

ESTUDIO DE LAS DIFERENCIAS PERCEPTUALES ENTRE RESPUESTAS AL IMPULSO DE UNA SALA

De Tejada Molera, Víctor. Saenz Lechón, Nicolás.
Universidad Politécnica de Madrid, C/ Nikola Tesla, 28038, Madrid, España.
+34687943471, v.detejada@alumnos.upm.es

Palabras Clave: Psicoacústica, Acústica Perceptual, Auditorios, Respuestas impulsivas.

ABSTRACT. Psychoacoustics is an area of knowledge that studies how people perceive sound. One of the most common ways of working in this field is by conducting subjective tests. These are composed of a certain number of people who are exposed to stimuli and must answer a series of questions about their perception of those stimuli.

In this project, we study how participants' perception varies when listening to the binaural impulse responses of a room. These responses have been obtained by varying the reception position, while keeping the position of the sound source static. Thanks to this, it has been possible to simulate how a person would listen to the impulse responses if he/she were seated in different positions within the stalls of an auditorium.

With these results, two types of data analysis are carried out: on the one hand, a more conventional analysis is performed using the UNE-EN ISO 10399 standard. On the other hand, an analysis is carried out using Thurstonian models.

Finally, with these two analyses, the project conclusions are drawn, as well as possible improvements and applications for future studies.

RESUMEN. La psicoacústica es una rama del conocimiento que estudia cómo percibimos el sonido las personas y una de las formas más habituales de trabajo en este campo es mediante la realización test subjetivos. Estos se componen de un determinado número de personas que se ven expuestos a estímulos y deben responder a una serie de cuestiones sobre su percepción sobre dichos estímulos.

En este proyecto, se estudia cómo varía la percepción de los participantes con la escucha de las respuestas al impulso binaurales de una sala. Estas respuestas se han obtenido variando la posición de recepción, mientras se mantiene estática la posición de la fuente sonora. De esta forma, se ha logrado simular cómo una persona escucharía las respuestas al impulso si se encontrara sentado en distintas posiciones dentro del patio de butacas de un auditorio.

Con dichos resultados, se realizan dos tipos de análisis de datos: por un lado, se realiza un análisis más convencional utilizando la norma UNE-EN ISO 10399. Por otro lado, se realiza un análisis mediante Modelos Thurstonianos.

Finalmente, con estos dos análisis se extraen las conclusiones proyecto, así como posibles mejoras y aplicaciones para futuros estudios

1. INTRODUCCIÓN

La respuesta al impulso de una sala se denomina el comportamiento acústico que se obtiene en una determinada posición de recepción, cuando ese espacio es excitado con una señal del tipo "Delta", desde una posición de emisión. Este tipo de respuestas tienen una gran importancia ya que aportan información sobre la reverberación del espacio, la inteligibilidad, etc.

A pesar de esto, las respuestas al impulso tienen una gran limitación: sólo aportan información sobre cómo se comporta el espacio para el par de puntos que se fijan como punto de emisión

y de recepción. Si se quiere caracterizar de forma adecuada un recinto, se deben tomar un elevado número de respuestas de forma que se consiga obtener un número de puntos de recepción suficientes.

¿Pero cuántas posiciones son realmente necesarias? Para resolver estas cuestiones entra en juego la Psicoacústica. La psicoacústica es el campo de la ciencia que estudia cómo las personas perciben el sonido, y la forma más habitual de trabajo es mediante la realización de test subjetivos de audio. Estos test se componen de un determinado número de personas que se ven expuestas a estímulos, y deben responder a una serie de cuestiones sobre su percepción sobre dichos estímulos.

La psicoacústica, además, depende en gran medida de procesos estadísticos. Por este motivo, es importante disponer de un gran número de participantes para que los resultados tengan relevancia estadística. Si el número de participantes fuera pequeño, las desviaciones obtenidas tendrían valores muy elevados y los resultados podrían estar fuertemente influidos por el azar, haciendo muy complicado que otros estudios fueran capaces de reproducir el mismo experimento.

1.1. Objetivos

Con todo esto, el objetivo de este proyecto es el de comprobar las diferencias perceptuales que se obtienen entre distintas respuestas impulsivas tomadas en distintas posiciones de una sala.

2. ANTECEDENTES

Para este estudio se han consultado alrededor de 50 documentos incluyendo libros de referencia, artículos de congreso y normativas, entre otros. De todos ellos, unas 30 fuentes bibliográficas han acabado siendo de utilidad.

Al analizar los documentos, se ha observado una gran inconsistencia en las características de los diferentes estudios que se han analizado. Este problema ya se comenta en algunas fuentes como [1].

Por un lado, se encuentran los diferentes tipos de test que se pueden aplicar. Algunos ejemplos pueden ser las pruebas de diferencias o binomiales donde se incluyen los "2-AFC". También se encuentran los test "Duo-Trio", los ABX, de escalas numéricas, entre otros.

