

INFLUENCIA DEL ESTÍMULO MUSICAL SOBRE LA PERCEPCIÓN DE LA CLARIDAD C_{80}

María Larrosa¹, Antonio Pedrero², Daniel de la Prida³

¹ Universidad Politécnica de Madrid

{e-mail: m.larrosa@upm.es}

² Grupo de Investigación en Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera 4, 28040, Madrid, España-

{e-mail: antonio.pedrero@upm.es}

³ Universidad Politécnica de Madrid

{e-mail: danidelaprida@gmail.com}

Resumen

La Claridad C_{80} ha sido ampliamente utilizada para la determinación de la claridad musical de recintos desde su definición en 1974. A pesar de lo extendido de su uso, no se ha investigado en profundidad que este índice tenga una buena correlación con la percepción subjetiva de la claridad para cualquier entorno acústico. En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos del análisis de la correlación existente entre el C_{80} y la percepción subjetiva para distintos estímulos y recintos. La información sobre la percepción subjetiva de la claridad se ha obtenido mediante la realización de un test psicoacústico a un conjunto de 18 participantes. Se utilizaron cinco estímulos musicales y 18 respuestas al impulso obtenidas mediante la simulación de tres recintos acústicos.

Los resultados obtenidos muestran que el estímulo musical constituye un factor significativo sobre la percepción que los oyentes tienen sobre la claridad de un recinto. De este modo se concluye que el C_{80} presenta posibilidades de mejora para mejorar su relación con la percepción subjetiva.

Palabras clave: acústica de salas, test psicoacústico, índices acústicos objetivos, claridad, C_{80}

Abstract

The acoustic parameter C_{80} has been widely used in the determination of the musical clarity of a venue since its definition in 1974. Despite its extended use, an exhaustive research has not been conducted which can conclude whether this index has a good correlation with the subjective perception of the musical clarity for certain kinds of music styles. This present communication shows the analysis of the correlation between the C_{80} and the subjective perception of the clarity for various musical stimuli and various venues. The information about the subjective perception of the clarity has been obtained from a listening test carried out by a set of 18 participants. The stimuli used were a total of five musical pieces and eighteen impulse responses obtained through the simulation of three acoustic halls.

The obtained results show that the musical stimuli were a significant factor in the perception of the clarity of the hall. Therefore it can be concluded that the C_{80} presents room for improvement in order to enhance its correlation with the subjective perception.

Keywords: room acoustics, listening test, objective acoustic indices, clarity, C_{80}

PACS n°. 43.66.Lj

1 Introducción

La investigación sobre el comportamiento acústico de las salas se remonta a principios del siglo XX [1]. El progreso en este campo se ha desarrollado principalmente en las tres últimas décadas debido al avance de otras tecnologías como la electrónica y la informática, que han permitido una mejora en los equipos de captación y en el tratamiento de las señales.

El interés que ha suscitado este campo se debe a una motivación cada vez mayor de crear espacios con propiedades acústicas mejor adaptadas al tipo de actividad que se va realizar en ellos de manera predominante (se puede hablar así de salas de conciertos, de conferencias, de cine, etc.), así como de mejorar los recintos ya existentes con el fin de obtener el mejor comportamiento acústico posible.

En el último siglo, tras la determinación del tiempo de reverberación como el primer descriptor de la acústica de salas por parte de W. C. Sabine en 1922 [2], han sido numerosas las aportaciones a la descripción de la acústica de salas mediante parámetros objetivos. Especialmente relevantes son las aportaciones en el campo de los índices acústicos de Leo L. Beranek [3]. Basándose en estudios realizados por éste en más de 100 salas se definieron un total de 25 parámetros, que él denominaba atributos, que definían todos los aspectos importantes de la música interpretada en la acústica de un recinto cerrado. Algunos de estos atributos han sido desarrollados para definir la percepción subjetiva de la acústica del recinto y han dado lugar a parámetros objetivos que se pueden definir mediante una fórmula matemática.

