

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DEL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO Y RECOMENDACIONES
DE DISEÑO PARA SALAS DE CLASES EN LA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y
MATEMÁTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

VALERIA ESTHER ACEVEDO MARTÍNEZ

PROFESOR GUIA:

CLAUDIO POO BARRERA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

**GASTÓN SANCHEZ BUSTAMANTE
MIGUEL BUSTAMANTE SEPÚLVEDA**

**SANTIAGO DE CHILE
OCTUBRE 2009**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: VALERIA ACEVEDO M.
FECHA: 02/10/2009
PROF. GUÍA: SR. CLAUDIO POO BARRERA

**“EVALUACIÓN DEL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO Y
RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA SALAS DE CLASES EN LA
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE
CHILE”**

El objetivo general del presente trabajo de título es aportar en el conocimiento de las condiciones acústicas y en el diseño de salas de clases en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile con el objeto de evaluar la calidad acústica de salas de clases características y generar eventuales propuestas de mejoramiento de las condiciones acústicas en salas ya existentes de la Facultad.

Al observar las distintas aulas de la Facultad y encuestar a usuarios de estas mismas, se puede reconocer que poseen una calidad acústica bastante pobre, debido a factores como ruido exterior , geometría poco adecuada, y la escasa o en algunos casos, inexistencia ,de materiales con fines acústicos.

Se revisó la normativa y criterios de desempeño disponibles con el fin de definir los parámetros acústicos a evaluar en las distintas aulas, tales como: ruido de fondo, tiempo de reverberación, diseño geométrico, entre otros.

Se realizó una caracterización teórica y una evaluación práctica en ellas, las deficiencias que presentaron algunas salas, fueron consecuencia del tiempo de reverberación elevado, además de una pobre aislación por parte de las ventanas, y una geometría poco adecuada. Fue posible concluir que todas estas anomalías se debían a factores comunes, como época de construcción de las salas de clases que consideraba grandes volúmenes de las salas acompañados de una poco óptima geometría, y la poca o nula mantención de puertas, ventanas y revestimientos.

Con todas estas deficiencias, fue posible generar propuestas a nivel general para la construcción, diseño y reparación de salas de clases.

AGRADECIMIENTOS

Es difícil resumir en unas cuantas líneas a todas las personas que me han ayudado y apoyado en este largo camino, que por fin quema su primera gran etapa. En primer lugar quiero agradecer a Dios y mis padres por guiarme y no dejarme caer, aún en los momentos más difíciles.

A mi profesor guía, por su valioso tiempo, por sentarse en un escritorio y darse un espacio para que revisáramos cada capítulo de este, para mi, casi interminable trabajo. Por su comprensión, dedicación y apoyo total, infinitas gracias.

A mis profesores co-guía e integrante por su tiempo, consejos y gran interés en aportar en este trabajo de título.

A cada amigo que me aportó con un granito de arena, con una palabra de aliento, en especial Marco, Gonzalo, Pedro, Anita, Naty, Jope, gracias por estar presentes en esta etapa. A mis compañeras y amigas, Paula, Dani, Mitzi, que al cerrar esta etapa no se cierre también nuestra amistad.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1	Motivación.....	7
1.2	Objetivos del estudio.....	9
1.3	Metodología.....	9
2.	CRITERIOS DE ESTUDIO Y DISEÑO.....	10
2.1	Propagación del sonido en un recinto cerrado.....	10
2.2	Definición de parámetros a estudiar.....	12
2.2.1	Tiempo de reverberación.....	12
2.2.2	Inteligibilidad de la palabra y ruido de fondo.....	13
2.2.3	Aislamiento acústico.....	14
2.3	Normativas a utilizar.....	16
2.3.1	ANSI S12.60-2002. "Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools".....	16
2.3.1.1	Tiempo de reverberación.....	16
2.3.1.2	Procedimientos de diseño para mejorar tiempo de reverberación.....	17
2.3.1.3	Ruido de fondo.....	18
2.3.1.4	Procedimientos de diseño para disminuir ruido de fondo.....	19
2.3.2	Documento básico "DB HR Protección frente al ruido". Normativa Española.....	20
2.3.2.1	Valores límite de tiempo de reverberación.....	20
2.3.2.2	Ubicación de los elementos para el acondicionamiento acústico.....	21
2.3.3	OMS. "Guías para el ruido urbano". 1999.....	22
2.3.4	NCh 352 Of. 61.....	23
3.	MATERIALES Y ELEMENTOS UTILIZADOS PARA EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN SALAS DE CLASES.....	25
3.1	Materiales absorbentes.....	25
3.1.1	Factores que afectan el grado de absorción del material.....	26
3.1.2	Ejemplos de materiales absorbentes.....	28
3.2	Materiales reflectores del sonido.....	31
3.2.1	Ejemplos de materiales reflectantes.....	31
3.3	Materiales difusores del sonido.....	32
3.3.1	Ejemplos de materiales difusores.....	33
3.4	Materiales aislantes.....	36

3.4.1	Recomendaciones para elementos constructivos	37
3.4.2	Sistemas de sellos.....	41
3.4.2.1	Sellos para puertas	41
3.4.2.2	Sellos para ventanas.....	42
3.4.2.3	Sellos para juntas	43
4.	DESCRIPCIÓN DE LAS SALAS DE CLASES A ESTUDIAR.	45
4.1	Sala B103. Edificio Computación.....	45
4.2	Sala B112.Edificio de computación.	46
4.3	Sala15 Sur. Hall sur.....	47
4.4	Sala Q10. Edificio de química.....	49
4.5	Sala Q12. Edificio de química.....	50
4.6	Sala G110. Edificio de geología.....	51
5.	ENCUESTA A ESTUDIANTES DE LA FACULTAD.....	54
6.	CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DE LAS SALAS EN ESTUDIO.....	59
6.1	Caracterización según ubicación, geometría y materialidad.	59
6.1.1	Sala B103.....	59
6.1.2	Sala B112.....	63
6.1.3	Sala 15 Sur.....	66
6.1.4	Sala Q10.	68
6.1.5	Sala Q12.	71
6.1.6	Sala G110.....	74
6.2	Caracterización según tiempo de reverberación.....	76
6.2.1	Cálculo del tiempo de reverberación en cada sala.....	76
6.2.1.1	Sala B103.	76
6.2.1.2	Sala B112.	77
6.2.1.3	Sala 15 Sur.	78
6.2.1.4	Sala Q10.....	79
6.2.1.5	Sala Q12.....	80
6.2.1.6	Sala G110.....	81
6.3	Caracterización según inteligibilidad de la palabra.	82
6.3.1	Cálculo del %ALCons en cada sala.	84
6.3.1.1	Sala B103.	84
6.3.1.2	Sala B112.	85
6.3.1.3	Sala 15 Sur.	86
6.3.1.4	Sala Q10.....	87
6.3.1.5	Sala Q12.....	88
6.3.1.6	Sala G110.....	89

7.	MEDICIONES REALIZADAS A SALAS DE CLASES.....	90
7.1	Equipos utilizados.....	90
7.2	Descripción de las mediciones.....	91
7.2.1	Sala B103.....	91
7.2.2	Sala B112.....	92
7.2.3	Sala 15 Sur.....	93
7.2.4	Sala Q10.....	94
7.2.5	Sala Q12.....	95
7.2.6	Sala G110.....	96
7.3	Mediciones de tiempo de reverberación.....	97
7.3.1	Sala B103.....	97
7.3.2	Sala B112.....	100
7.3.3	Sala 15 Sur.....	103
7.3.4	Sala Q10.....	105
7.3.5	Sala Q12.....	108
7.3.6	Sala G110.....	111
7.4	Mediciones de ruido de fondo.....	114
7.4.1	Sala B103.....	114
7.4.2	Sala B112.....	115
7.4.3	Sala 15 Sur.....	116
7.4.4	Sala Q10.....	117
7.4.5	Sala Q12.....	117
7.4.6	Sala G110.....	118
8.	ANÁLISIS DE DATOS.....	120
8.1	Tiempo de reverberación.....	120
8.1.1	Sala B103.....	120
8.1.2	Sala B112.....	121
8.1.3	Sala 15 Sur.....	121
8.1.4	Sala Q10.....	122
8.1.5	Sala Q12.....	122
8.1.6	Sala G110.....	123
8.2	Ruido de fondo.....	124
8.2.1	Sala B103.....	124
8.2.2	Sala B112.....	124
8.2.3	Sala 15 Sur.....	124
8.2.4	Sala Q10.....	125
8.2.5	Sala Q12.....	125
8.2.6	Sala G110.....	126
9.	PROPUESTAS PARA EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.....	128