También se han observado diferencias en relación con el número y características de las personas participantes. Mientras que diferentes normativas [2-4] recomiendan la utilización de, al menos, 20 personas, se pueden encontrar ejemplos en los que dicho número no se alcanza [5-8]. Lo mismo ocurre con la realización de experimentos previos y la utilización de gente con experiencia.

En cuanto al análisis de los datos, se observa que un gran número de estudios se han realizado utilizando un análisis de la varianza (ANOVA) [5,9-13], aunque también pueden encontrarse el uso de normas como. No obstante, en estudios más recientes, aparecen los modelos thurstonianos como una alternativa sencilla de aplicar y con cualidad que pueden resultar útiles para ciertos estudios [14-15].

A la vista del estudio de los antecedentes, queda expuesta la gran variedad de sistemas que se siguen a la hora de realizar los test perceptuales. Por ello, es necesario identificar sus particularidades para determinar las características que mejor se le ajustan.

3. TOMA DE DATOS

3.1 Localización

En este estudio, se ha utilizado el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Sistemas de Telecomunicación (ETSIST) ubicada en el Campus Sur de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Este espacio está diseñado como sala de conferencias y como espacio para de música coral. El espacio tiene unas dimensiones de 25 metros de largo por 13.64 de ancho. El auditorio tiene una altura aproximada de 5 metros. En la figura x se puede observar una vista en planta con sus diferentes zonas marcadas.

Es un espacio con acabados principalmente en madera, especialmente en las paredes laterales, el escenario y la concha acústica del techo. El suelo es de material linóleo, mientras que el patio

de butacas lo conforman 485 asientos individuales tapizados con material textil y relleno de material esponjoso que no se ha podido consultar.

3.2 Numeración y toma de datos

Para el caso de este proyecto, se ha supuesto que el salón de actos es simétrico en la parte izquierda y derecha. Por este motivo, se han determinado posiciones en la parte par de la sala. Después, se ha distribuido el área seleccionando una butaca y dejando butacas libres antes de seleccionar la siguiente posición para cada fila. Así mismo, para la fila siguiente no se selecciona la butaca que está en frente de la seleccionada, sino la inmediatamente a continuación a su derecha. En la figura 3.3 puede observarse un esquema con dicha distribución.

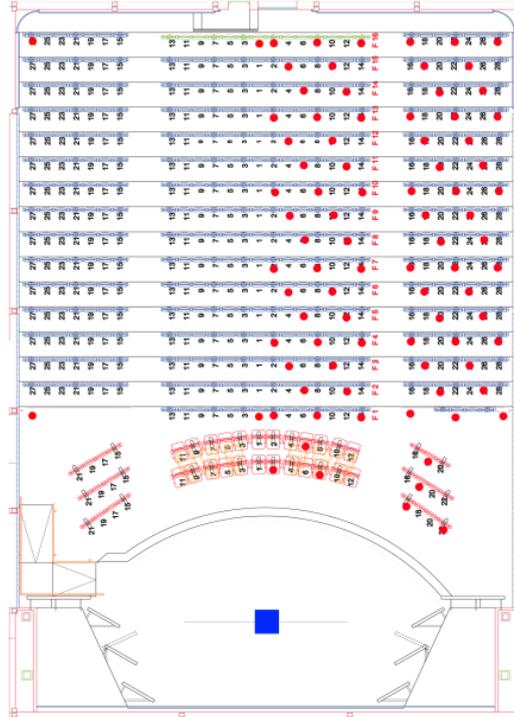


Figura 1: Distribución de las posiciones de grabación de las respuestas impulsivas.

3.3 Equipo utilizado

Para la toma de datos se utilizó el siguiente equipo:

- Ordenador portátil ASUS 2 con Windows 10 y software Dirac instalado.
- Tarjeta de sonido MOTU UltraLite-mk3 Hybrid.
- Amplificador de potencia Crown XLS 2002.
- Fuente dodecaédrica AVM DO-12.
- Alargaderas y cableado necesario para el conexionado de los equipos.
- Micrófonos biaurales Roland CS-10EM.
- Grabadora portátil Yamaha pr7.

3.4 Metodología para la grabación de las respuestas al impulso

En primer lugar, se procede a hacer una escucha de las fuentes de ruido que se aprecian dentro del espacio.

Una vez analizadas dichas fuentes, se procede a calibrar el sistema de forma que la relación señal a ruido en las posiciones más lejanas respecto de la fuente sean aceptables (mayor o igual a 35dB) y que ni la fuente ni los micrófonos saturaran en ningún momento.

Una vez hecha esta comprobación, se comenzó con las grabaciones. El orden seguido fue desde las filas más alejadas a la fuente a las más cercanas. La persona encargada de ser sujeto de las medidas se colocaba los auriculares y se sentaba en la butaca. Ya colocado, se comenzaba la reproducción de cuatro rondas de barridos frecuenciales de 20Hz a 20kHz. El sujeto debía iniciar

manualmente la grabación una vez terminaba de reproducirse el primer barrido y finalizarla una vez terminaba el tercer barrido. Una vez realizada la grabación, se comprobaba que se había grabado correctamente y se pasaba a la siguiente posición.