Los parámetros objetivos se encargan de cuantificar las cualidades acústicas de las salas mediante la realización de mediciones o estimaciones. Algunos de estos, como el tiempo de reverberación inicial, la fuerza sonora y el tiempo central, se consideran fieles descriptores de las características acústicas de los recintos, lo que ha llevado a la estandarización de sus métodos de medición en normas ISO, con el fin de contar con un marco metodológico común. El índice objetivo de interés en esta comunicación es la relación entre la energía precoz y la energía tardía, también denominado claridad C_{80} , definida por primera vez en 1974 por Reichard y Abdel Alim [4]. La norma UNE-EN ISO 3385-1:2010 [5] define la claridad como:

“... la relación entre las energías acústicas precoces y tardías. Se puede calcular para un límite precoz de 50 ms o de 80 ms, dependiendo de si los resultados se refieren a las condiciones de las salas de conferencia o de conciertos, respectivamente, utilizando la ecuación:

$$C_{te} = 10 \log \frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ dB} \quad (1)$$

El índice C_{80} también se conoce como la claridad musical de un recinto. Este parámetro se calcula como el promedio del valor obtenido para las octavas de 500 Hz y 1 kHz. Se considera que cuanto mayor sea el valor de este término más sensación de claridad presentará la sala, ya que más predominará el sonido directo con respecto a la reverberación.

En 2010, Bradley [6] presentó una investigación que tuvo como fin realizar un estudio crítico de todos los errores existentes en el cálculo y la interpretación de los parámetros acústicos definidos en [5]. Considera que, en general, no se han realizado suficientes investigaciones que determinen cómo utilizar adecuadamente los parámetros para obtener la mejor correlación con la percepción subjetiva. El mayor problema encontrado por Bradley para los parámetros de claridad C_{50} y C_{80} es la inexistencia de estudios que determinen el método ideal con el que obtener un valor único para definir la claridad de una sala, ya que los valores de estos parámetros varían considerablemente en función de la frecuencia.

Actualmente sólo se consideran las octavas de 500 Hz y 1 kHz, dejando fuera mucha información con respecto al comportamiento de la sala. A pesar de ello, debido a la falta de estudios subjetivos que den más información sobre los distintos índices de claridad, Bradley considera que el C_{50} y el C_{80} son los índices más adecuados para determinarla.

Para abordar este problema a lo largo de los años se han realizado *listening test* cuyo objetivo era la evaluación subjetiva de los descriptores objetivos de la acústica de salas. Tal y como se puede observar en la revisión de *listening test* en acústica de salas hecha en [7], en la mayoría de los test realizados [8, 9, 10, 11] el estudio se centraba en la determinación del umbral diferencial (JND) de la claridad C_{50} y C_{80} y otros parámetros acústicos; mientras que en [12] el propósito era evaluar la idoneidad de diversos índices objetivos como predictores subjetivos. Los estudios [9, 10] utilizaron el método de “*Minimal Changes*”; en [8, 11] el método “*Same-different*”; y en [12] el método “*Attribute 2-AFC*”. El primer método mencionado se encuentra basado en el segundo, cuyo principal problema es que es propenso a sesgos de tendencia [13]. También resaltar la importancia de la forma en la que se pregunta a los participantes y cómo estos interaccionan con los diversos estímulos. De especial interés son los resultados de [11], donde se observa que distintos procedimientos para la realización del *listening test* dan lugar a resultados distintos.

Otro punto de gran importancia a la hora de definir un *listening test* es el número de estímulos que se van a utilizar y sus características. En los cinco estudios de interés entre los evaluados en [7] se ha podido observar un total de nueve estímulos musicales pero solo uno de ellos ha sido utilizado en dos de las pruebas. También es importante mencionar que el número de estímulos utilizados en cada *listening test* es muy bajo, siendo habitualmente uno o dos, excepto en el caso de [11] donde se han utilizado cuatro. A pesar de que en algunos casos se ha justificado la selección de los estímulos no se han encontrado antecedentes claros que sostengan estas elecciones.

El objetivo de esta investigación es determinar la correlación existente entre el parámetro C_{80} y la percepción subjetiva en función del estímulo musical. La caracterización de la percepción subjetiva de la claridad se obtuvo mediante un *listening test* realizado por un conjunto de 18 participantes, para el que se usaron 18 respuestas al impulso obtenidas mediante la simulación de tres recintos de diferentes tamaño y cinco fragmentos musicales diferentes.

Con el fin de obtener un conjunto de fragmentos musicales representativos, con anterioridad a la realización del *listening test*, se llevó a cabo un estudio de la modulación musical de un conjunto de 69 piezas grabadas en cámara anecoica. La intención de este análisis era entender cómo se ve afectada la modulación musical en función del *tempo* de la pieza, de su instrumentación y de la figuración que presenta la misma. Los resultados de este análisis, que se encuentran más allá del alcance de esta comunicación, permitieron seleccionar cinco fragmentos musicales de distintos estilos y *tempo* para comprobar si estas características son significativas a la hora de percibir la claridad de un recinto.