9.1	Propuestas para salas que presentan problemas.....	128
9.2	Propuestas para salas de clases en general.....	132
10.	Discusión y conclusiones.....	134
10.1	Discusión.....	134
10.2	Conclusiones.....	136
ANEXO A.	Memoria de cálculo.....	141
ANEXO B.	Fotografías.....	160
ANEXO C.	Encuesta a estudiantes.....	176

PLANOS (8 Planos en total)

- 1 de 8. Planta General Edificio Computación
- 2 de 8. Planta General Edificio Escuela
- 3 de 8. Planta salas Q10 y 15 Sur- Corte A-A, Corte B-B, Corte C-C
- 4 de 8. Planta General Edificio Química
- 5 de 8. Planta salas de clases Q12, Edificio Química
- 6 de 8. Corte D, Corte E, Corte F
- 7 de 8. Planta General Edificio Geología
- 8 de 8. Solución salas Q10 y 15 Sur.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Motivación.

Los altos niveles sonoros existentes dentro de las aulas, las características acústicas arquitectónicas y constructivas inapropiadas y los bajos rendimientos académicos observados en los últimos años, llevaron a la institución de mayor prestigio en lo relacionado con la acústica en el mundo, la Acoustical Society of America (ASA, EE.UU.), a crear en el año 1996 el subcomité de acústica de aulas (Classroom Acoustics), el cual ha realizado bastantes contribuciones en esta disciplina, creando una normativa, la ANSI S12.60-2002, la cual logra regular los distintos parámetros acústicos para lograr altos estándares de calidad acústica dentro de las salas de clases.

Continuando con la regulación acústica, en España se crea el documento básico “DB HR Protección frente al ruido” el cual logra limitar, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios, y en particular se especifican valores y criterios máximos de acondicionamiento acústico para salas de clases.

La Organización Mundial de la Salud, OMS, confecciona las “Guías para el ruido urbano”, como resultado de la reunión del grupo de trabajo de expertos llevada a cabo en Londres, Reino Unido, en abril de 1999, y en donde se demuestra que el ruido puede perjudicar el rendimiento de los procesos cognitivos y además a largo plazo podría provocar problemas de salud. Específicamente para salas de clases, regula los valores máximos de tiempo de reverberación y ruido de fondo.

La Norma Chilena NCh 352 Of.61 “Condiciones acústicas que deben cumplir los edificios” especifica vagamente para salas de clases un nivel máximo sonoro ambiental. Esta norma fue actualizada en el año 2000, y pasa a llamarse: “Aislación acústica- Parte 1: Construcciones de uso habitacional-Requisitos mínimos y ensayos “.En esta sólo se definen requisitos para viviendas, por lo cual las salas de clases quedan fuera de esta reglamentación.

Luego de observar las distintas aulas de la Facultad, se puede reconocer que poseen una calidad acústica bastante pobre, debido principalmente a los siguientes factores:

- Ruido proveniente del exterior, como por ejemplo, tráfico vehicular.
- Ruido generado por la calefacción, ventilación y aire acondicionado
- Ruido proveniente de pasillos y espacios adyacentes.
- Equipos y proyectores que generan ruido en el interior de la sala.
- Geometría de las aulas poco adecuadas (cuadradas o rectangulares con grandes superficies de paredes duras, paralelas, etc), lo que conduce a tiempos de reverberación prolongados.

Entre las soluciones a los problemas anteriormente descritos se encuentra el reconocimiento de la necesidad de poseer una buena acústica, basada en la evidencia del inadecuado diseño geométrico, como también la pobre o nula utilización de tratamientos acústicos; para posteriormente recomendar criterios acústicos para aulas y establecimientos educacionales en el país.

Otras soluciones corresponden a mejoras de ingeniería en los sistemas de aire acondicionado, aislación de los recintos del ruido exterior y la utilización de materiales absorbentes en paredes y superficies, de tal manera de obtener un buen flujo de sonido en dirección de los oyentes y no se produzca eco, siendo éstas soluciones de implementación sencilla.

Pero también es indispensable un buen diseño geométrico de las aulas, ya que una mala distribución de los materiales para el acondicionamiento acústico, junto con una geometría inadecuada, conducen a generar un recinto con deficiencias acústicas al igual que un recinto no tratado acústicamente.

En la facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, no existen estudios acústicos para sus salas de clases y por tanto, considerando que los costos de un mal acondicionamiento acústico en una sala clases no sólo afectan a los estudiantes, debido al déficit de aprendizaje que ello implica, sino que también afecta a los docentes, provocando fatiga en su voz, y creando un ambiente laboral poco confortable, esta investigación es importante para mejorar la calidad de la educación en esta Facultad.

1.2 Objetivos del estudio

Objetivo general:

- El objetivo general en esta investigación, es aportar en el conocimiento de las condiciones acústicas y en el diseño de salas de clases en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Objetivos específicos:

- Evaluar la calidad acústica de salas de clases características, utilizando criterios de desempeño previamente establecidos en diferentes normativas.
- Generar eventuales propuestas de mejoramiento de las condiciones acústicas en salas ya existentes de la Facultad.

1.3 Metodología

A continuación se hace una breve descripción de las actividades a desarrollar para la elaboración del Trabajo de Título:

1. Estudio de la bibliografía disponible, de modo de involucrarse en el tema de acústica.
2. Estudio de acuerdo a Normas y criterios existentes de los requerimientos acústicos básicos y de aislación para este tipo de lugares.
3. Establecimiento de criterios para el estudio de las salas, es decir según la reverberación y la inteligibilidad de la palabra.
4. Realización de una caracterización teórica de las salas en cuanto a geometría, capacidad y ubicación.
5. Realización de una evaluación práctica de estos lugares, a través de distintos ensayos.
6. Análisis de los resultados obtenidos en la evaluación.
7. Confección de eventuales propuestas para el mejoramiento de las salas existentes.

2. CRITERIOS DE ESTUDIO Y DISEÑO.

2.1 Propagación del sonido en un recinto cerrado.

El sonido en un recinto, independientemente de las características del mismo, presenta dos componentes: sonido directo y sonido indirecto.

El sonido directo es el que proviene directamente de la fuente de sonido. El sonido indirecto es el resultado de las múltiples reflexiones⁽¹⁾, difracciones⁽²⁾ y absorciones⁽³⁾ que las paredes, techo, suelo y distintos objetos presentes en el recinto le producen al sonido directo.

La naturaleza del sonido indirecto se explica muy bien a través del modelo de rayos: suponemos que el sonido sale de la fuente a lo largo de rayos divergentes. En cada choque con las fronteras del recinto, los rayos son parcialmente absorbidos y reflejados y, después de un gran número de reflexiones, el sonido se hace difuso; la densidad promedio de energía es la misma en todo el local y todas las direcciones de propagación son igualmente probables.

En la siguiente figura vemos cómo se comporta el sonido, emitido por la fuente S, según la naturaleza de la superficie en la que se refleje:

- a) Las superficies planas actúan como espejos.
- b) Las superficies cóncavas concentran el sonido en la posición S'.
- c) Las superficies convexas dispersan el sonido, lo reflejan en haces divergentes.
- d) Las superficies rugosas hacen que el sonido se difunda.

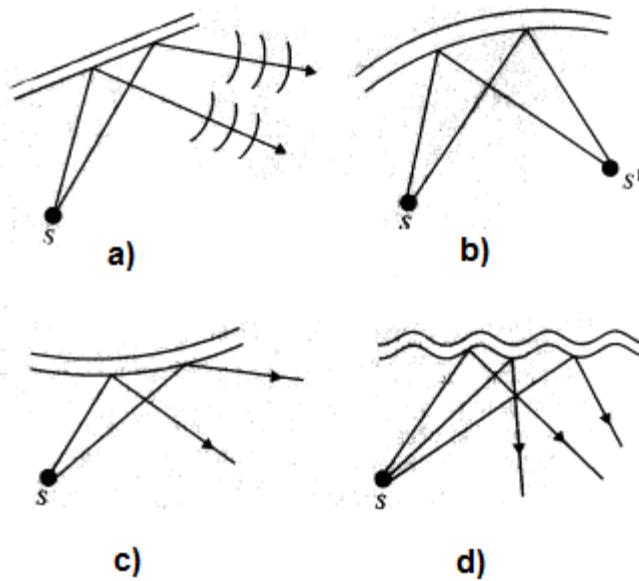


Figura N°2.1 . Comportamiento del sonido emitido por la fuente S.