En total se obtuvieron unas 83 grabaciones que, a continuación, se procesaban en el mismo ordenador utilizando el software Dirac con el fin de obtener las respuestas al impulso.

4. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN DEL TEST SUBJETIVO

Para el desarrollo de la aplicación, se ha optado por utilizar el lenguaje de programación Python3. Este lenguaje tiene la ventaja de que incluye numerosas librerías que permiten trabajar con interfaces gráficas con las que los participantes de los test puedan interactuar de forma sencilla. Para nuestro caso particular, se ha optado por utilizar la librería del entorno gráfico GTK.

4.1 Características de la interfaz de usuario

Desde un principio, se ha querido diseñar una interfaz que sea lo más simple posible, no sólo por facilidad para realizarla, sino para que las personas participantes puedan centrarse exclusivamente en los objetivos del test y hacer que su uso no suponga ninguna dificultad.

En una primera instancia se decidió generar una interfaz en la que los elementos principales fueran dos botones con los que el usuario pudiera escoger cuál de los audios quería reproducir. Las respuestas se recogerían en dos casillas de verificación, o *toggles*. También se incluyó un botón en la parte inferior para enviar cada una de las respuestas. En la parte superior se incluye un texto que indica el número de pregunta por la que va el test.

Esta configuración es la que se utilizó en una versión preliminar del test. Al finalizar dicha prueba, se les pidió a los participantes que propusieran diferentes mejoras para perfeccionar la interfaz de usuario. Atendiendo a estas propuestas, se modifica la interfaz (en la figura X se pueden apreciar las diferencias entre ambas versiones).

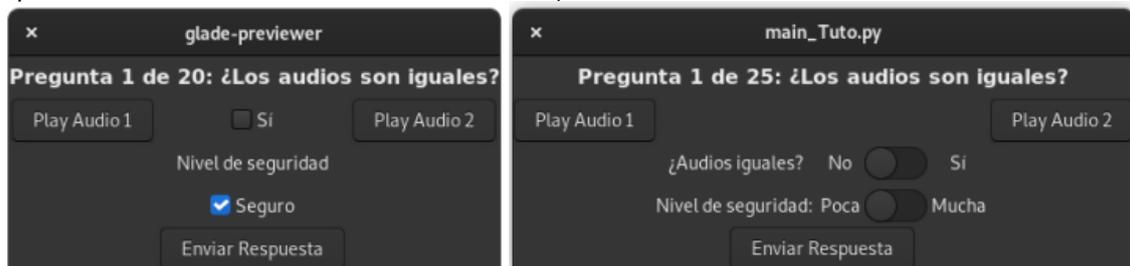


Figura 2: Versión inicial y final de la interfaz de usuario

5. REALIZACIÓN DEL TEST SUBJETIVO

Para simplificar la toma de datos del estudio, se parte de la premisa de que los oyentes perciben diferencias sonoras en función de la distancia a la que se encuentre la fuente sonora del receptor, pero que dichas percepciones son similares para posiciones simétricas dentro del espacio de estudio.

Para validar esta hipótesis, que permitiría que las muestras recogidas fueran de sólo la mitad del auditorio, se plantea un test previo y, una vez comprobada la hipótesis y realizada la adquisición de todos los datos necesarios, se diseña un segundo test más completo y con una interfaz de usuario más refinada a partir de las experiencias adquiridas en el test anterior.

5.1 Características del test previo

Para la realización de este test, se han seguido las recomendaciones propuestas en [1]. Para ello, se plantean las siguientes preguntas:

- ¿En qué categoría se engloba el estudio?: En este test, se pretende determinar la sensibilidad que tienen las personas para distinguir las diferencias perceptuales al escuchar sonidos cuando se encuentran en distintas posiciones respecto de la fuente

acústica. Por este motivo, se puede concluir que esta prueba se encuentra englobado dentro de los que se consideran como de Sensibilidad.