2 Metodología

Para caracterizar la percepción subjetiva de la claridad se realizó un *listening test* en el que los participantes tuvieron que evaluar la claridad de un total de 90 muestras sonoras. Estas muestras se obtuvieron convolucionando los estímulos musicales seleccionados con diferentes respuestas al impulso, que se calcularon mediante la modificación del nivel de claridad de los modelos acústicos de tres salas. Los participantes tuvieron que caracterizar el grado de claridad que percibieron en cada muestra mediante una escala de valores de cinco posiciones.

A continuación se describe la metodología seguida en la investigación. En primer lugar se va a explicar la implementación del *listening test*, justificando los estímulos utilizados y el tipo de test que se eligió utilizar. Seguidamente, se expone el entorno de realización del test y el procedimiento que se siguió con cada uno de los participantes. Finalmente, se explica el método de análisis empleado en la evaluación de los resultados obtenidos.

2.1 Diseño del *listening test*

Como se ha expuesto anteriormente el método utilizado para la realización del *listening test* y los estímulos utilizados en el mismo pueden tener una gran influencia sobre los resultados obtenidos. Por lo tanto, a la hora de realizar una evaluación subjetiva, el diseño del *listening test* presenta especial relevancia, a fin de reducir o controlar posibles fuentes de sesgo que puedan afectar a la calidad de los resultados. Los tres elementos más importantes a tener en cuenta en su diseño son: a) los elementos que se van a evaluar, b) los estímulos que se van a utilizar para su evaluación y c) el método de test utilizado. En la presente investigación, el elemento a evaluar fue el nivel de claridad subjetiva, los estímulos fueron cinco fragmentos musicales de distintas características y el tipo de test utilizado una escala de Likert de cinco puntos.

Determinación y cálculo de los niveles de claridad

Dado que el propósito del estudio era la evaluación de la correlación existente entre el nivel objetivo de la claridad C_{80} y la percepción subjetiva que se tiene de la claridad en función del estímulo musical, se determinó que lo ideal sería disponer de un amplio margen de variaciones de la claridad con el que poder estudiar su variación perceptual. Los recintos seleccionados para obtener las respuestas al impulso fueron una iglesia, una sala de conciertos y una sala de cámara, cuyas características iniciales se presentan en la tabla 1. La utilización de modelos acústicos de estos recintos permitieron la modificación de sus características con el fin de obtener el margen de variaciones de claridad deseado.

Tabla 1 – Características de los recintos utilizados para el cálculo de las respuestas al impulso.

Nombre del recinto	C_{80} (dB)	T_{30} (s)
Iglesia de San Cebrián de Mazote	-5,90	2,88
Sala de conciertos Jönköpin	-1,75	1,99
Auditorio del Campus Sur de la UPM	2,75	1,11

A la hora de determinar el número de respuestas al impulso a utilizar y los saltos en su nivel de claridad C_{80} se utilizó como referencia el estudio realizado por Bradley en [8]. En este trabajo, Bradley trataba determinar el JND para el parámetro acústico C_{50} . Para la realización del *listening test* se utilizó una respuesta al impulso base y, en cada prueba, los sujetos debían comparar esta señal con entornos acústicos cuyo salto de nivel del C_{50} con respecto a la señal base era de 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 y 4.0 dB.

A pesar de que el propósito del test fuese diferente, se utilizó el mismo método de determinación de los saltos de claridad C_{80} para la obtención de las respuestas al impulso. Las tres claridades base son las correspondientes a los recintos seleccionados. A partir de este valor, se modificaron las absorciones de los materiales de las salas para hacerlas más absorbentes, manteniendo en todo momento el balance de los elementos con el fin de que la sensación de espacialidad de la salas no se viera modificada entre señales. El valor final de la claridad C_{80} y del tiempo de reverberación T_{30} para cada una de las respuestas al impulso se presentan en la tabla 2.

Tabla 2 – Claridades C_{80} y tiempos de reverberación T_{30} para las respuestas al impulso calculadas.