El sonido indirecto lo podemos clasificar en dos tipos:

- Sonido temprano: formado por el primer grupo de reflexiones que experimenta el sonido directo, alcanzan al oyente transcurridos unos 50 ms (milisegundos) desde su producción (para $c^{(4)}=344$ m/s). Cuando el sonido emitido es un mensaje oral, tales reflexiones contribuyen a mejorar la inteligibilidad o comprensión del mensaje y, al mismo tiempo, producen un aumento de sonoridad (o sensación de amplitud del sonido).

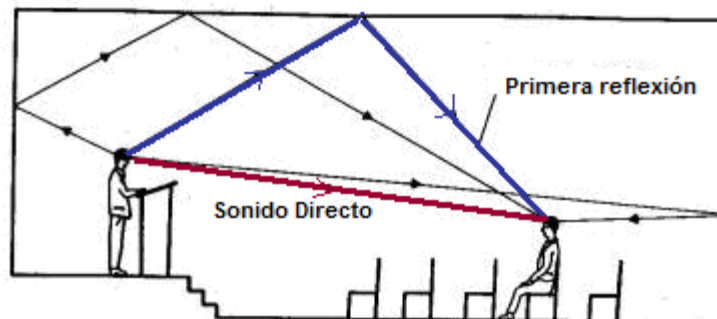


Figura N°2.2 . Sonido temprano.

- Sonido tardío: es el que el oyente capta tras las reflexiones tempranas. Si éstas tardan más de 50 ms en alcanzar al oyente, el oído ya no será capaz de sumarlas al sonido directo y por lo tanto se denomina sonido reverberante⁽⁵⁾. En el caso que exista una única reflexión que tarde más de 0,1 s en alcanzar al oyente, se denomina eco. Dada que la velocidad del sonido es aproximadamente de 344 m/s, cualquier pared, fachada u objeto reflectante

de grandes dimensiones que genere reflexiones que recorran un camino de más de 17 metros, puede ser causa de eco.

2.2 Definición de parámetros a estudiar.

A continuación se definirán los parámetros para el estudio y análisis de las salas de clases que se evaluarán:

2.2.1 Tiempo de reverberación.

La reverberación es la persistencia en el ambiente (dentro de un recinto cerrado), de la energía sonora una vez que la fuente que la genera ha dejado de emitir. Esta característica se potencia en espacios con grandes volúmenes y materiales con una mínima capacidad de absorción sonora. Una forma de cuantificar esta característica es por medio del tiempo de reverberación (T_{60}) y que se define como “el tiempo necesario en que la energía sonora decae 60 dB”. Cuanto más reflectora o reverberante sea el recinto, mayor será el tiempo que le lleve al sonido decrecer 60 dB.

La importancia del tiempo de reverberación está en que influye en la definición del sonido. Hace más de 100 años, un profesor de Harvard, Wakkace Clement Sabine, desarrolló una ecuación para el cálculo del tiempo de reverberación, llamada Fórmula de Sabine, y es la siguiente:

$$T_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A} \quad \text{Fórmula N°2.1}$$

En donde:

$$A = S \cdot \bar{\alpha} \quad \text{Fórmula N°2.2}$$

V: Volumen de la sala en m^3 .

A: Absorción sonora.

$\bar{\alpha}$: Coeficiente de absorción⁽⁶⁾ medio de la sala.

S: superficie total de la sala (paredes + techo + suelo).

Para el cálculo de $\bar{\alpha}$:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots \alpha_n \cdot S_n}{S_1 + S_2 + \dots S_n} \quad \text{Fórmula N°2.3}$$

Con:

α_n : Coeficiente de absorción de la superficie.

S_n : Superficie del elemento en estudio.

Pero también existe la fórmula de Eyring, que se aplica cuando los coeficientes de absorción sonora son de valores numéricos parecidos para todas las superficies límites y es la que utilizaremos para el cálculo del tiempo de reverberación en las salas de clases:

$$T_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha) + 4 \cdot m \cdot V} \quad \text{Fórmula N° 2.4}$$

Donde m es el coeficiente de atenuación de energía sonora en el aire de valor:

$$m = 1,89 \cdot 10^{-11} \cdot f^2 [m^{-1}] \quad \text{Fórmula N° 2.5}$$

Aquí f es el valor de la frecuencia. Las pérdidas de energía sonora en un recinto, debidas al aire, sólo tienen influencia a altas frecuencias (2000 Hz-4000 Hz), y en recintos de gran volumen (superior a 5000 m³). Luego para recintos pequeños y frecuencias inferiores a 4000 Hz, se puede desprestigiar el término 4mV. Como todas las salas de clases en estudio poseen un volumen inferior a 5000 m³, el término 4mV se desprestigiará.

En cualquier espacio cerrado el sonido que se percibe es una combinación del sonido directo, el cual viaja directamente del emisor hacia el receptor, y el sonido reverberante que viaja desde el emisor y rebota en varias superficies antes de alcanzar el oído del receptor. Y por tanto una excesiva reverberación puede reducir la comprensión del mensaje hablado pero al contrario, tratamientos de gran absorción del sonido, pueden provocar que éste decaiga rápidamente por lo que personas que se encuentran lejanas a la fuente sientan disminuida la intensidad del mensaje.

2.2.2 Inteligibilidad de la palabra y ruido de fondo.

La inteligibilidad de la palabra depende básicamente de la comprensión de un mensaje oral y la correcta percepción de sus consonantes y vocales. La duración en promedio de una vocal es del orden de 90 ms (milisegundos), en cambio la duración de una consonante es de 20 ms. Además el contenido frecuencial de las consonantes es más rico en altas frecuencia, factor que está estrechamente relacionado con el grado de

inteligibilidad de la palabra. En consecuencia, son las consonantes las que determinan la comprensión del mensaje oral.

La transmisión del mensaje puede estar afectada por dos factores acústicos: el ruido de fondo y las reflexiones sonoras no deseadas en los paramentos interiores del aula (reverberación); estos dos factores negativos disminuyen la inteligibilidad de la palabra.

Para obtener un porcentaje de inteligibilidad óptimo en el aula, se debe controlar el nivel de ruido en su interior, y debe existir un tiempo de reverberación adecuado para una buena transmisión de la palabra.

El ruido de fondo, corresponde a cualquier sonido no deseado proveniente del exterior o interior del edificio y que interfiere con la habilidad de las personas para entender el lenguaje hablado. Se mide generalmente en dB⁽⁷⁾ compensados con la escala A, dB(A)⁽⁸⁾.

2.2.3 Aislamiento acústico.

Se entiende por aislamiento ⁽⁹⁾ acústico a la protección de un recinto contra la penetración de sonidos que interfieran a la señal sonora deseada y también al control de la transmisión del sonido cuando la fuente sonora se encuentra en el interior de éste. Para encontrar las formas de protección de los recintos contra el ruido, se deben establecer en primer lugar la naturaleza de estos ruidos, y los caminos por los cuales penetran en el recinto, a través de las superficies límites.

Cuando las ondas sonoras chocan con un obstáculo, las presiones sonoras variables que actúan sobre él hacen que éste vibre. Una parte de la energía vibratoria transportada por las ondas sonoras se transmite a través del obstáculo y pone en movimiento el aire situado del otro lado, generando sonido. Parte de la energía de las ondas sonoras se disipa dentro del mismo, reduciendo la energía irradiada al otro lado.

El objetivo del aislamiento es reducir tanto el ruido aéreo ⁽¹⁰⁾ como el estructural ⁽¹¹⁾ (o de impacto). Un buen aislamiento pretende que la energía transmitida sea mínima.

