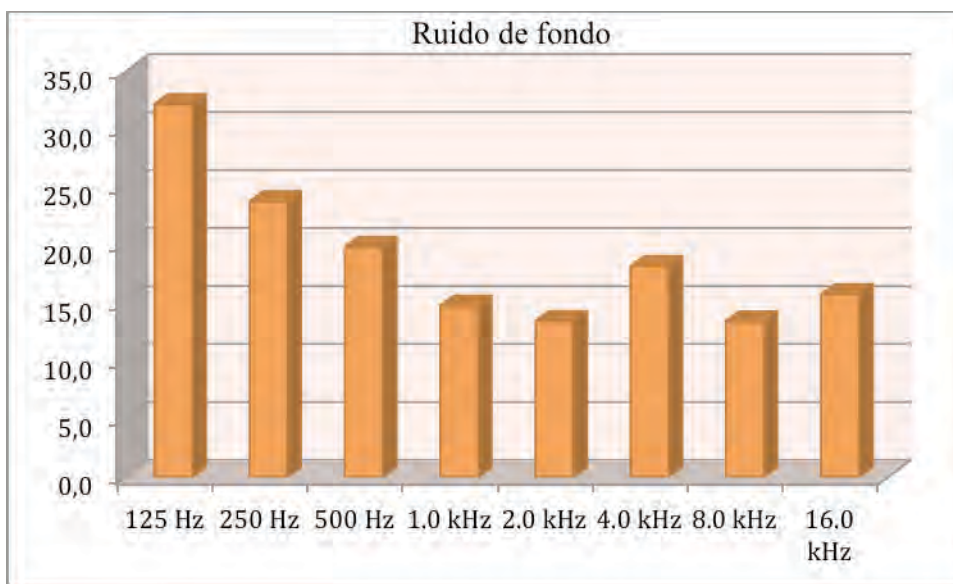


Fig. 4.14 "Gráfica de valores de ruido de fondo obtenidos en sitio". Elaboración propia, 2014.

4.3.3.5 Condiciones ambientales

Es posible integrar valores de temperatura y humedad en el programa de simulación, debido a que esto es utilizado para calcular la velocidad del sonido. Se utilizaron los siguientes valores registrados en la medición en sitio (fig. 4.15):

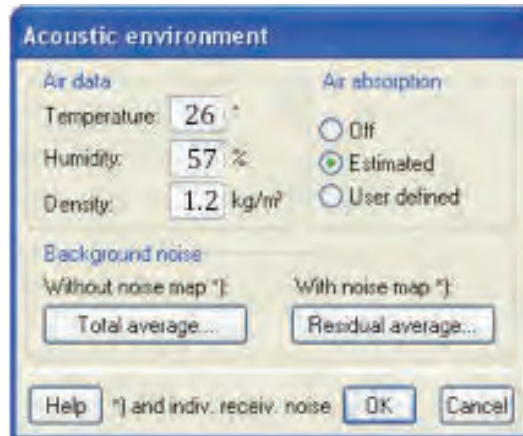


Fig. 4.15 “Cuadro de valores de ruido de fondo y condiciones ambientales en CATT Acoustic”. Elaboración propia, 2014.

4.3.3.6 Direccionalidad de la fuente

Para la validación sólo se utilizó la caracterización del ruido por impulso. En el programa CATT Acoustic se seleccionó Natural noise. Los datos Leq por frecuencia se vertieron al programa de la siguiente manera (fig. 4.16):

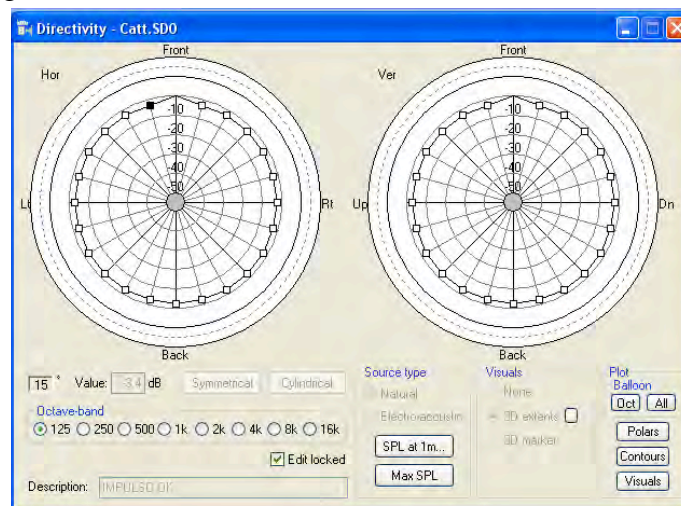


Fig. 4.16 “Módulo de direccionalidad de 125 Hz en CATT Acoustic”. Elaboración propia, 2014.

Posteriormente se integraron los datos de nivel de presión sonora a un metro de la fuente y nivel máximo de presión sonora. Ambos por frecuencia (fig. 4.17 y 4.18).

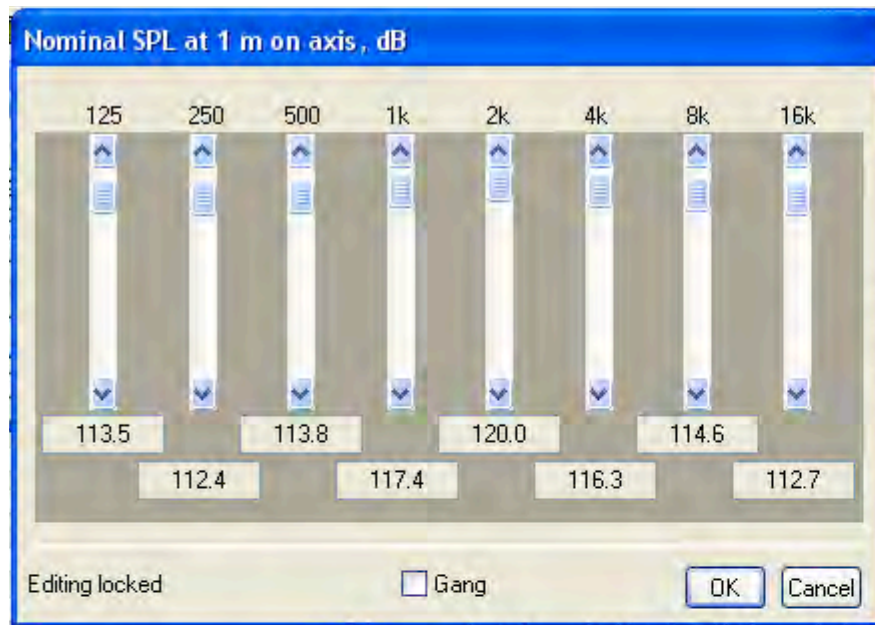


Fig. 4.17 "Cuadro de nivel de presión sonora nominal a 1m del eje en dBA en CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.

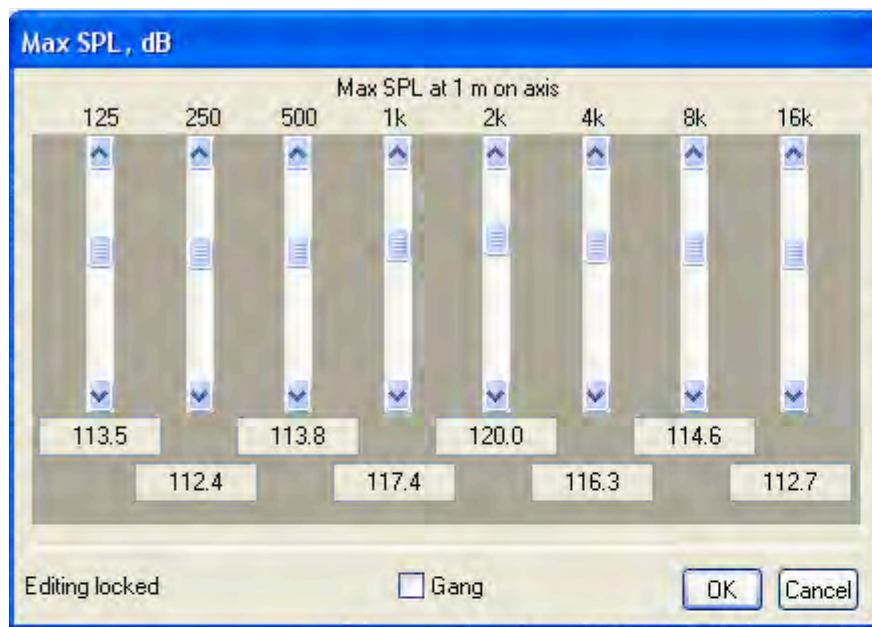


Fig. 4.18 "Cuadro de nivel de presión sonora máximo en dBA en CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.

Los valores de NPS utilizados fueron los máximos debido a la naturaleza del ruido de impulso. Es considerada una fuente de tipo omnidireccional y no es ponderable en Leq.

4.3.3.7 Cálculo acústico CATT

Se realizó una predicción de comportamiento acústico en el programa de simulación en donde se establecieron los siguientes parámetros (fig. 4.19):

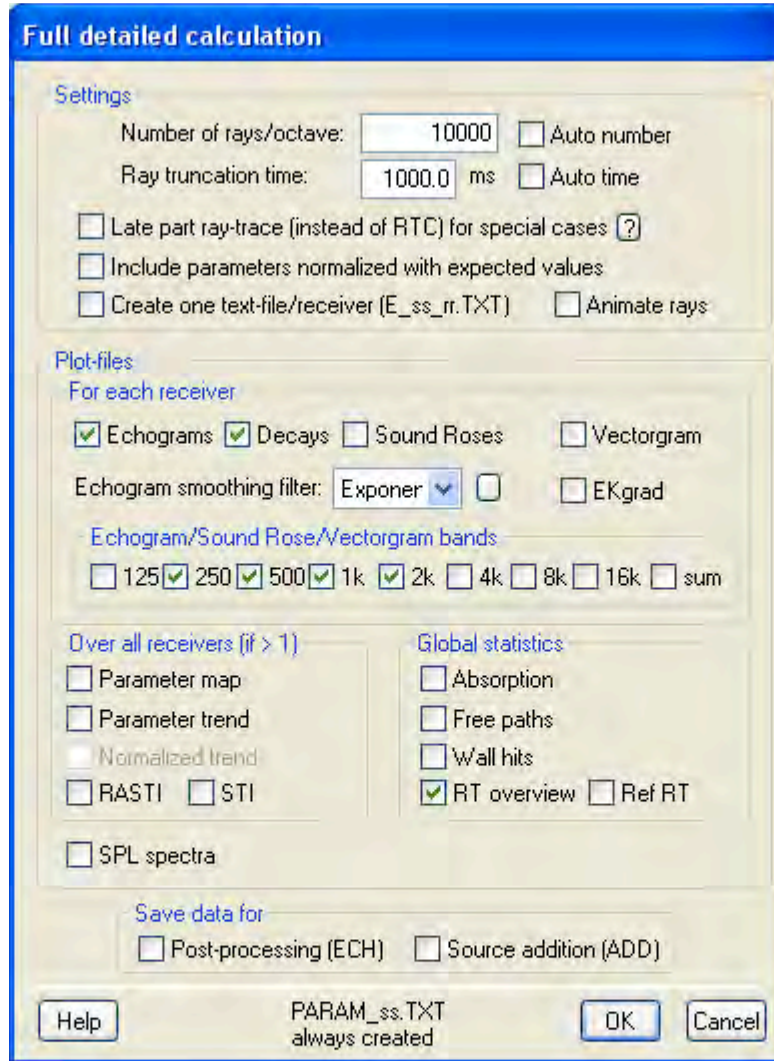


Fig. 4.19 "Cuadro de definición de parámetros para simulación CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.

Se obtuvieron ecogramas (gráficas de decaimiento) en un tiempo establecido de 1000 ms en cuatro frecuencias 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz para comparar entre la medición y la simulación.

El objetivo de la validación fue comprobar que el comportamiento acústico del espacio es similar tanto en la medición en sitio como en la simulación. Si los parámetros no se ajustaran entonces se tendrían que revisar la geometría del espacio, los coeficientes de absorción, las dimensiones de la superficie absorbente modelada (caja) ó la posición de las fuentes y receptores. Éste procedimiento fue realizado un total de 16 veces hasta que el modelo quedó ajustado y validado.

4.3.4 Resultados de la validación

Se realizaron dos tipos de análisis de para la validación:

1. Comparación de puntos máximos de NPS (en dBA) por coeficiente de correlación (medida de relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas)
2. Análisis de curvas de decaimiento de los receptores (del 1 al 9) con las tres fuentes (A1, A2 y A3) en cuatro frecuencias principales (250 Hz, 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz).

4.3.4.1 Comparación de puntos máximos de NPS por coeficiente de correlación

El análisis de los puntos máximos en dBA permite corroborar que los coeficientes de absorción son correctos, así como la geometría del espacio ya que mediante esto se pudieron conocer los niveles (dBA) que eran absorbidos por la distancia y los materiales, es decir, permite conocer el nivel de reducción acústica.

Las gráficas que se muestran a continuación (fig. 4.20) establecen una similitud entre los valores de nivel de presión sonora de la medición y la simulación en las cuatro diferentes frecuencias (250 Hz, 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz), así como las tres fuentes (A1, A2 y A3).

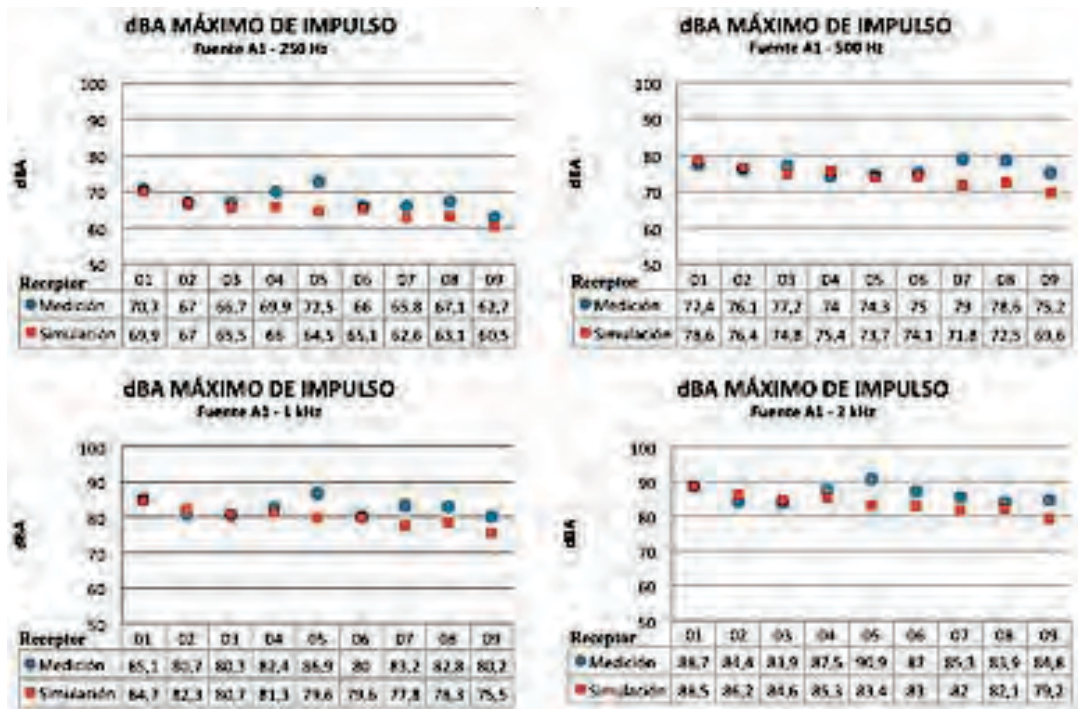


Fig. 4.20 " Comparación de NPS máximos en Fuente A1". Elaboración propia, 2014.

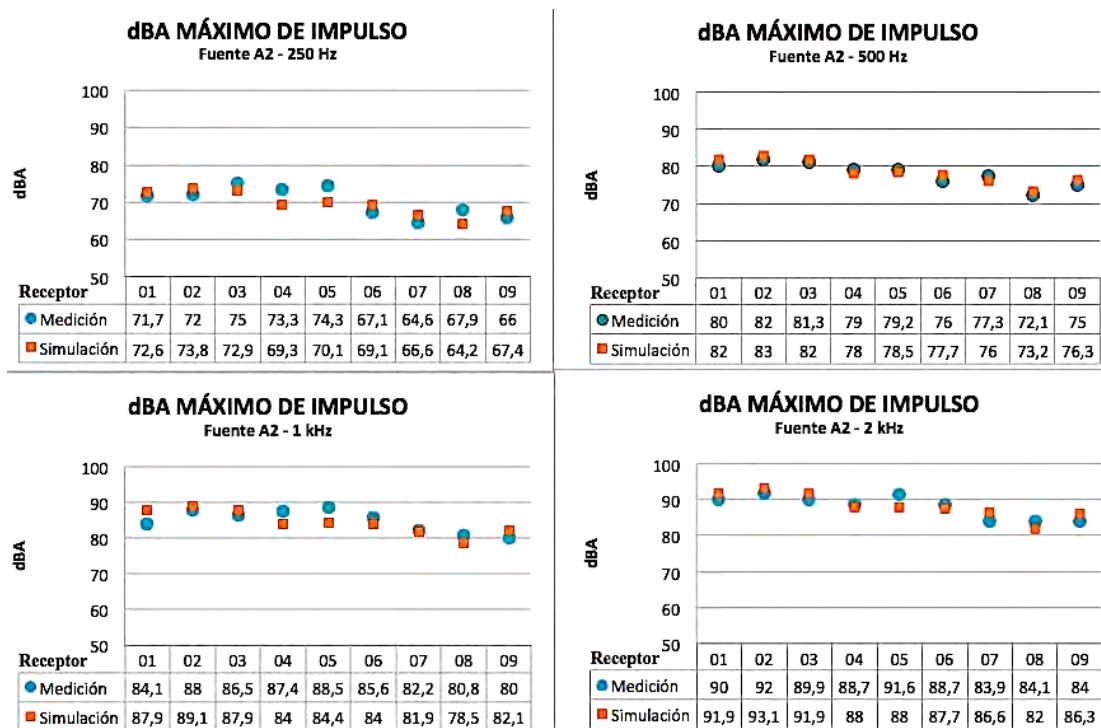


Fig. 4.21 " Comparación de NPS máximos en Fuente A2". Elaboración propia, 2014.

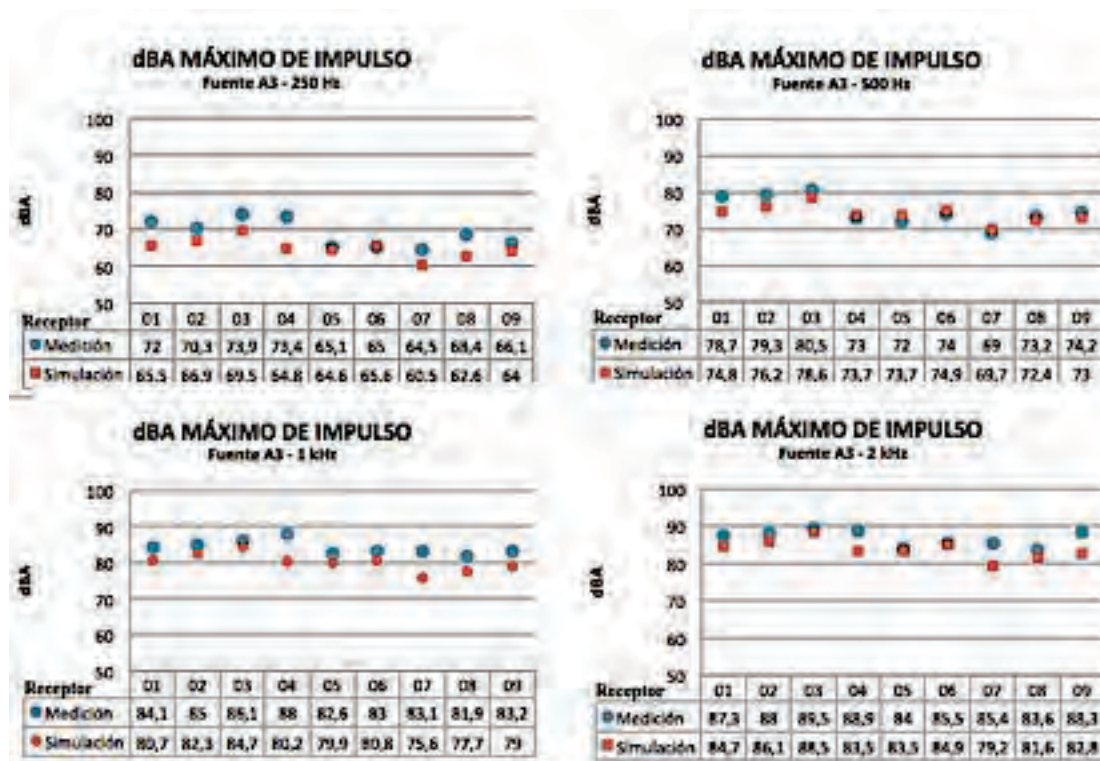


Fig. 4.22 " Comparación de NPS máximos en Fuente A3". Elaboración propia, 2014.

Con los datos de las gráficas se obtuvo un promedio de correspondencia por fuente y un promedio global en donde se observó que existe un 3.3 % de error (tabla 4.7).

FUENTE	PROMEDIO			
	FRECUENCIA			
	250 Hz (%)	500 Hz (%)	1 kHz (%)	2 kHz (%)
1	96,08	96,31	96,56	96,54
2	96,55	98,48	97,41	97,83
3	94,32	97,84	95,24	96,72
			TOTAL	96,66
				3,3 % ERROR

Tabla 4.7 "Promedio de porcentaje de error en valores máximos de NPS de validación". Elaboración propia, 2014.

4.3.4.2 Análisis de curvas de decaimiento de los receptores

Una vez comprobado el mínimo porcentaje de error en los niveles sonoros máximos, se procedió a comparar el comportamiento de las curvas de decaimiento en todos los receptores (fig. 4.23) y en las tres fuentes por cada frecuencia para obtener el coeficiente de correlación (tabla 4.8) . Para ello se obtuvieron los datos de los ecogramas y se compararon con los niveles (dBA) obtenidos previamente en la medición en un tiempo de 600 ms (esto debido a que se observó que a partir de los 600 ms la curva de decaimiento de NPS de la medición en sitio evidenciaba el ruido de fondo).

Ejemplo

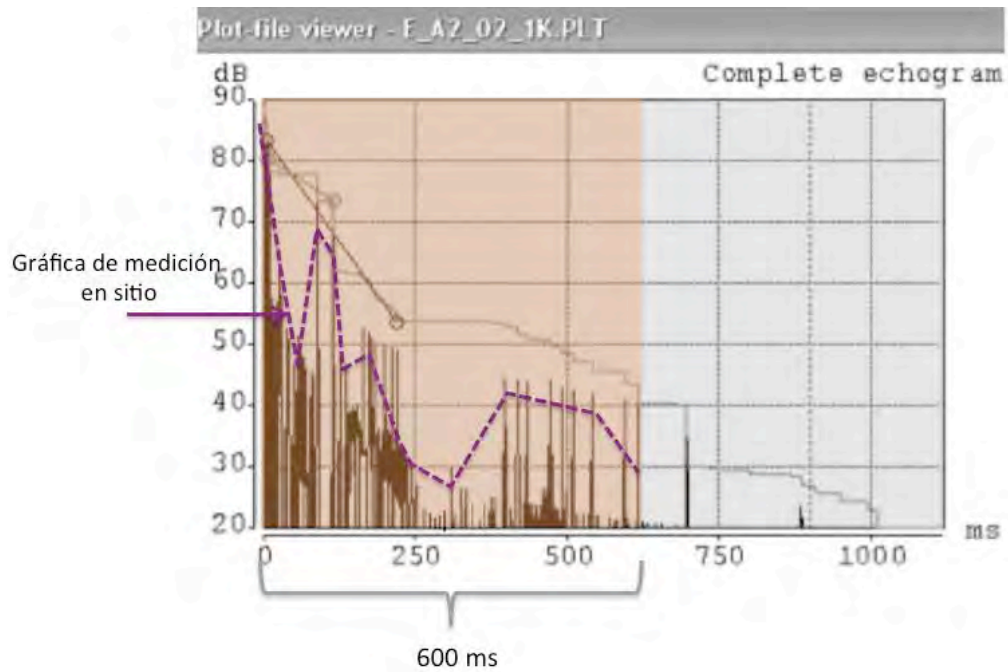


Fig. 4.23 "Ecograma de programa de simulación y línea de NPS de decaimiento de medición en sitio".
Elaboración propia, 2014.

Ejemplo

A2 - 02 - 1 kHz			
Tpo.	M	S	Dif
ms	dBA	dBA	dBA
.000	88	89,1	1,1
.050	67	64	2,7
.100	70	73	3,2

.150	48	48	0
.200	54	52	1,6
.250	24	28	3,7
.300	30	30	0,2
.350	29	26	2,7
.400	40	44	4
.450	40	43	3,2
.500	42	46	3,7
.550	41	43	1,8
.600	40	41	1,2
Coef. de correlación			0,991

Tabla 4.8 "Coeficiente de correlación de NPS para receptor 02 en fuente A2 a 1 kHz para validación entre simulación y medición en sitio". Elaboración propia, 2014.

De esta manera se obtuvieron los coeficientes de correlación de los 9 receptores, por las tres fuentes en cuatro frecuencias. Los resultados se muestran en las siguientes gráficas (fig. 4.24, 4.25 y 4.26).

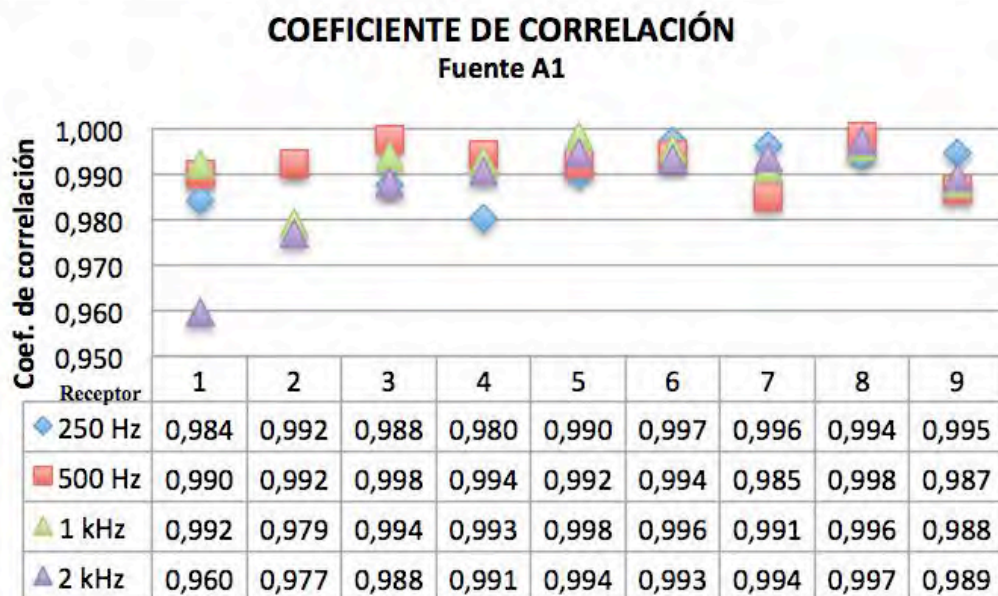


Fig. 4.24 "Gráfica de coeficiente de correlación de fuente A1". Elaboración propia, 2014.

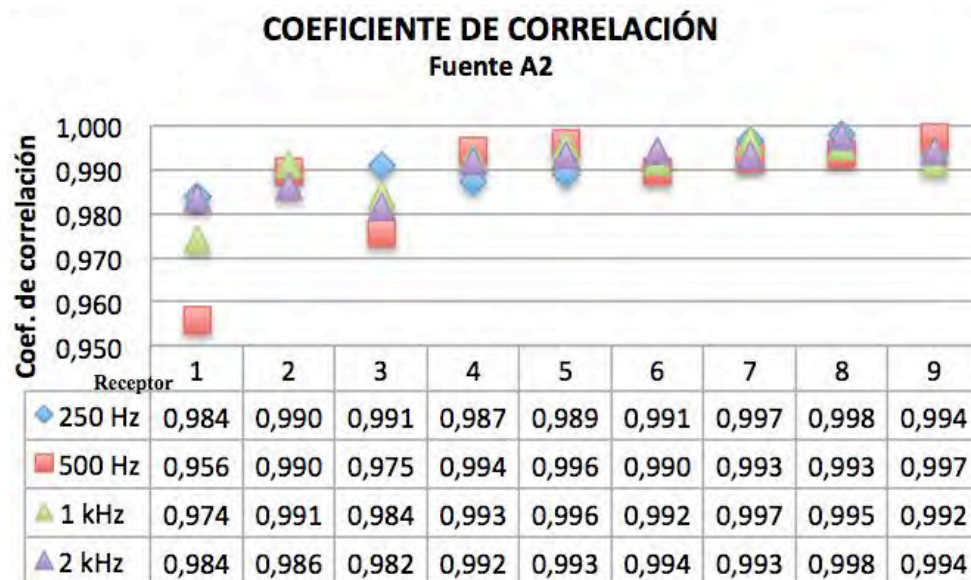


Fig. 4.25 " Gráfica de coeficiente de correlación de fuente A2". Elaboración propia, 2014.

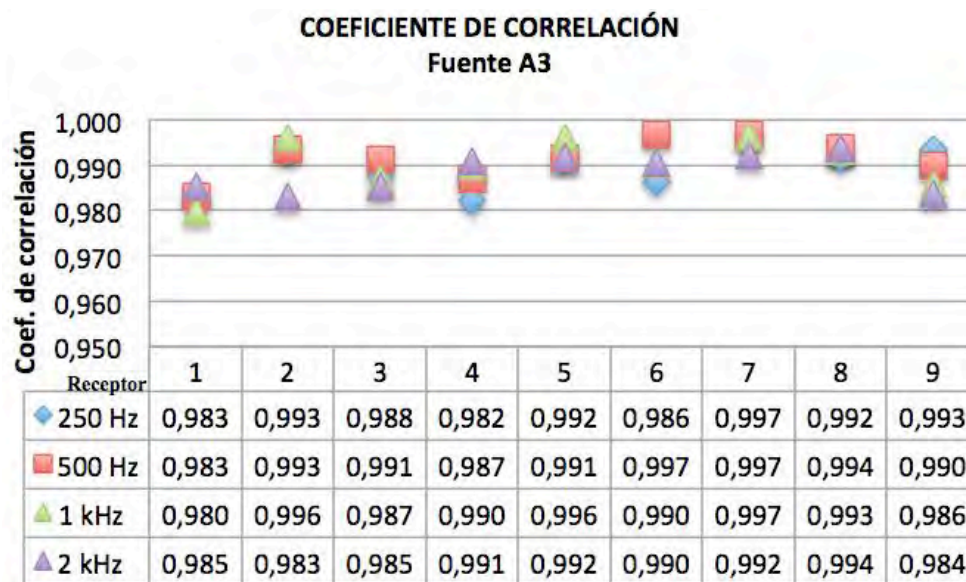


Fig. 4.26 " Gráfica de coeficiente de correlación de fuente A3". Elaboración propia, 2014.

Los coeficientes de correlación anteriores se promediaron y se obtuvo un valor de 0,99. Es decir 99% de correlación entre los datos de la medición y simulación (tabla 4.9).

PROMEDIO DE COEFICIENTE DE CORRELACIÓN
FRECUCIA

Receptor	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz
1	0,984	0,976	0,982	0,976
2	0,992	0,992	0,989	0,982
3	0,989	0,988	0,988	0,985
4	0,983	0,992	0,992	0,991
5	0,990	0,993	0,997	0,993
6	0,992	0,994	0,993	0,993
7	0,997	0,991	0,995	0,993
8	0,995	0,995	0,995	0,996
9	0,994	0,991	0,989	0,989
	0,990	0,990	0,991	0,989
			TOTAL	0,99

Tabla 4.9 "Promedio de coeficientes de correlación para validación". Elaboración propia, 2014.

Finalmente se elaboraron las gráficas para describir el comportamiento acústico a través de las curvas de decaimiento en donde se obtuvieron los valores de r^2 (relación entre variables) desprendidos a partir de una línea de tendencia logarítmica (fig. 4.27). La finalidad de éste análisis fue el de relacionar estos valores para determinar una relación no mayor a 10% o 0,01.