Iglesia San Cebrián		Sala de conciertos Jönköping		Auditorio Campus Sur	
C_{80} (dB)	T_{30} (s)	C_{80} (dB)	T_{30} (s)	C_{80} (dB)	T_{30} (s)
-5,90	2,88	-1,75	1,99	2,75	1,11
-5,40	2,64	-1,25	1,98	3,30	1,01
-4,90	2,44	-0,70	1,74	3,80	1,02
-4,40	2,27	-0,20	1,64	4,25	0,95
-3,35	1,96	0,80	1,36	5,25	0,86
-1,90	1,61	2,30	1,14	6,75	0,73

Selección de los estímulos

Las muestras sonoras utilizadas durante la prueba fueron cinco fragmentos de piezas musicales grabadas en cámara anecoica, que posteriormente se convolucionaron con las respuestas al impulso obtenidas de las salas. Así, cada participante evaluó un total de 90 muestras sonoras de una duración media de 16,8 s.

Los estímulos se seleccionaron después de la realización de un estudio de la modulación musical de un conjunto de 69 piezas. La selección se basó en sus diferencias de instrumentación, *tempo* y estilo con el fin de poder así comprobar si el estímulo musical se trata de un factor relevante a la hora de percibir la claridad de un recinto. Las piezas finalmente utilizadas en la realización del test fueron:

1. Concierto para flauta No. 1 en Sol Mayor KV 313 de Wolfgang Amadeus Mozart: fragmento de flauta solista de *tempo* rápido. La duración del estímulo es de 24 s.
2. Elegía op. 24 para violonchelo y orquesta de Gabriel Fauré: pasaje de chelo solista de *tempo lento*. La duración del fragmento es de 18 s.
3. Novena Sinfonía en Re Menor op. 125 de Ludwig van Beethoven: fragmento formado por los siete primeros compases del cuarto movimiento, consistente en un fragmento orquestal de *tempo* rápido. La duración del estímulo es de 8 s.
4. Preludio de *La Traviata* de Giuseppe Verdi: pasaje de *tutti* orquestal de *tempo* lento y línea de bajo muy marcada. La duración es de 20 s.
5. Canto litúrgico de duración de 14 s. Se trata de una pieza musical del repertorio de canto hispánico donde un cantante solista interpreta la melodía y es contestado por un coro.

La distinta duración de los estímulos se debe a que se seleccionaron pasajes musicales que terminasen en una cadencia conclusiva. Esta decisión se tomó debido a que el corte del fragmento a mitad de una frase musical hubiera producido una tensión involuntaria en los participantes, influenciando así su concentración y la correcta realización del test.

Método de *listening test* utilizado

El objetivo del *listening test* fue obtener información sobre la claridad percibida por los oyentes para los distintos niveles de claridad C_{80} y para todas las piezas seleccionadas. Para ello se tomó la decisión de dividir el test en tres partes, una para cada uno de los recintos evaluados, y que en cada parte se evaluaran los estímulos musicales de forma independiente para todos los niveles de claridad C_{80} .

Se consideró que el método más adecuado para la realización del test, dado que la evaluación era individual y no mediante métodos de diferencia, era mediante una escala de Likert de cinco puntos [14]. Se trata de un método basado en una escala de categoría donde se fijan cinco posiciones con una etiqueta que define la respuesta para cada posición. El número de posiciones se seleccionó, basándose en la

investigación realizada en [15] donde se comprueba que a partir de seis puntos la precisión de la prueba no aumenta y, en contraposición, genera mayor fatiga y dudas al participante en la selección de la respuesta. En cuanto a la elección de las etiquetas, se consultó la bibliografía existente y se encontró que durante mucho tiempo se consideró que la posición en la que dichas etiquetas se colocaran tenía una gran importancia. A lo largo de los años se realizaron diversos estudios en la materia [16, 17, 18] y las investigaciones de Weng [17] y Subedi [18] ponen de relieve que el orden de presentación de las etiquetas no afecta a los resultados. El vocabulario utilizado para la pregunta y las explicaciones se basaron en el glosario definido por Alexander Lindau [19] y el orden de las etiquetas se presentó según la norma UNE-ISO 4121 [20].

La pregunta a contestar consiste en indicar cómo de alta se considera la claridad de cada una de las muestras sonoras presentadas mediante la escala de cinco puntos; siendo las etiquetas, de izquierda a derecha: “nada alta”, “algo alta”, “moderadamente alta”, “muy alta” y “extremadamente alta”.