Para conocer las propiedades de aislamiento sonoro de una partición, se debe obtener la diferencia entre el nivel de intensidad incidente y el nivel de intensidad transmitida. Esta diferencia se conoce como Pérdida de Transmisión Sonora Aérea, TL

Las pérdidas por transmisión indican la capacidad de una pared para no transmitir las ondas sonoras. Estas pérdidas dependen sobre todo de su masa por unidad de área, su

rigidez y el amortiguamiento en el material. En las construcciones típicas, estas pérdidas varían entre 30 y 70 dB.

El aislamiento de una pared sencilla puede estimarse a través de sus propiedades mecánicas, pudiendo calcularse a partir de la ley de la masa, dada por la siguiente expresión:

$$R = 20 \log \left(M \cdot \frac{\omega}{2Z} \right) (dB) \quad \text{Fórmula N° 2.6}$$

Siendo ω la frecuencia angular ($\omega = 2\pi \cdot f$); M la masa por unidad de superficie y Z la impedancia ⁽¹²⁾ acústica del aire ($Z = 415$ rayls).

El aislamiento acústico bruto se calcula mediante la diferencia de los niveles de presión acústica, promediados en tiempo y en espacio, entre el recinto emisor y receptor, este se calcula por la siguiente expresión:

$$D = L_{P1} - L_{P2} \quad \text{Fórmula N° 2.7}$$

Siendo L_{P1} el nivel medio de presión acústica del recinto emisor (dB) y L_{P2} el nivel medio de presión acústica del recinto receptor (dB).

El aislamiento acústico normalizado es la diferencia de nivel que corresponde con un valor referenciado al tiempo de reverberación del recinto receptor. Se la designa por R y se calcula mediante la expresión:

$$R = D + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) (dB) \quad \text{Fórmula N° 2.8}$$

Donde D es la diferencia de nivel de presión acústica, T es el tiempo de reverberación del recinto receptor y T_0 es el tiempo de reverberación de referencia, que para particiones se toma un valor de 0,5 segundos.

Para cuantificar el aislamiento acústico, se utilizará el coeficiente STC, clase de transmisión sonora. Es un índice de número único mediante el cual se cuantifica el aislamiento acústico proporcionado por una partición, esto es, pared, ventana, puerta, etc.

El STC, realiza la comparación entre la pérdida de transmisión medida en bandas de 1/3 de octava entre las frecuencias de 125 Hz y 4000 Hz, y una curva patrón. El STC es el valor de la pérdida de transmisión (TL), correspondiente a la banda de 500 Hz de la curva patrón más alta y que cumpla las siguientes condiciones:

- Exista una diferencia máxima de 8 dB de *TL* debajo de la curva patrón de *STC*.
- Las diferencias de los valores de *TL* en bandas de 1/3 de octava, debajo de la curva patrón de *STC*, sumen como máximo 32 dB.

Esta estimación de pérdida de transmisión, al ser un número único, no toma en consideración la frecuencia, como parámetro fundamental de la pérdida de transmisión de una estructura, por lo cual no es un valor de precisión y fidelidad. Aún así, otorga un valor aproximado del aislamiento que podrá proporcionar la estructura. Esta aproximación puede llegar a ser muy errónea si la curva de atenuación tiene variaciones muy marcadas que difieren mucho de la curva de referencia y cuando las frecuencias de mayor importancia son muy inferiores a 500 Hz. Sin embargo, se considera un parámetro muy útil para realizar comparaciones entre una partición y otra.

2.3 Normativas a utilizar.

2.3.1 ANSI S12.60-2002. “Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools”.

2.3.1.1 Tiempo de reverberación.

Según esta normativa, los niveles máximos para el tiempo de reverberación en una sala desocupada, dependiendo del volumen de esta, son los que se muestran en la tabla N° 2.1.

Tabla N° 2.1. Niveles máximos para el tiempo de reverberación.

Espacio de aprendizaje	Tiempo máximo de reverberación para octavas de bandas 500, 1000 y 2000 Hz en [s]
Volúmen encerrado < 283 m ³	0,6
Volúmen encerrado >283 m ³ y < a 566 m ³	0,7
Volúmen encerrado > 566 m ³	(*)

(*)Ver punto b) en capítulo 2.2.1.2.

2.3.1.2 Procedimientos de diseño para mejorar tiempo de reverberación.

a) Estimación de la superficie de material absorbente.

La mínima superficie con tratamiento acústico corresponde a un porcentaje del área del piso de la sala de clases (que muestra la tabla N°2.2) y que depende del mínimo coeficiente de absorción que se desea implementar en la sala y de la altura de esta misma.

Tabla N°2.2 Porcentaje para la superficie mínima a tratar acústicamente para un T_{60} de 0,6 s

Coeficiente de absorción, α_1	Altura sala [m]								
	2,44	2,74	3,05	3,35	3,66	3,96	4,27	4,57	4,88
0,45	112	130	148	167	185	203	221	239	257
0,50	101	117	134	150	166	183	199	215	232
0,55	92	107	121	136	151	166	181	196	211
0,60	84	98	11	125	139	152	166	179	193
0,65	78	90	103	115	128	141	153	166	178
0,70	72	84	95	107	119	130	142	154	166
0,75	67	78	89	100	111	122	133	144	154
0,80	63	73	83	94	104	114	124	135	145
0,85	59	69	79	88	98	107	117	127	136
0,90	56	65	74	83	92	101	111	120	129
0,95	53	62	70	79	88	98	105	113	116
1,00	50	59	67	75	83	91	100	108	116

Tabla N°2.3. Porcentaje para la superficie mínima a tratar acústicamente para un T_{60} de 0,7 s

Coeficiente de absorción, α_1	Altura sala [m]								
	2,44	2,74	3,05	3,35	3,66	3,96	4,27	4,57	4,88
0,45	91	107	122	138	154	169	185	200	216
0,50	82	96	110	124	138	152	166	180	194
0,55	75	87	100	113	126	138	151	164	177
0,60	68	80	92	104	115	127	139	150	162
0,65	63	74	85	96	106	117	128	139	149
0,70	59	69	79	89	99	109	119	129	139
0,75	55	64	73	83	92	102	11	120	130
0,80	51	60	69	78	86	95	104	113	121
0,85	48	57	65	73	81	90	98	106	114
0,90	46	53	61	69	77	85	92	100	108
0,95	43	51	58	65	73	80	88	95	102
1,00	41	48	55	62	69	76	83	90	97

b) Ubicación del material absorbente.

Si la altura del cielo está a menos de 3 m, la mejor opción para ubicar la mayor parte del material absorbente es en el cielo. Para alturas de cielo mayor a 3 m, el material absorbente deberá ubicarse en los muros, desde la altura de 3 m hacia arriba. Si la mayor parte del material absorbente está ubicado en el cielo, es conveniente introducir muebles de tal forma de asegurar que las ondas sonoras viajen a través de la sala en dirección del material absorbente ubicado en el techo.

El tratamiento acústico en el techo debe ser suspendido de este con un espacio de aire de 40 cm.

Para salas de clases de grandes volúmenes (mayor a 566 m³) el material absorbente debe ser instalado para reducir el ruido causado por las actividades de los ocupantes así como para controlar la reverberación.

Una medida del coeficiente de absorción acústico de los materiales está dado por un coeficiente llamado “coeficiente de reducción de ruido” (NRC). Para grandes espacios, con cielos de altura máxima 3.7 m, un cielo falso con un NRC de 0,7 o mayor, puede ser usado en toda la superficie del techo, salvo en los lugares de ventilación y luminaria.

Cuando la altura del techo está sobre los 4,6 m se requiere un análisis más detallado y la experiencia personal para proveer de un adecuado control de la reverberación. Para esto, se sugiere utilizar la tabla N°2.3.

2.3.1.3 Ruido de fondo.

Los niveles de ruido de fondo promedio en una hora, no deben exceder los límites de la tabla N°2.4:

Tabla N°2.4. Niveles máximos de ruido de fondo.

Espacio de aprendizaje	Nivel de RF máximo
Volúmen encerrado < 283 m ³	35
Volúmen encerrado >283 m ³ y < a 566 m ³	35
Volúmen encerrado > 566 m ³	40

Los límites de ruido de fondo se aplican para las siguientes condiciones:

a) Para ruidos continuos en un periodo de una hora cuando las actividades de aprendizaje toman lugar.

- b) Fuentes de ruido en el exterior y en el interior están operando simultáneamente.
- c) Fuentes de ruido interior tales como equipos de ventilación, calefacción, etc se encuentran operando en su máxima condición de funcionamiento (ej. máxima velocidad).
- d) Equipos como computadores y reproductores audio-visuales se encuentran apagados.