- ¿Qué tipo de test es el más adecuado?: Para el estudio que se pretende hacer, existen numerosos tipos de test que pueden arrojar datos interesantes. En este caso, se ha optado por repetir el tipo de test utilizado en el estudio previo; es decir 2-AFC o Same/Different. Los motivos que han llevado a esta elección han sido la facilidad de implementación y codificación, su simpleza que lo hace apropiado para todo tipo de participantes y que permite arrojar resultados bastante fiables mediante un análisis relativamente sencillo usando modelos Thurstonianos, además de que existen normas internacionales que permiten obtener resultados extra que pueden ser interesantes de comparar con los de dichos modelos.
- ¿Participantes expertos o inexpertos?, ¿cuántos necesito?: A la hora de plantear el experimento, desde un primer momento se planteó como una situación que afectaba a la población general. Por este motivo, se consideró que no era relevante que los participantes tuvieran una experiencia particular en la realización de este tipo de test. A pesar de todo esto, se consideró que todas personas participantes debían pasar por una breve sesión de entrenamiento previo para que supieran de antemano en qué elementos de los sonidos tenían que fijarse. En cuanto al número de participantes, se siguieron las recomendaciones de las mismas normas [2-4]. De esta forma, se concluyó que el número de participantes debía de ser de un mínimo de 30 personas.
- ¿Qué tipo de señal utilizo?: Se optó por utilizar directamente las respuestas al impulso obtenidas tras el procesado que realiza el software Dirac, como ya se explica también en el apartado de “Toma de datos”. En este caso, se utilizan un total de 83 archivos distintos de 2 segundos de duración. Al igual que en la prueba anterior, la duración se encuentra dentro de los límites marcados por [2-4] para evitar la fatiga auditiva y que los participantes se acostumbren a los estímulos. Para la realización de los experimentos, el volumen al cual se reproducen las señales no es relevante, siempre y cuando no se modifique a lo largo de toda la sesión. Por este motivo, el participante puede escoger el que le sea más cómodo, con la única restricción de que el volumen debe ser el mismo para la escucha de los dos audios que conforman cada pregunta.
- ¿Cuál es el tipo de análisis de datos?: para los test finales se han optado por dos análisis diferentes. Por un lado, se mantiene el análisis del coeficiente α siguiendo las especificaciones de la norma ISO-10399 [16] y las tablas que ofrece en sus anexos. Por otro lado, se realiza un análisis mediante modelos thurstonianos. Ambos análisis se realizan para dos diferentes disposiciones de los datos: según la distancia del punto medio de la posición de los dos audios respecto de la fuente, y según la distancia a la que se encuentre la posición de ambos audios.

5.2 Procedimiento del test

Localización

El espacio escogido para la realización de las escuchas fue un laboratorio del CITSEM localizado en el Campus Sur de la UPM. Se escogió esta localización porque, debido a la situación pandémica producida por la COVID-19, era necesario que las ventanas estuvieran abiertas en todo momento. Se planteó la utilización de aparatos de depuración del aire, pero su ruido era comparable o más molesto que el ruido procedente del exterior. El espacio está situado en un área poco transitada sin la presencia de vehículos.

Material utilizado:

Para la realización del test se utilizó el siguiente equipo:

- Ordenador portátil con S.O. Debian 11 con procesador Intel i5 y 12GB de RAM.
- Software *Gnome Builder* para la ejecución de la aplicación.
- Auriculares Tascam-TH02
- Declaración de consentimiento.

Realización del Test

En primer lugar, se explicaba a los participantes en qué consistía el estudio del que iban a formar parte y se les daba a leer una hoja de información al participante en la que se explica en mayor detalle las particularidades del test, las partes de las que consta, así como información relevante en temas de salud y protección de datos. Una vez leído, debían rellenar una declaración responsable aceptando los aspectos marcados en el documento anterior.

A continuación, daba comienzo el experimento con el tutorial. En él se le presentan al participante tres de las posibilidades que podría encontrarse (que los audios fueran de la misma posición, que fueran de filas distintas y que fueran de butacas distintas de la misma fila).

Una vez el participante consideraba que estaba preparado, pulsaba el botón de “Empezar test” para iniciar la segunda parte. En esta segunda parte al usuario se le presentan dos audios, escogidos de forma aleatoria, de todas las posiciones posibles de la sala y debe determinar si lo que percibe son dos audios que suenan igual o no. Por otro lado, el participante debe especificar si se encuentra seguro de su respuesta. El usuario puede repetir la reproducción de los audios las veces que quiera, pero debe esperar a que el audio termine de reproducirse antes de poder escoger si repetirlo o escuchar el otro audio. No existe la opción de “No sabe/no contesta”, por lo que, en caso de no poder decidirse, el usuario debe escoger una de las dos opciones de forma aleatoria y marcar la opción de “no seguro”. Una vez ha decidido su respuesta, debe pinchar en el botón de “Enviar respuesta” para que se le presenten los dos siguientes audios.

El experimento termina tras las 25 rondas de preguntas. Una vez terminada esta parte, el trabajo de las personas voluntarias ha terminado y puede marcharse para dar paso al siguiente participante.

En total participaron 34 personas en un rango de 18 a 33 años y en ningún momento la duración superó los 30 minutos.

6. RESULTADOS DEL TEST

Para este estudio, se han agrupado los resultados de dos formas diferentes. La primera es en función de la distancia relativa entre butacas. Para este tipo de agrupación los resultados se muestran en la tabla 6.2. Esta separación se indica en forma de intervalos de la forma $[x - y)$ donde se expresa el rango de las distancias en las que se incluyen las respuestas. Por ejemplo, el intervalo $[2-3)$ incluye todas las respuestas en las que la distancia relativa entre butacas se encuentra en los 2 metros (incluidos) y los 3 metros (sin incluir).