A la hora de seleccionar los participantes que iban a realizar la prueba se tuvo en cuenta que el método de *listening test* utilizado se trataba de un método basado en atributos. En [21] se describe que el uso de pruebas atributivas sobre participantes sin experiencia puede suscitar la aparición de sesgos adicionales, siendo, por lo tanto, necesaria la utilización de participantes entrenados. En esta investigación se seleccionó que los participantes tuvieran como mínimo un título de Grado Profesional de Música. De los participantes seis contaban con un Título Superior de Música en la especialidad de Interpretación; uno con un Título Superior de Música en la especialidad de Dirección de Orquesta; y los restantes con un Título de Grado Profesional de Música.

2.2 Realización del *listening test*

En esta sección se va a describir el entorno en el que se llevó a cabo el test, el procedimiento que se siguió para su realización y la duración del mismo.

Entorno de realización

La realización del *listening test* a cada uno de los participantes tuvo lugar en una sala vacía, de pequeño tamaño y con un nivel de ruido de fondo muy bajo.

El equipo utilizado fue un ordenador portátil modelo HP-BS512NS y unos auriculares circumaurales de diadema abiertos Sennheiser HD-650. El nivel de volumen utilizado en los test fue siempre el mismo y se especificó a los participantes que este no se podía modificar en ningún momento.

Procedimiento

Tras el recibimiento de los participantes se les entregó una encuesta de datos demográficos, en la que debían rellenar algunos datos relativos a la edad, sexo, nivel educativo, etc... Esta encuesta tenía un doble propósito: por un lado, servía de método de aclimatación al entorno de la prueba, con el fin de que el participante se fuera acomodando al ambiente en el que iba a realizar el test y, por otro, con el fin de disponer de información adicional para las posteriores etapas de análisis. Una vez finalizada la encuesta, se le entregaba una hoja de instrucciones donde se detallaba el procedimiento del test y a qué tipo de pregunta se iba a enfrentar cada participante, con el fin de reducir el sesgo debido a la interacción entre el participante y el experimentador.

Con anterioridad al comienzo del test, el participante realizó una prueba de entrenamiento, con el fin de que se familiarizara con la interfaz utilizada y las preguntas a contestar, con el propósito de reducir un posible sesgo de interacción hombre-máquina. Las muestras sonoras utilizadas en este test de entrenamiento fueron una señal de palmadas convolucionada con distintas respuestas al impulso, que en ningún caso se utilizaron durante el desarrollo de la prueba principal.

La prueba podía, entonces, dar comienzo. Ésta se encontraba dividida en tres partes diferentes, cada una dividida, a su vez, en cinco pestañas, una para cada uno de los estímulos musicales bajo evaluación. Cada una de las tres partes se espaciaron en el tiempo, con un periodo de descanso de aproximadamente cinco minutos entre cada una de ellas, para minimizar el efecto que la fatiga y la memoria auditiva pudiesen tener sobre las caracterizaciones posteriores. El orden de presentación de las salas, los estímulos y las claridades C_{80} era aleatorio para cada participante, asegurando así una independencia estadística en las respuestas.

Una vez se iniciaba el test el participante, en primer lugar, estaba obligado a escuchar las seis muestras presentes en cada pantalla (un estímulo musical convolucionado con todas las respuestas al impulso de la sala bajo evaluación) con el fin de tener una referencia de la sala y así evitar la aparición de sesgo debido a la no selección de las posiciones extremas de la escala. Posteriormente, el participante podía escuchar las muestras tantas veces como deseara y se le instaba a dar una respuesta individual para cada una de ellas.

Durante la realización de la prueba se cronometraron las duraciones de cada parte del test y de los descansos y, una vez terminados todos, se obtuvo que el promedio de la duración del test fue de una hora y seis minutos.

2.3 Análisis de los resultados

Después de la realización del *listening test*, se procedió al análisis estadístico de los juicios perceptuales. Este análisis tuvo como propósito comprobar la hipótesis de que la claridad percibida por los participantes para un mismo recinto depende significativamente de la pieza musical interpretada.

Para el análisis se decidió utilizar la moda de las respuestas dadas. Se tomó esta decisión ya que los participantes únicamente pudieron contestar en posiciones fijas que representan números enteros y el empleo de la media implicaría la utilización de decimales que introducirían un sesgo en el estudio. Al utilizarse una escala de cinco puntos, para cada combinación de sala, estímulo y claridad C_{80} se obtendrá un resultado de la claridad percibida por cada participante en una escala entre 1 y 5.