2.3.1.4 Procedimientos de diseño para disminuir ruido de fondo.

Para lograr disminuir el ruido de fondo presente en la sala, ésta se deberá aislar acústicamente de las fuentes de ruido externos, para se utilizarán los siguientes aspectos de aislación acústica:

Los valores mínimos de STC requeridos para una pared, cielo, techo que separa una sala de otra se especifican en la siguiente tabla:

Tabla N° 2.5. Valores mínimos de STC.

Espacio adyacente		
Otras salas	Espacios públicos, baños	pasillo, escaleras
50	53	45

Dados los límites para el ruido de fondo de la tabla 2.4 los rangos recomendados de STC para muros, cielo, puerta y ventana deben ser los de la siguiente tabla:

Tabla N° 2.6. Diferencia aproximada entre el mínimo STC requerido para las componentes de la sala y el requerido para reducir el nivel de ruido exterior-interior.

Aberturas %	(STC de muros y cielo) "menos" (nivel de reducción de ruido exterior-interior)	(STC de puertas y ventanas) "menos" (nivel de reducción de ruido exterior-interior)
1 a 25	15	6
26 a 70	20	11

Aberturas es un el porcentaje del total (superficie de muros y cielo) y que consiste en ventanas, puertas y otras aberturas.

Los valores del STC de las columnas 2 y 3 se basan en que el ruido dominante del exterior corresponde a tráfico vehicular.

2.3.2 Documento básico “DB HR Protección frente al ruido”. Normativa Española.

Este documento básico tiene por objeto establecer reglas y procedimientos que permiten cumplir las exigencias básicas de protección frente al ruido. Además pretende limitar, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios.

2.3.2.1 Valores límite de tiempo de reverberación.

Los elementos constructivos, acabados superficiales y revestimientos que delimitan un aula, tendrán la absorción acústica suficiente de tal manera que:

- El tiempo de reverberación en aulas vacías, pero incluyendo el total de las butacas, cuyo volumen sea menor que 350 m³, no debe ser mayor a 0,5 s.

Para satisfacer el valor límite del tiempo de reverberación, se debe utilizar el siguiente método de cálculo:

El tiempo de reverberación, T, de un recinto se calcula mediante la expresión:

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{A} [s]$$

Fórmula N°2.9

Siendo:

V: volumen del recinto, [m³].

A: absorción acústica total del recinto, [m²].

La absorción acústica, A, se calculará a partir de la expresión:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^n A_{O,m,j} + 4 \cdot \overline{m_m} \cdot V$$

Fórmula N°2.10

Donde:

$\alpha_{m,i}$: coeficiente de absorción acústica medio de cada paramento, para las bandas de tercio de octava centradas en las frecuencias de 500,1000,2000 Hz; la dispersión de los tres valores del tiempo de reverberación obtenidos usando la citada fórmula de Sabine independientemente para cada una de las tres bandas de frecuencia citadas respecto a su valor medio no debe superar el 35%.

S_i : área del paramento cuyo coeficiente de absorción es α_i , [m²].

$A_{O,m,j}$: área de absorción acústica equivalente media de cada mueble fijo absorbente diferente [m³].

V : Volumen del recinto.

$\overline{m_m}$: Coeficiente de absorción acústica medio en el aire, para las frecuencias de 500,1000 y 2000 Hz y de valor $0,006 \text{ m}^{-1}$.

El término $4\overline{m_m} V$ es despreciable en los recintos de volumen menor que 250 m^3 .

Muchas veces suelen emplearse tratamientos absorbentes uniformes aplicados únicamente en el techo. Los valores mínimos del coeficiente de absorción acústica medio ($\alpha_{m,t}$) del material o techo suspendido se calculan como sigue:

a) En aulas de volumen hasta 350 m^3 , sin butacas tapizadas:

$$\alpha_{m,t} = h \cdot \left(0,23 - \frac{0,12}{\sqrt{S_t}} \right)$$

Fórmula N° 2.11

b) En aulas de volumen hasta 350 m^3 , con butacas tapizadas:

$$\alpha_{m,t} = h \cdot \left(0,32 - \frac{0,12}{\sqrt{S_t}} \right) - 0,26$$

Fórmula N° 2.12

Siendo:

h: altura libre del recinto, [m].

S_t : área del techo, [m^2].

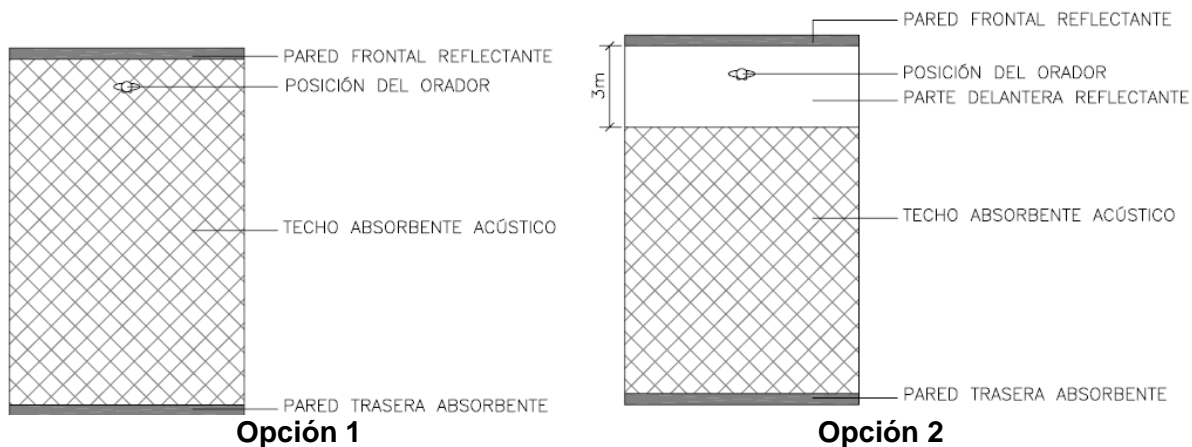
2.3.2.2 Ubicación de los elementos para el acondicionamiento acústico.

Para volúmenes de salas menores a 350 m^3 , se recomienda una de las dos opciones de diseño en cuanto a la distribución de los materiales absorbentes:

a) Opción 1. Se dispondrá un material absorbente acústico en toda la superficie del techo, la pared frontal será reflectante y la pared trasera será absorbente acústica para minimizar los ecos tardíos.

b) Opción 2. Se dispondrá un material absorbente acústico en el techo, pero sólo se cubrirá la parte trasera del techo, dejando una banda de 3 m de ancho de material reflectante en la parte delantera del techo. La pared frontal será reflectante y en la

pared trasera se dispondrá un material absorbente acústico de coeficiente de absorción acústica similar al del techo.



Opción 1
Opción 2
Figura N° 2.1. Vista en planta de las opciones 1 y 2.

Para valores iguales de absorción acústica total de los elementos que componen el recinto, es más recomendable disponer un pasillo central que dos pasillos laterales para el acceso de alumnos.

2.3.3 OMS. “Guías para el ruido urbano”.1999.

Según la Organización Mundial de la Salud, la exposición prolongada al ruido puede desarrollar efectos permanentes en las personas, como hipertensión y cardiopatía asociadas con la exposición a altos niveles de sonido. La magnitud y duración de los efectos se determinan en parte por las características individuales, estilo de vida y condiciones ambientales. Los sonidos también provocan respuestas reflejo, en particular cuando son poco familiares y aparecen súbitamente.

Se ha demostrado que el ruido puede perjudicar el rendimiento de los procesos cognitivos. Si bien un incremento provocado del ruido puede mejorar el rendimiento en tareas sencillas de corto plazo, el rendimiento cognoscitivo se deteriora sustancialmente en tareas más complejas. Entre los efectos cognitivos más afectados por el ruido se encuentran la lectura, la atención, la solución de problemas y la memorización. El ruido también puede actuar como estímulo de distracción y el ruido súbito puede producir un efecto desestabilizante como resultado de una respuesta ante una alarma.