Ejemplo

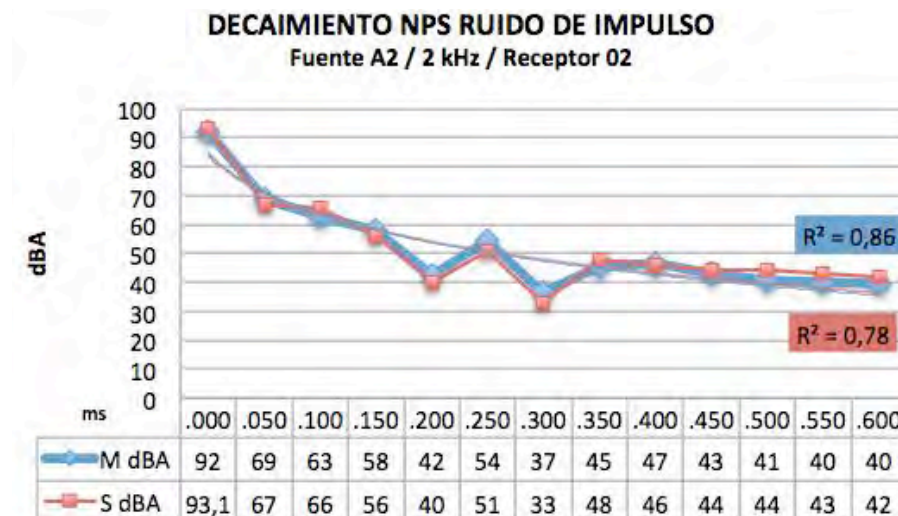


Fig. 4.27 " Gráfica de curva de decaimiento de NPS, comparación entre medición y simulación". Elaboración propia, 2014.

En el anexo no. 3 se incluyen todas las gráficas de comparación. Lo anterior permitió determinar una estrecha relación entre los valores de la simulación y la medición por lo así sería posible realizar la simulación para voz y caracol.

4.4 Simulación

Una vez validado el modelo, se realizó la simulación. Se grabaron y caracterizaron los sonidos de caracol y voz para ingresarlo al módulo de direccionalidad de las fuentes. Se incluyeron los coeficientes de absorción de las nuevas superficies (estuco), y condiciones ambientales.

Los valores de nivel de ruido de fondo permanecieron iguales, así como el modelo 3D y la localización de las fuentes y los receptores.

Se realizaron tres simulaciones :

- 1.- Fuente de voz y espacio con audiencia
- 2.- Fuente : Caracol y espacio vacío
- 3.- Fuente : Caracol y espacio con audiencia.

**Se realizó la simulación de voz sólo con audiencia ya que los parámetros acústicos de lenguaje especifican la inclusión de la absorción del espacio producida por las personas en una sala llena.*

4.4.1 Grabación y caracterización de las fuentes sonoras (Caracol y voz)

Debido a que cada sonido está compuesto por diversas frecuencias es necesario realizar una caracterización del mismo para conocer su comportamiento omnidireccional y por lo tanto, la respuesta acústica que presenta la Plaza ante las frecuencias, debido al caracol y a la voz.

La grabación y caracterización se realizaron en la cámara sonoamortiguada del LADAc de la UAM-A. El procedimiento consistió en colocar al ejecutante en el centro y realizar diez grabaciones del sonido con una grabadora digital portátil TASCAM DR-100 Teac Professional, tanto del caracol como de la voz (fig. 4.28 y 4.29).

Posteriormente, se revisaron cada uno de los audios obtenidos y se eligieron aquellos que presentaban mayor uniformidad en su ejecución.



Fig. 4.28 “Grabación de fuente sonora caracol”. Dr. Fausto Rodríguez, 2014.



Fig. 4.29 “Grabación de fuente sonora de voz en náhuatl. Elaboración propia”. 2014.

La caracterización de los sonidos también se realizó en la cámara sonoamortiguada del LADAc en la UAM-A (fig. 4.4) en el círculo previamente dividido y marcado en veinticuatro puntos (fig. 4.5).

Se colocaron, en la misma posición en donde se grabaron los sonidos (fig. 4.30), un par de bocinas a la altura de 1.6 m. Posteriormente se colocó el sonómetro en uno de los puntos

marcados y se reprodujo el sonido por medio de las bocinas desde una laptop hasta calibrar con los niveles reales obtenidos en la grabación. El sonómetro registró durante diez segundos el nivel de presión sonora en las frecuencias que componen el sonido. Se calibró el instrumento para obtener registro de los dBA a cada 25 ms en tercios de octava.

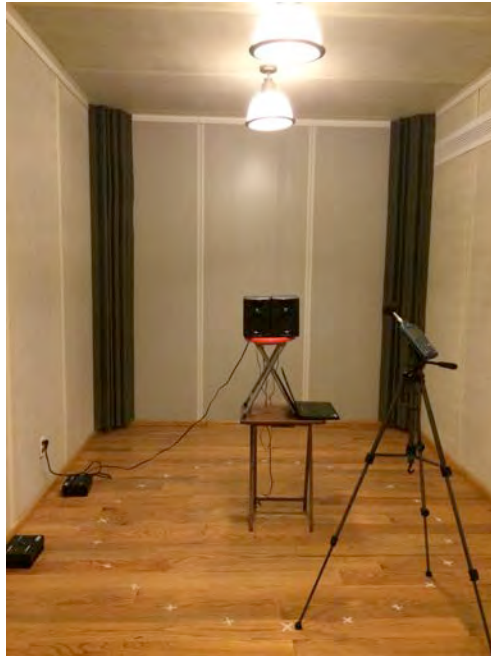


Fig. 4.30 “Medición de NPS para caracterización en el LADAc UAM-A”. Elaboración propia, 2014.

Una vez registrados los NPS, se transfirieron los datos a hojas de Excel, con un total de 400 datos por punto de medición en 36 frecuencias.

Se obtuvieron 24 hojas de datos por cada fuente. Los datos se analizaron sólo en ocho frecuencias debido a que el programa de simulación analiza los datos de directividad de una fuente sólo en las frecuencias entre 125 Hz y 16 kHz, cada octava. Los datos se encuentran en el cd anexo.

4.4.1.1 Análisis de datos para la caracterización de las fuentes

Debido a que se obtuvieron 400 datos para cada frecuencia fue necesario conocer el nivel acústico equivalente por frecuencia (L_{eq}), para lo que se utilizó la siguiente tabla de cálculo (tabla 4.10):

Cálculo Leq (Nivel Acústico Equivalente) [Datos y Resultados]					© M.Monroy
Nivel Leq' o nivel sonoro continuo equivalente: Es el nivel en dBA de un ruido constante hipotético correspondiente a la misma cantidad de energía acústica que el ruido real considerado, en un punto determinado durante un período de tiempo T. Su expresión matemática es la siguiente:					
Leq = 10 log ((Σ ti·10^{Li/10})/T) dBA					
Donde ti es el tiempo de observación durante el cual el nivel sonoro es Li ± 2,5 dBA.					
Muestras	Nivel Li (dBA)	Intensidad 10 ^{Li/10}	Suma Σ ti·10 ^{Li/10}	Media Int (Σ ti·10 ^{Li/10})/T	Nivel Equiv Leq (dBA)
1	43,2	20893	20893	20893	43,2
2	37,5	5623	26516	13258	41,2
3	30,3	1072	27588	9196	39,6
4	24,1	257	27845	6961	38,4
5	20,1	102	27947	5589	37,5
6	18	63	28010	4668	36,7
7	23,2	209	28219	4031	36,1
8	22,2	166	28385	3548	35,5
9	17,4	55	28440	3160	35,0
10	46,8	47863	76303	7630	38,8
11	40,5	11220	87523	7957	39,0
12	42,2	16596	104119	8677	39,4
13	36	3981	108100	8315	39,2
14	24,5	282	108382	7742	38,9
15	22,4	174	108556	7237	38,6
16	23,7	234	108790	6799	38,3
17	18,9	78	108868	6404	38,1
18	26,2	417	109285	6071	37,8
19	24,6	288	109573	5767	37,6
20	20,4	110	109683	5484	37,4

Tabla 4.10 “Formato de cálculo para obtener Leq. M. Monroy”. 2014.

Para ingresar los datos al programa de simulación acústica se requirieron tres datos:

- 1.- Nivel máximo a 1 m (Lmax): Es el nivel máximo que se obtuvo durante la medición en las ocho frecuencias antes mencionadas.
- 2.- Nivel acústico equivalente por frecuencia (Leq): El programa de simulación en el módulo de directividad solicita un nivel máximo de -50 dBA, por lo que hay que convertir cada medición (24 en total por fuente) a la escala del mismo (procedimiento explicado en el apartado de acústica arquitectónica y urbanística), se indica en las tablas como "Valor CATT".
- 3.- Nivel máximo equivalente por frecuencia (utilizando la tabla de M. Monroy para cálculo Leq).

A continuación se muestran los resultados en 8 frecuencias por posición de la fuentes sonoras de caracol y voz (tablas 4.11 a 4.22).

Caracterización (caracol)

ARCHIVO	0070	0071		0072		0073		0074		
	1	2	3	4	5	Valor	Valor	Valor	Valor	
Ángulo	0°/360°	15°	30°	45°	60°	Leq	CATT	Leq	CATT	
125 Hz	32,3	-27	32,4	-27	30,0	-28	32,3	-27	23,4	-34
250 Hz	58,6	-8	53,0	-12	59,9	-7	60,1	-7	47,9	-16
500 Hz	43,0	-19	36,5	-24	42,7	-19	43,4	-19	32,3	-27
1.0 kHz	61,5	-6	59,5	-7	59,1	-7	55,8	-11	62,9	-5
2.0 kHz	37,4	-23	37,8	-23	35,4	-25	34,6	-25	36,0	-24
4.0 kHz	27,2	-30	30,9	-28	29,7	-29	31,9	-27	31,8	-27
8.0 kHz	21,8	-34	23,5	-33	24,1	-32	25,3	-32	26,9	-31
16.0 kHz	21,4	-34	22,6	-34	22,0	-34	22,0	-34	21,7	-34
MÁX Leq	61,5		59,5		59,9		60,1		62,9	
MÁX MEDICIÓN	85,2		79,1		86,2		86,5		73,9	

Tabla 4.11 “Valores de caracterización de NPS de caracol, posición 1 a 5”. Elaboración propia, 2014.

ARCHIVO	0075	0076		0077		0078		0079		
	6	7	8	9	10	Valor	Valor	Valor	Valor	
Ángulo	75°	90°	105°	120°	135°	Leq	CATT	Leq	CATT	
125 Hz	22,6	-34	24,7	-32	24,7	-31	32,6	-23	28,0	-30
250 Hz	55,9	-10	56,2	-9	55,9	-10	58,8	-42	60,5	-7
500 Hz	38,6	-22	39,2	-22	39,4	-22	42,8	-31	43,1	-19
1.0 kHz	62,1	-5	64,3	-4	66,1	-2	61,5	-44	62,2	-5
2.0 kHz	33,6	-26	37,6	-23	40,0	-21	44,5	-32	44,5	-18
4.0 kHz	30,4	-28	32,4	-27	33,3	-26	37,1	-27	37,9	-23
8.0 kHz	26,0	-31	27,8	-30	29,1	-29	30,6	-22	31,3	-28
16.0 kHz	20,9	-35	20,1	-35	20,7	-35	22,9	-16	25,4	-32
MÁX Leq	62,1		64,3		66,1		61,5		62,2	
MÁX MEDICIÓN	83,3		83,4		83		85,8		86,7	

Tabla 4.12 “Valores de caracterización de NPS de caracol, posición 6 a 10 Elaboración propia”. 2014.

Caracterización (caracol)

ARCHIVO	0080		0081		0082		0083		0084	
	11		12		13		14		15	
Ángulo	150°	Valor	165°	Valor	180°	Valor	195°	Valor	210°	Valor
	Leq	T	Leq	T	Leq	CATT	Leq	CATT		CATT
125 Hz	29,1	-29	32,0	-27	32,8	-26	32,4	-27	30,4	-28
250 Hz	53,3	-12	50,5	-14	59,0	-7	52,7	-12	51,3	-14
500 Hz	36,3	-24	40,2	-21	42,8	-19	37,1	-23	34,2	-25
1.0 kHz	61,1	-6	65,9	-3	69,9	0	65,2	-3	61,3	-6
2.0 kHz	46,4	-16	49,6	-14	49,3	-14	45,6	-17	47,3	-16
4.0 kHz	38,6	-22	36,6	-24	36,3	-24	34,3	-25	35,7	-23
8.0 kHz	32,6	-27	35,4	-24	37,1	-23	36,0	-26	32,2	-27
16.0 kHz	25,3	-32	28,3	-29	28,7	-29	25,9	-32	25,1	-32
MÁX Leq	61,1		65,9		69,9		65,2		61,3	
MÁX MEDICIÓN	79,7		75,1		88,7		79,3		76,7	

Tabla 4.13 “Valores de caracterización de NPS de caracol, posición 11 a 15 Elaboración propia”. 2014.

ARCHIVO	0085		0086		0087		0088		0089	
	16		17		18		19		20	
Ángulo	225°	Valor	240°	Valor	255°	Valor	270°	Valor	285°	Valor
	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT		CATT
125 Hz	28,4	-29	26,5	-31	25,7	-32	30,5	-28	24,5	-32
250 Hz	50,3	-14	47,1	-16	38,4	-22	59,0	-7	56,3	-9
500 Hz	36,1	-24	33,0	-26	39,1	-22	43,3	-19	40,4	-21
1.0 kHz	61,4	-6	62,2	-5	62,2	-5	61,2	-6	61,2	-6
2.0 kHz	47,9	-16	47,8	-16	40,8	-21	39,7	-22	35,7	-23
4.0 kHz	38,2	-23	36,8	-24	34,0	-25	32,8	-27	32,2	-27
8.0 kHz	31,8	-28	29,6	-29	27,4	-30	26,2	-31	24,9	-32
16.0 kHz	24,3	-33	23,3	-33	22,9	-34	21,2	-34	22,0	-34
MÁX Leq	61,4		62,2		62,2		61,2		61,2	
MÁX MEDICIÓN	82,2		80,9		82,8		89,4		86,6	

Tabla 4.14 “Valores de caracterización de NPS de caracol, posición 16 a 20 Elaboración propia”. 2014.

Caracterización (caracol)

ARCHIVO	0090		0091		0092		0093	
	21		22		23		24	
Ángulo	300°	Valor	315°	Valor	330°	Valor	345°	Valor
	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT
125 Hz	31,8	-28	27,8	-30	35,4	-24	31,1	-27
250 Hz	53,8	-12	62,4	-5	63,9	-4	56,0	-9
500 Hz	38,7	-22	45,5	-17	47,9	-16	40,1	-21
1.0 kHz	63,1	-4	55,7	-10	58,2	-8	56,8	-9
2.0 kHz	37,0	-23	37,9	-23	34,6	-25	35,5	-24
4.0 kHz	31,1	-27	31,7	-27	31,3	-27	29,4	-29
8.0 kHz	26,3	-31	26,9	-31	25,3	-32	25,8	-32
16.0 kHz	22,7	-34	23,8	-33	23,5	-33	24,9	-32
MÁX Leq	63,1		62,4		63,9		56,8	
MÁX MEDICIÓN	80,4		89,1		89,1		81,7	

MÁXIMA Leq **69,9**
(Todas las frecuencias)

MÁXIMA Leq	
125 Hz	32,8
250 Hz	63,9
500 Hz	47,9
1.0 kHz	69,9
2.0 kHz	47,9
4.0 kHz	38,6
8.0 kHz	37,1
16.0 kHz	28,7

MÁXIMA POR MEDICIÓN	
125 Hz	56,9
250 Hz	67,8
500 Hz	56,0
1.0 kHz	72,9
2.0 kHz	58,5
4.0 kHz	47,0
8.0 kHz	51,4
16.0 kHz	30,8

Tabla 4.15 “Valores de caracterización de NPS de caracol, posición 21 a 24 y valores máximos Leq por frecuencia”. Elaboración propia, 2014.

Caracterización (voz)

ARCHIVO	0094	0095		0096		0097		0098		
Punto	1	2		3		4		5		
Ángulo	0°/360°	Valor	15°	Valor	30°	Valor	45°	Valor	60°	Valor
	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT
125 Hz	54,1	-8	53,9	-9	52,6	-10	50,8	-11	48,7	-13
250 Hz	53,0	-9	53,6	-9	55,4	-7	54,2	-8	54,4	-8
500 Hz	61,1	-3	60,1	-4	57,6	-6	58,2	-5	59,4	-5
1.0 kHz	50,7	-11	52,9	-10	45,7	-15	44,0	-16	49,7	-12
2.0 kHz	46,1	-14	52,9	-10	43,0	-17	44,3	-16	40,8	-19
4.0 kHz	37,6	-21	43,0	-17	56,5	-7	44,4	-16	40,8	-19
8.0 kHz	26,4	-30	29,3	-27	31,8	-26	29,8	-27	30,6	-27
16.0 kHz	14,0	-39	13,7	-40	15,6	-38	15,5	-38	15,1	-38
MÁX Leq	61,1		60,1		57,6		58,2		59,4	
MÁX MEDICIÓN	67,2		64		62,9		63,9		66	

Tabla 4.16 “Valores de caracterización de NPS de voz, posición 1 a 5”. Elaboración propia, 2014.

ARCHIVO	0099	0100		0101		0102		0103			
Ángulo	6	7	8	9	10	Valor	120°	Valor	135°	Valor	
	75°	90°	105°	120°	135°	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT
	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	
125 Hz	46,6	-14	46,8	-14	48,1	-13	48,9	-13	49,4	-12	
250 Hz	53,0	-9	51,8	-10	54,5	-8	56,9	-7	56,6	-7	
500 Hz	54,8	-8	58,0	-5	52,9	-10	56,4	-7	60,4	-4	
1.0 kHz	51,3	-10	51,6	-10	50,3	-11	53,4	-9	49,4	-12	
2.0 kHz	53,0	-9	45,0	-15	45,8	-15	45,7	-15	51,8	-10	
4.0 kHz	45,2	-15	46,7	-14	49,0	-12	51,9	-10	51,3	-10	
8.0 kHz	33,2	-24	34,8	-24	36,1	-22	40,1	-19	42,3	-17	
16.0 kHz	15,1	-38	16,1	-37	18,2	-36	20,7	-34	22,1	-33	
MÁX Leq	54,8		58,0		54,5		56,9		60,4		
MÁX MEDICIÓN	62,2		63,7		63,4		62,5		65,4		

Tabla 4.17 “Valores de caracterización de NPS de voz, posición 6 a 10 Elaboración propia”. 2014.

Caracterización (voz)

ARCHIVO	0104		0105		0106		0107		0108	
	11		12		13		14		15	
Ángulo	150°	Valor	165°	Valor	180°	Valor	195°	Valor	210°	Valor
	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT
125 Hz	50,7	-11	51,9	-10	52,6	-10	51,6	-10	50,6	-11
250 Hz	57,6	-6	57,0	-6	56,8	-7	56,4	-7	57,9	-6
500 Hz	63,0	-1	62,6	-2	64,0	-1	65,3	0	63,5	-1
1.0 kHz	49,0	-12	51,4	-10	55,4	-8	57,7	-6	51,2	-10
2.0 kHz	56,9	-7	50,2	-11	57,7	-6	52,5	-10	56,2	-7
4.0 kHz	55,3	-8	56,3	-7	51,6	-10	52,0	-10	50,2	-11
8.0 kHz	44,5	-16	45,6	-15	46,8	-14	44,8	-16	46,0	-14
16.0 kHz	25,6	-30	30,5	-27	31,5	-26	28,9	-28	26,0	-30
MÁX Leq	63,0		62,6		64,0		65,3		63,5	
MÁX MEDICIÓN	68,2		67,6		66,4		73		69,8	

Tabla 1.18 “Valores de caracterización de NPS de voz, posición 11 a 15 Elaboración propia”. 2014.

ARCHIVO	0109		0110		0111		0112		0113	
	16		17		18		19		20	
Ángulo	225°	Valor	240°	Valor	255°	Valor	270°	Valor	285°	Valor
	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT
125 Hz	49,1	-12	47,7	-14	45,6	-15	46,1	-14	46,7	-14
250 Hz	58,7	-5	57,7	-6	54,1	-8	52,9	-10	52,8	-10
500 Hz	63,5	-1	57,6	-6	55,6	-7	56,5	-7	57,6	-6
1.0 kHz	50,0	-11	49,7	-12	50,5	-11	53,4	-9	51,1	-10
2.0 kHz	55,9	-7	52,6	-10	48,1	-13	47,0	-14	45,5	-15
4.0 kHz	56,0	-7	49,5	-12	51,1	-10	46,4	-14	45,7	-15
8.0 kHz	43,7	-17	41,6	-18	39,4	-20	35,2	-23	32,8	-25
16.0 kHz	24,5	-31	22,1	-33	21,1	-33	17,1	-37	15,9	-38
MÁX Leq	63,5		57,7		55,6		56,5		57,6	
MÁX MEDICIÓN	66,8		63,4		65,2		63,9		66,8	

Tabla 4.19 “Valores de caracterización de NPS de voz, posición 16 a 20 Elaboración propia”. 2014.

Caracterización (voz)

ARCHIVO	0114		0115		0116		0117	
	21		22		23		24	
Ángulo	300°	Valor	315°	Valor	330°	Valor	345°	Valor
	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT	Leq	CATT
125 Hz	48,2	-13	50,0	-11	51,4	-10	53,7	-9
250 Hz	55,6	-7	54,6	-8	55,9	-7	54,6	-8
500 Hz	55,7	-7	58,1	-5	58,6	-5	57,4	-6
1.0 kHz	49,2	-12	43,2	-17	47,6	-14	45,9	-15
2.0 kHz	45,6	-15	42,9	-17	45,8	-16	45,0	-15
4.0 kHz	43,2	-17	42,1	-17	40,8	-19	40,6	-19
8.0 kHz	32,5	-25	30,9	-27	26,9	-30	27,1	-29
16.0 kHz	14,8	-39	16,3	-37	15,1	-38	14,6	-39
MÁX Leq	55,7		58,1		58,6		57,4	
MÁX MEDICIÓN	63		64,6		63,3		65,4	

MÁXIMA Leq **65,3**

(Todas las frecuencias)

MÁXIMA Leq		MÁXIMA POR MEDICIÓN	
125 Hz	53,9	125 Hz	60,3
250 Hz	58,7	250 Hz	60,6
500 Hz	65,3	500 Hz	73,0
1.0 kHz	57,7	1.0 kHz	68,2
2.0 kHz	57,7	2.0 kHz	63,2
4.0 kHz	56,5	4.0 kHz	59,8
8.0 kHz	46,8	8.0 kHz	53,3
16.0 kHz	31,5	16.0 kHz	45,7

Tabla 4.20 "Valores de caracterización de NPS de voz, posición 21 a 24 y valores máximos Leq. Elaboración propia". 2014.

Leq Máximas (Caracol)

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1.0 kHz	2.0 kHz	4.0 kHz	8.0 kHz	16.0 kHz	ARCHIVO
40,5	62,4	48,6	65,4	42,8	34,2	32	27,8	70
39,1	56,5	41,4	65,1	43,8	35,9	29,4	27,8	71
37,4	63,5	46,7	64,9	41,4	35,9	33	27,8	72
54	62,6	48,6	59,8	42	39,3	36,7	27,8	73
30,2	50,6	37,3	66,2	42,4	36,3	33,6	27,8	74
39,1	60,5	43,6	66,7	43,4	36,3	35,1	27,8	75
32,4	60,2	43,7	69	43,2	38,8	34,1	27,8	76
31,3	59,5	45,7	69,5	43,4	38,8	40,1	27,8	77
54,2	62,1	56	69,9	53,7	47	43,5	27,8	78
35,6	64	46,7	67,2	49	44,7	45,7	27,8	79
36,1	57,1	40,3	65,4	51,4	44,7	47,1	27,8	80
39,9	53	49,9	68,8	57,7	44,7	51,4	27,8	81
40,5	64,4	49,9	72,9	54,3	42,2	47,9	27,8	82
39,7	56,2	43,2	69,6	49,2	40,8	46,7	27,8	83
37,2	53,9	37,2	65,6	53,5	42,8	48,8	27,8	84
36,2	57,4	45,2	66,1	58,5	45,5	43,8	27,8	85
33,9	56,5	42,5	66	57,1	45,6	41,9	27,8	86
31,9	59,9	43,6	66,8	45,6	40,2	37	27,8	87
51,1	65	51,5	66,8	44,8	39,5	38,9	27,8	88
33,4	62,4	48,6	65,2	44,6	39	34,3	27,8	89
53,3	57,1	52,2	70,1	50	37,8	32,9	27,8	90
35,4	65,5	50,1	62,8	48,4	36,8	33,3	27,8	91
56,9	67,8	54,2	64,2	46,5	37,4	33,5	30,8	92
38,2	58,4	45,4	66,3	43,6	34,1	33,1	27,8	93
56,9	67,8	56	72,9	58,5	47	51,4	30,8	

Tabla 4.21 “Leq NPS máxima de caracol. Elaboración propia”. 2014.

Leq Máximas (Voz)

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1.0 kHz	2.0 kHz	4.0 kHz	8.0 kHz	16.0 kHz	ARCHIVO
70,2	65	77,2	66,6	59,8	50	41	25,9	94
70,3	64,6	74	73,8	60	56,1	46,2	24,9	95
68,4	67,8	72,9	61,6	57,6	57,4	48,5	29,1	96
66,3	65,7	73,9	62,1	59,6	57,9	47,4	28,8	97
63,9	66	76	65,7	54,7	54,6	47,4	27,3	98
62,2	66	69,1	69,5	57,9	57,6	48,6	27,3	99
62,6	65,1	72,9	69,7	60,4	60,2	51,9	28,7	100
64,1	66,7	66,1	67,1	59	62,1	52,6	32,9	101
65,2	68,3	69,5	72,5	58,3	66,6	57,4	34,9	102
65,5	68,7	75,4	66,7	67,4	63,3	59,5	36,3	103
66,6	68,9	81	67,3	72,1	68,7	61,5	39,5	104
68,3	68,6	78,4	68,3	64,4	69,1	62,5	44,5	105
68,9	68,9	79,7	70	73,2	64,7	63,1	45,7	106

67,8	67,8	83	78,2	66,8	65,2	61,8	43	107
66,2	69,7	80,6	65,4	70,2	63,5	63,3	40,9	108
64,8	70,6	78,2	64,9	70,2	69,8	60,6	38,5	109
63	70,2	72,6	64,3	67,6	63,1	58,6	36,3	110
60,8	66,2	69,5	66,4	60,8	64,1	55,9	35,4	111
61,1	66	69,6	68,5	61,5	59,6	52,5	31,3	112
61,5	66,5	72	66,5	59,6	59,1	50,1	28,4	113
63,5	68,6	72,1	65,2	60,1	56,6	48,9	26,7	114
66	66,7	74,6	57,3	57,1	54,8	48,9	28,6	115
68	67,6	73,3	64,7	61	53,9	42,2	26,9	116
70,1	66,2	71,4	60,8	59,5	53,5	43,2	26,1	117
70,3	70,6	83	78,2	73,2	69,8	63,3	45,7	

Tabla 4.22 “Leq NPS máxima de voz. Elaboración propia”. 2014.

Los datos expuestos se integraron al programa computacional. El procedimiento se explica en el siguiente apartado.

4.4.2 Direccionalidad

Los valores de direccionalidad se integraron al programa con los valores de NPS obtenidos en la cámara semianecómica del LADAc tanto de voz como para caracol (tablas 4.11 a 4.22).

4.4.3 Superficies

En la Plaza de la Estela de los Dos Glifos, como ya se mencionó, las edificaciones fueron construidas con piedra volcánica unida con tepetatillo. Las paredes, de acuerdo con Garza (1995) estaban recubiertas con una capa de estuco y pintura. Los pisos tanto en el interior de los edificios como en plazas y patios consistían en una capa de arcilla bien compactada para nivelar el terreno sobre la cual se colocó un firme de 5 a 10 cm de espesor hecho con gravilla y cal. El acabado se daba mediante una delgada capa de mezcla de cal y arena bien pulida.

El estuco, de acuerdo el estudio realizado por Ortiz¹ (n/d)² et. al. titulado “Aspectos de ciencia de materiales en arquitectura prehispánica: El caso de Xochicalco” concluyen que el material estaba compuesto principalmente de feldespato, calcital y silicoaluminatos.

¹ La investigación estuvo a cargo del departamento de física aplicada y tecnología avanzada del Instituto de Física de la UNAM y el Instituto Nacional de Antropología e Historia.

A continuación se muestran los coeficientes de absorción utilizados para la simulación en CATT Acoustic (tabla 4.23):

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN							
MATERIAL EN SITIO	MATERIAL DE REFERENCIA	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
PISO	Grava, suelo flojo y húmedo	0,25	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
AUDIENCIA	-----	0,25	0,44	0,59	0,56	0,62	0,50
CIELO	-----	99	99	99	99	99	99
ESTUCO PINTADO	Revoco cal-arena	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06

Tabla 4.23 “Coeficientes de absorción utilizados”. Sancho, pp. 185, 2001.

4.4.4 Condiciones ambientales

En el programa de simulación se integraron los valores de las normales climatológicas de temperatura de Alpuyecá (Anexo I). Con esos datos, por medio del programa de cálculo para estimación de factores climáticos del Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet (Anexo 2) se obtuvieron los datos de humedad relativa media.

4.4.5 Cálculo Acústico CATT

La simulación se realizó con los valores de directividad establecidos a partir de la caracterización. Como se mencionó anteriormente se incluyeron los nuevos coeficientes de absorción y condiciones ambientales.

Para obtener los valores recomendados fue necesario agregar una superficie (caja) de 1.6 m de altura en el programa que simulara una congregación de personas al centro de la Plaza debido a que los parámetros se analizan con audiencia (fig. 4.31), en el caso de la simulación de música.

² Documento de: <https://juanbartigas.files.wordpress.com/2012/05/2-aaspectos-de-ciencia-de-materiales-en-arquitectura-prehispc3a1nica-el-caso-de-xochicalco.pdf>

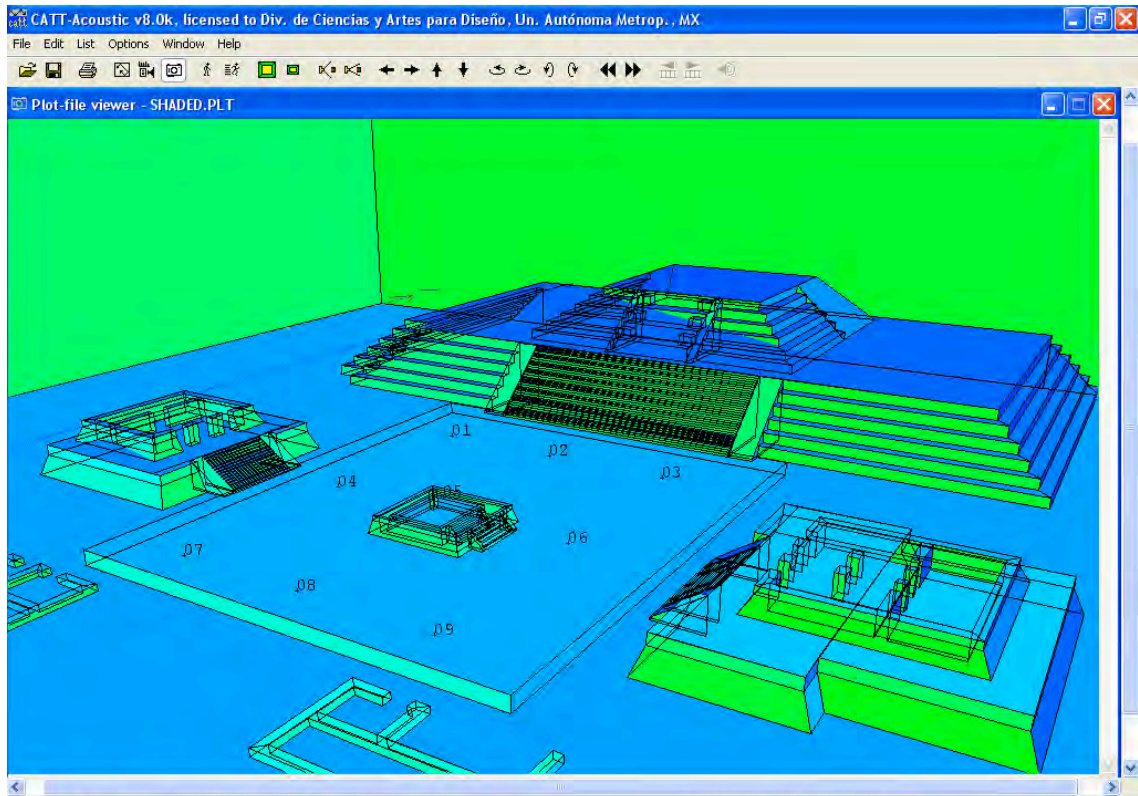


Fig. 4.31 "Adición de caja simulando audiencia CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.

Posteriormente se seleccionó el módulo de predicción para obtener los valores de los parámetros acústicos, así como los ecogramas y el mapeo de NPS en frecuencias de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz.