Tabla 1: Resultados en función de la distancia entre butacas

Distancia [m]	Respuestas	Iguals	Diferentes	Duda iguals	Duda diferentes
(0-2)	61	40	21	11	9
[2-3)	76	40	36	11	16
[3-4)	102	47	55	14	14
[4-5)	111	30	81	13	29
[5-6)	95	24	71	9	21
[6-7)	78	11	67	6	10
[7-8)	70	9	61	2	4
[8-9)	52	4	48	3	9
[9-10)	62	3	59	1	8
[10-11)	47	1	46	0	3
[11-12)	33	1	32	0	2
[12-14)	33	1	32	1	0
[14-18)	24	0	24	0	1
Total	844	211	633	71	126

La otra forma de organización es ordenándolos en función de la distancia relativa a la fuente sonora (considerando esta como el origen de coordenadas). En este caso, la agrupación sigue la misma nomenclatura que en el caso anterior, solo que esta vez el intervalo $[x - y)$ se corresponde con las distancias promedio a cada pareja a la fuente, en vez de la distancia entre butacas. Haciendo esta organización, los datos se reparten de la forma que se muestra en la tabla 6.3.

Tabla 2: Resultados en función de la distancia relativa a la fuente

Distancia [m]	Respuestas	Iguales	Diferentes	Duda iguales	Duda diferentes
[6-8)	15	5	10	2	2
[8-10)	35	10	25	2	3
[10-11)	32	8	24	2	7
[11-12)	53	12	41	7	7
[12-13)	55	14	41	3	5
[13-14)	67	14	53	6	9
[14-15)	101	22	79	10	10
[15-16)	99	18	81	3	12
[16-17)	84	18	66	4	12
[17-18)	63	10	53	3	11
[18-19)	95	21	74	3	15
[19-20)	62	19	43	11	9
[20-21)	44	19	25	9	10
[21-24]	39	21	18	6	4
Total	844	211	633	71	126

7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

7.1 Distancia relativa a la fuente

Aplicando los conceptos presentes en la norma UNE-EN ISO 10399, para todas las respuestas, y para las únicamente marcadas como “seguras”, se obtienen las tablas x e y respectivamente. Por otro lado, se utiliza el paquete “sensR” para aplicar el análisis mediante modelos thurstonianos a ambos grupos de respuestas. Los resultados de dicho análisis pueden observarse en la figura X.

Tabla 3: Valores de los resultados arrojados por la norma UNE-EN ISO 10399 y aplicando modelos thurstonianos.

Distancia [m]	Respuestas	Iguales	Diferentes	α -Risk	d'	$\sigma(d')$
[6-8)	15	5	10	0.2	0.609	0.473
[8-10)	35	10	25	0.05	0.800	0.318
[10-11)	32	8	24	0.01	0.954	0.341
[11-12)	53	12	41	0.001	1.062	0.270
[12-13)	55	14	41	0.001	0.934	0.259
[13-14)	67	14	53	0.001	1.146	0.244
[14-15)	101	22	79	0.001	1.102	0.197
[15-16)	99	18	81	0.001	1.285	0.208
[16-17)	84	18	66	0.001	1.120	0.217
[17-18)	63	10	53	0.001	1.414	0.269
[18-19)	95	21	74	0.001	1.087	0.203
[19-20)	62	19	43	0.01	0.715	0.236
[20-21)	44	19	25	NO	0.243	0.269
[21-24]	39	21	18	NO	0.000	NA

Tabla 4: Resultado del análisis de datos según la norma UNE-EN ISO 10399 y aplicando modelos thurstonianos para las respuestas marcados como "seguras"

Distancia [m]	Respuestas	Iguales	Diferentes	α -risk	d'	$\sigma(d')$
[6-8)	11	3	8	0.2	0.855	0.571
[8-10)	30	8	22	0.01	0.881	0.347
[10-11)	23	6	17	0.05	0.906	0.399
[11-12)	39	5	34	0.001	1.605	0.361
[12-13)	47	11	36	0.001	1.026	0.285
[13-14)	52	8	44	0.001	1.443	0.298
[14-15)	81	12	69	0.001	1.477	0.241
[15-16)	84	15	69	0.001	1.302	0.226
[16-17)	68	12	56	0.001	1.314	0.252
[17-18)	49	7	42	0.001	1.510	0.313
[18-19)	77	18	59	0.001	1.027	0.223
[19-20)	42	8	34	0.001	1.239	0.315
[20-21)	25	10	15	No	0.358	0.359
[21-24]	29	15	14	No	0	NA