Cuando se escuchan mensajes complicados (en la escuela, en lengua extranjera o en una conversación telefónica), la razón de la señal en comparación con el ruido debe ser al menos de 15 dB con un nivel de voz de 50 dBA. Ese nivel de ruido corresponde en promedio a un nivel casual de voz en hombres y mujeres ubicados a un metro de

distancia. En consecuencia, para una percepción clara del habla, el nivel de ruido de fondo no debe ser mayor de 35 dBA. En aulas o salas de conferencias, donde la percepción del habla es de gran importancia, o para grupos sensibles, los niveles de ruido de fondo deben ser los más bajos posibles. El tiempo de reverberación de menos de 1 segundo también es necesario para una buena comunicación oral en habitaciones más pequeñas.

Los efectos críticos del ruido son la interferencia en la comunicación oral, disturbios en el análisis de información (por ejemplo en la comprensión y adquisición de lectura), comunicación de mensajes y molestias. Para poder oír y comprender los mensajes orales en la sala de clases. Además el tiempo de reverberación en el salón de clase debe ser de 0,6 segundos.

En resumen se tiene que:

Tabla N°2.7. Valores límite según OMS.

Ambiente	Efectos en la salud	Ruido de Fondo [dBA]	Tiempo de reverberación [s]
Salas de clases	Interferencia en la comunicación, perturbación en la extracción de información, inteligibilidad del mensaje.	35	0,6

2.3.4 NCh 352 Of. 61.

Según esta norma, una sala de clases clasifica en el grupo 1, es decir, locales que por naturaleza requieren estar totalmente aislados del ruido exterior, cuyo nivel sonoro ambiental aceptable es de 20 a 25 fon, unidad que mide la intensidad sonora subjetiva de un sonido. Es decir:

Tabla N°2.8. Nivel de ruido de fondo máximo permitido.

Tipo de local	Ruido de fondo para la banda de 1000 Hz [dB]
Sala de clases	25

Para este grupo, la norma recomienda una aislación mínima de 35 dB para los muros de fachadas y medianeros, también recomienda que las ventanas o puertas vidriadas que se encuentren en el exterior del edificio, o que den a patios de luz deberán ser dotadas de vidrios dobles separados por distancias no inferiores a 2 cm, o bien de un solo vidrio inclinado.

El valor del aislamiento acústico que se considera conveniente para la separación de los tipos de ambiente es el que se muestra a continuación:

Tabla N°2.9. Aislamiento conveniente para muros medianeros.

Peso de la pared [Kg/m²]	Espesor [cm]	Aislamiento [dB]
150	10	42

Es conveniente que el aislamiento mínimo de las puertas sea de 30 dB, lo cual se alcanza con materiales con un peso de 15 Kg/m².

El aislamiento de 30 dB, que también es recomendable para las ventanas, se puede alcanzar con vidrios dobles de espesores diferentes a distancias entre 3 cm y 4 cm. Así con vidrios de 2 mm y 4 mm de espesor se obtiene un aislamiento comprendido entre 26 dB y 28 dB; con vidrios de 5 mm y 7 mm se llega a valores entre 32 dB y 34 dB.

3. MATERIALES Y ELEMENTOS UTILIZADOS PARA EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN SALAS DE CLASES.

El éxito en el diseño acústico de cualquier tipo de recinto, una vez fijado su volumen y definidas sus formas, radica en primer lugar en la elección de los materiales más adecuados para utilizar como revestimientos del mismo con objeto de obtener un tiempo de reverberación óptimo.

En este capítulo se describen distintos tipos de materiales y elementos utilizados para obtener un acondicionamiento acústico adecuado para una sala de clases. Estos materiales producen principalmente la absorción, reflexión y difusión del sonido en la sala de clases.

3.1 Materiales absorbentes.

La absorción que sufren las ondas sonoras cuando inciden sobre los distintos materiales absorbentes utilizados como revestimientos de las superficies límite del recinto, así como su dependencia en función de la frecuencia, varían considerablemente de un material a otro. En consecuencia, la correcta elección de los mismos permitirá obtener, en cada caso, la absorción más adecuada en todas las bandas de frecuencias de interés.

Los materiales absorbentes se utilizan generalmente para conseguir uno de los siguientes objetivos:

- Obtención de tiempos de reverberación adecuados.
- Prevención o eliminación de ecos.

Estos materiales presentan un gran número de canales a través de los cuales la onda sonora puede penetrar. La disipación de energía en forma de calor se produce cuando la onda entra en contacto con las paredes de dichos canales. Cuanto mayor sea el número de canales, mayor será la absorción producida. El correspondiente coeficiente de absorción es asignado a la superficie del material.

El mecanismo de acción es el siguiente: la onda sonora incidente es parcialmente reflejada. La energía sonora no reflejada penetra en el material, se atenúa y alcanza de nuevo su superficie después de reflejarse en la pared rígida posterior. La energía remanente se divide, nuevamente, en una parte que atraviesa la superficie del material

y otra que vuelve a la pared posterior a través del material. Desde un punto de vista teórico, este proceso continúa indefinidamente.

El mencionado mecanismo de absorción del sonido es propio de todos los materiales porosos, siempre y cuando los poros sean accesibles desde el exterior. Normalmente tales materiales están formados por sustancias fibrosas o granulares a las que se les confiere un grado suficiente de compacidad a través de un proceso de prensa o de tejeduría.

En la figura 3.1 se representa dicho proceso de forma gráfica y simplificada.

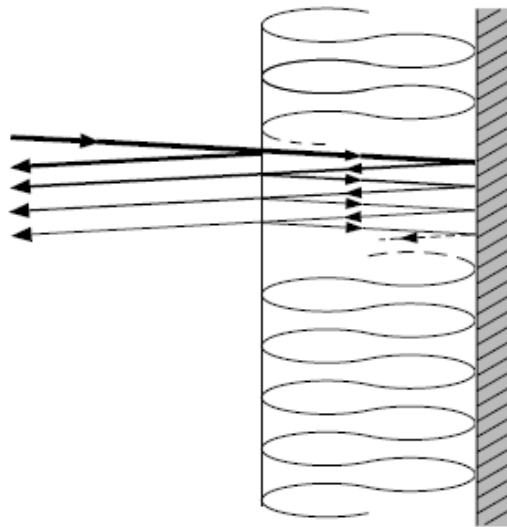


Figura 3.1. Proceso de disipación de energía en el interior de un material poroso situado delante de una pared rígida.

Los materiales absorbentes comerciales de este tipo se manufacturan básicamente a partir de lana de vidrio, lana mineral, espuma a base de resina de melamina o espuma de poliuretano.

3.1.1 Factores que afectan el grado de absorción del material.

a) Espesor.

Asumiendo que el material absorbente está colocado delante de una pared rígida, cuanto mayor sea el espesor mayor será el grado de absorción acústica, especialmente para bajas frecuencias.

b) Porosidad.

Partiendo de la misma hipótesis anterior en cuanto a la ubicación del material, al aumentar su porosidad aumenta la absorción a todas las frecuencias.

c) Densidad.

Si la densidad del material es baja, existen pocas pérdidas por fricción y, en consecuencia, la absorción es pequeña. A medida que la densidad va aumentando, se produce un incremento progresivo de absorción hasta llegar a un valor límite, a partir del cual la absorción disminuye, debido a que existe una menor penetración de la onda sonora en el material, es decir, una mayor reflexión de energía.

Desde un punto de vista práctico, es aconsejable que los materiales absorbentes utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos tengan una densidad situada entre, aproximadamente, 40 y 70 Kg/m³, no debiéndose superar en ningún caso los 100 Kg/m³.

d) Distancia del material a la pared rígida.

Si se pretenden obtener coeficientes de absorción elevados a bajas frecuencias, no es imprescindible hacer uso de materiales muy gruesos. Basta con utilizar un material con un espesor medio y colocarlo a una cierta distancia de la pared rígida.

Cuanto mayor sea "d", menor será la frecuencia a la que la absorción será máxima. Por lo tanto, para aumentar la absorción a bajas frecuencias, es preciso incrementar la separación entre el material y la pared. De todas formas, dicha mejora se ve contrarrestada por una disminución de absorción a frecuencias más elevadas.

e) Materiales absorbentes suspendidos del techo.

En aquellos recintos donde no existe suficiente superficie disponible para el montaje de la cantidad de material absorbente necesaria, o bien donde es imprescindible aumentar la superficie de absorción más allá de la estrictamente asociada a las superficies límite, se suele recurrir a la utilización de materiales absorbentes suspendidos del techo. Dichos materiales se suelen utilizar en espacios de dimensiones medias o grandes.