A continuación se muestra una tabla resumen de los valores obtenidos en la simulación de lenguaje y caracol trompeta. Se exponen los valores de los ocho receptores (excepto el cinco, ya que nadie se encontraba sobre el altar durante una ceremonia) y se muestra el promedio de los mismos.

Se encuentran sombreados en color naranja las frecuencias que se promediaron, ya que los valores recomendados incluyen sólo determinadas frecuencias.

Capítulo 5. Análisis y discusión de los resultados

Una vez realizada la simulación acústica por computadora en el programa CATT Acoustic se obtuvieron los diversos parámetros de evaluación de salas tanto para voz como para música.

Los resultados se reportan a través de un listado (fig. 5.1) y de gráficas (fig. 5.2), mismas que se vertieron en una tabla de Excel para analizar y ponderar los valores obtenidos y de esta manera procesar la información de una manera eficiente.

```

RESULTADOS DE CARACOL CON AUDIENCIA A1.TXT
CATT-Acoustic v8.0k : Acoustic parameters Copyright © CATT 1988-2011
Original file name: C:\DOCUMENTS AND SETTINGS\PJA DE CAJA VOZ\PARAM_A1.TXT
Original save time: 2014-07-10 16:42:23
-----
Project : -
-----
GEOMETRICAL INFORMATION
Src id and loc [m] : A1 48,909 91,992 9,500
Rec id and loc [m] : 01 68,009 67,764 1,600
Rec id and loc [m] : 02 81,909 67,764 1,600
Rec id and loc [m] : 03 96,344 67,764 1,600
Rec id and loc [m] : 04 68,009 47,445 1,600
Rec id and loc [m] : 06 96,344 47,445 1,600
Rec id and loc [m] : 07 68,009 27,126 1,600
Rec id and loc [m] : 08 81,909 27,126 1,600
Rec id and loc [m] : 09 96,344 27,126 1,600
-----
VARIABLE SOURCE DATA
Directivity
Type (library) : Catt_5D0
Dir. Index (DI) [dB] : 9.6 4.8 9.0 4.3 10.2 12.4
Level
On axis 1m [dB] : 95.9 97.8 96.0 102.9 98.5 80.0
Total power [dB] : 97.2 103.9 97.8 109.4 99.1 78.5
Aim
Horizontal angle [°] : -180.0
Vertical angle [°] : 0.0
Point [m] : 48,909 1,000 9,500
Roll angle [°] : 0.0
  
```

Fig. 5.1 “Reporte de resultados de simulación en .txt, programa CATT Acoustic”. Elaboración propia, 2014.

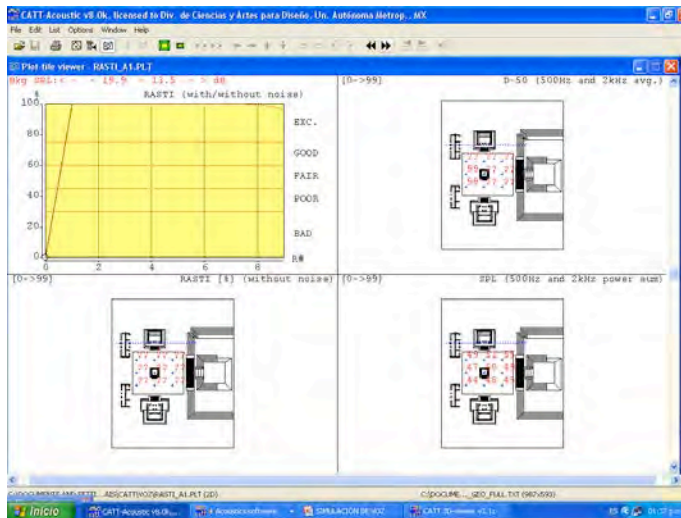


Fig. 5.2 “Reporte gráfico de resultados de simulación, programa CATT Acoustic”. Elaboración propia, 2014.

A continuación se muestran las tablas resumen y las gráficas obtenidas de cada parámetro, así como la discusión de cada uno de ellos en comparación con su valor recomendado.

VOZ ESPACIO CON AUDIENCIA

SONORIDAD MEDIA (Gmid)															
FUENTE A1				FUENTE A2				FUENTE A3				Promedio			
REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom.	REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom.
1	5,8	4,8	7,1	6,7	6,4	4,2	6,9	1	5,5	4,5	6,8	6,4	6,1	3,9	6,4
2	5,6	4,6	6,9	6,5	6,2	4	6,7	2	5,9	4,9	7,2	6,8	6,5	4,3	6,8
3	4,7	3,7	6	5,6	5,3	3,1	5,8	3	5,4	4,4	6,7	6,3	6	3,8	6,3
4	5	4	6,3	5,9	5,6	3,4	6,1	4	4,6	3,6	5,9	5,5	5,2	3	5,5
6	4,5	3,5	5,8	5,4	5,1	2,9	5,6	6	4,3	3,3	5,6	5,2	4,9	2,7	5,2
7	4,9	3,9	6,2	5,8	5,5	3,3	6,0	7	3,8	2,8	5,1	4,7	4,4	2,2	4,7
8	4,6	3,6	5,9	5,5	5,2	3	5,7	8	4,8	3,8	6,1	5,7	5,4	3,2	5,7
9	4,4	3,4	5,7	5,3	5	2,8	5,5	9	3,3	2,3	4,6	4,2	3,9	1,7	4,2
Prom	5,79														

NIVEL DE PRESION SONORA (NPS)															
FUENTE A1				FUENTE A2				FUENTE A3				Promedio			
REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom.	REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom.
1	32,6	38,2	54,9	40,9	38,9	43,3	43,3	1	40,5	40,7	56,1	42,8	40	45,2	45,2
2	27,8	35	49,2	36,9	34,3	38,5	38,5	2	56	56,2	58,1	52,2	45,9	50,6	50,6
3	24,5	31,7	44,6	34,3	30	34,5	34,5	3	40,7	40,9	56,7	43,8	40,5	43,8	43,8
4	29,6	33	51	38,6	34	37	37	4	36,4	36,6	52,2	40,5	35,3	40,8	40,8
6	24,7	32,4	48,1	33,6	31,8	36,6	36,6	6	36,1	36,3	52,9	41,2	34,9	38,5	38,5
7	26,9	29,7	48,5	37,3	29,5	33,9	33,9	7	32,1	32,3	47,8	36	30,1	37,6	37,6
8	25,4	29,3	47,3	33,9	30,5	32,5	32,5	8	36,9	37,1	50,6	43,5	37,6	41,9	41,9
9	21	26,4	43,7	29,3	27,3	30,1	30,1	9	31,4	31,6	49,7	38,8	30,4	35,2	35,2
Prom	26,6	32,0	48,4	35,6	32,0	35,8	35,8	Prom	38,8	39,0	53,0	42,4	36,8	41,7	41,7

TIEMPO DE REVERBERACION MEDIO R _{mid}															
FUENTE A1				FUENTE A2				FUENTE A3				Promedio			
REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom.	REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom.
1	1,84	1,57	0,39	1,49	1,46	1,96	0,9	1	1,65	1,8	1,9	1,8	1,87	1,85	1,9
2	1,1	0,9	1,83	2,61	1,08	1,61	2,2	2	1,83	1,13	1,41	0,53	1,37	1,57	1,0
3	0,71	0,9	1,12	1,42	1,38	1,47	1,3	3	0,78	1,08	1,03	1,27	1,06	1,52	1,2
4	1,92	1,37	0,82	1,47	1,54	1,62	1,1	4	0,56	0,86	0,83	0,41	0,96	0,86	0,6
6	1,95	0,64	0,64	0,73	1,52	0,87	0,7	6	1,24	1,54	1,03	2,15	1,77	1,05	1,6
7	1,75	0,96	1,59	1,76	0,67	0,77	1,7	7	0,96	1,26	1,66	1,87	1,01	0,94	1,8
8	1,22	1,3	1,46	1,5	1,31	1,87	1,5	8	0,54	0,84	1,17	1,43	2,06	0,8	1,3
Prom	1,31	1,36	1,49	1,24	1,24	1,36	1,36	Prom	1,11	1,06	1,11	1,06	1,11	1,06	1,1

Tabla 5.2 "Resultados de simulación 2 (Voz)" Elaboración propia, 2014.

1.- RASTI (Rapid index speech transmission)

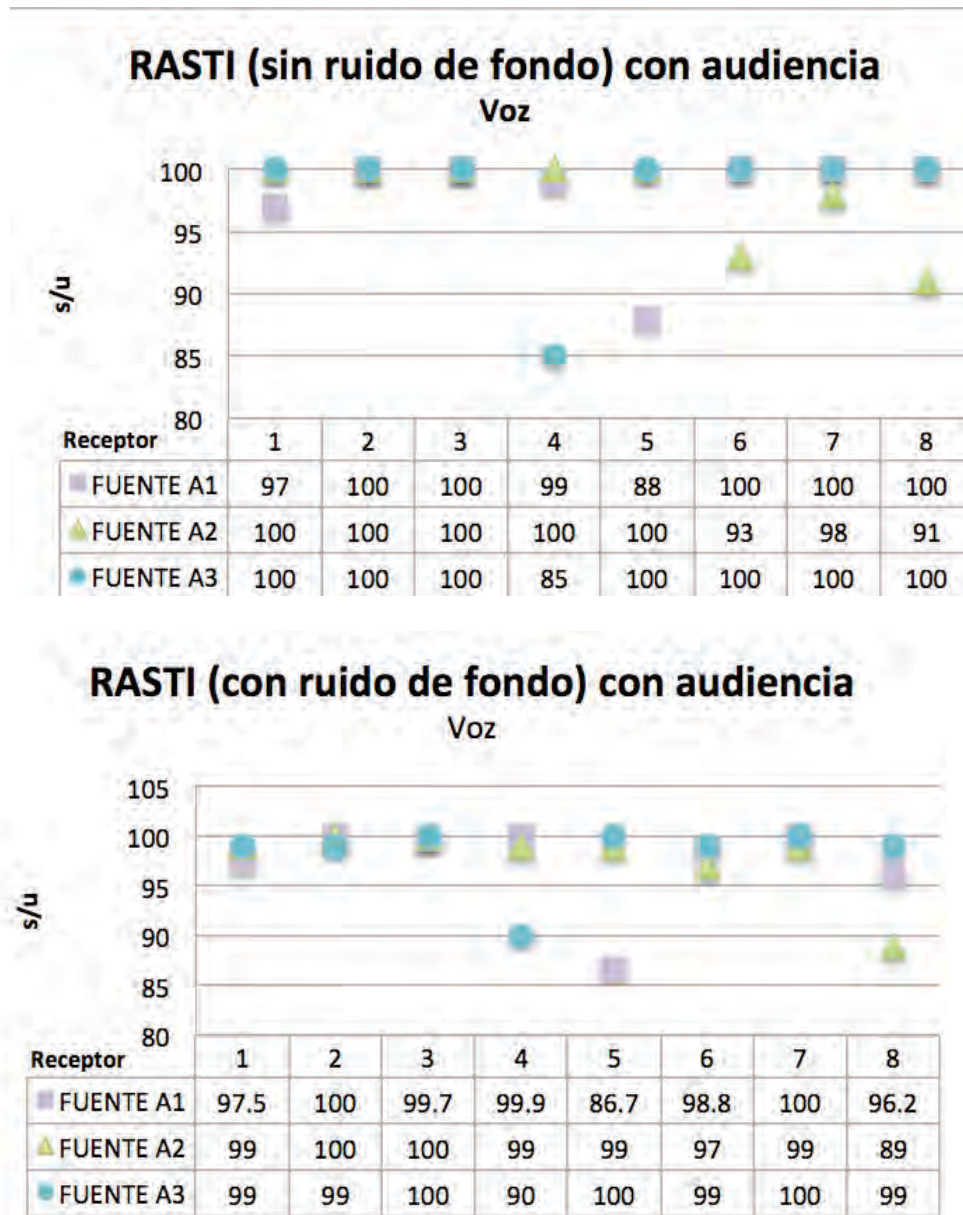


Fig. 5.3 "Gráfica de valores RASTI de simulación de voz con y sin audiencia". Elaboración propia, 2014.

El RASTI indica el grado de inteligibilidad de la palabra. En la Plaza de la Estela de los Dos Glifos se presenta una mejor inteligibilidad en los receptores 1, 2 y 3, mismos que están localizados más cerca de la fuente, por lo que el mensaje oral en ésta posición era escuchado más

claramente. Los receptores 4 y 5, localizados en la mitad de la plaza hacia los extremos perciben el mensaje menos claramente. Sin embargo los valores obtenidos se encuentran entre 80 y 100, lo que se considera "excelente" para los nueve receptores y desde las tres fuentes (fig. 5.3).

2.- Definición (D50)

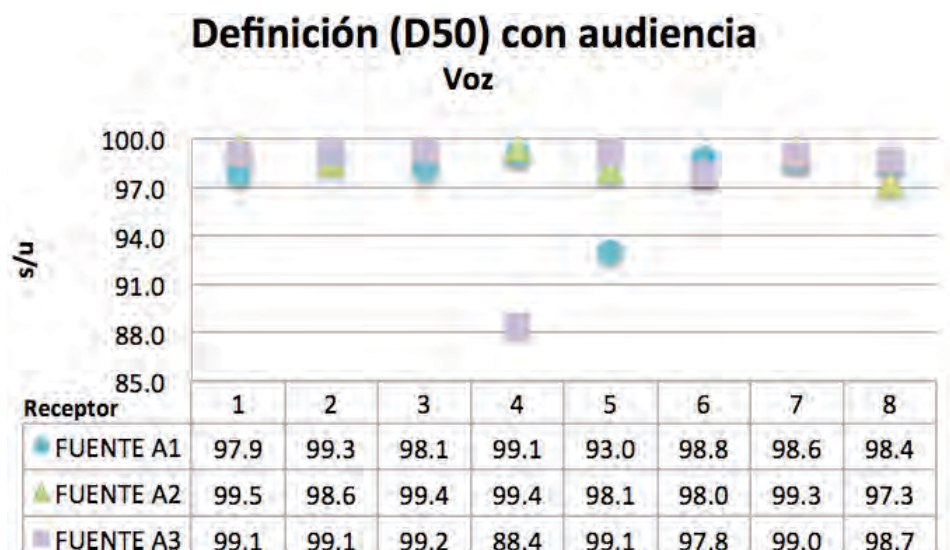


Fig. 5.4 "Gráfica de valores de definición de simulación de voz con audiencia". Elaboración propia, 2014.

Los valores de definición muestran un alto grado de comprensión de los sonidos que componen el mensaje oral, ya que se encuentran cercanos a 100. Los receptores 1, 2 y 3, localizados más cerca de las fuentes presentan un mayor grado de definición, mientras que los receptores 4 y 5 indican valores menores debido a que se encuentran localizados a mayor distancia del emisor. En el caso de la fuente 3 el menor valor se presenta en el receptor 4 y en la fuente 1 (fig. 5.4).

3.- Claridad (C50) La claridad indica el grado de facilidad para comprender un mensaje oral. En el caso de la Plaza, se presenta un alto grado de claridad presente en cada uno de los receptores, sin embargo es más alto en la fuente A2 que se localiza al centro de la Gran Pirámide. En promedio se obtuvo el valor de 2.41 dBA, siendo el parámetro recomendado $C50 < 2$ dBA (fig. 5.5).

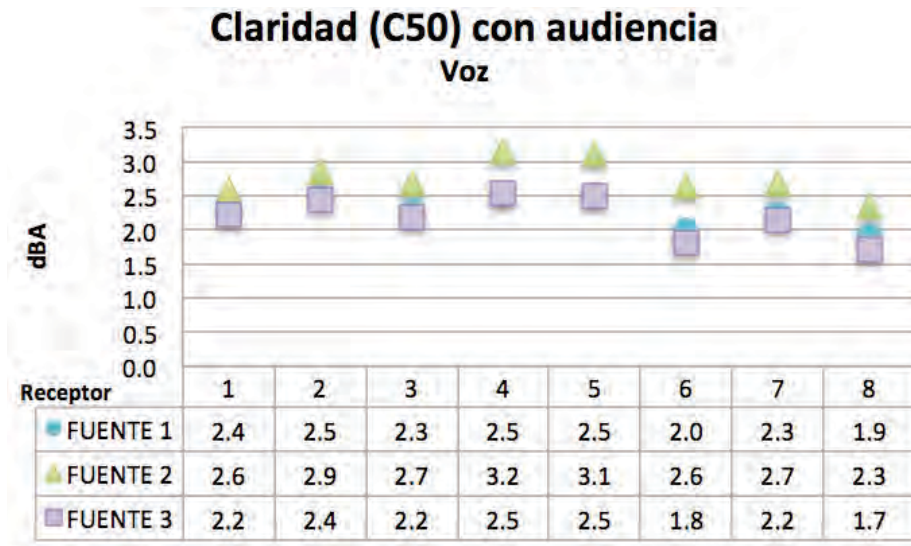


Fig. 5.5 "Gráfica de valores de claridad de simulación de voz con audiencia". Elaboración propia, 2014.

4.- Sonoridad media Gmid

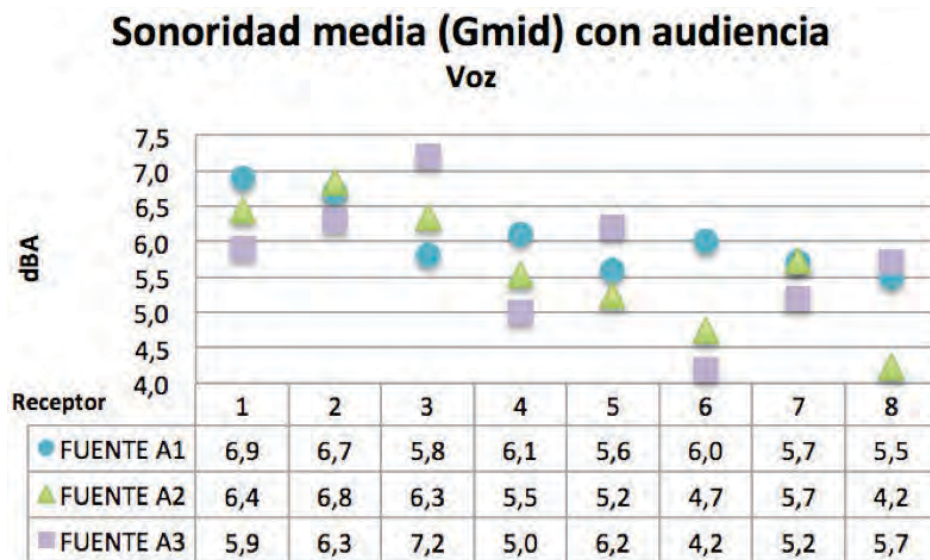


Fig. 5.6 "Gráfica de valores de sonoridad de simulación de voz con audiencia". Elaboración propia, 2014.

En un espacio con audiencia la sonoridad indica el grado de amplificación que produce un espacio sobre el mensaje oral emitido. La sonoridad incrementa de 4,2 a 7,2 dB(A), siendo los

receptores en los que se presenta mayor incremento los que están localizados frente a la fuente (fig. 5.6).

5.- Tiempo de reverberación Tr

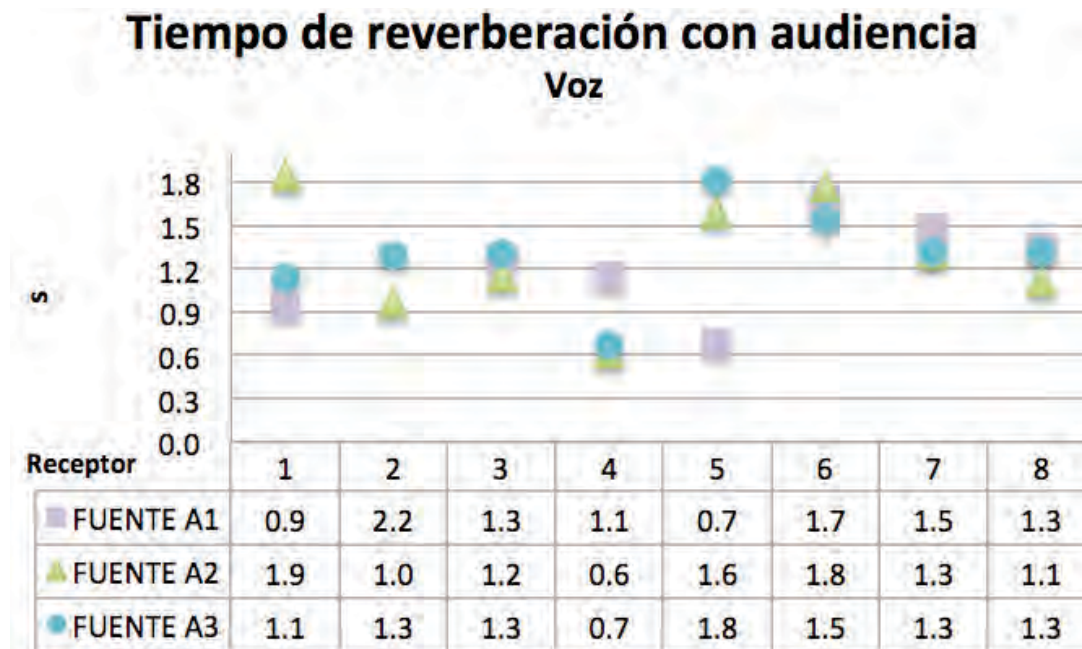


Fig. 5.7 "Gráfica de valores de tiempo de reverberación de simulación de voz con audiencia". Elaboración propia, 2014.

El tiempo de reverberación es el tiempo transcurrido desde que una fuente emisora interrumpe su emisión hasta que el NPS cae en 60 dB. Los valores recomendados para una sala de conferencias es de 1,2 seg. Los receptores que presentan esas cualidades son el 1, 2, 3 y 4. Los demás se encuentran un poco elevados. Sin embargo el promedio presenta un tr de 1.3 s (fig. 5.7).

6.- Nivel de presión sonora (NPS)

A continuación se muestra el nivel de presión sonora que presenta cada receptor. En la gráfica se muestra que la mayor cantidad de dBA se reciben a 500 Hz, posteriormente a 1 kHz, 4 kHz y finalmente a 2 kHz, 125 Hz y 250 Hz (fig. 5.8).

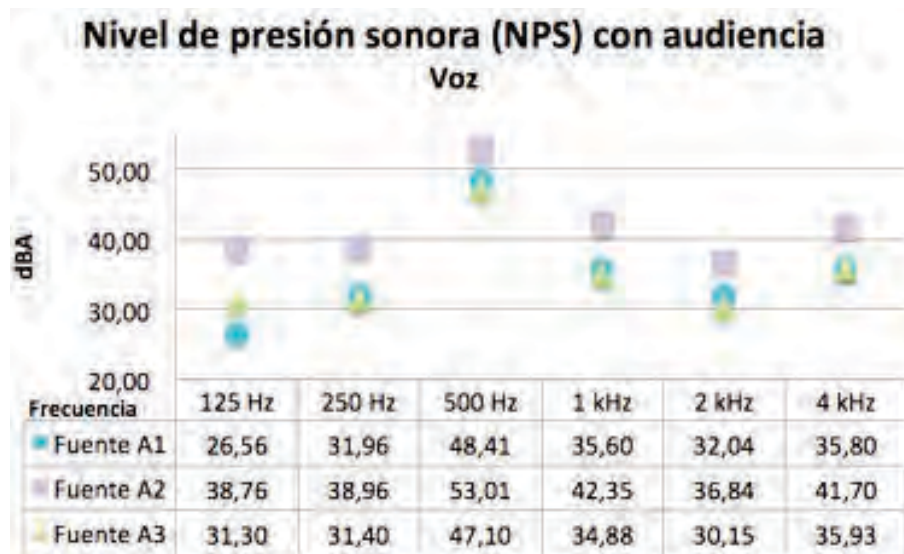


Fig. 5.8 "Gráfica de valores de nivel de presión sonora de simulación de voz con audiencia".
Elaboración propia, 2014.

7.- Mapeo de nivel de presión sonora

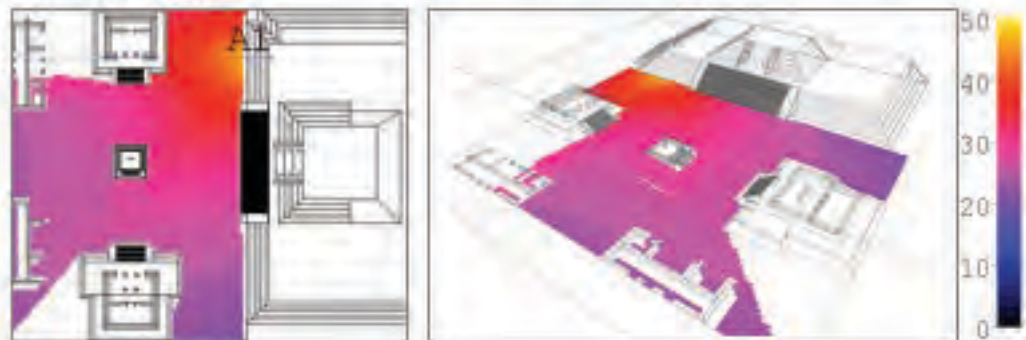
Se realizó en mapeo de nivel de presión sonora en el plano de piso para conocer la distribución sonora del espacio.

A continuación se muestran los mapeos de intensidad sonora de las tres fuentes en las frecuencias de 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz (fig. 5.9, 5.10 y 5.11).

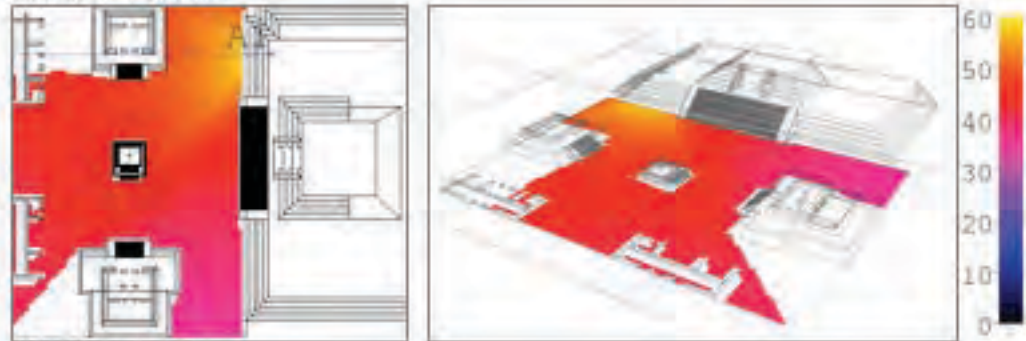
De los mapas se puede concluir que existe una uniformidad del campo sonoro, sin embargo, detrás de las estructuras Este y Oeste es posible visualizar sombras acústicas que impiden el paso del sonido directo.

Las intensidades más fuertes se muestran en las gráficas de nivel de presión sonora. En los gráficos se muestran en una escala en dB(A).

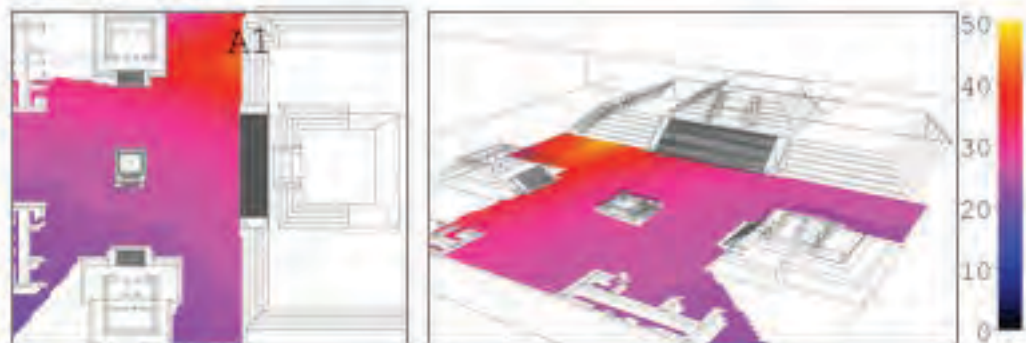
MAPEO DE NIVEL DE PRESIÓN SONORA / Sonido directo/ Tipo de fuente: Voz
Fuente A1 / 250 Hz



Fuente A1 / 500 Hz



Fuente A1 / 1 kHz



Fuente A1 / 2 kHz

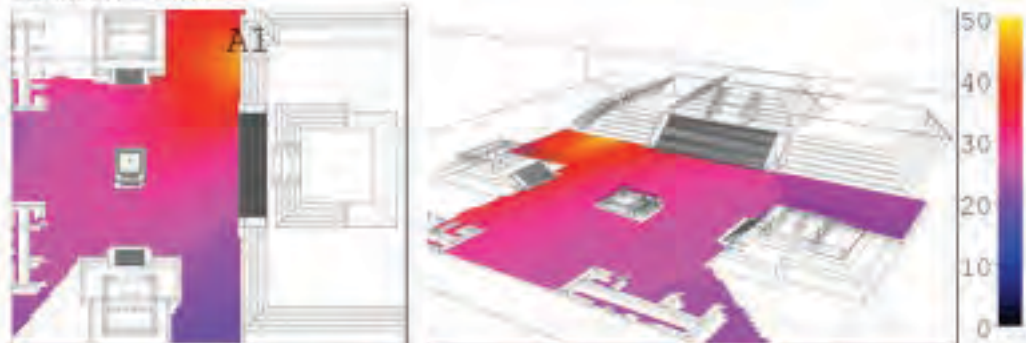
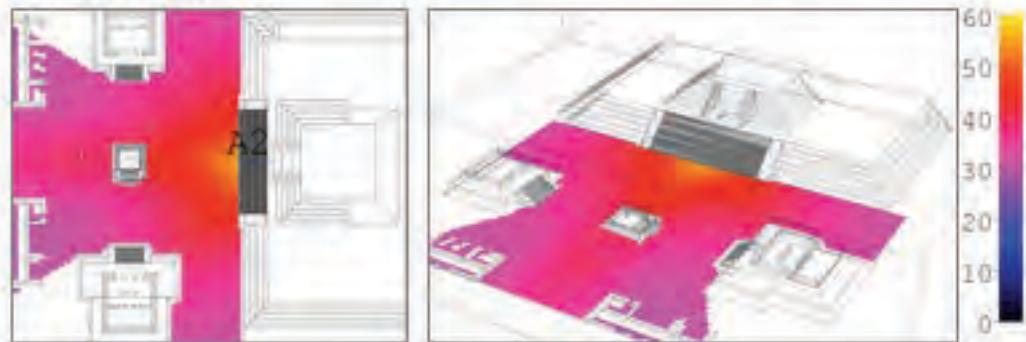
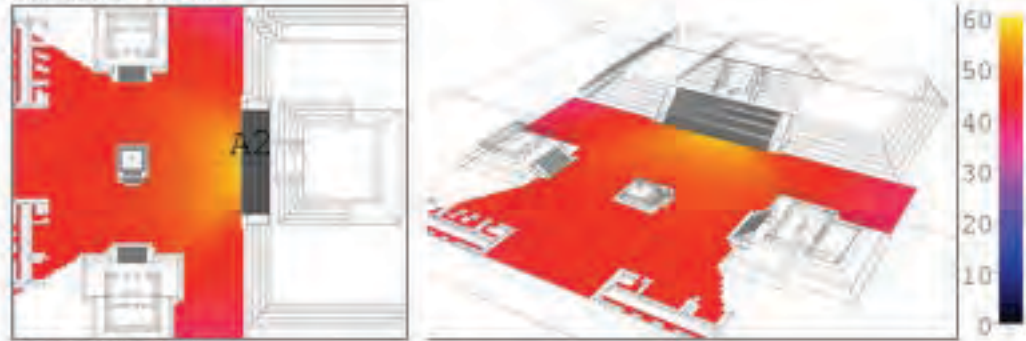


Fig. 5.9 "Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A1". Elaboración propia, 2014.