Para comprobar la validez de la hipótesis se ha realizado un análisis de regresión, cuyo objetivo es explicar el comportamiento de una variable Y (de la cual no se conoce su comportamiento) a partir de otra variable X (controlada por el investigador). Una forma de representar gráficamente la regresión es mediante la definición de una nube de puntos que muestra el valor que toma Y para cada X y, posteriormente, mediante el cálculo de la ecuación de la recta que mejor se ajuste a dicha nube de puntos; esta recta se denomina recta de regresión.

La medida más importante para determinar la bondad de ajuste de una recta de regresión es el coeficiente de determinación R^2 que indica el grado de ajuste entre la nube de puntos y la recta de regresión calculada; toma valores entre $[0, 1]$. Cuando éste está próximo a cero indica que la capacidad de predicción de la recta de regresión es baja; mientras que si su valor está próximo a uno la fuerza de asociación entre ambas variables es muy alta.

El análisis de regresión se ha realizado para cada conjunto de estímulo y sala de forma individual con el fin de obtener una mejor representación del comportamiento de la percepción subjetiva.

3 Resultados

En este apartado se van a presentar los resultados obtenidos para la comparación realizada entre los valores objetivos de la claridad C_{80} y la claridad subjetiva percibida por los participantes del *listening test*.

En el análisis de regresión se consideró que la claridad C_{80} es la variable independiente y la claridad percibida por los sujetos es la variable dependiente. Este análisis se realizó para cada una de las salas y cada uno de los estímulos por separado ya que la evaluación subjetiva a través del *listening test* se realizó de este modo. Para cada una de las salas se tiene una escala de 1 a 5, independientemente de la claridad C_{80} de referencia de la sala, por lo que el estudio conjunto de las salas no tendría sentido puesto que se atribuirían valores de claridad percibida muy similares a juicios con diferentes niveles base de claridad.

Tabla 3 – Coeficientes de determinación para cada combinación de sala y estímulo en porcentaje. () $p > 0.15$; (*) $0.15 > p > 0.05$; (**) $0.05 > p > 0.005$; (***) $p < 0.005$.

	Sala de conciertos	Sala de cámara	Iglesia
Mozart	66,13**	78,68**	88,43**
Fauré	97,07***	29,13	49,81*
Verdi	51,04*	12,96	49,81*
Pieza litúrgica	83,76**	64,73*	91,16***
Beethoven	19,14	89,38***	79,68**

Observando los coeficientes de determinación representados en la tabla 3 se puede comprobar que la relación de dependencia existente entre la claridad C_{80} y la percepción subjetiva no se mantiene constante para todos los estímulos e, incluso, varía considerablemente dentro del propio estímulo para distintas salas. Esta variación en la capacidad de determinar la claridad de un recinto en función del estímulo puede depender de las características musicales de la pieza, como por ejemplo el *tempo* o la figuración.

En el caso de la pieza de Mozart se puede observar que los valores del coeficiente de determinación son elevados para todas las salas, siendo el más bajo el obtenido para la iglesia. Esta buena correlación se puede deber a que el fragmento está interpretado por una flauta solista con un *tempo* rápido y una figuración y articulación muy marcada, siendo así posible que se perciba fácilmente el efecto que la reverberación del recinto presenta sobre la pieza.

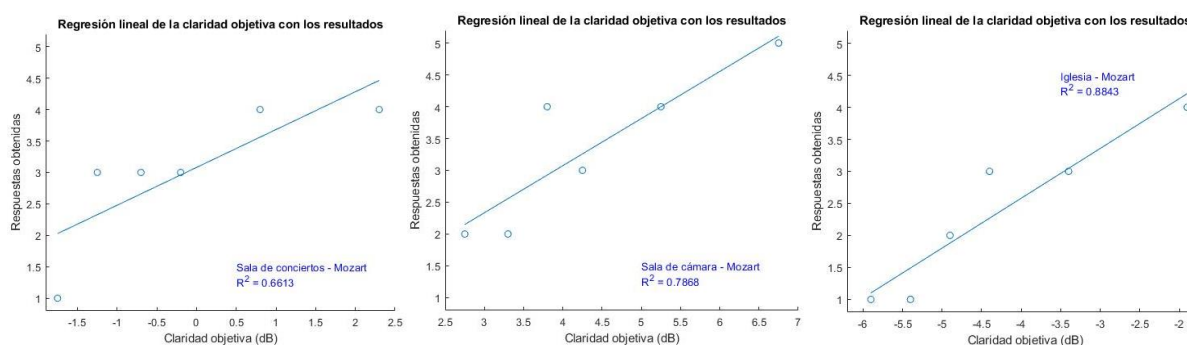


Figura 1 – Nubes de puntos y rectas de regresión para el estímulo de Mozart en la sala de conciertos (izquierda), sala de cámara (centro) e iglesia (derecha).