3.1.2 Ejemplos de materiales absorbentes.

En un recinto cerrado, el cielo representa una superficie muy amplia, por lo que, en caso de estar hecho de un material poco absorbente al sonido, como el hormigón, hará que el tiempo de reverberación sea elevado. Para obtener un valor óptimo para el T_{60} , esto es, que esté dentro del límite de lo permitido en las distintas normativas antes mencionadas, debemos recubrirlo con un material absorbente.

Existen paneles diseñados para ser montados en los techos; éstos quedan suspendidos mediante una guía a cierta distancia del mismo. Esta cavidad se puede rellenar con material absorbente, reduciendo, así, el T_{60} y ajustándolo a los márgenes deseados. Hay que tener presente que la colocación de este cielo falso implica también una reducción del volumen, y, por tanto, ayuda también a reducir el tiempo de reverberación.

A continuación se muestran distintos tipos de techos absorbentes de variadas empresas en el mercado nacional.

- Marca: Romeral
Modelo: Decociel-Brisa
Material: Yeso reforzado con fibra de vidrio
NRC : 0,6



Figura N° 3.3. Cielos Romeral.

- Marca: Volcan
Modelo: Casoprano-Jazz Acústico
Material: Yeso-cartón
NRC: 0,55



Figura N°3.4. Cielos Volcan.

- Marca: Knauf AMF
Modelo: Thermatex Mercure
Material: Yeso
NRC: 0,6

SISTEMAS DE TECHOS
Espacio de Ideas y Arquitectura



Figura N°3.5. Cielos Knauf.

Las paredes representan un porcentaje muy elevado de la superficie de una aula, por ello contribuyen, de manera relevante, al tiempo de reverberación final. Por otro lado, tampoco podemos recubrir las paredes con un material absorbente, ya que, en muchos casos, no sería práctico; este tipo de materiales se ensucian con mayor facilidad y tienen poca resistencia mecánica. Por este motivo, no se acostumbra a tratar acústicamente las paredes con el objetivo de reducir el tiempo de reverberación, si no que se concentra casi toda la absorción necesaria en el techo, siendo suficiente para llegar al T_{60} deseado.

El piso también representa una superficie importante, existen distintos tipos de cubrepisos y alfombras que cumplen una función absorbente, pero el que se utiliza en la mayoría de las salas de la facultad es del tipo:

- Alfombra tipo Buclé de alto tráfico, antiestática, autoextinguible, resistente a la decoloración, antihumo.

Marca de referencia	: Bercia
Línea	:Góndola
Color	: Storm Sky
Características	: Fibra: 100% Olefin Tejido: Tufting Tipo: Textured Loop Graphic. Base: Polipropileno tejido.
NRC	: 0,015

3.2 Materiales reflectores del sonido.

En general, cualquier superficie dentro de la sala de clases es capaz de generar reflexiones, más o menos intensas, en función del grado de absorción que presenten. La única superficie que teóricamente no genera reflexiones, es aquella provista de un revestimiento ideal totalmente absorbente a todas las frecuencias ($\alpha = 1$).

Dentro de las salas de clases ya existen materiales reflectantes como los muros de hormigón, pizarrón, enchapes de madera y en general todos los elementos de superficies lisas y duras, por lo que la ubicación de estos y la forma que ellos presenten, es decir, planos o curvos, orientarán de mejor o peor forma el sonido hacia los oyentes.

3.2.1 Ejemplos de materiales reflectantes

Como forma de utilizar las reflexiones para aumentar la sonoridad y mejorar la distribución del sonido, especialmente en grandes recintos, existen distintos elementos y materiales con este fin:

- **Paneles reflectores.**

La empresa “Kinetics Noise Control” (Estados Unidos) , tiene entre sus productos los paneles “ Ovation reflector panels”, los cuales están diseñados para grandes espacios que requieren una mejor directividad del sonido. Este sistema utiliza las reflexiones que se producen en el techo y las distribuye hacia los oyentes como se muestra en la siguiente figura:

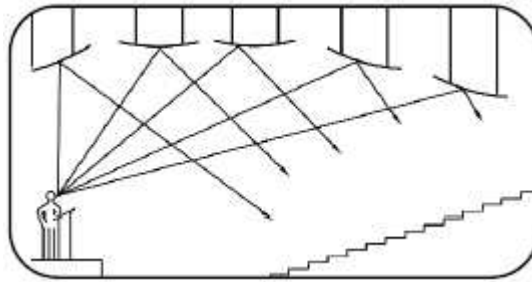


Figura N°3.6. Forma en que trabajan los paneles "Ovation reflector".

Estos paneles son de madera contrachapada y poseen un índice NRC de 0.05.



Figura N°3.7. "Ovation reflector panels". Fuente : www.kineticsnoise.com.

3.3 Materiales difusores del sonido.

Los difusores se encargan de reflejar la energía que les llega pero de manera aleatoria, es decir, creando un campo difuso de energía, reforzándola en las últimas filas. Este aumento de energía aumentará la inteligibilidad.

En la figura siguiente se muestra una comparación del comportamiento, en términos de energía reflejada, entre materiales absorbentes, reflectores y difusores.

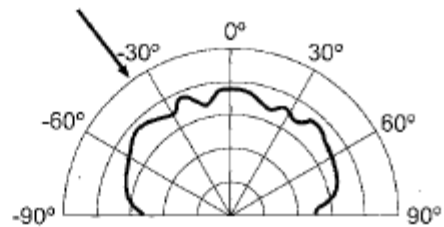
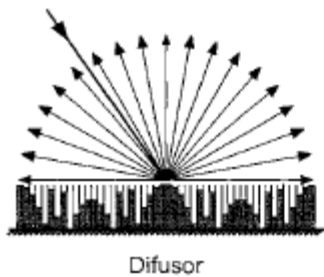
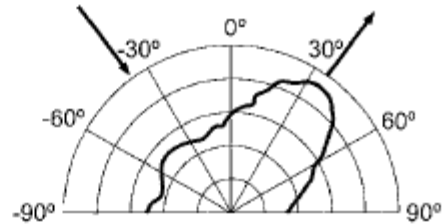
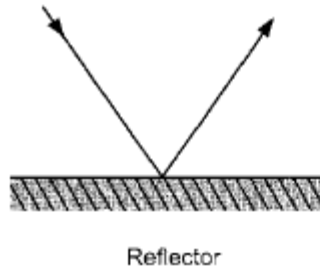
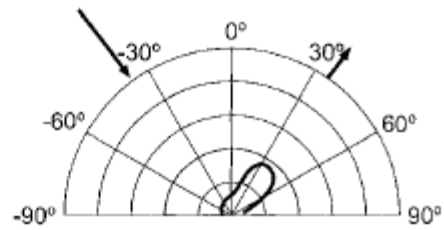
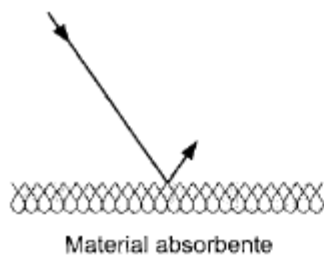


Figura N° 3.8. Comparación entre los efectos absorción, reflexión y difusión del sonido.

Como se observa en la figura anterior, en el caso del elemento difusor, la energía reflejada es elevada, y está repartida en forma uniforme en todas las direcciones.

3.3.1 Ejemplos de materiales difusores.

Los difusores unidireccionales QRD son los más utilizados y consisten en una serie de ranuras paralelas de forma rectangular de igual ancho pero distinta profundidad. Generalmente dichas ranuras están separadas por unos divisores delgados y rígidos.

- La empresa “Kinetics Noise Control” (Estados Unidos), tiene entre sus productos los paneles “HighTones Wood Diffuser”, éstos son de madera y se utilizan para producir una dispersión del sonido en altas frecuencias. Sus dimensiones y diseño típico es el siguiente:

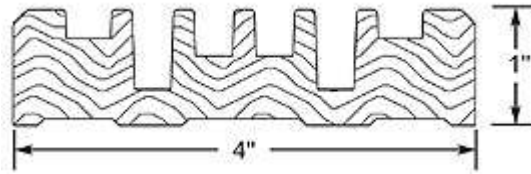


Figura 3.9. Diseño típico para paneles “HighTones Wood Diffuser”.