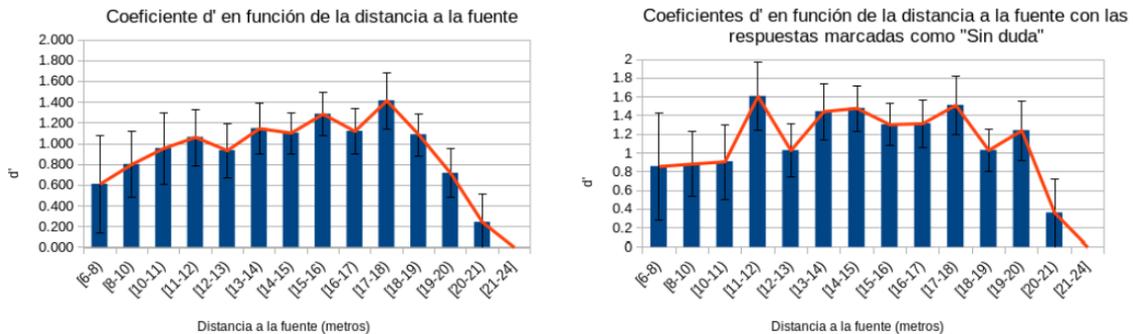


Figura 3: Coeficientes d' en función de la distancia a la fuente.

Como se puede observar en las tablas y figuras antes mencionadas, el comportamiento para ambos procedimientos es bastante similar. Hay que tener en cuenta que para α -risk, cuanto menor es el valor, estadísticamente más representativa es la diferencia, mientras que para los modelos thurstonianos, se produce a la inversa; cuanto mayor es el valor de d' , más diferentes son los estímulos. En ambos casos, se observa que las diferencias aumentan conforme aumenta la distancia respecto de la fuente, pero llegada una determinada distancia, las diferencias comienzan a dejar de ser perceptibles hasta llegar a posiciones donde las posibles diferencias pueden considerarse debidas al azar. La mayor diferencia entre ambos sistemas se encuentra en lo que podríamos denominar como "sensibilidad". La norma UNE-EN ISO 10399 es menos sensible a las variaciones puntuales del número de respuestas consideradas correctas; además de que los cambios que se producen son mucho más abruptos ya que sólo existen seis posibles valores para α -risk (0.2, 0.1, 0.05, 0.01, 0.001 y que no pueda obtenerse el valor). Los modelos thurstonianos, por otra parte, son mucho más sensibles, ya que ligeras variaciones en los resultados, producen variaciones en los valores de d' . Al mismo tiempo, se dispone de todo un rango continuo de valores que dicho coeficiente puede obtener. Esto permite que las representaciones graficas de las variaciones de d' muestren mejor el comportamiento psicoacústico de los estímulos y analizar si existe una tendencia, como es el caso de nuestro experimento.

7.2 Distancia relativa entre butacas

Para este apartado se vuelven a aplicar tanto los procedimientos de la norma UNE-EN ISO 10399, como los modelos thurstonianos. De ambos análisis se obtienen las tablas 7.5 y 7.6, así como las figuras 7.4 y 7.5.

Tabla 5: Resultado del análisis de los datos según la norma UNE-EN ISO 10399 y aplicando modelos thurstonianos

Distancia [m]	Respuestas	Total iguales	Total diferentes	α -risk	d'	$\sigma(d')$
(0-2)	61	40	21	NO	0.000	NA
(2-3)	76	40	36	NO	0.000	NA
(3-4)	102	47	55	0.05	0.139	0.176
(4-5)	111	30	81	0.001	0.865	0.18
(5-6)	95	24	71	0.001	0.942	0.197
(6-7)	78	11	67	0.001	1.521	0.249
(7-8)	70	9	61	0.001	1.603	0.270
(8-9)	52	4	48	0.001	2.017	0.362
(9-10)	62	3	59	0.001	2.349	0.384
(10-11)	47	1	46	0.001	2.868	0.583
(11-12)	33	1	32	0.001	2.654	0.615
(12-14)	33	1	32	0.001	2.654	0.615
(14-18)	24	0	24	0.001	∞	NA

Tabla 6: Resultado del análisis de los datos según la norma UNE-EN ISO 10399 y aplicando modelos thurstonianos para las respuestas marcadas como "seguras".

Distancia [m]	Respuestas	Total iguales	Total diferentes	α -risk	d'	$\sigma(d')$
(0-2)	41	27	14	NO	0.000	NA
(2-3)	49	29	20	NO	0.000	NA
(3-4)	74	33	41	NO	0.192	0.207
(4-5)	79	17	62	0.001	1.115	0.224
(5-6)	65	15	50	0.001	1.041	0.243
(6-7)	62	5	57	0.001	1.981	0.327
(7-8)	64	7	57	0.001	1.739	0.295
(8-9)	40	1	39	0.001	2.772	0.597
(9-10)	53	2	51	0.001	2.514	0.450
(10-11)	44	1	43	0.001	2.829	0.589
(11-12)	31	1	30	0.001	2.614	0.621
(12-14)	32	0	32	0.001	∞	NA
(14-18)	23	0	23	0.001	∞	NA