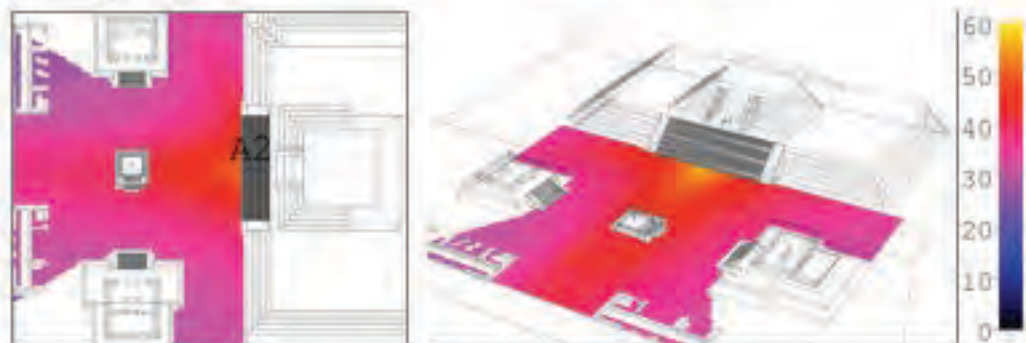
MAPEO DE NIVEL DE PRESIÓN SONORA / Sonido directo/ Tipo de fuente: Voz
Fuente A2 / 250 Hz



Fuente A2 / 500 Hz



Fuente A2 / 1 kHz



Fuente A2 / 2 kHz

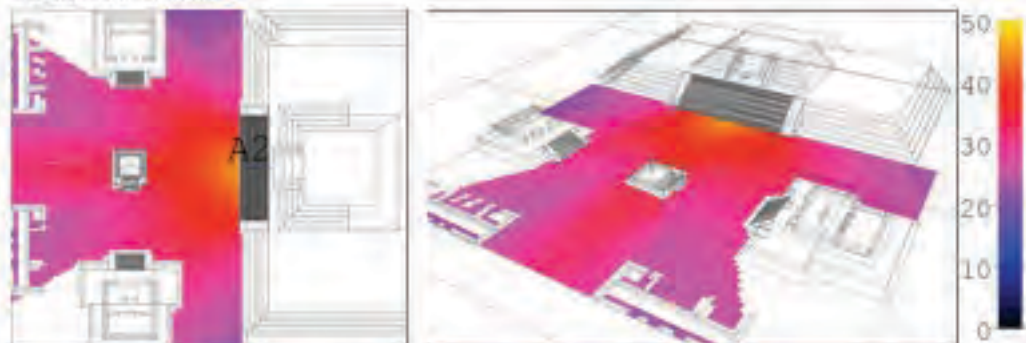
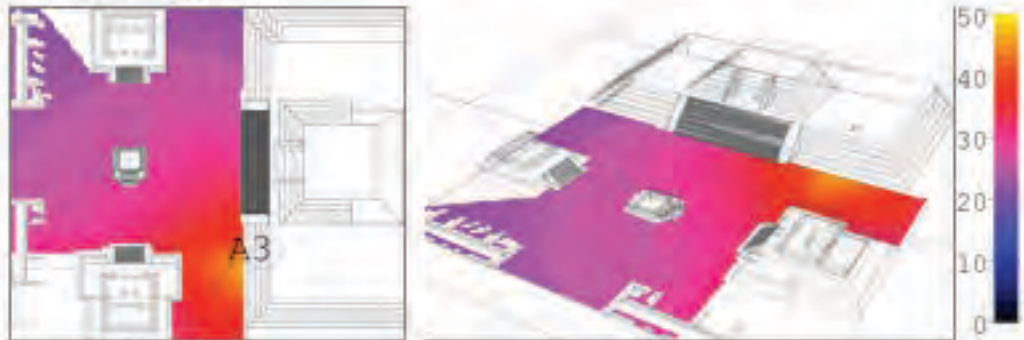
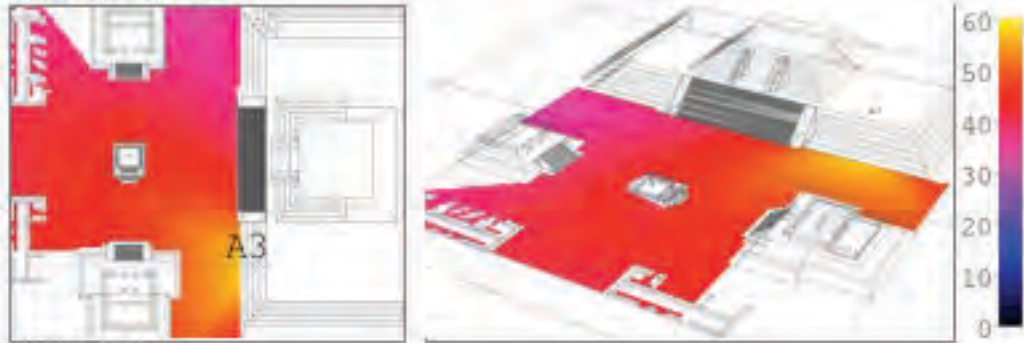


Fig. 5.10 "Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A2". Elaboración propia, 2014.

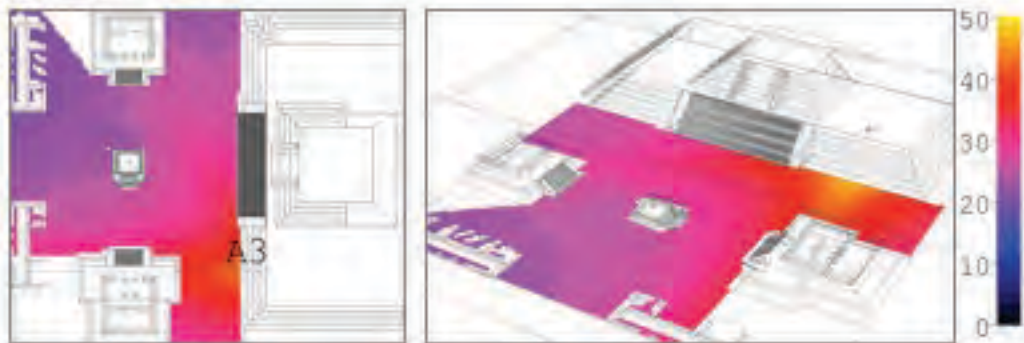
MAPEO DE NIVEL DE PRESIÓN SONORA / Sonido directo/ Tipo de fuente: Voz
Fuente A3 / 250 Hz



Fuente A3 / 500 Hz



Fuente A3 / 1 kHz



Fuente A3 / 2 kHz



Fig. 5.11 "Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A3". Elaboración propia, 2014.

Ecogramas

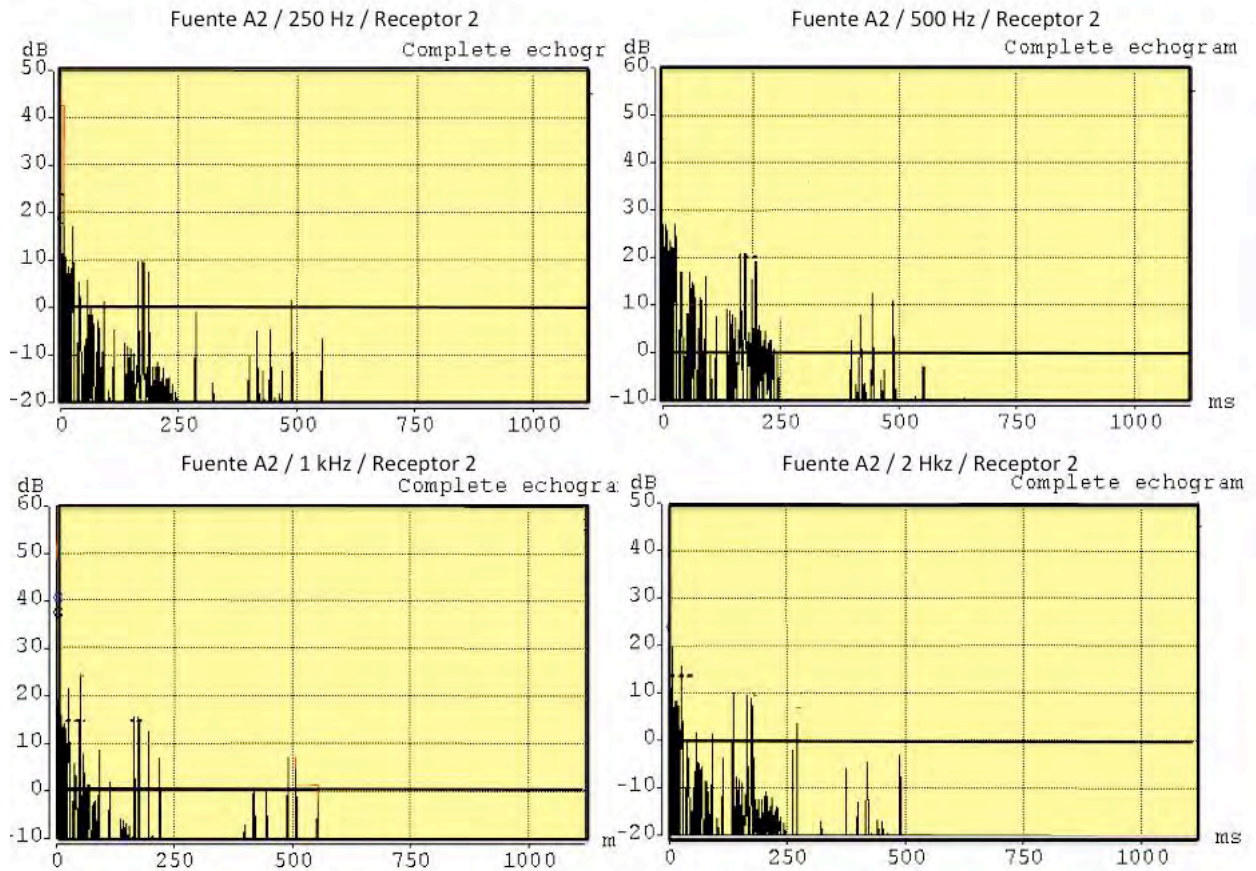


Fig. 5.12 "Ecogramas de simulación de voz con audiencia de fuente A2, receptor 2 en cuatro frecuencias". Elaboración propia, 2014.

Los ecogramas que se muestran provienen de la fuente A2, del receptor 02 en cuatro diferentes frecuencias (fig. 5.12).

A partir de los 50 ms se considera que existe un eco, y esto es respuesta a la configuración arquitectónica de los escalones de las estructuras Oriente y Poniente.

Las curvas de decaimiento presentan una tendencia logarítmica, sin embargo existe una primer reflexión a los 50 ms aproximadamente.

5.2 Resultados de simulación de Caracol trompeta con audiencia o sala llena (tabla 5.3)

CARACOL ESPACIO CON AUDIENCIA													
NIVEL DE PRESIÓN SONORA (NPS)													
FUENTE A1			FUENTE A2			FUENTE A3			Promedio				
REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1	42.3	57.9	46.2	69.7	56.5	30.8	1	46.8	66.9	54.2	73.3	58.1	34
2	36.8	53.5	41.9	67.8	53.2	26.4	2	73	74.6	71.1	76.9	71.4	51.5
3	33.2	52.4	39.2	65.8	49.4	23	3	48.4	67.9	55.5	72.6	58.4	33.6
4	39.3	54.7	42.5	66.6	51.9	25.7	4	44.5	62.9	52.6	69.7	55.1	28.5
6	33.5	50.3	38.9	63.3	49.2	23	6	44.4	61.8	49.5	69.2	53.4	27.7
7	36.8	52.7	40.5	64.9	48.3	22.1	7	42.7	60.7	47.7	67.5	53.2	30.2
8	34.1	50.1	37.4	62.3	47.7	21.1	8	62.5	65	61.7	69.1	62.7	42.7
9	31	46.1	36.2	58.3	44.2	17.6	9	42.7	59.7	48.4	67.1	50.8	24.6
Prom	35.9	52.2	40.4	64.8	50.1	23.7	Prom	50.6	64.9	55.1	70.7	57.9	34.1
CLARIDAD MUSICAL MEDIA (C80)													
FUENTE A1			FUENTE A2			FUENTE A3			Promedio				
REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1	0.3	0.8	1.9	2.4	2.2	2.1	1	0.2	0.9	2.1	2.5	2.3	0.8
2	0.4	0.9	1.9	2.5	2.2	2.20	2	0.3	1.1	2.2	2.9	2.5	1.2
3	0.2	0.7	1.8	2.2	2.1	0.9	3	0.2	0.8	2.1	2.4	2.2	0.9
4	0.6	1.2	2.1	2.5	2.4	2.3	4	0.6	1.2	2.4	2.9	2.6	1.3
6	0.5	1.1	1.9	2.3	2.2	2.13	6	0.5	1.3	2.3	2.8	2.6	1.4
7	-0.2	0.6	0.7	1.4	1	0.9	7	-0.1	0.6	1.2	1.9	1.4	0.3
8	0.2	0.7	0.9	1.7	1.2	1.1	8	0.4	0.5	1.4	2.1	1.7	0.2
9	-0.4	0.4	0.5	1.3	0.8	0.8	9	-0.1	0.6	1.1	1.6	1.3	0.1
Prom	0.3	0.8	1.9	2.4	2.2	2.1	Prom	0.2	0.9	2.1	2.5	2.3	0.8
TIEMPO DE REVERBERACIÓN MEDIO Rt mid													
FUENTE A1			FUENTE A2			FUENTE A3			Promedio				
REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1	0.91	1.27	0.99	1.42	1.53	1.19	1	1.7	1.32	1.68	1.74	1.8	1.49
2	1.19	1.71	1.24	1.62	1.19	1.22	2	2	2.01	2.59	1.29	2.35	2.33
3	1.94	1.67	1.66	1.77	1.5	1.03	3	2.74	1.98	1.31	1.89	1.82	1.58
4	1.15	1.81	1.15	1.24	1.3	0.92	4	1.45	1.61	1.99	2.01	1.85	1.58
6	2.21	1.46	0.87	1.55	1.48	0.7	6	1.77	1.92	0.7	2.15	1.57	1.66
7	1.33	1.98	3.18	1.12	0.96	0.7	7	2.25	1.4	1.59	1.65	1.48	1.49
8	5.73	2.82	1.37	1.19	0.92	1.75	8	0.84	2.42	2.73	1.18	1.05	1.62
9	1.58	1.08	0.83	1.29	1.04	0.91	9	1.77	1.33	0.82	1.17	1.42	1.78
Prom	1.58	1.08	0.83	1.29	1.04	0.91	Prom	1.77	1.33	0.82	1.17	1.42	1.78
Prom	1.58	1.08	0.83	1.29	1.04	0.91	Prom	1.77	1.33	0.82	1.17	1.42	1.78

Tabla 5.3 "Resultados de simulación 1 (Caracol)". Elaboración propia, 2014.

5.3 Resultados de simulación de Caracol trompeta con espacio vacío (tabla 5.4)

CARACOL ESPACIO VACÍO															
EFICIENCIA LATERAL MEDIA (LF)															
FUENTE A1			FUENTE A2			FUENTE A3			Promedio						
REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom	REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom
1	0.9	0.6	3	0.1	0.4	1.1	1.2	1	0.1	0.1	0.4	0.1	0	0.1	0.2
2	1.2	0.4	1.2	0.1	0.1	0.4	0.7	2	0	0	0	0	0	0.0	0
3	1.6	2.2	0.2	0.16	0.17	0.18	1.0	3	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1
4	1.3	0.2	0.6	0.1	0.2	0.4	0.6	4	0	0.1	6.1	0.1	0	0.1	1.6
6	2.7	2.6	2.6	3.1	2.8	2.5	2.8	6	1.4	0.9	0.8	8.2	3.2	2.9	2.8
7	1	0.2	0.6	0.1	0.2	0.5	0.5	7	3.3	3.2	0	2.7	1.3	2.1	2.3
8	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	8	0.1	0	0	0.1	0	0	0.1
9	0.7	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	9	2.4	2.6	2.8	2.2	2.9	1.9	2.5
1.11															
SONORIDAD MEDIA (Gmid)															
FUENTE A1			FUENTE A2			FUENTE A3			Promedio						
REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom	REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom
1	3.8	2.8	5.1	4.2	5.4	3.2	4.7	1	4.4	3.4	5.7	4.6	5.8	3.6	5.2
2	4.2	3.2	5.5	4	5.2	3	4.8	2	4	3	5.3	4	5.2	3	4.7
3	3.8	2.8	5.1	3.9	5.1	2.9	4.5	3	3.7	2.7	5	4	5.2	3	4.5
4	5.9	4.9	7.2	6.7	7.9	5.7	7.0	4	6.3	5.3	7.6	6.7	7.9	5.7	7.2
6	7.1	6.1	8.4	5.6	6.8	4.6	7.0	6	7.3	6.3	8.6	5.6	6.8	4.6	7.1
7	4	3	5.3	4.1	5.3	3.1	4.7	7	3.8	2.8	5.1	4.4	5.6	3.4	4.8
8	3.9	2.9	5.2	3.9	5.1	2.9	4.6	8	3.7	2.7	5	4.1	5.3	3.1	4.6
9	3.6	2.6	4.9	3.5	4.7	2.5	4.2	9	3.3	2.3	4.6	3.5	4.7	2.5	4.1
5.05															
CLARIDAD MUSICAL MEDIA (C80)															
FUENTE A1			FUENTE A2			FUENTE A3			Promedio						
REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom	REC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Prom
1	1.3	1.7	2.5	2.7	2.4	1.7	2.5	1	1.4	2.2	2.8	2.9	2.9	1.7	2.9
2	1.6	2	2.6	2.9	2.8	2	2.8	2	1.6	2.4	2.6	3.2	2.9	1.9	2.9
3	1.4	1.8	2.3	2.6	2.2	1.7	2.4	3	1.4	2.3	2.6	2.8	2.9	1.6	2.8
4	0.6	1.2	2.5	2.9	2.7	1.2	2.7	4	0.9	0.9	2.6	3.1	2.9	0.8	2.9
6	0.6	1.2	2.4	2.8	2.6	1.3	2.6	6	0.8	0.8	2.4	2.9	2.8	0.8	2.7
7	-1.2	0.9	1.2	1.5	1.3	0.7	1.3	7	0.4	0.6	1.5	1.7	1.5	0.5	1.6
8	0.6	1	1.1	2.1	1.2	0.9	1.5	8	0.5	0.7	2.1	2.3	2	0.7	2.1
9	-1.6	0.8	1.1	1.3	1.2	0.6	1.2	9	0.4	0.5	1.1	1.6	1.2	0.3	1.3

Tabla 5.4 "Resultados de simulación 2 (Caracol)". Elaboración propia, 2014.

1.- Tiempo de reverberación Tr

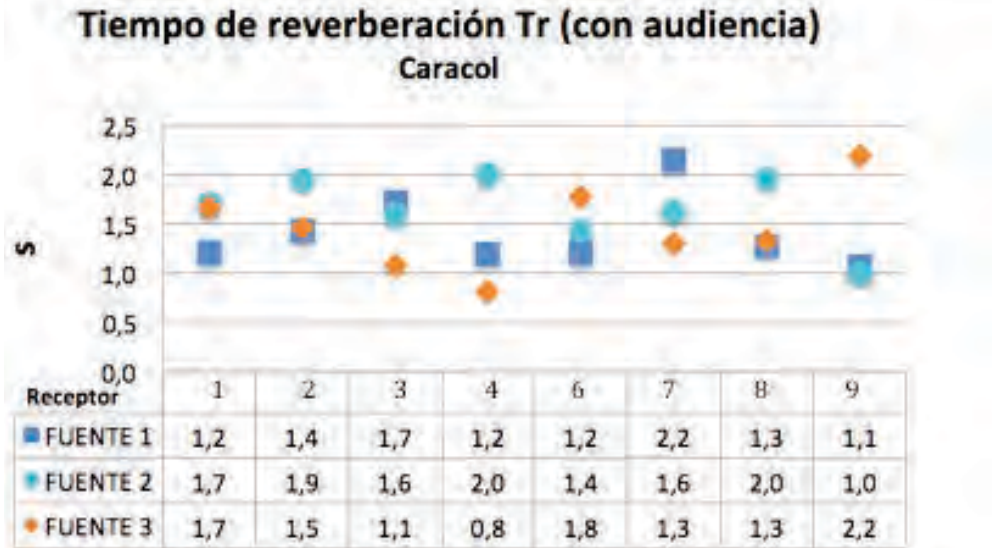


Fig. 5.13 "Gráfica de valores de tiempo de reverberación de simulación de caracol con audiencia".
Elaboración propia, 2014.

Los valores recomendados para tiempo de reverberación para música es de 1.6 s, mismos que se presentan en todos los receptores excepto el 2, 4, 7, 8 y 9. Principalmente en la fuente A2. Sin embargo el promedio de los ocho receptores y las tres fuentes fue de 1.5 s (fig. 5.13).

2.- Claridad musical (C80)

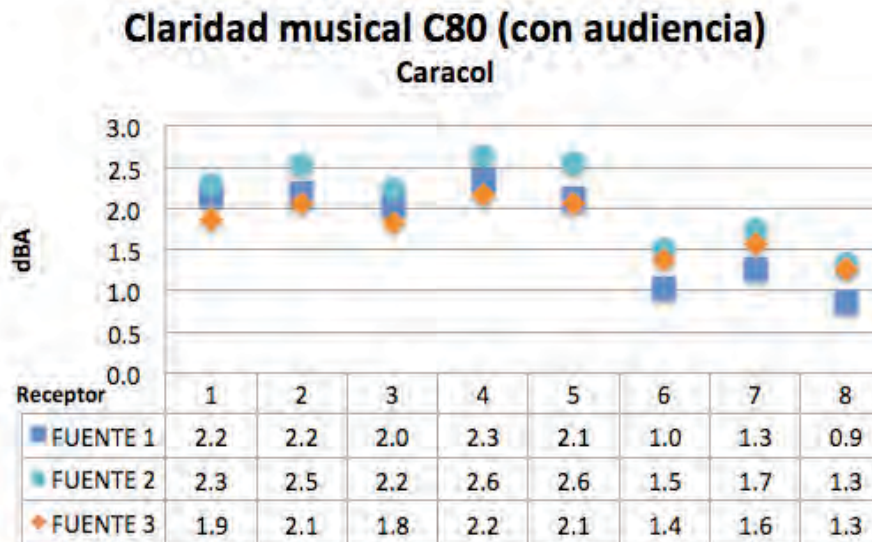


Fig. 5.14 "Gráfica de valores de claridad musical de simulación de caracol con audiencia".
Elaboración propia, 2014.

El parámetro de claridad musical indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical. Los parámetros recomendables se encuentran entre -4 y 0 dBA, sin embargo el valor promedio obtenido fue de 1.88, esto posiblemente sea un parámetro que se debe reconsiderar ya que la música prehispánica no es como la de cámara u orquesta entre otras (fig. 5.14).

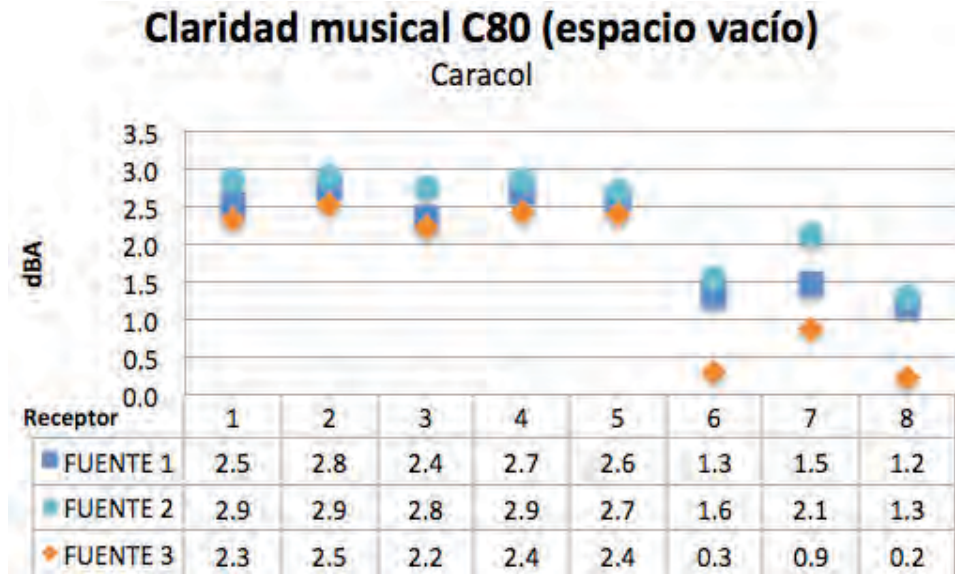


Fig. 5.15 "Gráfica de valores de claridad musical de simulación de caracol sin audiencia".
Elaboración propia, 2014.

Los valores de claridad en el espacio vacío recomendados son de -2 a 2 dBA. En éste caso se obtuvo un promedio de 2.06, siendo los de mayor valor los cercanos a la fuente sonora (fig. 5.15).

3.- Sonoridad (Gmid)

Los valores de sonoridad oscilan entre 4 y 7 dBA, presentando una amplificación de sonido mayor en los receptores frente a la fuente que en los laterales (fig. 5.16).

Sonoridad media Gmid (espacio vacío) Caracol

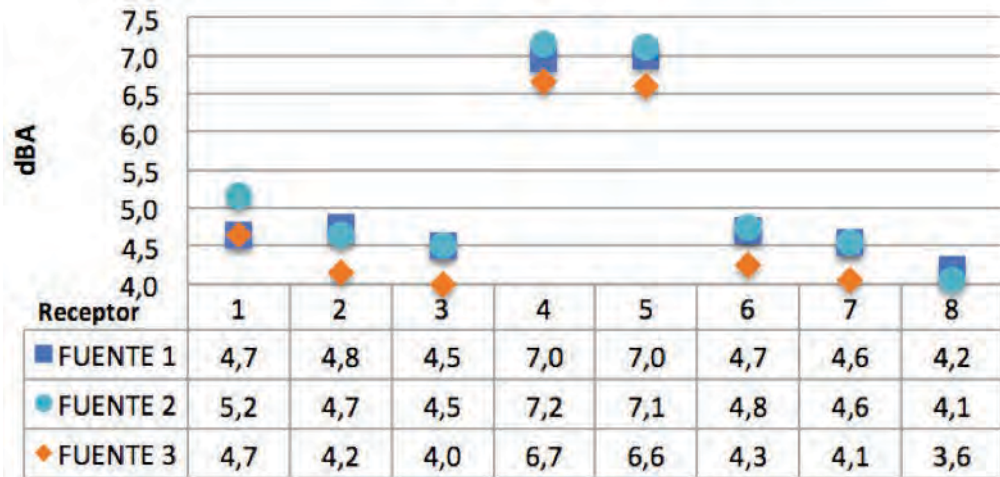


Fig. 5.16 "Gráfica de valores de sonoridad media de simulación de caracol sin audiencia". Elaboración propia, 2014.

4.Eficiencia lateral media (LF)

Eficiencia lateral media LF (espacio vacío) Caracol



Fig. 5.17 "Gráfica de valores de eficiencia lateral media de simulación de caracol sin audiencia". Elaboración propia, 2014.

La eficiencia lateral media indica la impresión espacial del sonido. (amplitud aparente de la fuente sonora). Los valores recomendados sugieren un LF mayor a 0,19. Los receptores 4 y 6 son

los que presentan mayor LF debido a la geometría del espacio y su cercanía con las pirámides laterales por lo que presentan un mayor refuerzo sonoro (fig. 5.17).

5.- Nivel de presión sonora (NPS)

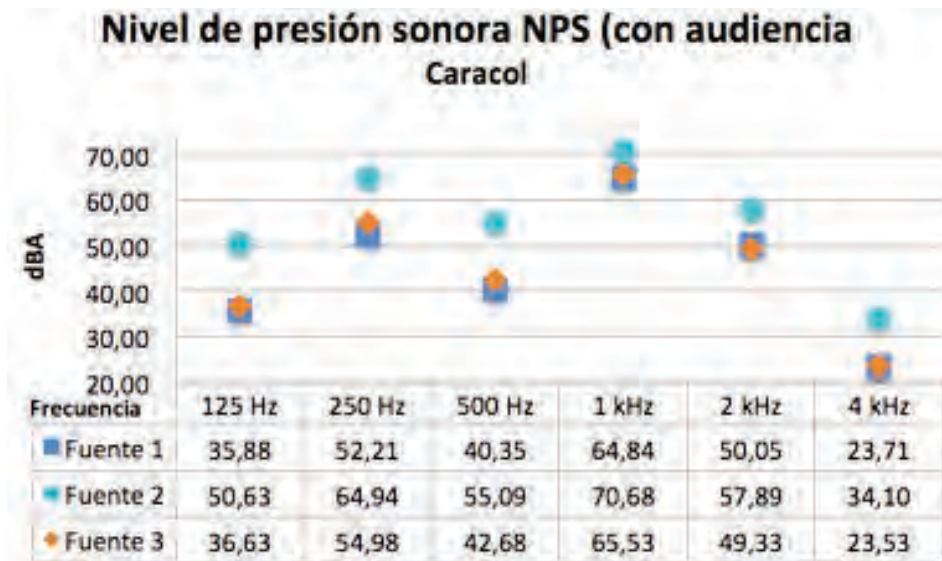


Fig. 5.18 "Gráfica de valores de nivel de presión sonora de simulación de caracol con audiencia".
Elaboración propia, 2014.

La menor pérdida de nivel de presión sonora se presenta en la frecuencia de 1kHz, posteriormente 250 Hz, 2 kHz, 500 Hz, 125 Hz y 4 kHz (fig. 5.18).

6.- Mapeo de nivel de presión sonora

Al igual que el mapeo de voz, en la simulación para caracol trompeta en espacio vacío es posible observar zonas de sombra acústica producidas en la parte posterior de las estructuras oriente y poniente.

El campo sonoro directo permanece uniforme y presenta un mayor nivel de presión sonora en los receptores cercanos a las fuentes (fig. 5.19, 5.20 y 5.21).

No hay presencia de focalizaciones o concentraciones de sonido tanto para voz como para música.

La escala que se presenta a un lado de cada mapa es en dBA.

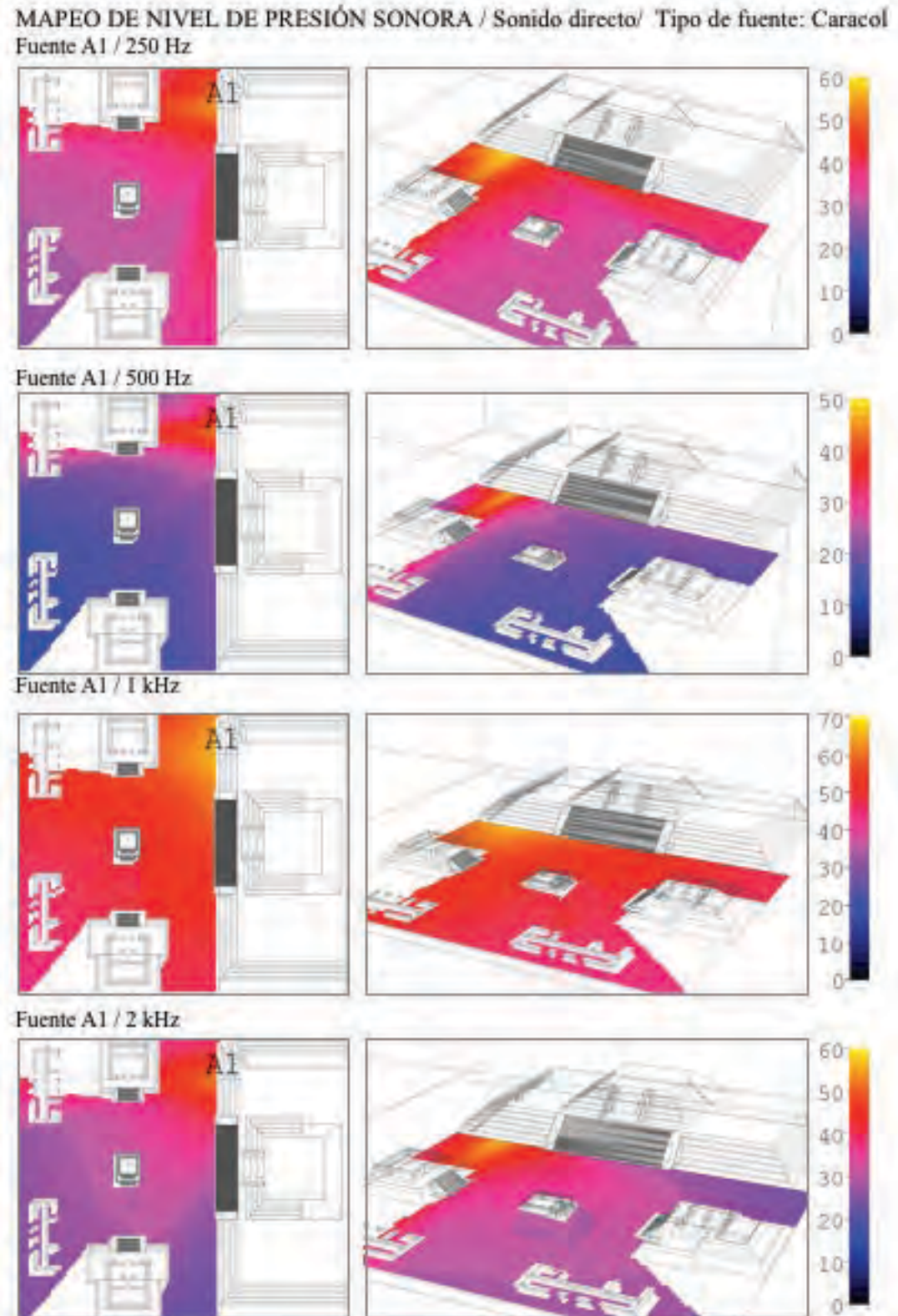
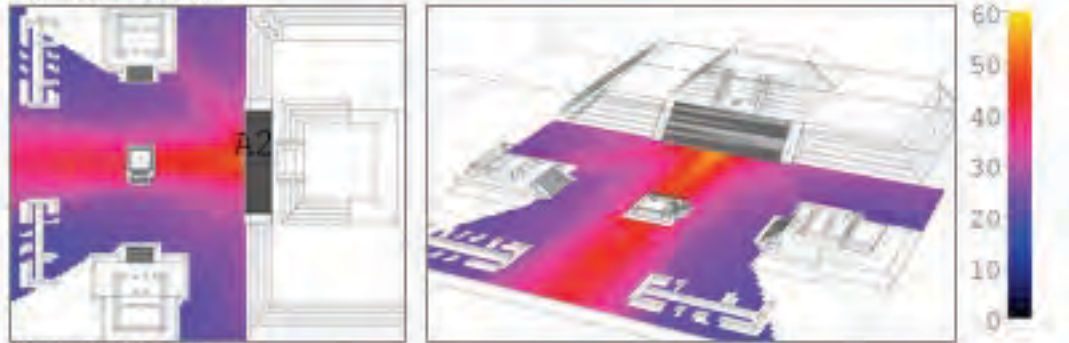


Fig. 5.19 “Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A1”. Elaboración propia, 2014.