La pieza de Fauré se compone de un violonchelo solista interpretando una pieza de figuración larga y *tempo* lento, siendo así la pieza más influenciada por la reverberación y permitiendo también que sea sencillo diferenciar la claridad del recinto donde se interpreta. En el caso de la iglesia el nivel de claridad es tan bajo que puede dificultar la percepción de las variaciones entre niveles de claridad próximos.

Las características musicales que presenta el fragmento de Verdi son una melodía fácilmente entendible, de figuración relativamente larga y un acompañamiento a negras muy marcado, todo en un *tempo* lento. La facilidad de entendimiento de las líneas musicales de la pieza pudo derivar en una peor percepción de la claridad del recinto donde se interpreta la pieza, razón por la que los niveles de claridad seleccionados por los participantes fueron siempre los mismos (como se puede ver en la figura 2), provocando así un bajo coeficiente de determinación para todos los recintos evaluados.

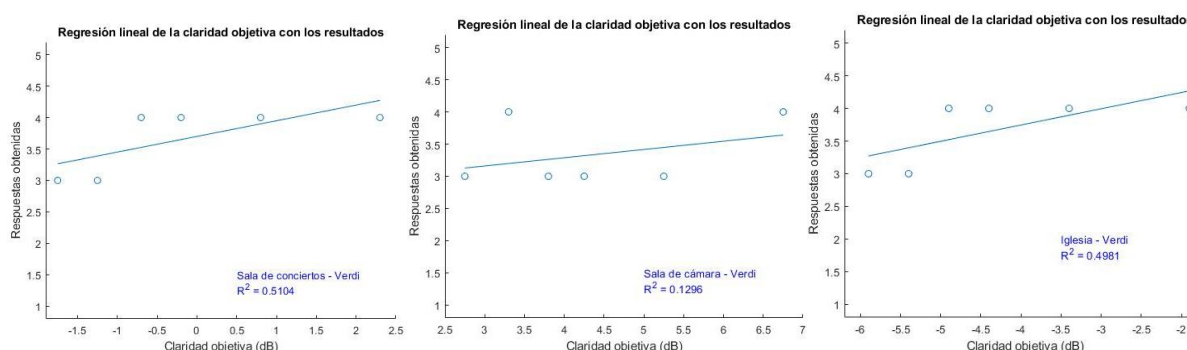


Figura 2 – Nubes de puntos y rectas de regresión para el estímulo de Verdi en la sala de conciertos (izquierda), sala de cámara (centro) e iglesia (derecha).

La pieza litúrgica se trata de un canto hispánico donde, en primer lugar, un cantante solista canta una línea melódica y, a continuación, se une un coro que contesta a dicha frase. En todos los casos el coeficiente de determinación es alto, indicando que se trata de una pieza que permite percibir la reverberación existente en las salas.

Por último, se va a evaluar el caso del estímulo con el fragmento musical de Beethoven. En este caso se puede observar un coeficiente de determinación alto tanto para la sala de cámara como para la iglesia; mientras que en la sala de conciertos el coeficiente presenta un nivel muy bajo (19,14 %). Este fragmento musical es considerablemente más complejo, con un gran número de instrumentos tocando simultáneamente con figuras musicales de corta duración y en *tempo* rápido. El valor tan bajo del coeficiente de correlación para la sala de conciertos se puede deber a una mala diferenciación de la claridad en un entorno en el que la reverberación de la sala no se percibe como excesivamente alta ni

excesivamente baja, si no que se mantiene en unos márgenes adecuados para la interpretación de este estilo musical.

4 Conclusiones

Tras la realización del *listening test* al grupo de participantes seleccionado y de la evaluación de los resultados mediante un análisis de correlación, se ha visto que la claridad percibida por dichos participantes para un mismo recinto depende significativamente del estímulo musical utilizado. Las características de la pieza musical que resultan de mayor interés y pueden presentar un mayor efecto sobre la percepción son el número de instrumentos y su tesitura, el *tempo* y el estilo de la pieza.