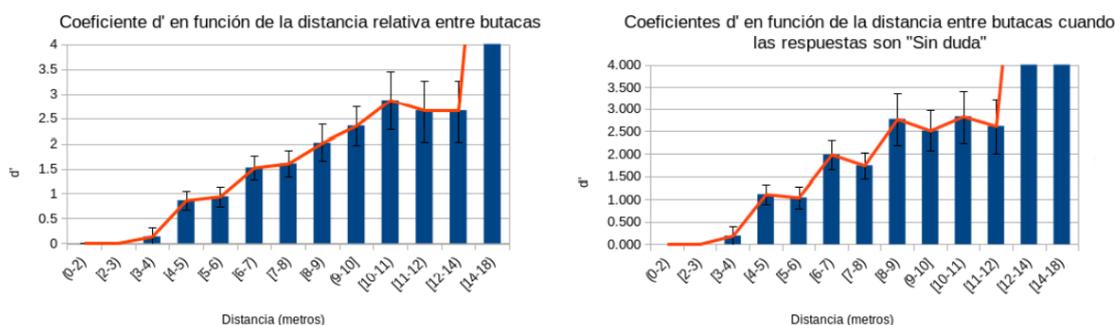


Figura 4: Coeficientes d' en función de la distancia entre butacas

Como se puede observar en las tablas recién mencionadas, los participantes empiezan a notar diferencias cuando la distancia entre butacas se encuentra a partir de los [3-4) metros, aunque este efecto se retrasa hasta los [4-5) metros si suprimimos las respuestas marcadas como "Con duda". Una vez ahí, las diferencias se mantienen estadísticamente representativas con el máximo nivel de seguridad que ofrece la norma, ya que la probabilidad de que los eventos sean iguales cuando, en realidad, se han

percibido como diferentes, es de 0.001. En los resultados obtenidos no hay un momento en el que dicha probabilidad decrezca.

Por otro lado, la tabla 7.5, así como la figura 7.4, muestran, para el análisis mediante modelos thurstonianos, un crecimiento más o menos constante del coeficiente d_0 desde los [3-4] metros hasta el final. En este caso, en el que están incluidos los resultados marcados como “Con duda”, puede parecer que existe una bajada de la percepción de las diferencias, pero al observar los datos de la tabla, se ve que ese decaimiento se debe a que se tienen menos datos en dichas posiciones y, por tanto, el hecho de que una persona determine que ha percibido los audios como iguales, hace que el valor del coeficiente baje. Esto se comprueba observando la tabla 7.6 y figura 7.5 donde se han eliminado las respuestas dudosas y se observa un reforzamiento en la tendencia creciente en las distancias más lejanas.

8. CONCLUSIONES

A la vista del análisis de los resultados, se puede concluir que la percepción auditiva de las respuestas al impulso de un determinado espacio depende, en gran medida, de la distancia a la fuente sonora. De esta forma, se puede ver como las diferencias son más perceptibles a medida que las respuestas se alejan de la fuente hasta que, en las posiciones más alejadas, dichas diferencias dejan de percibirse con una pendiente bastante abrupta. También se puede concluir que la distancia absoluta entre las posiciones de escucha tiene, a su vez, un rol muy importante a la hora de encontrar diferencias perceptuales. En este caso, se ha observado que las diferencias se encuentran más fácilmente a medida que aumenta dicha distancia. Debido a esto, se puede afirmar que la mejor forma de realizar las tomas de datos no es uniforme, sino que, en las posiciones más cercanas y alejadas, la densidad de los datos puede ser menor, ya que la capacidad de los participantes para distinguir las señales es bastante menor que en el centro. En esta parte central, la habilidad para distinguir los estímulos es mayor, por lo que es necesario tener un mayor volumen de datos. Las mayores dificultades que se han encontrado para la consecución de este objetivo es la imposibilidad de establecer unos criterios específicos para el número de respuestas. Aquí entran en juego variables como las dimensiones de la sala, la reverberación o la disposición del patio de butacas. Por este motivo, se antoja necesaria la realización de un análisis específico según el tipo de espacio sobre el que vayan a tomarse las medidas.

8.1 Mejoras y nuevas líneas de investigación

Por un lado, se hubiera modificado la distribución de las posiciones en la toma de datos. En vez de seleccionar los datos de una de cada tres butacas con un desplazamiento de una butaca entre filas, se hubiera hecho una distribución dependiente de la distancia a la fuente sonora. De esta forma, se hubieran tomado menos datos en las posiciones más cercanas y el grueso de las medidas se encontrarían en las zonas medias y lejanas. También, de haber dispuesto del tiempo y material necesario, se hubiera repetido los test y análisis utilizando otro tipo de señales para comprobar si los resultados varían en función de los audios que se aplican. Otras posibles futuras líneas de investigación incluyen el análisis de otros aspectos perceptuales más concretos como la coloración de las señales, la percepción de reverberación o comprobar de qué forma las variaciones del nivel de percepción son modificadas en función de diferentes tipos de salas (de tamaños diferentes, variando el acondicionamiento acústico, etc).