MAPEO DE NIVEL DE PRESIÓN SONORA / Sonido directo/ Tipo de fuente: Caracol
Fuente A2 / 250 Hz



Fuente A2 / 500 Hz



Fuente A2 / 1 kHz



Fuente A2 / 2 kHz

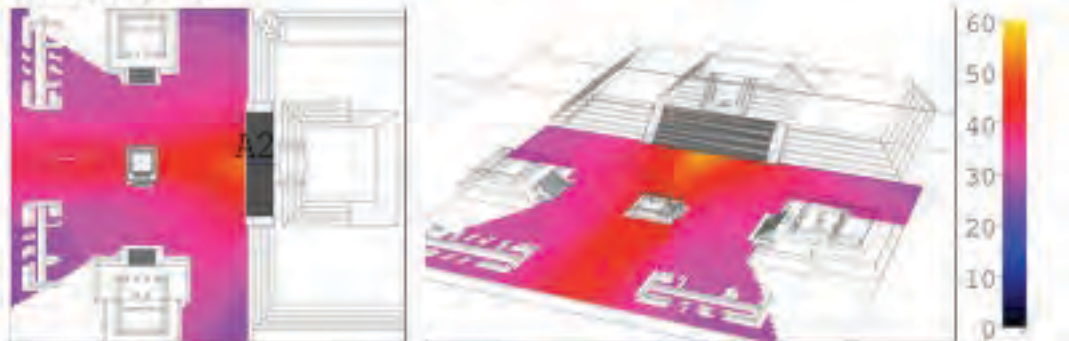


Fig. 5.20 "Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A2". Elaboración propia, 2014.

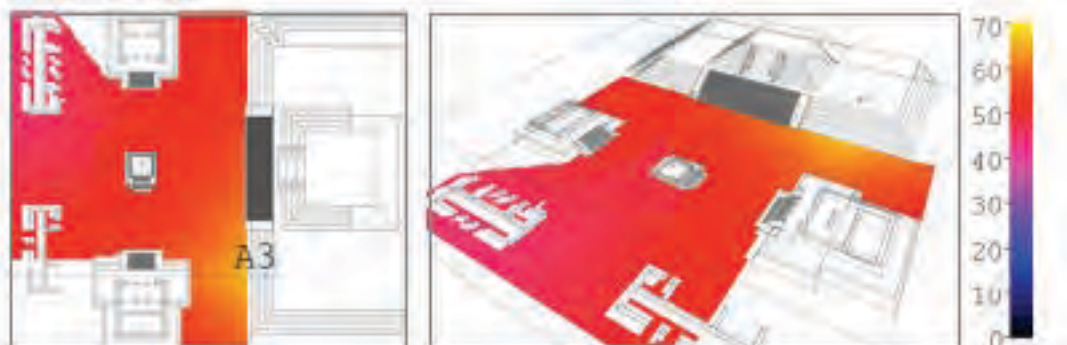
MAPEO DE NIVEL DE PRESIÓN SONORA / Sonido directo/ Tipo de fuente: Caracol
Fuente A3 / 250 Hz



Fuente A3 / 500 Hz



Fuente A3/ 1 kHz



Fuente A3 / 2 kHz



Fig. 5.21 "Mapeo de nivel de presión sonora, simulación de voz en fuente A3". Elaboración propia, 2014.

Ecogramas

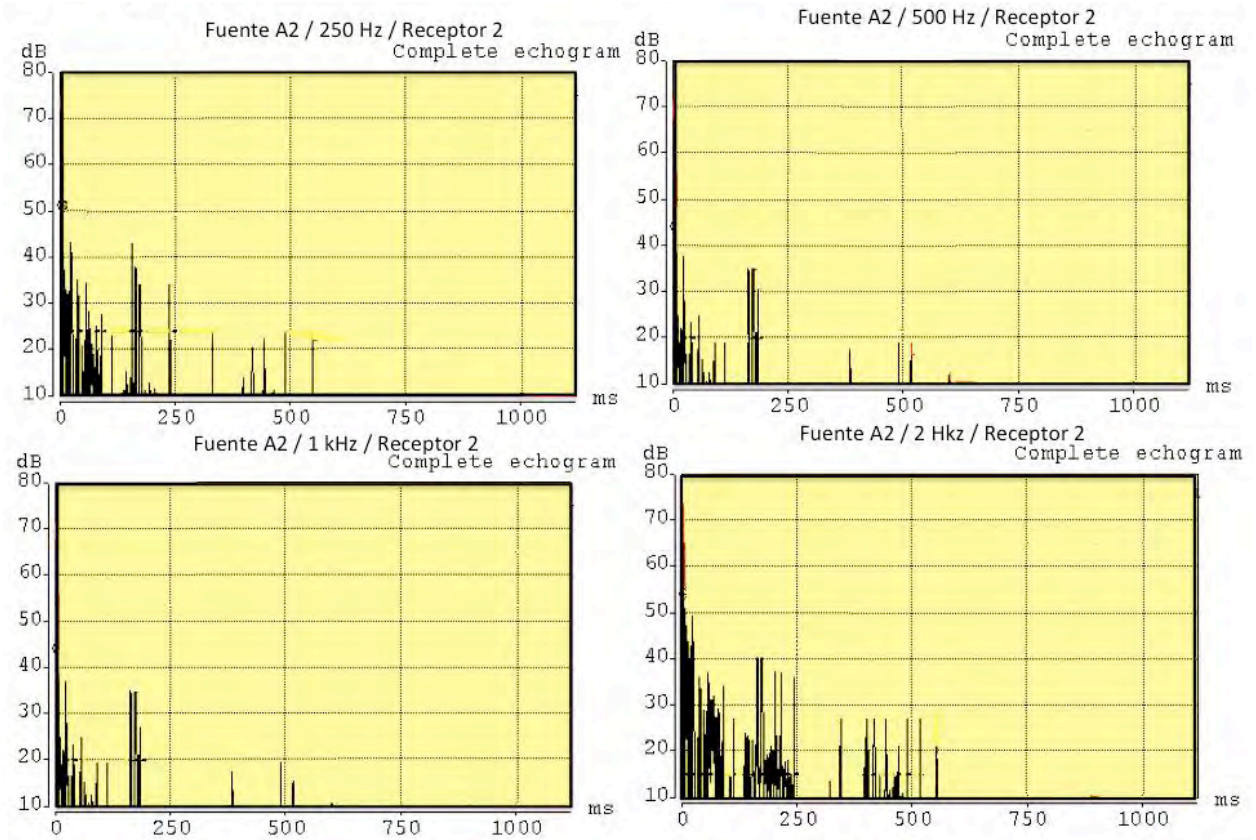


Fig. 5.22 "Ecogramas de simulación de caracol con audiencia de fuente A2, receptor 2 en cuatro frecuencias". Elaboración propia, 2014.

Se presentan los ecogramas provenientes de la fuente A2, receptor 02 en cuatro diferentes frecuencias (fig. 5.22).

La curva de decaimiento presenta un comportamiento logarítmico hasta los 200 ms en donde se presenta un eco.

5.4 Tabla resumen

Por último se presenta una tabla resumen (tabla 5.5) que relaciona los parámetros acústicos y sus valores recomendados comparando los valores obtenidos en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos.

LENGUAJE					
Parámetro acústico	Audiencia /vacío	Valor recomendado	Unidad	Descripción	Valor de Plaza
Tiempo de reverberación RT (500 Hz a 1 kHz)	Espacio con audiencia	$0.7 \leq Rt \leq 1.2$	s	Tiempo transcurrido desde que una fuente emisora interrumpe su emisión hasta que el NPS cae en 60 dB.	1.31
Claridad de la voz C50 (speech average)	Espacio con audiencia	$C50 > 2$	dB	Grado de facilidad para comprender un mensaje oral	2.41
Definición D (125 Hz a 4 kHz)	Espacio con audiencia	$D > 0.5$ (50%)	s/u	Grado de facilidad para comprender los sonidos de un mensaje oral	98.04
RASTI	Espacio con audiencia	$RASTI \geq 0.65$ (65%)	s/u	Grado de inteligibilidad de las palabras	97.78
Sonoridad media Gmid (500 Hz a 2 kHz)	Espacio con audiencia	$4 \leq Smid \leq 8$ dB (orientación frontal actor)	dB	Grado de amplificación que produce un espacio sobre el mensaje oral emitido	7.14
		$2 \leq Smid \leq 6$ dB (orientación lateral actor)			5.53
MÚSICA					
Parámetro acústico	Audiencia /vacío	Valor recomendado	Unidad	Descripción	Valor de Plaza
Tiempo de reverberación RT (500 Hz a 1 kHz)	Espacio con audiencia	1.6	s	Tiempo transcurrido desde que una fuente emisora interrumpe su emisión hasta que el NPS cae en 60 dB.	1.50
Claridad musical media C80 (music average) (500 Hz a 2 kHz)	Espacio con audiencia	$-4 \leq C80 \leq 0$	dB	Grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical.	1.88
	Espacio vacío	$-2 \leq C80 \leq +2$	dB		2.06
Sonoridad media Gmid (500 Hz a 1 kHz)	Espacio vacío	$4 \leq Gmid \leq 5.5$	dB	Grado de amplificación producido por la sala	5.05
Eficiencia lateral media LFE (125 a 1 kHz)	Espacio vacío	$LFE \geq 0.19$	s/u	Impresión espacial del sonido. (amplitud aparente de la fuente sonora)	1.11

Tabla 5.5 "Resumen de resultados de parámetros acústicos de evaluación para lenguaje y música". Elaboración propia, 2014.

La tabla resumen muestra los resultados de los parámetros acústicos obtenidos de la Plaza de la Estela de los Dos Glifos.

1. Lenguaje

- Tiempo de reverberación : El sonido permanece en el espacio 1 ms más de lo recomendado para salas de conferencias, sin embargo no es perjudicial para la comprensión de los mensajes orales.
- Claridad de la voz : Se muestra con un valor de 2.41, por lo tanto el grado de facilidad para comprender el mensaje es alto.
- Definición : Muy cercano al 100, la definición del mensaje oral es excelente, por lo que se puede concluir que es fácil percibir los diferentes sonidos que integran el mensaje.
- RASTI : Con un valor de 97.78, muestra un excelente grado de inteligibilidad de las palabras.
- Sonoridad media : La sonoridad presenta un incremento de entre 4.2 y 7.2 dBA en la orientación frontal a la fuente.

2. Música

- Tiempo de reverberación : El sonido decae 60 dBA 1 ms más pronto que el recomendado. Sin embargo se considera adecuado para transmitir sonidos musicales.
- Claridad musical media : Con un valor de 2.06 para espacio vacío y 1.88 para espacio con audiencia, siendo más altos que los valores recomendados, lo cual podría interpretarse como una comprensión no tan clara cuando se habla de la diferenciación de los sonidos de la “melodía”.
- Sonoridad media : Al igual que para el mensaje oral, el espacio presenta un incremento del sonido. En los receptores frente a la fuente se presenta un mayor incremento de la NPS.
- Eficiencia Lateral : Se obtuvo un valor de 1,11, lo cual indica una impresión espacial positiva. Frente a la fuente, es posible percibir una amplificación del mensaje musical.

5.5 Simulación de ruido por impulso: Fuente al centro de la Plaza

El efecto acústico de tipo “barrido” en éste espacio se genera por medio de un aplauso cuando el emisor se localiza al centro del mismo. Por ello, se determinó importante mostrar el efecto que se produce cuando una fuente de este tipo es emitida por medio de los ecogramas en CATT Acoustic. Aunque no es un estudio exhaustivo del efecto (ya que para ello es necesario utilizar la teoría ondulatoria y tratar los datos con ecuaciones de onda), se mostrará la respuesta acústica en función del tiempo y el nivel de presión sonora por medio de ecogramas, mapeo de sonido directo y valores cuantitativos.

Para realizar la simulación en CATT Acoustic se estableció la fuente de impulso al centro y los nueve receptores permanecieron en la misma posición. Se ingresaron los valores de ruido de fondo previamente establecidos, así como los coeficientes de absorción de los materiales (estuco) y los valores de direccionalidad de la fuente de impulso (fig. 5.23).

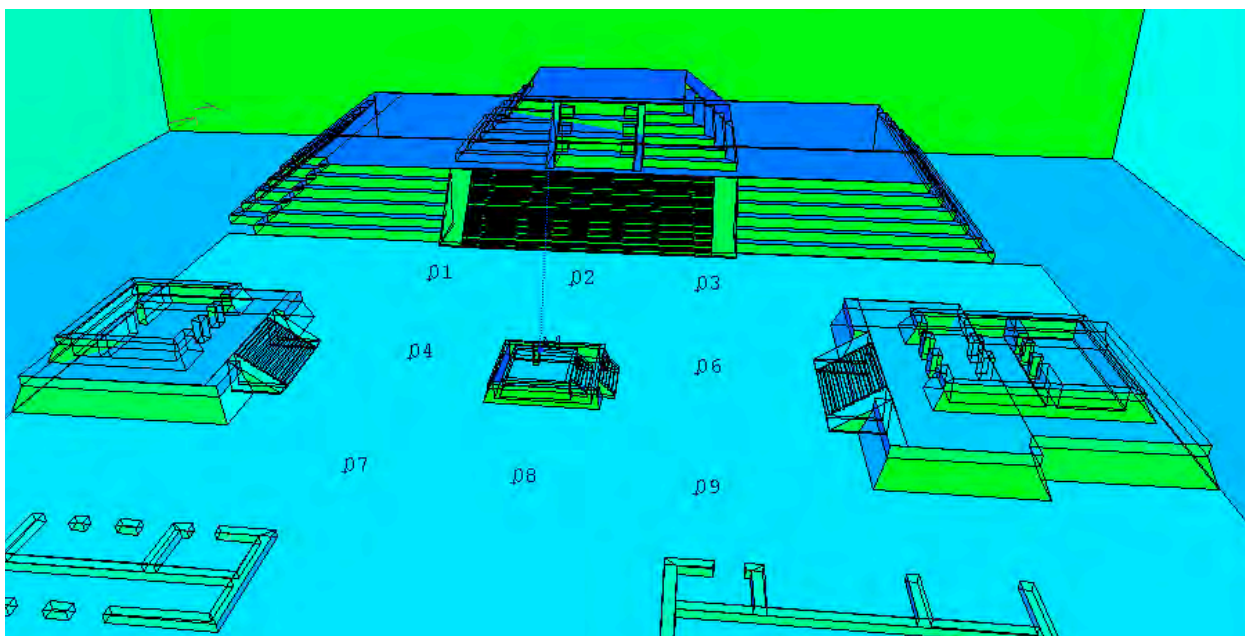


Fig. 5.23 “Ubicación de fuentes y receptores para simulación de ruido de impulso al centro de la Plaza”. Elaboración propia, 2014.

Se obtuvieron los ecogramas (fig. 5.24, 5.25 y 5.26) que presentan el decaimiento del sonido. Se reportarán los ecogramas en cuatro diferentes frecuencias de tres receptores, el 02, 04 y 06, debido a que son los más representativos por su cercanía con las escalinatas de los basamentos oriente y poniente y la Gran Pirámide.

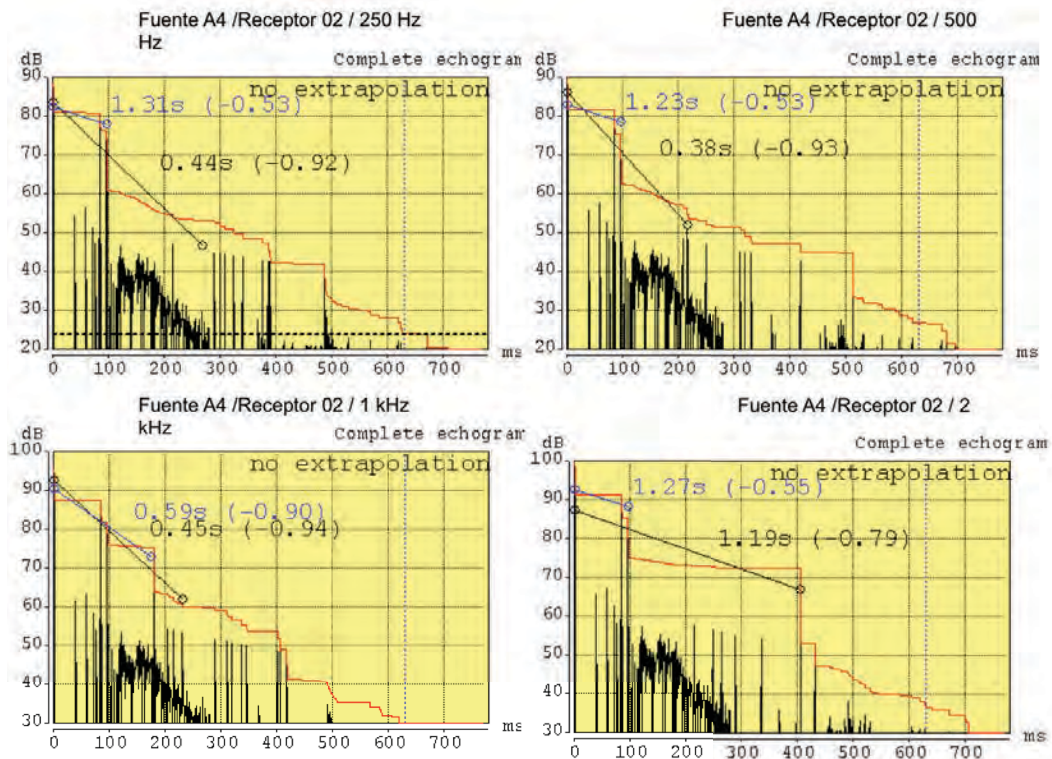


Fig. 5.24 "Ecogramas de respuesta acústica de receptor 2 producido por fuente A4 de ruido de impulso CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.

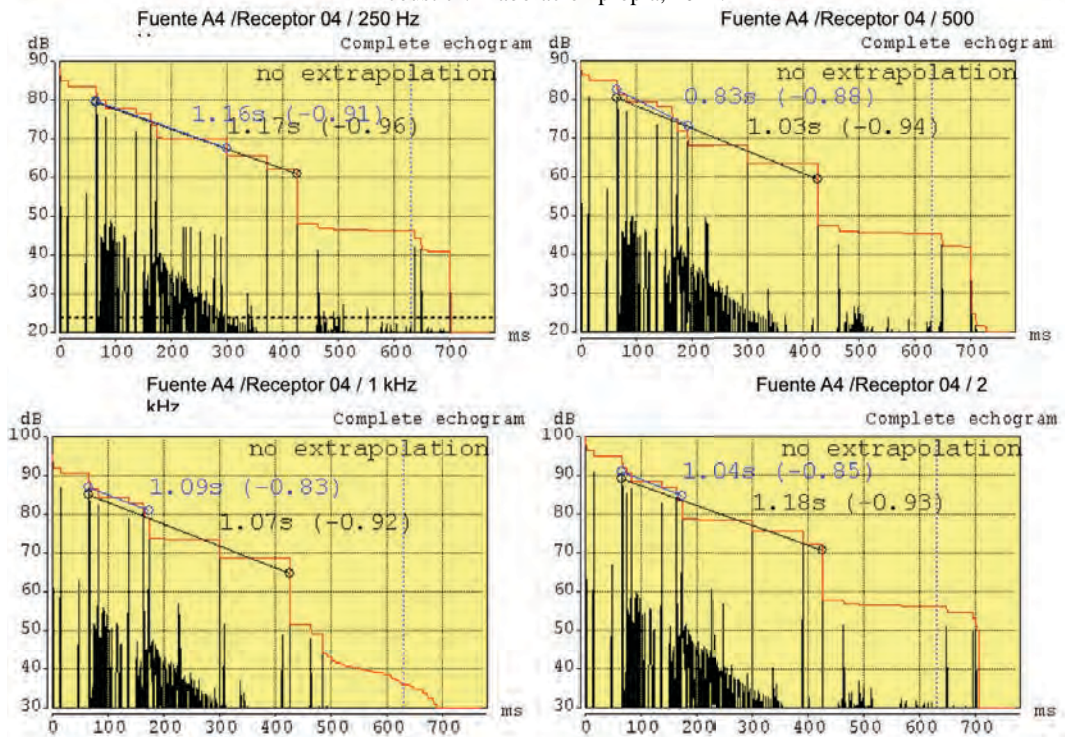


Fig. 5.25 "Ecogramas de respuesta acústica de receptor 2 producido por fuente A4 de ruido de impulso CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.

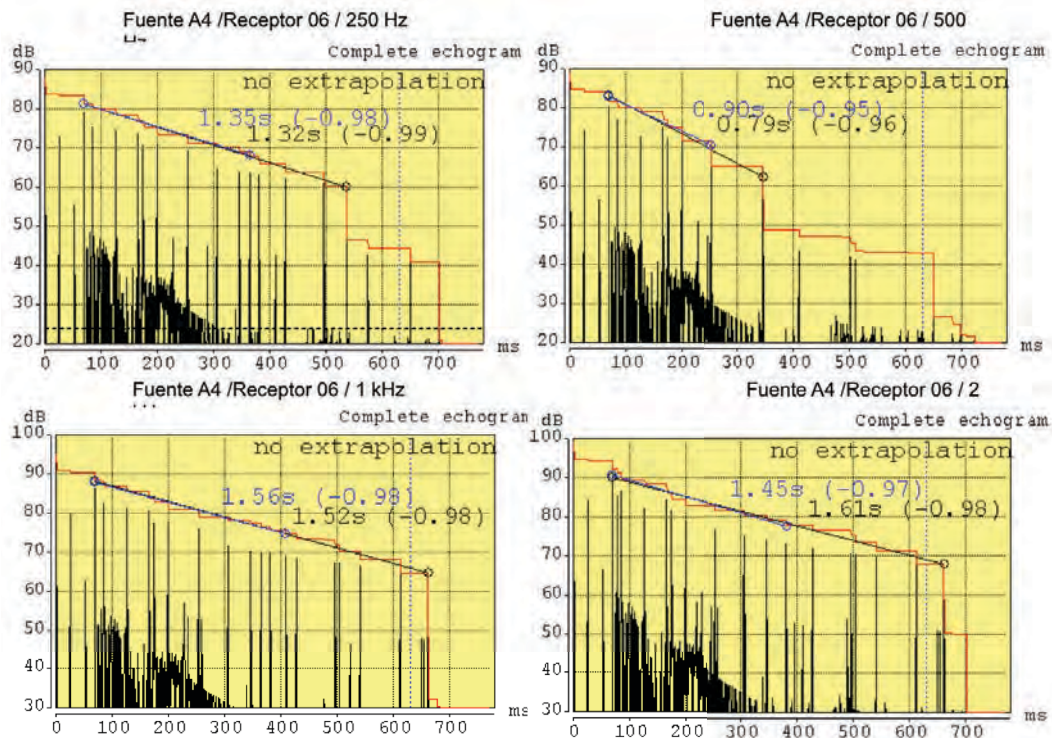


Fig. 5.26 "Ecogramas de respuesta acústica de receptor 2 producido por fuente A4 de ruido de impulso CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.

Se presentan grandes concentraciones de los 100 a los 300 ms y una gran presencia de ecos a cada 50 ms aproximadamente. Esto es debido a la configuración arquitectónica de las estructuras Oriente y Poniente de la Plaza, mismas que están constituidas por escalinatas y producen el efecto de "barrido acústico" también presente en la Pirámide de Kukulcán en Chichén Itzá y en un gran número de ciudades prehispánicas. La distribución sonora es uniforme de acuerdo al mapeo de intensidad (fig. 5.27).

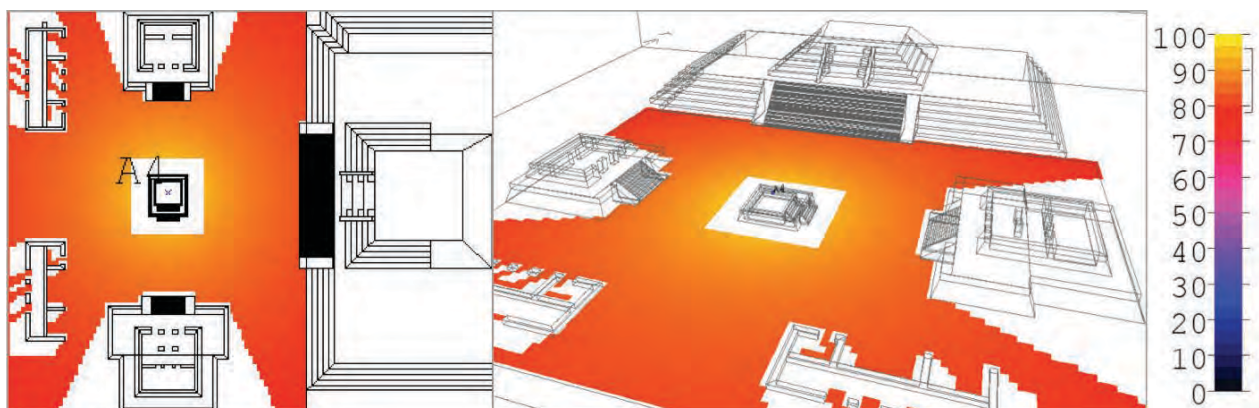


Fig. 5.27 "Mapeo de intensidad sonora con fuente de impulso A4. CATT Acoustic". Elaboración propia, 2014.

5.6 Auralización

En el caso de estudio se empleó un sistema de binaural para simular la voz y el instrumento de viento. La auralización muestra como resultado el sonido que es “escucharía” en ese lugar. Los audios que se ingresaron fueron los que se obtuvieron de la grabación en la cámara sonoamortiguada del LADAc en la UAM-A (voz en náhuatl y caracol trompeta).

El procedimiento fue el siguiente :

1. Realizar predicción con parámetros acústicos. En la ventana de “full detailed calculation” seleccionar “save data for ” y activar “post-processing” y “source addition”. Save and run.
2. En la barra de herramientas seleccionar “window”, “source addition”, “SRC”, “abrir” y seleccionar la fuente y la frecuencia en la que se desea realizar la auralización. Save and run.
3. Nuevamente en la barra de herramientas seleccionar “window”, “post-processing”, “general settings”, “binaural” y ok.
4. En “window” (la misma ventana que el paso 3) seleccionar “output files”, activar la opción “take”, save and run, guardar y seleccionar receptor, abrir.
5. Seleccionar “convultion”, “mono” y finalmente save and run.
6. El archivo de audio se guarda en la carpeta que incluye todos los archivos de CATT Acoustic.

Los archivos de audio generados para voz y caracol se muestran en el cd que incluye la tesis y a través de ellos es posible percibir que los receptores que están ubicados frente a la fuente presentan un mayor refuerzo sonoro y es posible percibir claramente ambos mensajes.

Capítulo 6 Conclusiones

Introducción

En diversas partes del mundo existen sitios prehispánicos o prehistóricos en donde se presentan diversos fenómenos acústicos, sin embargo hasta nuestros días pocas han sido las investigaciones en Arqueoacústica conducidas para proveer una explicación científica a éste hecho.

El presente trabajo propone analizar las condiciones acústicas en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos para comprobar que es un espacio apto para transmitir mensajes orales y musicales.

La metodología para comprobar este hecho se desarrolló en la investigación a través de tres recursos principales: la utilización de la cámara semi-anecóica del LADAc para grabar y caracterizar sonidos; la medición en el sitio a través de una fuente de impulso y la utilización del simulador acústico por computadora (CATT Acoustic) para conocer los valores objetivos de los parámetros que se utilizan para realizar una evaluación acústica.

6.1 Descripción del trabajo

Se presentó una revisión de los trabajos nacionales e internacionales realizados en Arqueoacústica desde 1999, donde se muestran los diversos enfoques con los que ésta disciplina se ha abordado.

Se expusieron las diferentes formas en las que las investigaciones han sido conducidas en el aspecto de tipo de acercamiento al problema. Aunado a lo anterior, se mostraron las herramientas utilizadas, tanto de medición en sitio como de simulación, en diversos sitios arqueológicos.

Se presentaron los conceptos teóricos indispensables para realizar un análisis acústico en sitios prehispánicos entre los que destacan los conceptos de acústica y sonido; transmisión, recepción y emisión de los mensajes sonoros y musicales; así como los parámetros de evaluación acústica de espacios para lenguaje y música.

Se presentó una metodología experimental que incluyó los aspectos de investigación arqueológica (materiales, geometría del espacio y localización geográfica) y antropológica del sitio (función del lugar y aspectos ceremoniales), mismos que definieron el rumbo de la medición en sitio y la simulación por computadora.

De igual manera, se presentó el proceso experimental que constó en la simulación por computadora utilizando el programa CATT Acoustic y la medición en sitio para realizar la validación del modelo. Posteriormente se mostró la simulación para voz y caracol en donde se describieron los módulos que lo integran y las variables que requeridas para realizar la predicción acústica.

Por último se expusieron los resultados cuantitativos de cada uno de los parámetros acústicos de evaluación de espacios y se discutieron los valores individualmente. Se comprobó que el espacio es apto para la transmisión de mensajes orales, sin embargo para la evaluación musical resultó no apto.

También, se integraron los mapeos de nivel de presión sonora que permitieron conocer la distribución del campo sonoro, mismos que mostraron una uniformidad al centro de la plaza. De igual manera se mostraron los ecogramas de la simulación por impulso al centro de la Plaza (aplauso) en donde se perciben los picos de reverberación que existen y por lo cual se genera el efecto de “barrido acústico” o eco. Finalmente se expone la auralización del espacio con fuentes de voz y caracol, archivos de audio incluidos en el cd anexo que permiten percatarse que el mensaje de voz es transmitido claramente. La transmisión de la fuente de caracol trompeta subjetivamente es posible decir que es “escuchada” sin distorsiones.

6.2 Conclusiones del estudio

Diversos arqueólogos establecieron la teoría de que La Plaza de la Estela de los Dos Glifos en Xochicalco era un espacio apto para la comunicación de mensajes orales a la población y que en ella se realizaban ceremonias rituales, entre otros usos que ésta tenía.

En la presente investigación se obtuvieron los diferentes valores de los parámetros de evaluación de espacios para lenguaje y música a través de la medición en sitio y la simulación por computadora para comprobar siguiente hipótesis:

La Plaza de la Estela de los Dos Glifos en Xochicalco presenta condiciones acústicas adecuadas para la transmisión de mensajes orales y musicales.

Como respuesta concreta es posible afirmar que en La Plaza de la Estela de los Dos Glifos es posible percibir el mensaje oral claramente, ya que los valores, como se muestran en el Capítulo 5, de claridad, tiempo de reverberación, definición, sonoridad y RASTI fueron adecuados a los recomendados.

Los parámetros de la evaluación acústica musical el tiempo de reverberación, sonoridad y eficiencia lateral son adecuados, mientras que el parámetro de claridad no se ajustó a los valores recomendados, por lo que podría decirse que no sería posible escuchar adecuadamente cada uno de los sonidos que componen una melodía. La discusión se centra en que los parámetros de evaluación musical para salas fueron elaborados para música de orquesta y en este caso, aunque se conocen los instrumentos que se hallaron en el sitio, no es posible afirmar cómo se realizaba una ejecución musical prehispánica.

Si nos remitimos a los instrumentos musicales hallados en el Altiplano Central es posible tal vez concluir que las melodías no presentaban una complejidad tan grande como la ejecución de una melodía de orquesta, no se sabe, sin embargo los parámetros de evaluación musical deberían revisarse para incluir a los instrumentos prehispánicos, observación que deja abierta la puerta a nuevas investigaciones.

Es posible afirmar que éstos parámetros de evaluación sean adecuados debido a la configuración arquitectónica de la Plaza en la que las ondas sonoras son reflejadas por efecto de las escalinatas y taludes de las Estructuras Oriente y Poniente como se muestra en la siguiente figura (fig. 6.1).