El hecho de que el estímulo sea un factor significativo en la percepción de la claridad implica que el estímulo con el que se determina la claridad debería ser tenido en cuenta a la hora de calcular su valor objetivo. Observando los p-valores expuestos en la tabla 3 se puede comprobar que las piezas de Verdi y Fauré no son favorables para la realización de *listening test*, ya que sus p-valores son siempre superiores a 0,05; mientras que los valores obtenidos para la pieza de Mozart muestran que es favorable para la determinación de características acústicas de recintos.

Finalmente, se puede concluir que el parámetro objetivo C_{80} , a pesar de tener posibilidades de mejora mediante la determinación de ponderaciones más adecuadas, que tengan en cuenta todo el rango frecuencial o mediante la inclusión del estímulo en su cálculo, presenta una relación aceptable con la claridad percibida y que, como ya dijo Bradley en [6], se trata del mejor índice actual para determinar la claridad de un recinto.

Referencias

- [1] Lacatis, R. et al. Historical and chronological evolution of the concert hall acoustics parameters. *Acoustics '08*, París (Francia), 29 de Junio al 4 de Julio.
- [2] Sabine, W. *Collected Papers on Acoustics*, Harvard University Press, Cambridge (Estados Unidos), 1922.
- [3] Beranek, Leo L. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture*, Springer, 1962.
- [4] Abdel Alim, O. “Dependence of time and register definition of room acoustical parameters with music performances”, Disertación, Universidad Técnica de Dresde (Alemania), 1973.
- [5] AENOR. UNE-EN ISO 3382-1:2010: Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos, AENOR, Madrid (España), Junio 2010.
- [6] Bradley, J. S. Review of objective room acoustics measures and future needs. *Applied Acoustics*, Vol. 72 (10), 2011, pp. 713-720.
- [7] De la Prida, D. et al. Does the method matter? A review of the main testing methods for the subjective evaluation of room acoustics through listening tests. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, ICA 2019*, Aachen (Alemania), 9-13 de Septiembre.
- [8] Bradley, J. S.; Reich, R.; Norcross, S. G. A just noticeable difference in C_{50} for speech. *Applied Acoustics*, Vol. 58 (2), 1999, pp. 99–108.

- [9] Martellotta, F. The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *The Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 128 (2), 2010, pp. 654–63.
- [10] Cox, T.; Davies, W.; Lam, Y. The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoriums. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 79 (1), 1993, pp. 27-41.
- [11] Vigeant, M.C.; Celmer, R.D. Effect of Experimental Design on the Results of Clarity-Index Just-Noticeable-Difference Listening Tests. *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010*, Sydney (Australia), 23-27 de agosto, Vol. 425.
- [12] Soulodre, G. A; Bradley, J. S. Subjective evaluation of new room acoustic measures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 98 (1), 1995, pp. 294-301.
- [13] Prins, N. *Psychophysics: a practical introduction*, Academic Press, 2016.
- [14] Likert, R. A technique for the measurement of attitude. *Archives of Psychology*, Vol. 22, 1932, pp. 5 – 55.
- [15] Simms, L. J., Zelazny, K., Williams, T. F., & Bernstein, L. Does the number of response options matter? Psychometric perspectives using personality questionnaire data. *Psychological assessment*, Vol. 31 (4), 2019, pág. 557.
- [16] Chan, J. S. Response-order effects in Likert-type scales. *Educational and Psychological Measurements*, Vol. 51, 1991, pp. 531 – 540.
- [17] Weng, L. J.; Cheng, C. P. Effects of Response Order on Likert-type scales. *Educational and Psychological Measurements*, Vol. 60, 2000, pp. 908 – 924.
- [18] Subedi, B. P. Using Likert type data in social science research: Confusion, issues and challenges. *International journal of contemporary applied sciences*, Vol. 3 (2), 2016, pp. 36-49.
- [19] LINDAU, A. Spatial Audio Quality Inventory. Test Manual. V1.2. Marzo 2015 [Consulta: 3 de mayo de 2018]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/275032444_Spatial_Audio_Quality_Inventory_SA_QI_Test_Manual_v12.
- [20] AENOR. UNE-ISO 4121: Análisis sensorial. Directrices para la utilización de escalas de respuestas cuantitativas. AENOR, Madrid (España), Octubre 2006.
- [21] Van Hout, D. *Measuring meaningful differences: Sensory testing based decision making in an industrial context; applications of Signal detection theory and Thurstonian modelling*. 2014.
- [22] Howell, D. C. *Statistical methods for psychology*. Cengage Learning, Wadsworth, Ohio (Estados Unidos), 2007.