REFERENCIAS

- [1] Tejada, V. de: Desarrollo de un protocolo para la realización de experimentos de percepción subjetiva. Universidad Politécnica de Madrid, 2020. <https://oa.upm.es/66850>.

- [2] UIT, Sector de Radiocomunicaciones de la: Recomendación UIT-R BS.1534-3: Método para la Evaluación Subjetiva del Nivel de Calidad Intermedia de los Sistemas de Audio. Informe técnico, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2015.
- [3] UIT, Sector de Radiocomunicaciones de la: Recomendación UIT-R BS.1116-3: Métodos para la Evaluación Subjetiva de Pequeñas Degradaciones en los Sistemas de Audio. Informe técnico, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2015.
- [4] UIT, Sector de Radiocomunicaciones de la: Recomendación UIT-R BS.1284-2: Métodos Generales para la Evaluación Subjetiva de la Calidad de Sonido. Informe técnico, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2019.
- [5] Klockgether, S. y S. van der Par: Just Noticeable Differences of spatial cues in echoic and anechoic acoustical environments. Journal of the Acoustical Society of America, 2016.
- [6] Zahorik, P.: Direct-to-Reverberant Energy Ratio Sensitivity. Journal of the Acoustical Society of America, 2002.
- [7] Nowak, M. y P. Kokowsky: Subjective and Objective Assessments of Noise Barriers in Terms of the Loudness Level. En Proceedings of the 23rd International Congress of Acoustics, ICA 2019, 2019.
- [8] Shao, Z., W. Zhang y W. Zhu: Research on the Bandwidth Effect on Binaural Loudness Summation on the Cam Scale. En Proceedings of the Iner.Noise Congress 2019, 2019.
- [9] Shiell, M. y E. Formisano: Acuity of Spatial Stream Segregation Along the Horizontal Azimuth with Non-Individualized Head-Related Transfer Functions. En Proceedings of the 23rd International Congress of Acoustics, ICA 2019, 2019.
- [10] Pulvirenti, G., N. Totaro y E. Parizet: Simulated Transfer Path Accuracy vs Sound Perception. En Proceedings of the 23rd International Congress of Acoustics, ICA 2019, 2019.
- [11] Emiya, V., E. Vincent, N. Harlander y V. Hohmann: Subjective and Objective Quality Assessment of Audio Source Separation. IEEE Transactions on Audio, SPEech and Language Processing, 2011.
- [12] Krittly, L., V. Chmelik, Y. Sluyts, C. Glorieux y M. Rychtárikova: Audibility of Spectral Dips and Peaks in Broadband Noise. En Proceedings of the 23rd International Congress of Acoustics, ICA 2019, 2019.
- [13] Hongisto, V. y P. Virjonen: Annoyance Penalty of Amplitude-Modulated Sound. En Proceedings of the 23rd International Congress of Acoustics, ICA 2019, 2019.
- [14] Prida, D. de la y A. Pedrero: Methodology for the subjective evaluation of airborne sound insulation through 2-AC and Thurstonian models. Applied Acoustics, 157, 2019.
- [15] Prida, D. de la y A. Pedrero: Listening Tests in Room Acoustics: Comparison of overall differences regarding operational power. Applied Acoustics, 182, 2021.
- [16] O), International Standardization Organization: Analisis sensorial. Metodología. Ensayo duo-trio. UNE-EN, 2018.
- [17] Brockhoff, P. y R. Christensen: Thurstonian models for sensory discrimination tests as generalized linear models. Food Quality and Preference, 21, 2010.
- [18] Egan, J., E. Carterette y E. Thwing: Some factors affecting multi-channel listening. The Journal of the Acoustical Society of America, 1954.

- [19] Goose, J. y S. van de Par: Improved Binaural Speech Intelligibility by Adding Reverberation to the Target Speaker. En Proceedings of the 23rd International Congress of Acoustics, ICA 2019, 2019.
- [20] Christensen, H. y P. Brockhoff: Estimation and inference in the same-different test. Food Quality and Preference, 20, 2009
- [21] Gelfand, Stanley A: Hearing : an introduction to psychological and physiological acoustics. Marcel Dekker, New York, 4th ed. edición, 2004, ISBN 978-0-8247-5652-9.
- [22] Zwicker, E: Psychoacoustics: facts and models. Springer series in information sciences 22. Springer-Verlag, Berlin, 1998, ISBN 3-540-65063-6.
- [23] Blauert, Jens: Spatial hearing : the psychophysics of human sound localization. MIT Press, Cambridge, Massa
- [24] Mcmillan, N. y C. Douglas: Detection theory: a user's guide. Lawrence Erlbaum Associates,, 2005
- [25] Tejada, V. de y Saenz, N: Estudio de las diferencias perceptuales entre respuestas al impulso de una sala. Universidad Politécnica de Madrid 2022.