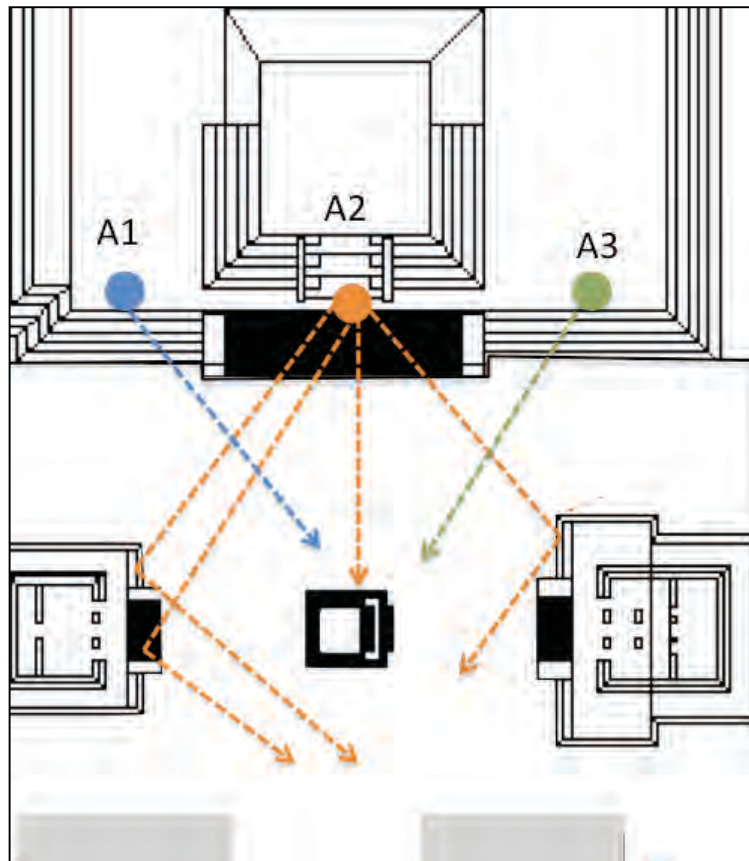


Fig. 6.1 “Reflexión de ondas sonoras en la Plaza de la Estela de los Dos Glifos” Elaboración propia, 2014.

Como complemento a la obtención de los valores acústicos recomendados se realizaron mapeos de intensidad sonora, herramienta que permite mostrar la distribución de la intensidad sonora en dBA. Los mapeos realizados a través de la simulación por computadora en CATT Acoustic de la Plaza muestran una distribución uniforme y sin sombras acústicas al centro de la Plaza como se ha expuesto en el capítulo 5. En los laterales de las edificaciones Oriente y Poniente se presenta una sombra acústica en donde no se marcan dBA (fig. 6.2), sin embargo, por un efecto posible de difracción, en sitio, es posible apreciar los mensajes orales (observación subjetiva personal).



Fig. 6.2 “Mapeo de intensidad sonora de fuente A2 en 500 Hz, CATT Acoustic”. Elaboración propia, 2016.

La intensidad se distribuye uniformemente desde cualquier ubicación de emisión del mensaje (A1, A2 o A3) y decrecen los niveles sonoros a medida que la distancia crece, es decir, entre más lejos se localice el oyente, menos intenso se percibe el mensaje, tanto para voz como para caracol.

Se realizó también la simulación por ruido de impulso al centro de la Plaza en donde se muestra el efecto que se produce debido a la geometría de las edificaciones. Es perceptible, a través de los ecogramas, la gran cantidad de concentraciones que presenta en el periodo de comprende de 100 a 200 ms y posteriormente la presencia de ecos a cada 50 ms aproximadamente. Esto hace referencia a que se “escuche” un barrido acústico y genere lo que los visitantes del sitio o guías turísticos definen como el sonido de un ave, sin embargo no es posible afirmar si esto forma parte de un diseño intencional.

También se integró el estudio de auralización del espacio, en donde es perceptible la claridad con la que se transmiten los mensajes orales y musicales de manera subjetiva. Aunado a lo anterior se puede deducir que los mensajes presentan mayor intensidad sonora cuando los receptores se encuentran ubicados frente a la fuente.

Finalmente es posible comentar que bajo los parámetros metodológicos de este estudio y con base en la hipótesis de que ambos mensajes pueden ser percibidos claramente, únicamente el

mensaje oral puede ser transmitido claramente, el mensaje musical carece entonces de claridad. Sin embargo este espacio ritual-ceremonial prehispánico aún sigue maravillando a los visitantes que siempre realizan conclusiones empíricas favorables acerca de la hipótesis que se plantea en el presente trabajo.

6.3 Aportación

Con este proyecto se ha tratado de contribuir a la sistematización del estudio de efectos acústicos en sitios arqueológicos de la que hablan Clara Garza, Andrés Medina, Pablo Padilla, Alejandro Ramos y Francisca Zalaquett, puntualmente en el campo de la acústica arquitectónica. Como menciona Andrés Medina (2011), no existe una metodología específica para la arqueoacústica debido a la interdisciplinariedad que la compone, sin embargo este trabajo presenta un esfuerzo más para tratar de completar la visión metodológica que puede comprender realizar un estudio de este tipo, en este caso, el arquitectónico. La Arquitectura Bioclimática es una disciplina que está orientada a diversas ramas o ciencias que aborda fenómenos físicos, que estudia los espacios en cuanto a su configuración geométrica y física, también se aborda el aspecto social, al ser una disciplina humanística, entre otras disciplinas como la historia, y más.

Lo anterior permite tener una visión amplia acerca de los múltiples fenómenos que constituyen a la arqueoacústica, por lo que podría ser un enlace potencial importante para los futuros equipos de trabajo que desarrollen investigaciones de este tipo.

Se condujo una metodología que se basó en la medición en sitio, caracterización de fuentes sonoras, simulación por computadora a través del programa CATT Acoustic y se mostró la investigación arqueológica, arquitectónica e histórica, misma que determinó el planteamiento del experimento, desde la localización de las fuentes hasta los coeficientes de absorción de los materiales, siendo éste último un factor determinante para la realización del estudio.

Se ha iniciado también, una discusión acerca de los parámetros de evaluación para acústica musical, descrita anteriormente, y de la cual se puede trazar una nueva línea de investigación para

la *Arqueoacústica*, ya que aún no se conoce con certeza cómo era una ejecución musical prehispánica.

Por supuesto, se presenta una aportación al conocimiento del sitio Arqueológico de Xochicalco, ya que la Plaza de la Estela de los Dos Glifos no había sido considerada un “espacio acústico” como lo ha sido Chichén Itzá, aunque considero, este trabajo podría ser complementado con el estudio del fenómeno de difracción (barrido acústico) presente por efecto de la configuración geométrica de las estructuras Oriente, Poniente y Norte.

Por otra parte, este trabajo pretende impulsar el desarrollo de estudios en Mesoamérica de Arqueoacústica debido a que aún existe un estado del arte limitado. Tal vez más adelante sea posible realizar una comparativa de los estudios acústicos en diferentes centros prehispánicos y, así como fue posible afirmar que en Mesoamérica se tenía pleno conocimiento para planear edificaciones orientados astronómicamente, posiblemente se puede afirmar que también lo hacían con un fin acústico.

Finalmente, considero que el estudio del aspecto de confort acústico en sitios prehispánicos dentro de la línea de Arquitectura Bioclimática puede contribuir a la creación de foros al ire libre contemporáneos que se basen en estos sitios para reducir o prescindir de la utilización de equipo electroacústico en pos de un ahorro energético.

Además de contribuir al conocimiento de las culturas del pasado, es importante que la Arqueoacústica, para nosotros como arquitectos, nos brinde el rescate de técnicas antiguas de diseño y conceptualización arquitectónica aplicables al diseño contemporáneo con objeto de obtener condiciones acústicas adecuadas.

6.4 Recomendación a futuras investigaciones

A lo largo de esta investigación, desde el análisis del estado de arte para establecer una estrategia de acercamiento al problema fue difícil determinar un camino claro, ya que las variables a considerar eran bastas.

Se trató de plantear el procedimiento metodológico de una manera clara y concisa, sin embargo, al ser una tesis de Diseño en Arquitectura Bioclimática fue imprescindible analizar arquitectónicamente el sitio y partiendo de este punto se desprendieron las demás variables.

El primer problema que se presentó fue la falta del conocimiento del comportamiento acústico de materiales. Por ello es importante que se realice la investigación de estos coeficientes para los diversos materiales empleados en sitios prehispánicos. Que se cree una metodología para obtener estos valores con muestras pequeñas, ya que por el deterioro en estas zonas pocos son los sitios en los que se encuentran muestras grandes, como por ejemplo el estuco.

En cuanto a los programas de simulación por computadora, sería conveniente realizar el análisis de fuentes múltiples. Generalmente en las ceremonias prehispánicas se puede presentar la interacción de instrumentos y voz, sin embargo no es conocido con exactitud cómo se realizaban, factor indispensable en la determinación de la metodología experimental.

Finalmente es primordial considerar que la Arqueoacústica tiene diversos retos por afrontar en los próximos años. Uno de ellos es establecer una metodología interdisciplinaria que provea una forma sistemática de acercamiento al problema, exponer todos los elementos que deberían ser considerados en un estudio de esta naturaleza y reconocer que el problema requiere de diversos enfoques y por lo tanto conformar equipos de diversas disciplinas.

De igual manera es fundamental apoyar el desarrollo de investigaciones en diversos sitios arqueológicos o prehistóricos para así determinar la posible evidencia de intencionalidad en el diseño de los espacios con una finalidad acústica favorable.

En el campo específico de la Arquitectura Bioclimática, es importante crear un estado del arte que permita conocer cómo los antiguos constructores diseñaban los espacios para obtener un confort acústico con base en sus elementos, materiales y disposición para explorar la posibilidad de reinterpretar estos sitios en diseños contemporáneos.

Glosario de términos

Fuente fija : Es toda instalación establecida en un sólo lugar que tenga como finalidad desarrollar actividades industriales, comerciales, de servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

Media estadística : Es el promedio aritmético de los valores de todos los niveles sonoros presentes durante el periodo de observación.

Medición semi-continua : Es la medición de un ruido fluctuante que se realiza mediante la obtención aleatoria de muestras durante el periodo de observación.

Muestra estadística : Es cualquier elemento del conjunto de valores aleatorios del nivel de ruido obtenido al azar en forma exclusiva, exhaustiva e igual.

Nivel de emisión de fuente fija : Resultado de un proceso estadístico que determina el nivel de ruido emitido por la fuente fija a su entorno.

Nivel de presión acústica : Relación entre la presión acústica de un sonido cualquiera y la presión acústica de referencia. Equivale a diez veces el logaritmo decimal del cociente de los cuadrados de una presión acústica cualquiera y la de referencia es de 20 microPascales (20mPs).

Nivel de ruido : Nivel sonoro causado por el ruido emitido por una fuente fija en su entorno.

Nivel sonoro : Nivel de presión acústica ponderada por una red normalizada de sonoridad o sea, el nivel de presión acústica ponderado por una curva. Se mide en decibeles (dB).

Nivel sonoro de fondo : Nivel sonoro presente en torno a una fuente fija que pretenda medirse producido por todas las causas excepto la fuente de la misma.

Reducción acústica : Es el decremento normalizado del nivel sonoro debido a la presencia de un elemento constructivo que impide su libre transmisión.

Ruido estable: Es aquel que se registra con una variación de su nivel de presión acústica no superior a + - 2 dB.

Ruido impulsivo: Es aquel ruido inestable que se registra durante un periodo menor a 1 s.

Ruido rosa: Es aquel ruido de energía controlada cuyo espectro presenta una pendiente de 0 dB/octava.

Sonómetro : Aparato normalizado que comprende un micrófono, un amplificador, redes de ponderación y un indicador de nivel, que se utiliza para la medida de los niveles de ruido según especificaciones determinadas.

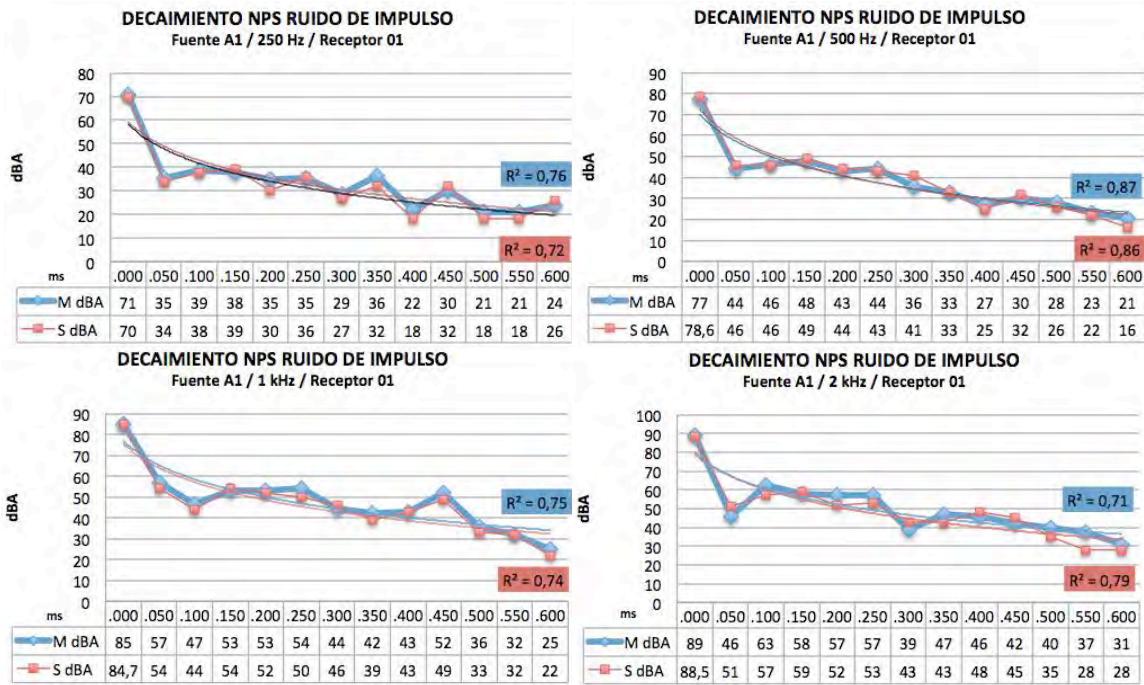
Anexos

Anexo 1 Normales climatológicas Alpuyea. Fuente : Servicio Meteorológico Nacional, 2014.

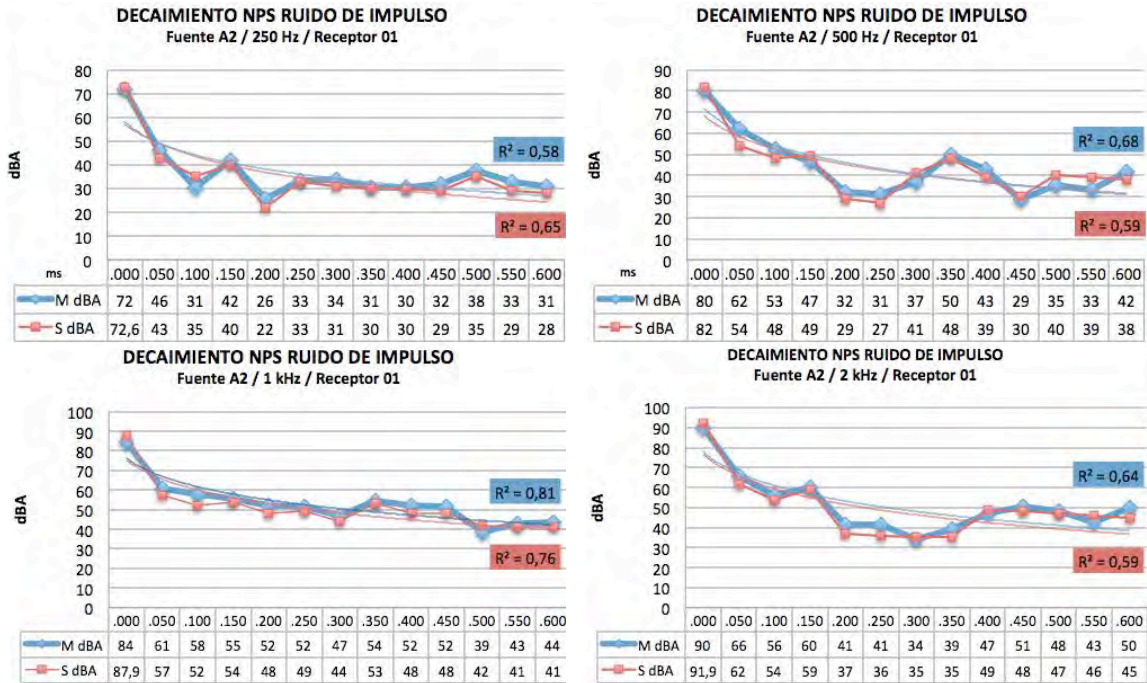
SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL													
NORMALES CLIMATOLÓGICAS 1971-2000													
ESTADO DE: MORELOS													
ESTACION: 00017072 ALPUYECA, XOCHITEPEC													
LATITUD: 18°44'06" N. LONGITUD: 099°15'57" W. ALTURA: 1,038.0 MSNM.													
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MAXIMA													
NORMAL	29.6	31.0	33.8	34.8	34.2	31.5	30.4	30.5	30.1	30.4	30.5	30.0	31.4
MAXIMA MENSUAL	34.8	38.8	40.2	38.7	38.3	38.7	34.5	35.7	35.4	36.0	38.0	38.0	39.0
AÑO DE MAXIMA	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1999	1999	1999	1999	1999	1999
MAXIMA DIARIA	42.0	42.5	43.5	41.0	42.0	41.0	39.0	37.0	38.0	39.0	41.0	41.0	41.0
FECHA MAXIMA DIARIA	02/2000	19/1998	15/1998	29/1971	09/1998	12/1998	13/1982	02/1999	27/1999	30/1999	02/1999	05/1999	
AÑOS CON DATOS	19	19	19	19	18	19	19	19	19	18	17	18	
TEMPERATURA MEDIA													
NORMAL	21.1	21.8	24.7	26.5	26.7	25.5	24.4	24.7	24.8	24.2	22.9	21.2	24.0
AÑOS CON DATOS	19	19	19	19	18	19	18	19	19	18	17	18	
TEMPERATURA MINIMA													
NORMAL	12.6	12.7	15.5	18.1	19.2	19.5	18.4	19.0	19.6	18.0	15.4	12.3	16.7
MINIMA MENSUAL	6.2	6.0	11.2	15.1	15.7	16.0	12.8	13.5	14.7	13.7	10.7	8.4	
AÑO DE MINIMA	1981	1981	1983	1983	1999	1999	1988	1988	1988	1979	1984	2000	
MINIMA DIARIA	4.0	1.0	6.0	11.0	14.0	13.0	9.0	9.0	10.0	1.0	0.9	4.0	
FECHA MINIMA DIARIA	23/1983	04/1987	01/1981	14/1984	24/1981	03/1982	21/1974	11/1988	24/1975	22/1979	28/1974	21/1982	
AÑOS CON DATOS	19	19	19	19	18	19	18	19	19	18	17	18	
PRECIPITACION													
NORMAL	5.8	1.5	3.0	2.6	46.4	182.8	149.4	156.4	162.6	50.1	7.0	1.4	769.0
MAXIMA MENSUAL	61.0	17.5	25.5	16.5	154.0	296.9	289.3	249.7	321.4	129.0	20.5	9.5	
AÑO DE MAXIMA	1980	1983	1978	1981	1975	1985	1981	1999	1983	1971	1987	1977	
MAXIMA DIARIA	20.5	9.5	25.5	10.0	54.5	65.6	82.0	76.0	78.2	50.3	20.5	9.5	
FECHA MAXIMA DIARIA	24/1980	11/1983	16/1978	26/1974	24/1975	09/2000	25/1981	10/1973	10/1973	10/1982	09/1987	14/1977	
AÑOS CON DATOS	19	19	19	19	19	19	20	20	19	18	17	18	
EVAPORACION TOTAL													
NORMAL	137.0	154.0	219.5	239.1	229.9	189.4	179.5	177.3	149.3	131.5	127.1	120.0	2,053.6
AÑOS CON DATOS	16	16	16	16	16	13	15	16	15	16	15	17	
NUMERO DE DIAS CON LLUVIA													
NORMAL	0.5	0.3	0.4	0.7	5.6	14.6	14.2	14.6	14.3	5.6	1.1	0.3	72.2
AÑOS CON DATOS	19	19	19	19	19	19	20	20	19	18	17	18	
NIEBLA													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.4
AÑOS CON DATOS	19	19	19	19	18	19	20	20	19	18	17	18	
GRANIZO													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
AÑOS CON DATOS	19	19	19	19	18	19	20	20	19	18	17	18	
TORRENTA E.													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3
AÑOS CON DATOS	19	19	19	19	18	19	20	20	19	18	17	18	

Mo	PARAMETROS	U	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURAS (T)															
A	MAXIMA	°C	29.6	31.0	33.8	34.8	34.2	31.5	30.4	30.5	30.1	30.4	30.5	30.0	31.40
A	MEDIA	°C	21.1	21.8	24.7	26.5	26.7	25.5	24.4	24.7	24.8	24.2	22.9	21.2	24.04
A	MINIMA	°C	12.6	12.7	15.5	18.1	19.2	19.5	18.4	19.0	19.6	18.0	15.4	12.3	16.69
CUENTA CON DATOS OBSERVADOS DE HR MEDIA															
NO															
1 HUMEDAD RELATIVA (HR) (estimada)															
	MAXIMA	%	79.9	78.3	81.0	86.8	90.8	95.6	94.9	96.4	98.3	93.7	96.7	78.2	88.4
	MEDIA	%	57.1	55.1	57.5	63.0	67.3	73.8	73.1	74.8	77.5	71.8	63.6	55.4	65.8
	MINIMA	%	34.3	31.9	33.9	39.2	43.8	52.0	51.3	53.2	56.7	49.8	40.6	32.7	43.3
(Hes * HR)/100															
HUMEDAD ESPECIFICA (HE) (estimada)															
	MAXIMA	g/kg	9.105	9.208	11.570	14.165	15.290	15.476	14.303	14.911	15.526	13.872	11.368	8.906	12.803
	MEDIA	g/kg	8.995	9.070	11.335	13.863	15.002	15.287	14.147	14.751	15.376	13.717	11.223	8.790	12.483
	MINIMA	g/kg	7.262	7.163	8.917	11.294	12.685	13.612	12.605	13.300	14.084	12.125	9.461	6.962	10.509
(Pvs * HR)/100															
2 PRESIÓN DE VAPOR (Pv) (estimada)															
	MAXIMA	kPa	1.423	1.433	1.787	2.181	2.358	2.406	2.230	2.324	2.423	2.163	1.772	1.390	1.991
	MEDIA	kPa	1.429	1.439	1.790	2.181	2.359	2.410	2.235	2.329	2.427	2.168	1.778	1.396	1.970
	MINIMA	kPa	1.166	1.150	1.427	1.802	2.021	2.168	2.010	2.120	2.243	1.935	1.518	1.118	1.680
$T_{bb} = 7.5 + 0.9 * (T-10) + (HR-70)/30 * (2.75 + 0.1 * (T-10))$															
2 TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO (Tbh)															
	MAXIMA	°C	19.53	20.24	22.75	24.45	24.77	23.91	22.88	23.26	23.48	22.63	21.24	19.60	22.41
	MEDIA	°C	15.83	16.17	18.97	21.32	22.13	22.00	20.89	21.41	21.88	20.82	18.25	15.70	19.56
	MINIMA	°C	10.83	10.77	13.66	16.78	18.33	19.21	18.05	18.62	19.60	17.51	14.20	10.38	15.62
$T_{pr} = (-430.22 + 237.7 * \ln(Pv)) / (\ln(Pv) + 19.08)$															
4 TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO (Tpr)															
	MAXIMA	°C	12.23	12.35	15.75	18.90	20.17	20.49	19.26	19.93	20.60	18.77	15.62	11.88	17.45
	MEDIA	°C	12.30	12.41	15.77	18.91	20.17	20.52	19.30	19.96	20.64	18.81	15.67	11.95	17.29
	MINIMA	°C	9.24	9.03	12.28	15.88	17.69	18.81	17.61	18.45	19.35	17.00	13.22	8.62	14.79

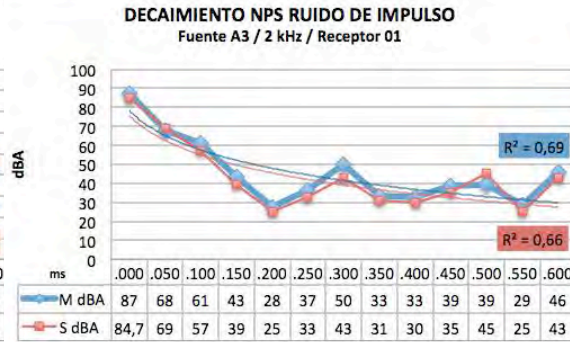
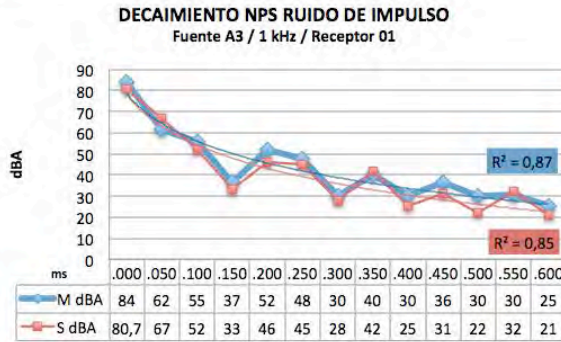
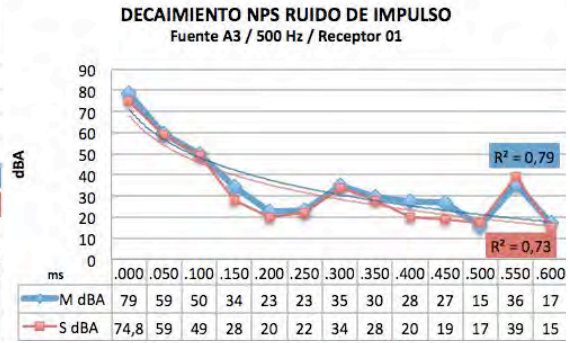
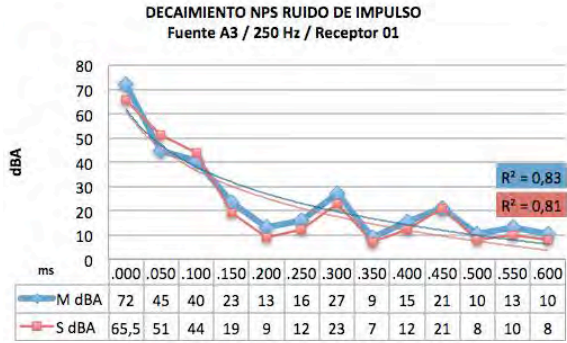
FUENTE 1 RECEPTOR 1



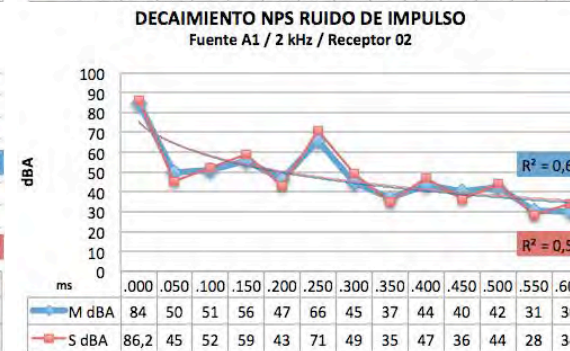
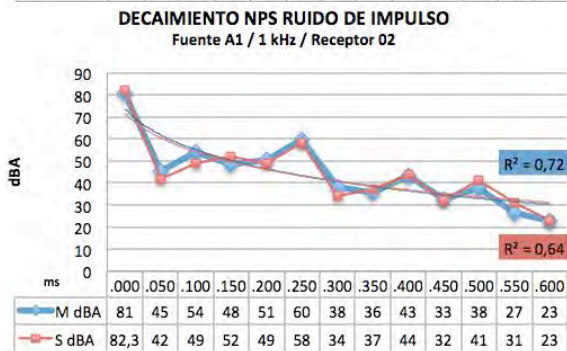
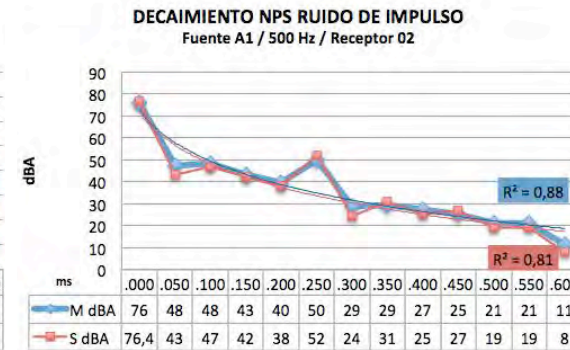
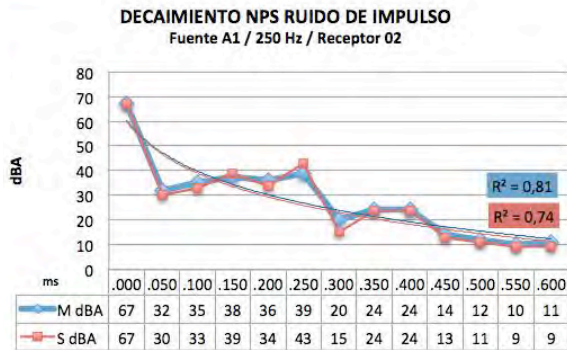
FUENTE 2 RECEPTOR 1



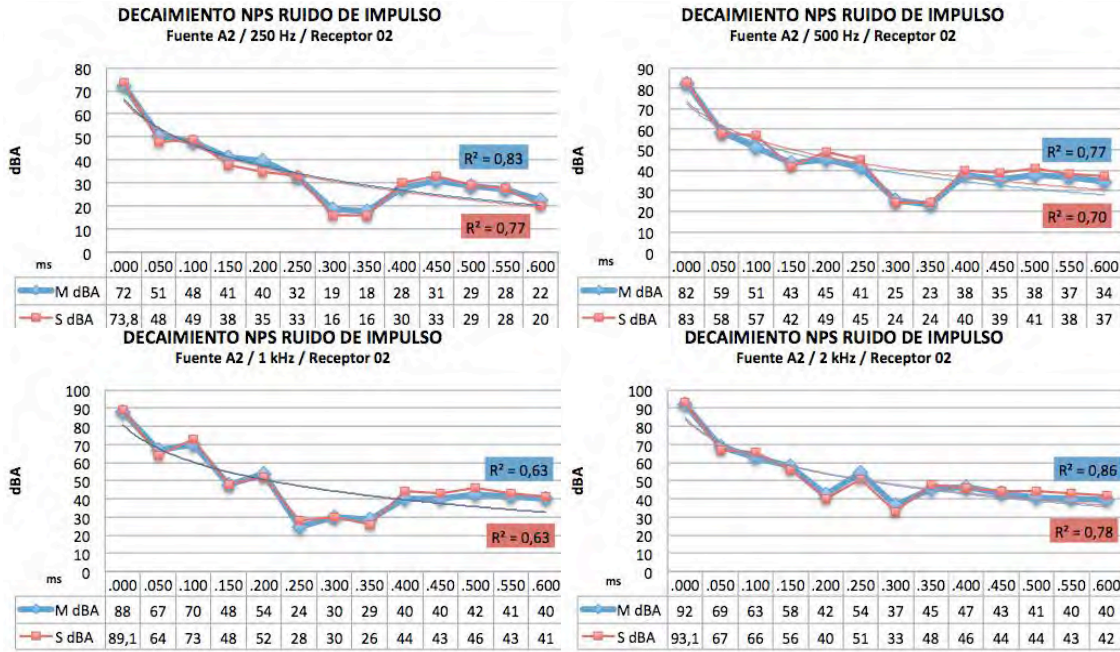
FUENTE 3 RECEPTOR 1



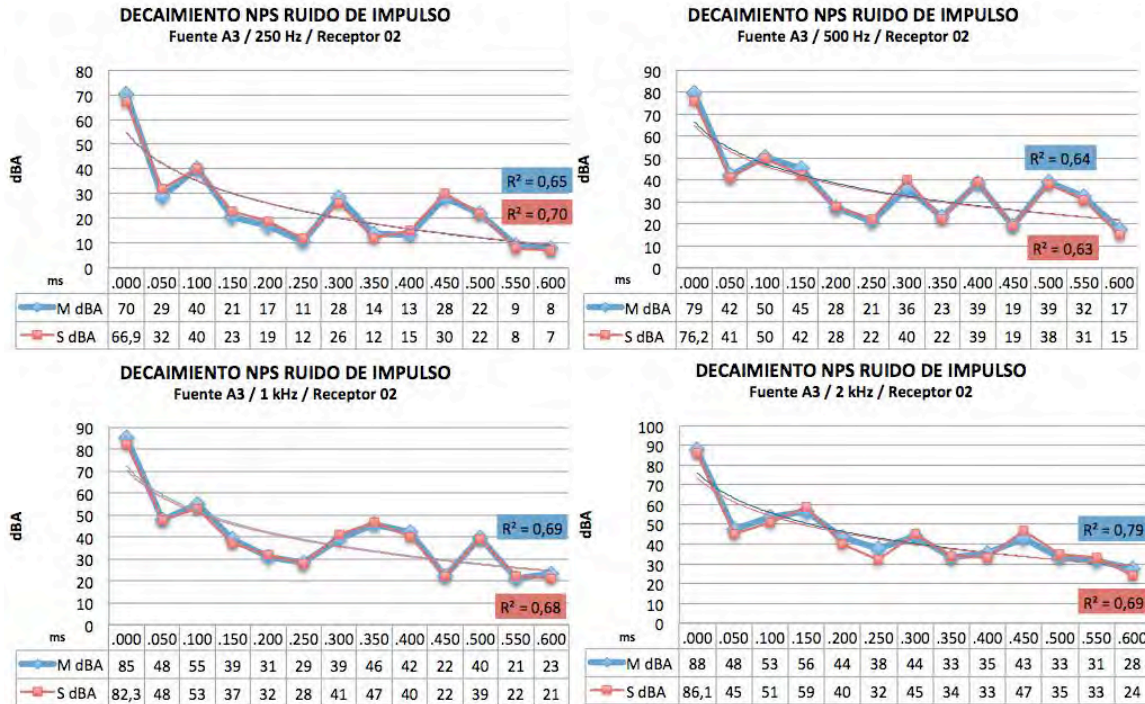
FUENTE 1 RECEPTOR 2



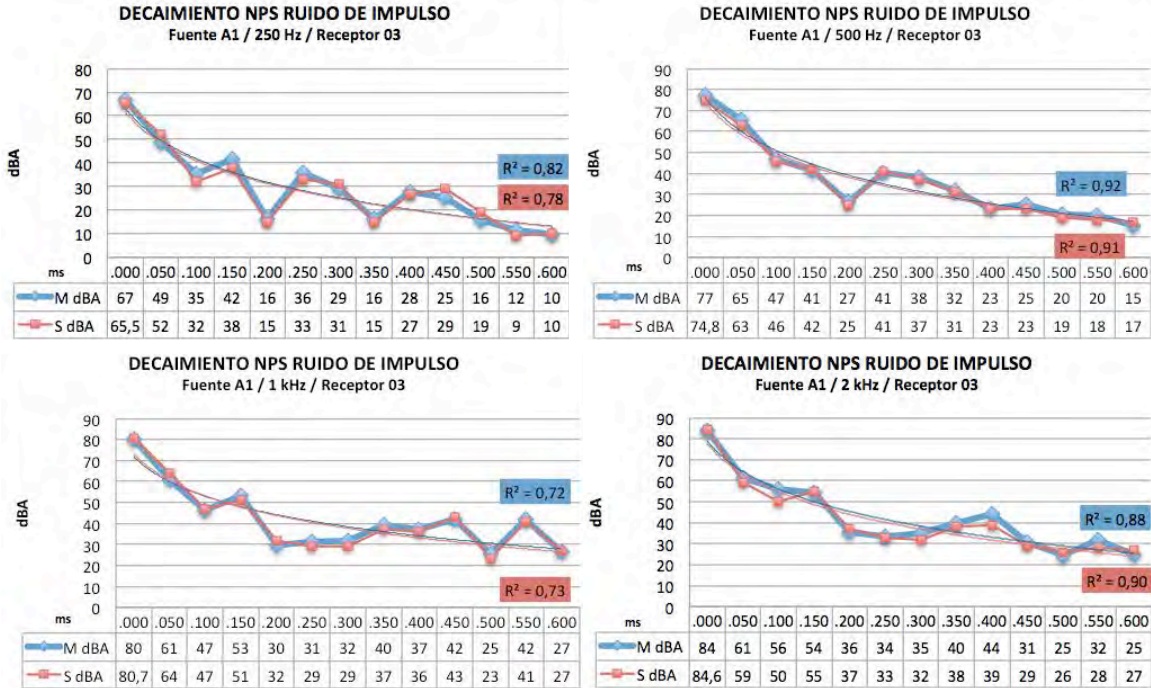
FUENTE 2 RECEPTOR 2



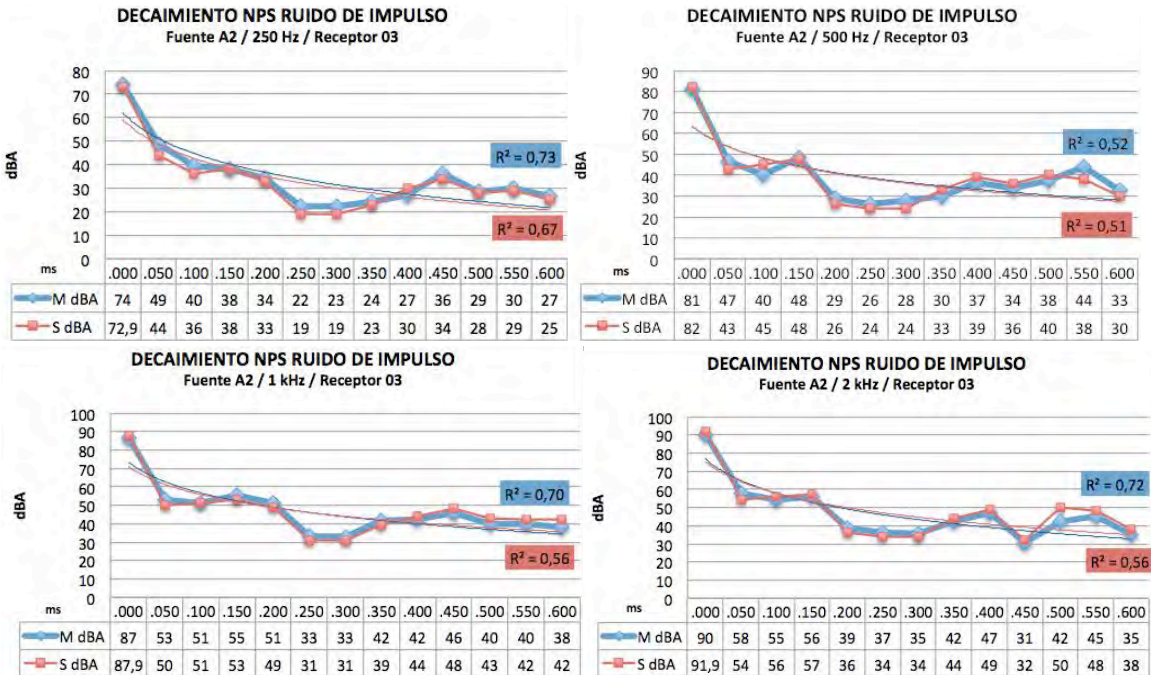
FUENTE 3 RECEPTOR 2



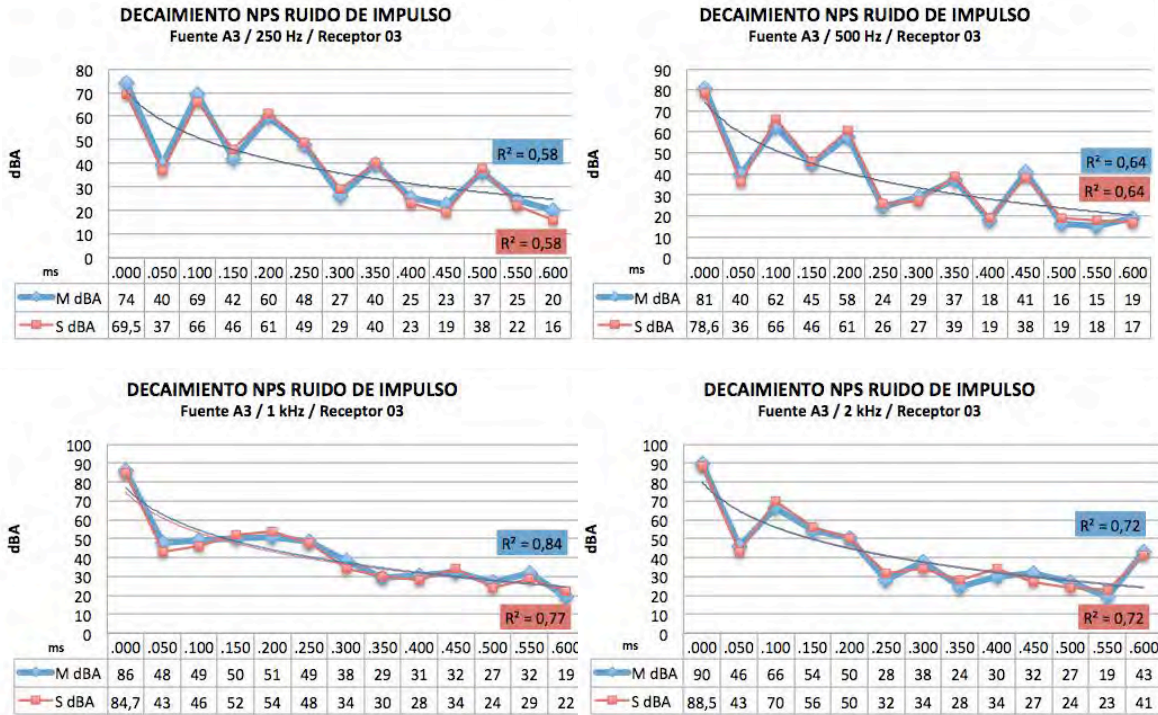
FUENTE 1 RECEPTOR 3



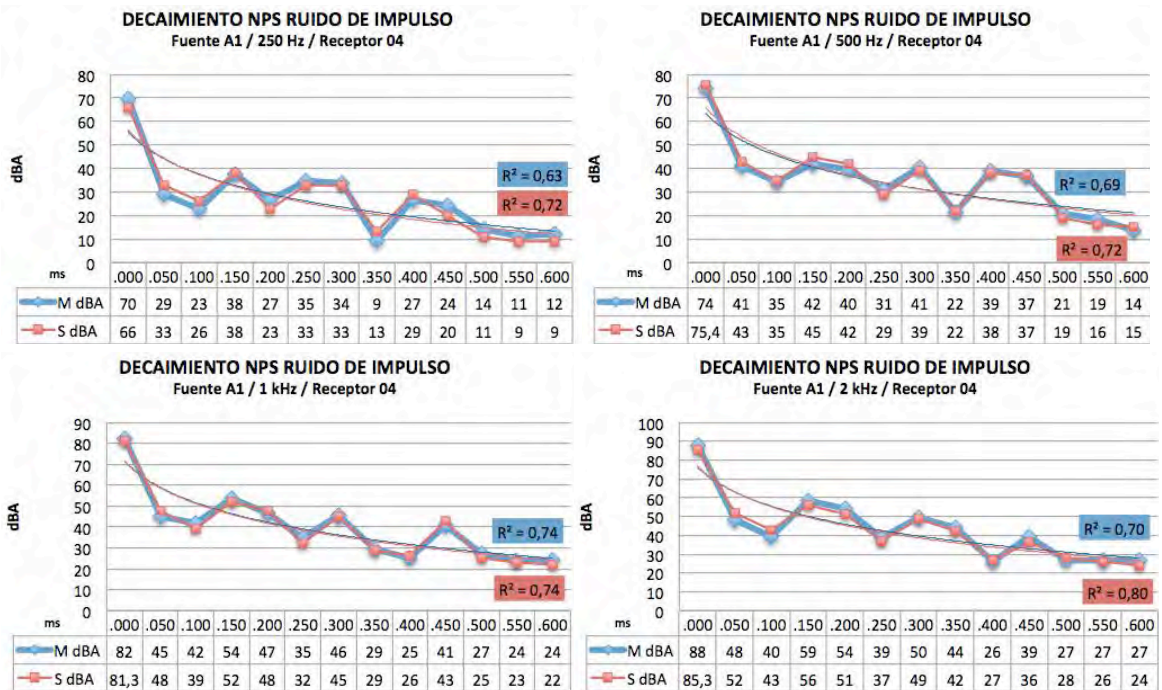
FUENTE 2 RECEPTOR 3



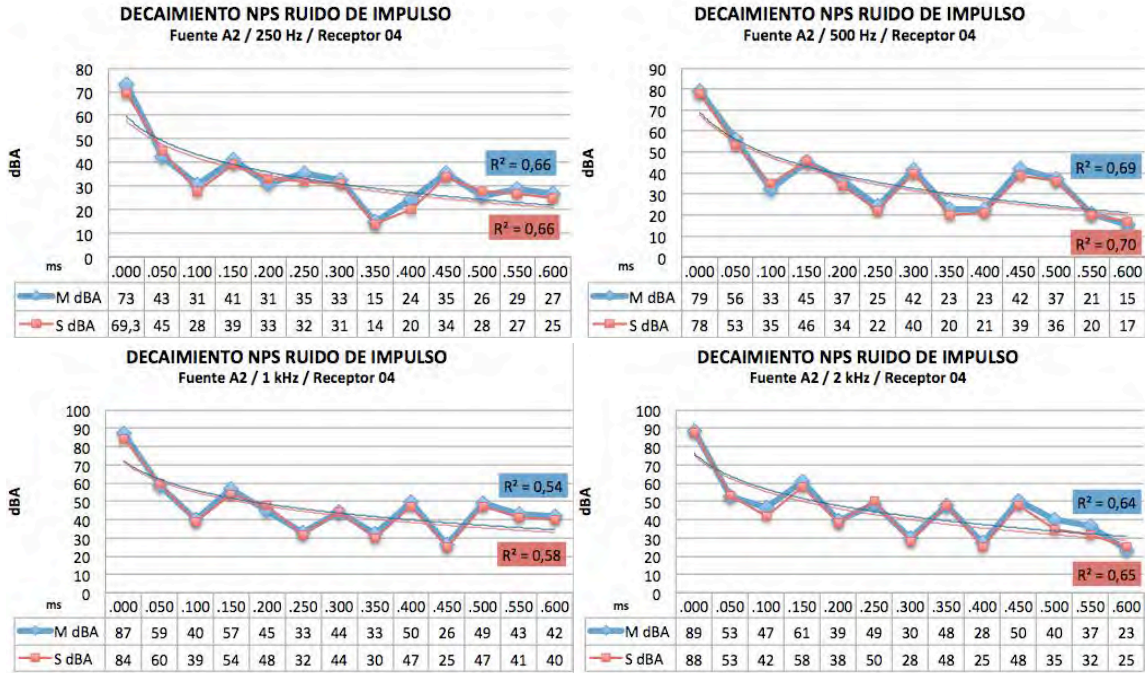
FUENTE 3 RECEPTOR 3



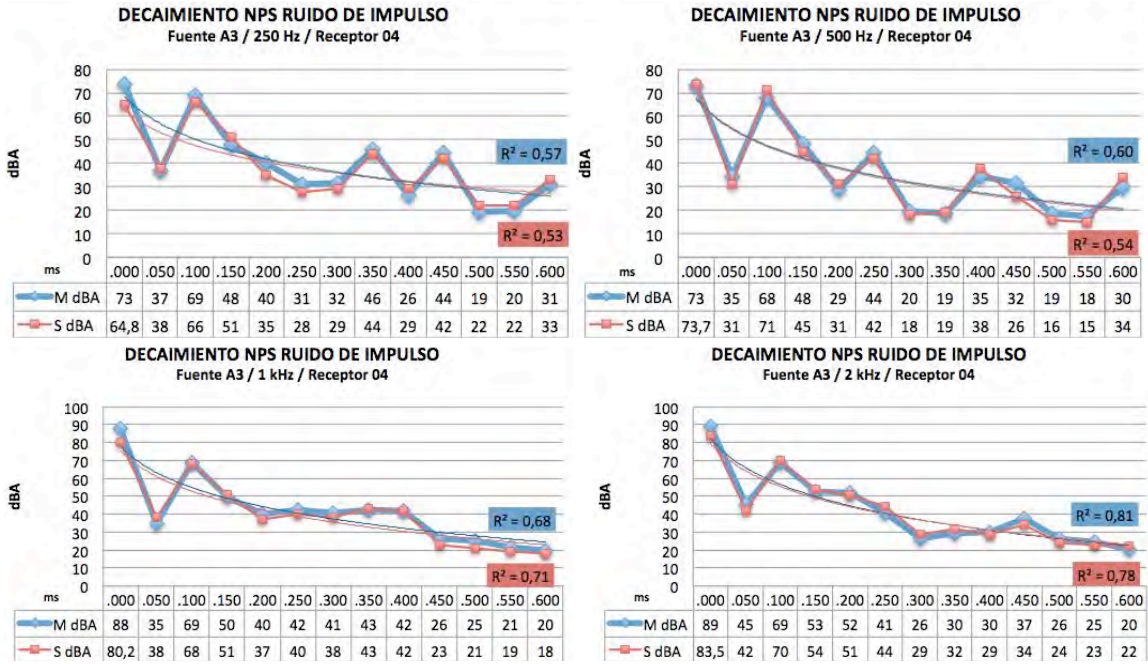
FUENTE 1 RECEPTOR 4



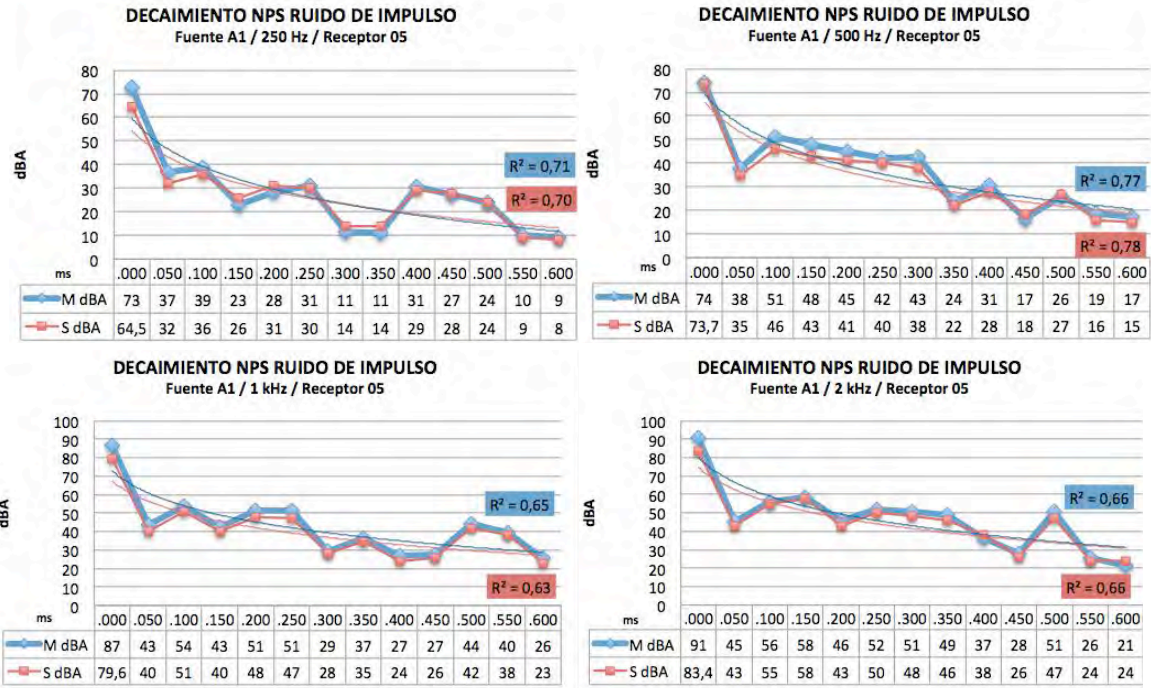
FUENTE 2 RECEPTOR 4



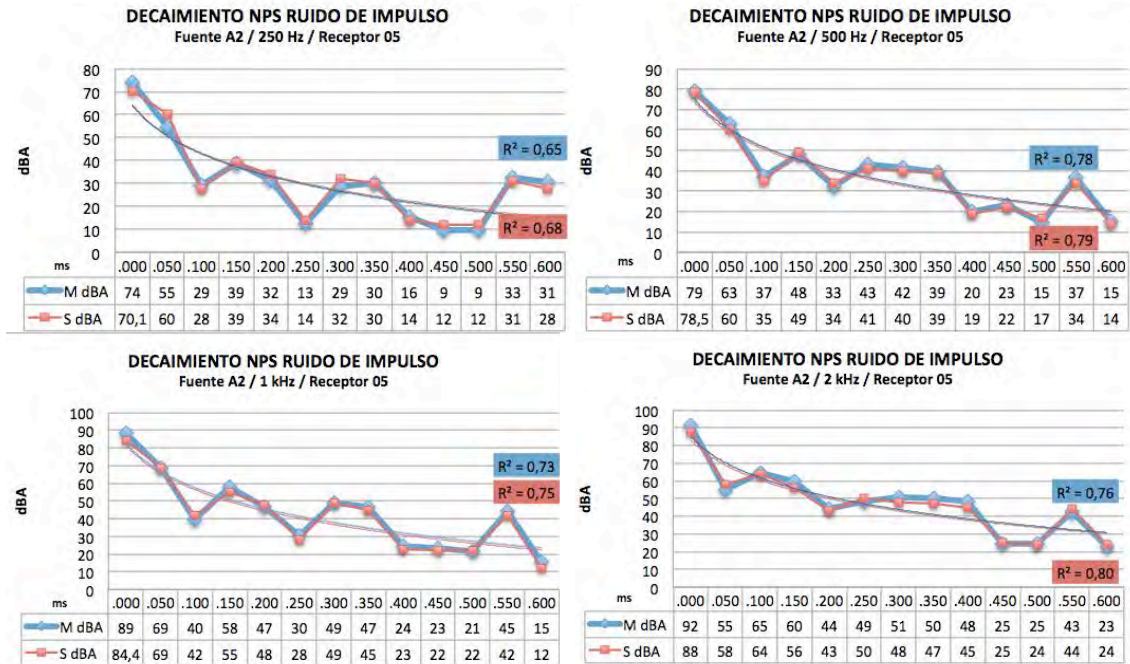
FUENTE 3 RECEPTOR 4



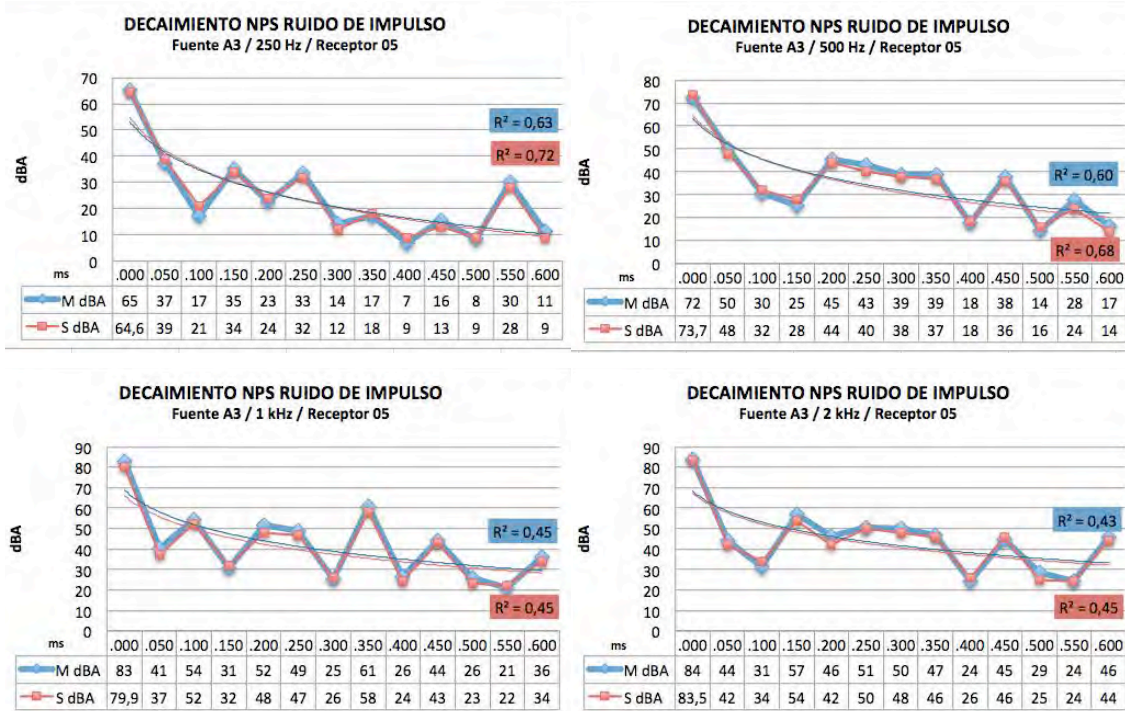
FUENTE 1 RECEPTOR 5



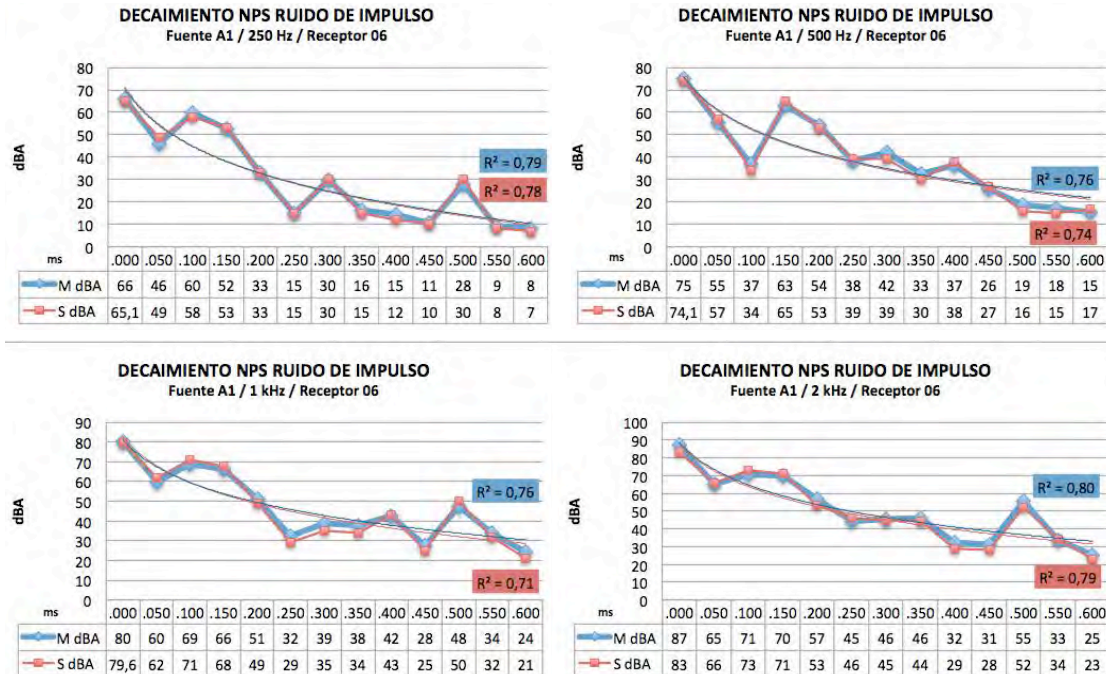
FUENTE 2 RECEPTOR 5



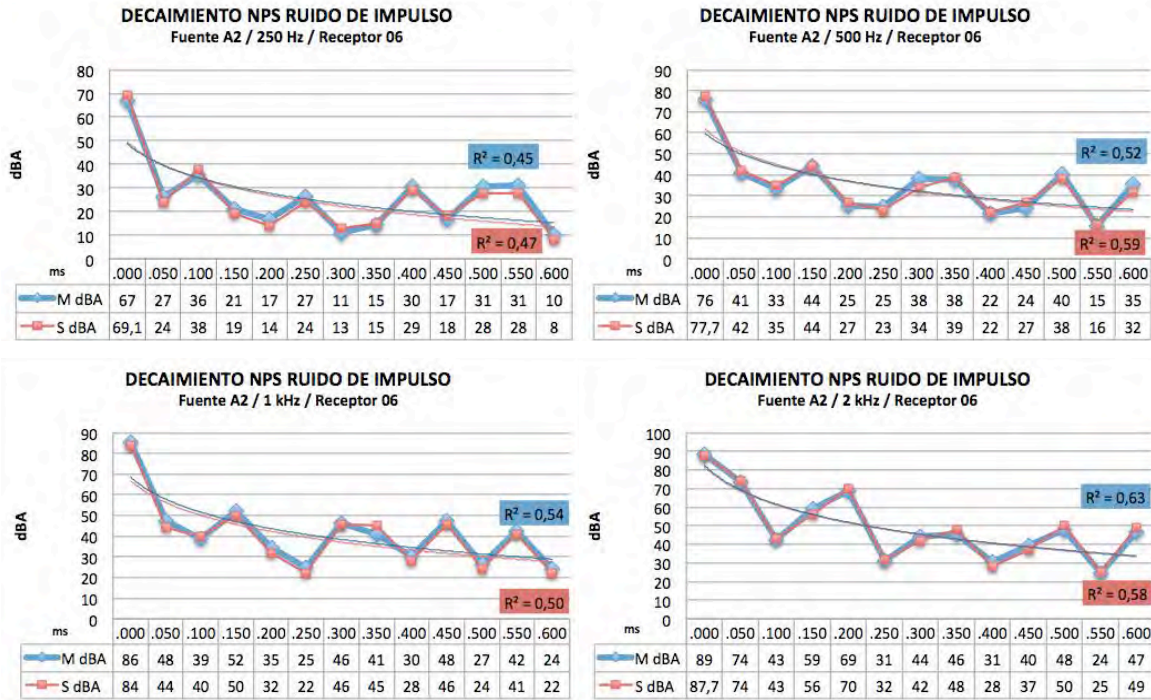
FUENTE 3 RECEPTOR 5



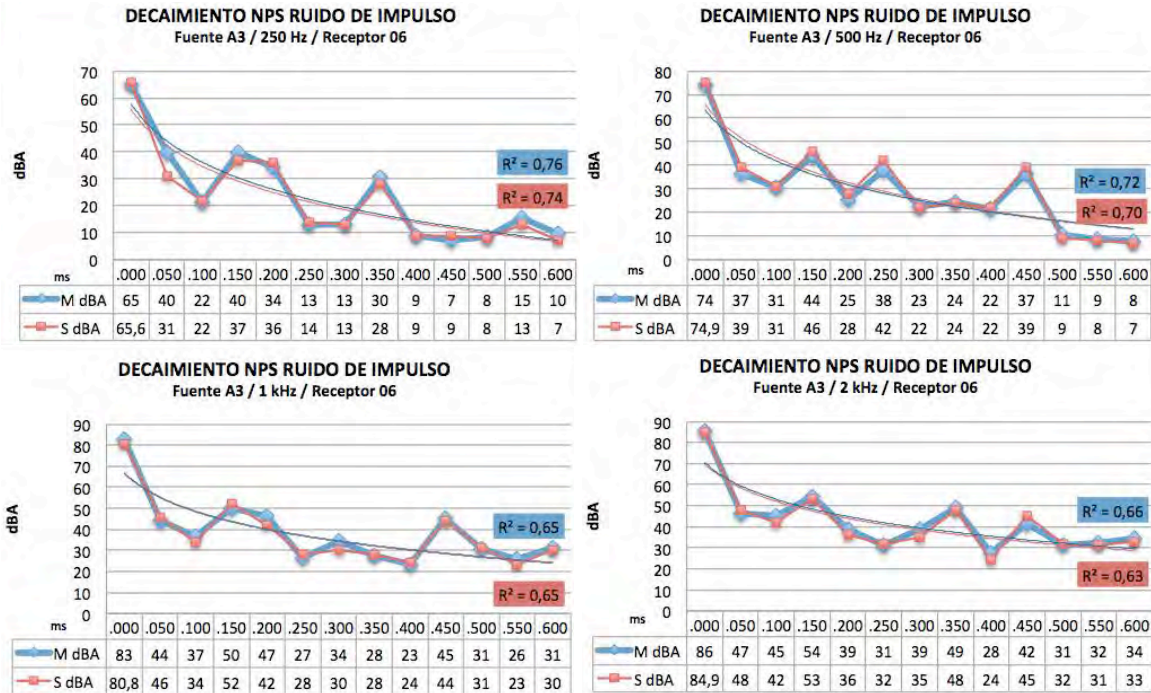
FUENTE 1 RECEPTOR 6



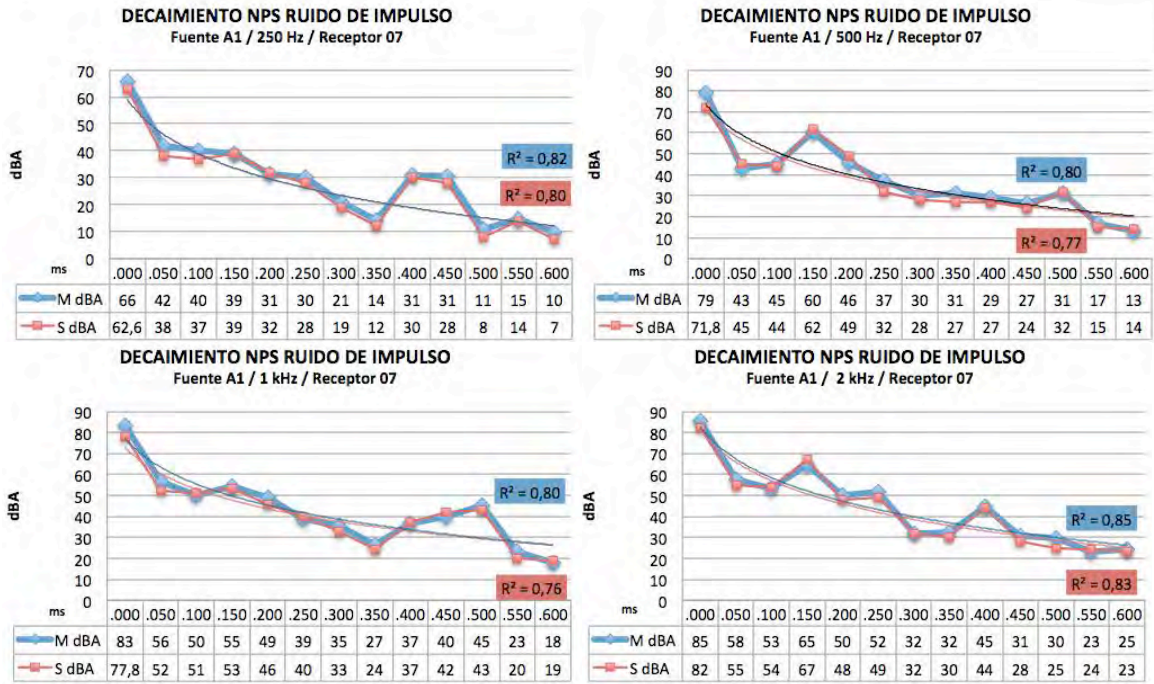
FUENTE 2 RECEPTOR 6



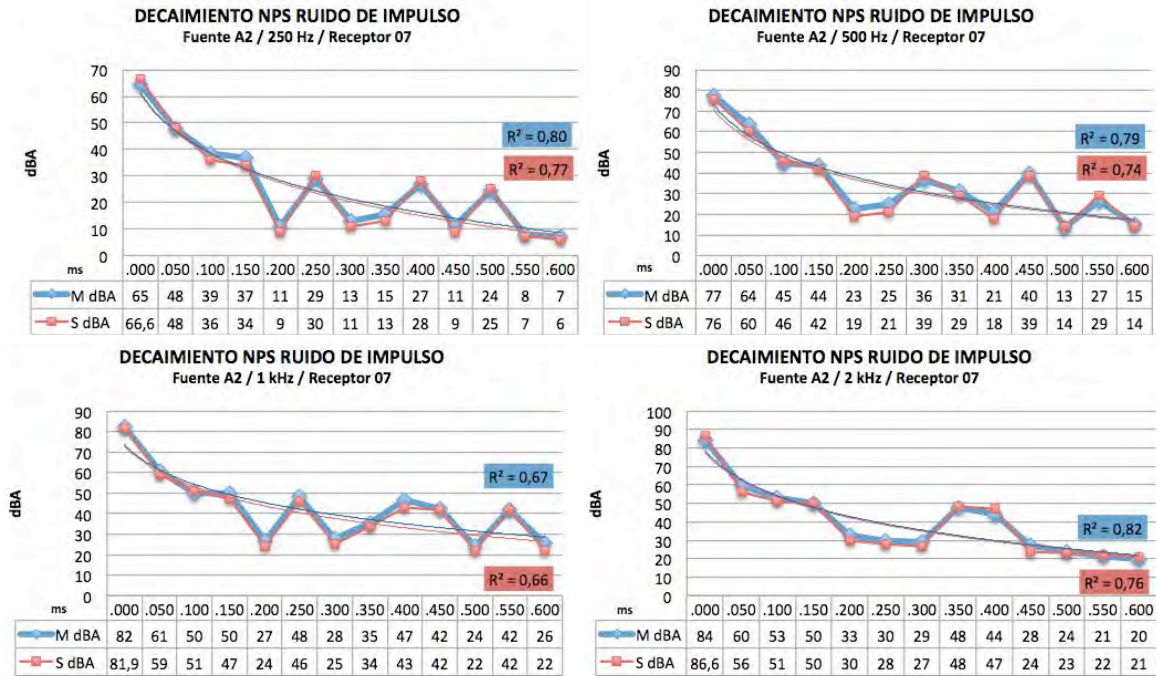
FUENTE 3 RECEPTOR 6



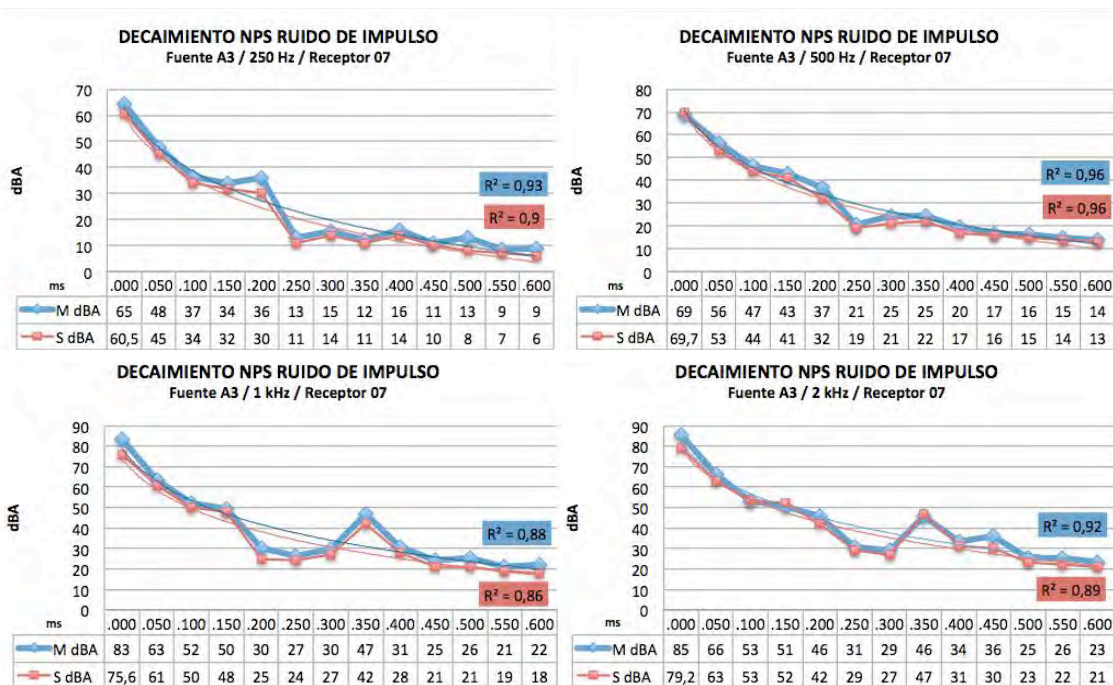
FUENTE 1 RECEPTOR 7



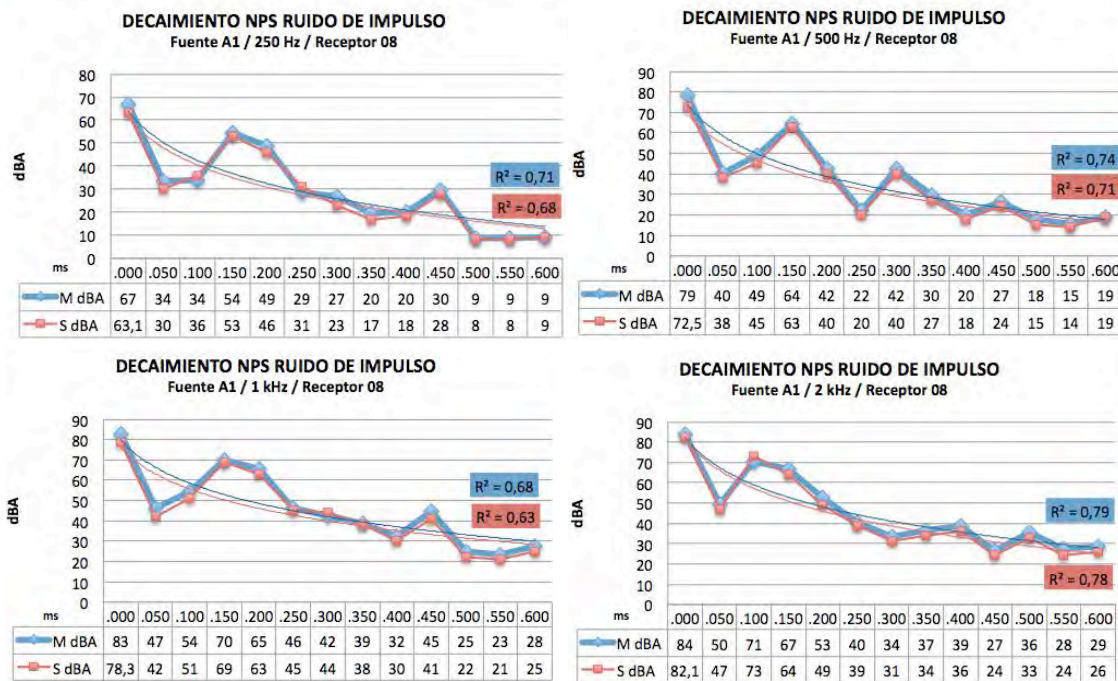
FUENTE 2 RECEPTOR 7



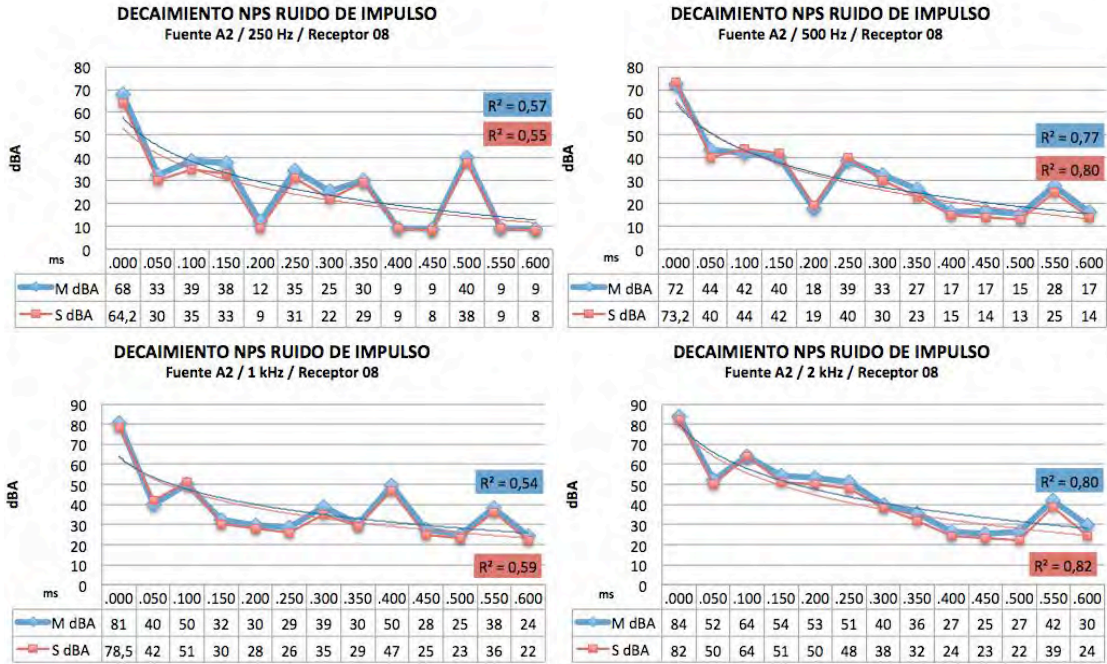
FUENTE 3 RECEPTOR 7



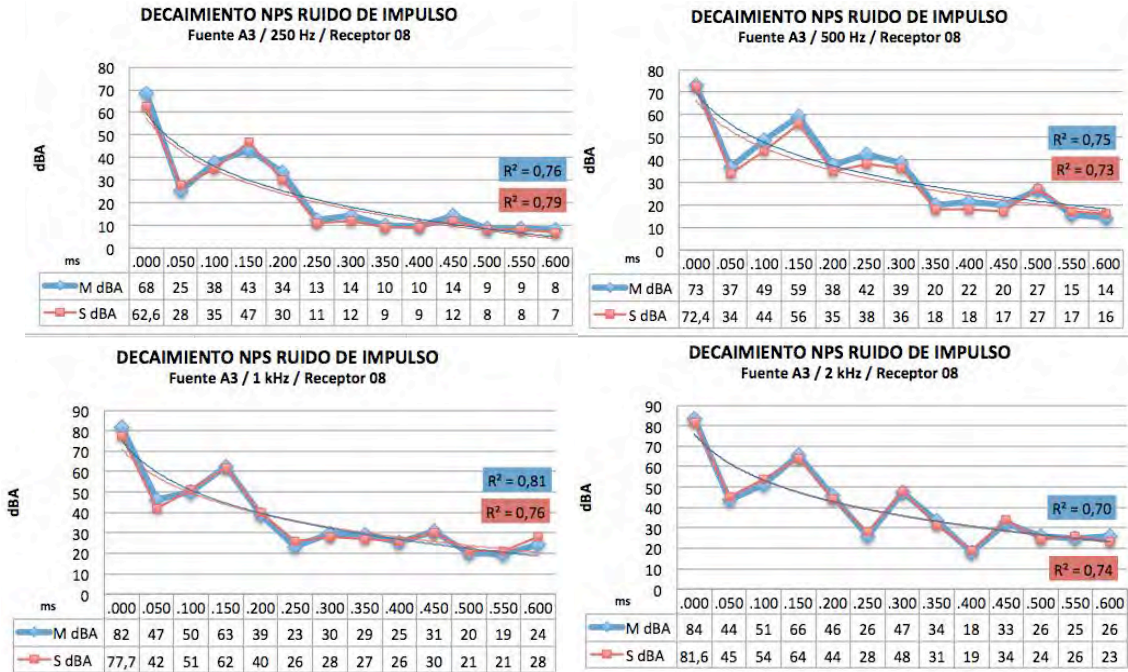
FUENTE 1 RECEPTOR 8



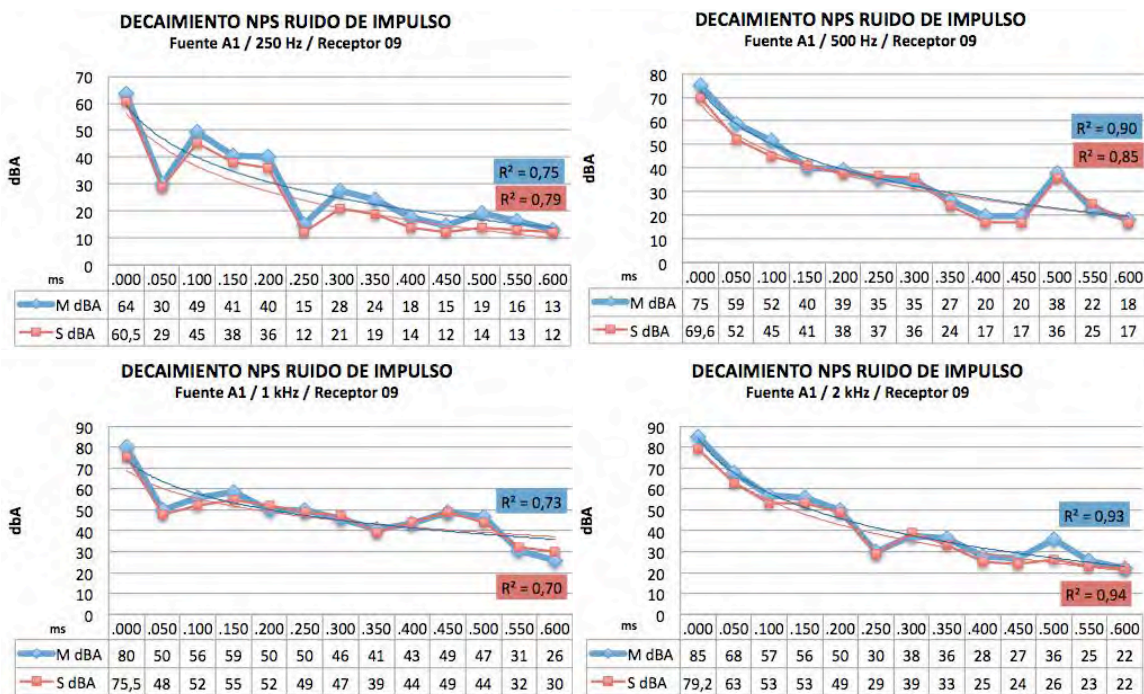
FUENTE 2 RECEPTOR 8



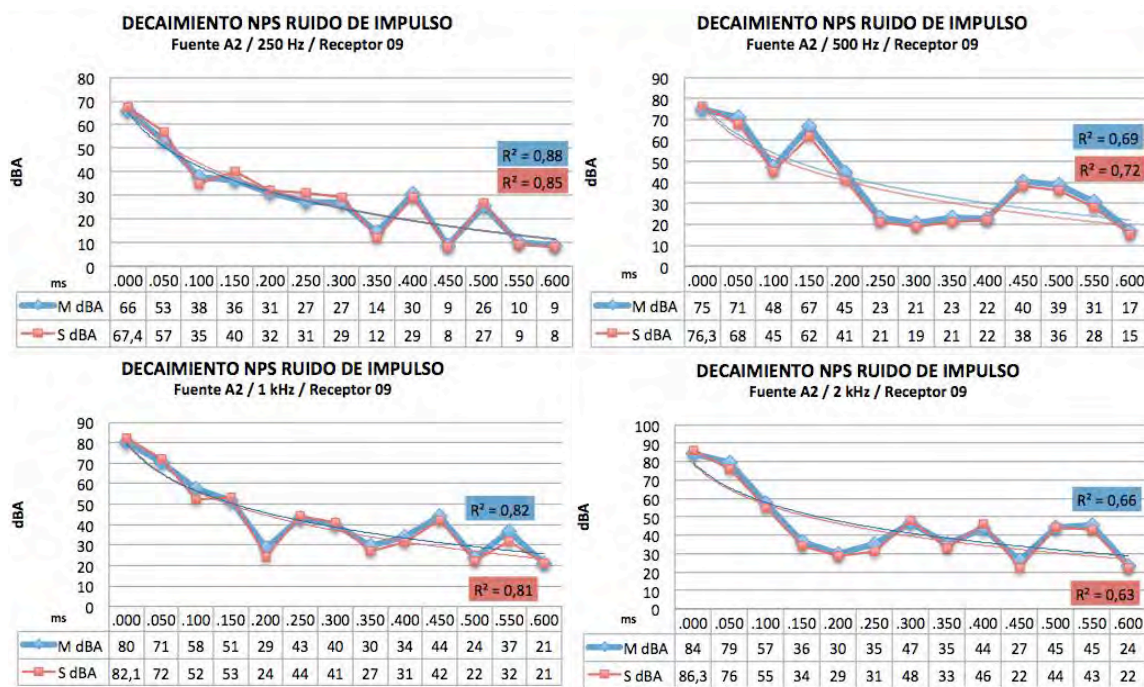
FUENTE 3 RECEPTOR 8



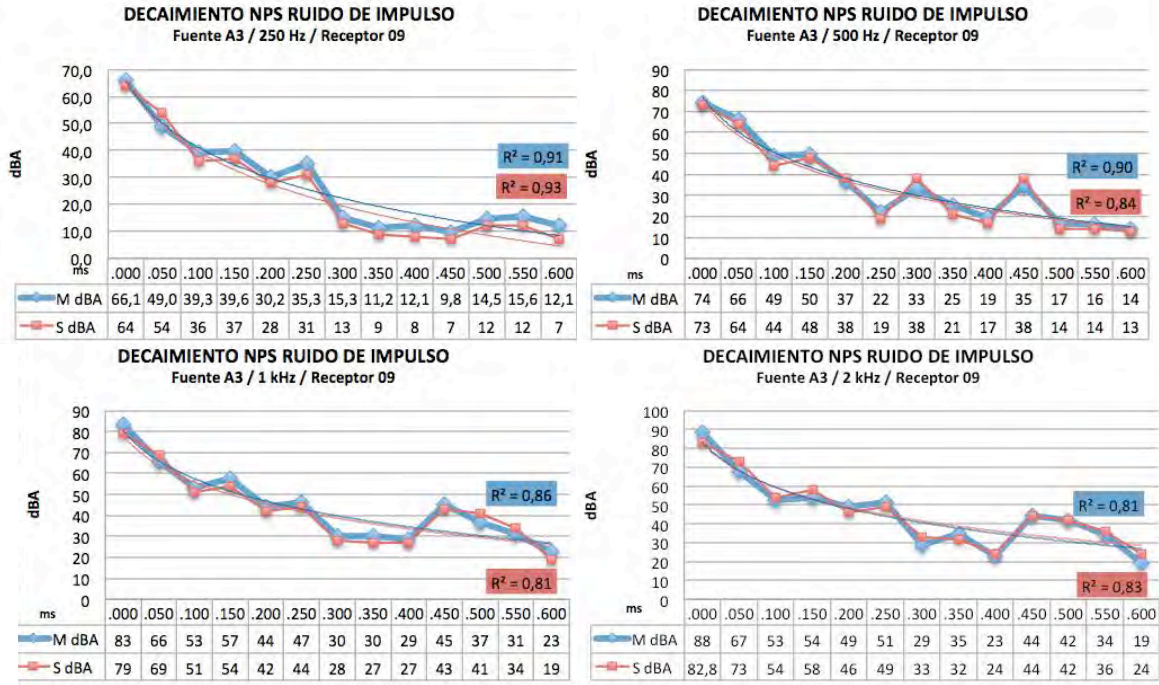
FUENTE 1 RECEPTOR 9



FUENTE 2 RECEPTOR 9



FUENTE 3 RECEPTOR 9



REFERENCIAS

Libros :

- De la Fuente, B., 1995. *La Acrópolis de Xochicalco*. México: INAH
- Beléndez, A., 1992. *Acústica, fluidos y termodinámica*. E.U.: Universidad Politécnica de Alicante
- Fernández, J., 1972. *Sobre lo bello en general y dos monumentos de arquitectura mexicana; Tajín y Xochicalco*. México: UNAM, Instituto de investigaciones estéticas.
- González, N., 1994. *Xochicalco; guía*. México: INAH
- Hirth, K., 1995. *The investigation of Obsidian Craft Production at Xochicalco, Morelos*. Ancient Mesoamerica, chapter 6 (251-258).
- Howard, D., 2007. *Acoustics and psychoacoustic*. Inglaterra: Ediciones ELSEVIER, Oxford.
- Jiménez, W., 1959. *Síntesis de la Historia Precolteca de Mesoamérica*. Esplendor del México Antiguo, tomo II, México.
- Kenneth, H., 1988. *Tiempo y asentamiento en Xochicalco*. México: INAH
- Kinsler, L., 1992. *Fundamentos de acústica*. México: Ediciones LIMUSA
- Labrada, J., 1987. *El registro sonoro*. México: Ediciones Alba.
- León, M., 1993. *La filosofía náhuatl*. México: Ediciones UNAM, Instituto de Investigaciones históricas.
- López, L., 2001. *Xochicalco y Tula*. México: Ediciones Trillas
- López, L., 2001. *Descubridores del pasado en Mesoamérica*. Antiguo Colegio de San Idelfonso.
- Lawrence, A., 1970. *Architectural Acoustics*. USA: Ediciones ELSEVIER
- Lorenzo, A., 1986. *Xochicalco, La leyenda de los Soles*. México: INAH
- Marshall, L., 2005. *Acústica Arquitectónica*. USA: Ediciones ELSEVIER
- Marcus, J., 1995. *La zona oaxaqueña en el Clásico*, en: *Historia antigua de México*. Vol. II: El horizonte clásico. México, Instituto Nacional de Antropología e Historia UNAM.
- Mangino, A., 2006. *Arquitectura Mesoamericana; Relaciones espaciales*. México: Ediciones TRILLAS
- Marroquin, G., 2009. *La Música prehispánica y su iconología*, México: INAH
- Martí, S., 1968. *Instrumentos musicales precortesianos*. México: INAH
- Ochoa, J., 2002. *Catálogo de Instrumentos Musicales y objetos Sonoros del México Indígena*. México: INAH

- Piña, R., 1989. *Xochicalco; El mítico Tamoanchan*. México: INAH
- Rigden, J., 1984. *Physics and the sound of music*. USA: Ediciones John Wiley & Sons.
- Saenz, C., 1963. *Últimos descubrimientos en Xochicalco*. México: INAH
- Saenz, C., 1965. *Nuevas exploraciones y hallazgos en Xochicalco*. México: INAH
- Saenz, C., 1965. *Xochicalco, Temporada 1960*. México: INAH
- Saenz, C., 1967. *El fuego nuevo*. México: INAH
- Saenz, C., 1978. *El enigma de Xochicalco*. México: INAH
- Sancho, F., 2008. *Acústica Arquitectónica y urbanística*. México: Ediciones LIMUSA, Universidad Politécnica de Valencia
- Webb, M., 1978. *The significance of the epiclassic, period in Mesoamerican Prehistory*. Mouton Publishers.
- Yoichi, A., 1998. *Architectural acoustics : blending sound sources, sound fields and listeners*. Nueva York: Ediciones SPRINGER – VERLAG.

Normas :

- Norma Oficial Mexicana. NOM-AA-62 :1979 Acústica - Determinación de los niveles de ruido ambiental.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-081-ECOL-1994 Límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición.
- International Organization of Standardization. ISO 3388 Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- International Organization of Standardization. ISO 26101: 2012 Acoustics - Test methods for the qualification of free field environments.
- International Organization of Standardization. ISO 1996-2:2007 Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels.

Artículos en revistas :

- Aboites, V. Wilson, M., 2013. *Mediciones acústicas en sitios arqueológicos de Guanajuato*. Acta Univeritaria Vol. 23 no. 2 pp. 5-15.
- Díaz et. al., 2012. *Acoustics and Levantine rock arte: auditory perceptions in La Valltorta Gorge*. Journal of Archaeological Science Vol 39 No. 12 pp. 35.42
- Lubman, D. (1998) *Archaeological Acoustic Study of Chirped Echo from Mayan Pyramid at Chichen Itza*. J. Acoust. Soc. Am., 104 (3), 1763.
- Lubman, D. (1999) *Singing Stairs*, Sci, News. Washington, D.C.
- Lubman, D. (1999) *Mayan Acoustics : Of Rainbows and Resplendent Quetzals*. J. Acoust. Soc. Am. 106, 2228.

- Lubman, D. (2002) *Acoustical Features of Two Mayan Monuments at Chichen Itza : Accident or Design*. J. Acoust. Soc. Am., 112, 2285.

Manuales :

- Manual de instrucciones Tascam DR-100 Teac Professional, Recuperado de [<http://www.fcp.uncu.edu.ar/upload/tascam-dr100es.pdf>]
- User Documentation NOR-140 Real Time Analyser. Recuperado de [<http://www.norsonic.com/filestore/PDF-filer/Brochures/Nor140SoundLevelMeterbrochure.pdf>]

Documentos digitales:

- Avedaño, A., 2011 *Estudian arqueoacústica precolombina expertos en producción musical digital*. Recuperado de [<http://www2.ccm.itesm.mx/talentotec/node/103>]
- Ávila, R., 2002 Los Pueblos Mesoamericanos. IPN. Recuperado de: [<https://claselenguaycultura.files.wordpress.com/2014/12/984752256-los-pueblos-mesoamericanos.pdf>]
- Cruz, J. (s/f) *Fenómenos acústicos en Chichen Itza*. Recuperado de [http://www.acusticaweb.com/images/PDF/articulos/acustica_en_chichen.pdf]
- Diccionario de etimologías. Recuperado de [<http://etimologias.dechile.net/>], 2014.
- Fundación Cultural Armella Spitalier, 2006. *Xochicalco*, Cd Interactivo, Vol. 29.
- García, C., 2011. *Archaeoacoustics, experimental archaeology and music: theoretical and methodological challenges in music archaeological research*. Recuperado de [http://www.academia.edu/1642590/Archaeoacoustics_Experimental_Archaeology_and_Music_Theoretical_and_Methodological_Challenges_In_Music_Archaeological_Research]
- Garza, C., 2008. *Estudios de cultura maya Vol XXXII; Arqueoacústica maya: La necesidad del estudio sistemático de efectos acústicos en sitios arqueológicos*. Recuperado de [<http://www.iifl.unam.mx/html-docs/cult-maya/32/claragarza.pdf>]
- Garza, et. al. (s/f) *“Xochicalco, la serpiente emplumada y Quetzalcoatl”* Recuperado de [http://www.oocities.org/mx/arqmeso/endosis/ed2/Art_xochicalco.pdf]
- López, L., 2001. *La Arqueología del epiclásico en el Centro de México*. Antiguo Colegio de San Ildefonso. Recuperado de: [<http://www.mesoweb.com/about/articles/Epiclasico.pdf>]
- Rios, M., 2014. Función de las plazas en la época prehispánica del Altiplano Mesoamericano. Revista Iberoamericana de las Ciencias Sociales y Humanísticas, ISSN:2395-7972. Recuperado de: [www.ricsh.org.mx/index.php/RICSH/article/view/22/48]

- Saenz, C., 1968. *Cuatro piedras con inscripciones en Xochicalco, México*. Recuperado de [<http://www.revistas.unam.mx/index.php/antropologia/article/view/19355>]
- Sahagún, F. 1938. *Historia general de las cosas de la Nueva España*. Tomo II. Recuperado de [<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k83043m>]
- Universitat de Barcelona, 2012. *Un estudio de arqueoacústica en el barranco de La Valltorta concluye que las áreas con pinturas rupestres corresponden a las de mejor sonoridad*. Recuperado de [http://www.ub.edu/web/ub/es/menu_eines/noticies/2012/10/056.html]

Tesis :

- Morante, R. (1993) *Evidencias del conocimiento astronómico en Xochicalco, Morelos*. (Tesis de maestría) INAH, México.
- Martínez, M. (2002) *Acústica en los espacios escénicos rituales prehispánicos* (Tesis doctoral) Universidad de Sevilla, San Luis Potosí.
- Méndez, A. (2009) *Tipología de los instrumentos arqueológicos de Mesoamérica y el Norte de México*. (Tesis doctoral) INAH, México.
- Jiménez, Noé (2007) *Estudio de las Características Acústicas de la Cueva del Parpalló*. (Tesis de licenciatura) Escuela Politécnica Superior de Gandia Recuperado de [http://www.academia.edu/985721/Estudio_de_las_Caracteristicas_Acusticas_de_la_Cueva_del_Parpallo]
- Knight, D., (2010) *The archaeoacoustics of San Vitale, Ravenna* (Master of philosophy/ Recuperado de [<http://eprints.soton.ac.uk/169837/1.hasCoversheetVersion/KnightMPhilETHESIS.pdf>] University of Southampton, School of humanities & archaeology.
- Medina, A. (2011) *Arqueoacústica*. (Tesis de licenciatura) Recuperado de [http://132.248.9.195/ptb2011/septiembre/0673245/0673245_A1.pdf] UNAM.
- Rodríguez, F. (2001) *Análisis y balance acústico de los espacios arquitectónicos: Propuesta de un modelo auxiliar para el diseño de espacios con características de confort acústico en arquitectura*. (Tesis de maestría) Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Ruíz, T. (2009) *Análisis acústico del efecto “Cola de Quetza” en “El Castillo” de Chichén Itzá, Yucatán*. (Tesis de Licenciatura) Recuperado de [<http://132.248.9.195/ptb2010/mayo/0657640/Index.html>] UNAM.
- Zalaquett, F. (2006) *Estudio de las representaciones escénicas en los mayas del periodo clásico: El grupo Norte de Palenque y su significado social*. (Tesis doctoral) UNAM, México

Currículum vitae

Arquitecta egresada de la Universidad Anáhuac Mayab, en la ciudad de Mérida, con especialidad en construcción en el año 2009.

Su experiencia profesional se basa principalmente en la cuantificación, elaboración de presupuestos, administración, gestión y construcción de obras de carácter comercial desde el año 2010.

Ha participado en congresos Nacionales e Internacionales desde 2011, presentando trabajos en relación a temas de sustentabilidad como Permacultura y sistemas foto-térmicos.