Figura 3.10. Paneles “HighTones Wood Diffuser”.

La diferencia entre los coeficientes de difusión para un panel delgado (liso) y uno difusor (Hightone wood diffuser) se muestra en la figura siguiente:

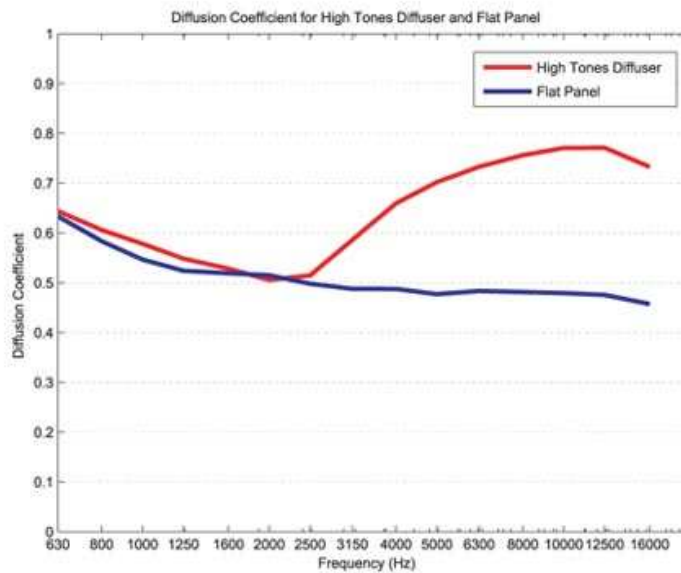


Figura 3.11. Comparación entre un panel liso y el “HighTones Wood Diffuser”.

- La empresa “Acústica integral” (España), posee entre sus productos, el panel difusor TR-Q, el cual es de madera barnizada, y es utilizado para medias (panel TR-Q4) y altas frecuencias (TR-Q2). Sus dimensiones son de 595 x 595 mm.
- La empresa “Sonoflex chile”, posee paneles difusores QRD los cuales son elementos especialmente calculados y diseñados para mejorar la distribución del sonido en el interior de un recinto, logrando que las ondas sonoras reflejadas sean de igual energía en cualquier ubicación de la sala. Sus dimensiones son 0,46 m x 0,91 m.



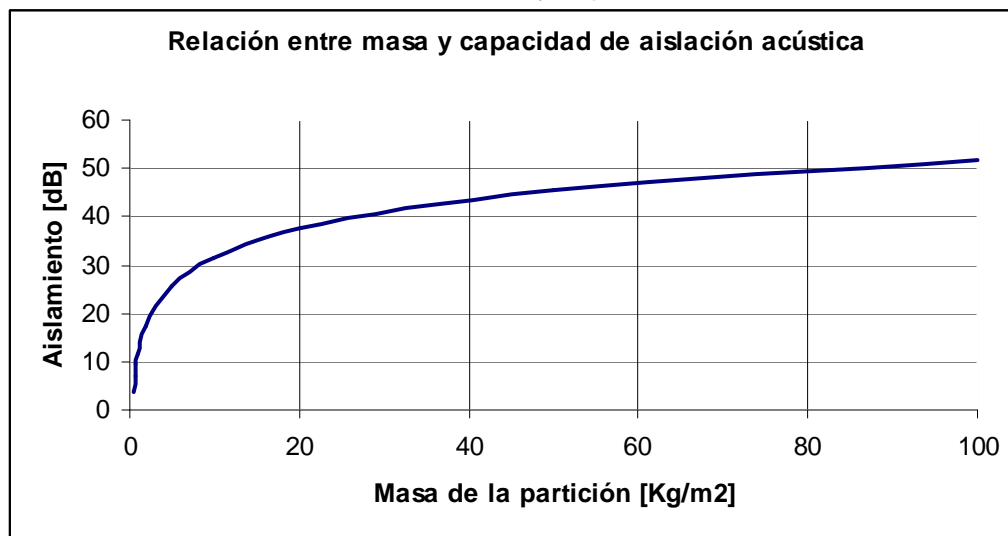
Figura 3.12. Panel difusor QRD.

3.4 Materiales aislantes

Existen tres propiedades físicas que inciden, principalmente, en el aislamiento de los elementos constructivos al ruido aéreo y ruido de impacto. Éstas son:

- **Masa:** El aislamiento acústico depende de la masa del elemento divisorio. La ley física de masa indica que existe una mejora de 6 dB en el aislamiento al duplicar la masa. Esto es válido en elementos macizos tales como muros. En el caso de elementos con cámara de aire interior la masa también influirá positivamente en el aislamiento. Esta relación se puede observar en el siguiente gráfico:

Gráfico N° 3.1. Relación entre masa y capacidad de aislación acústica.

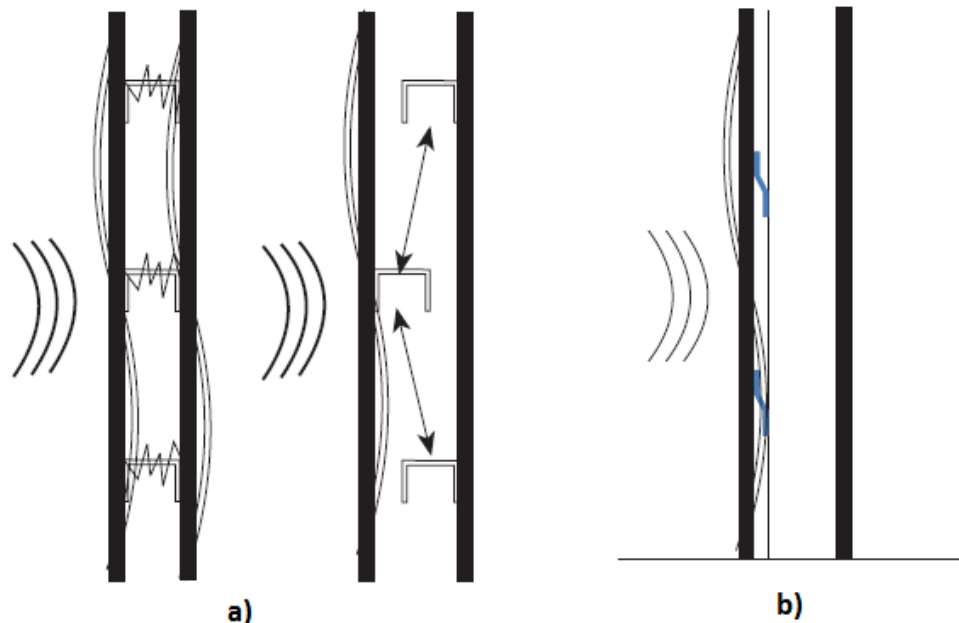


- **Rigidez:** Es una medida de la elasticidad de los cuerpos. Representa la capacidad de un objeto sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos. En el caso del aislamiento acústico, el análisis de esta propiedad va directamente relacionado con la frecuencia. En algunos casos convendrá disminuir la rigidez del sistema (solución constructiva) como es el caso de las estructuras soportantes de tabiques. En otros casos, será necesario aumentarla, como por ejemplo en los revestimientos.
- **Amortiguamiento:** Es conveniente que los elementos constructivos sean capaces, de disipar la energía sonora (en forma de calor), siendo la amortiguación una medida de esto. A mayor amortiguación habrá mayor disipación.

Los materiales a utilizar para el aislamiento acústico, deben tener la característica de impedir la propagación de una señal sonora, mediante diferentes obstáculos reflectores en los elementos perimetrales del recinto, esto es, muros, puertas, ventanas, entrepisos.

3.4.1 Recomendaciones para elementos constructivos.

- **Muros de hormigón:** La capacidad de los muros de hormigón para aislar ruidos aéreos depende fundamentalmente de su masa. Por ello, aún cuando espesores de muro de 10 cm posee un aislamiento de 45 dBA, en la medida en que se utilicen espesores superiores la aislación acústica será significativamente mayor.
- **Muros de albañilería:** A partir de aproximadamente 100 kg/m²(peso) los muros de albañilería son regidos principalmente por la ley de masa, mejorando su aislamiento en cuanto mayor sea la densidad de sus elementos y mayor sea su espesor. Estos muros poseen una aislación de 40 a 50 dBA.
- **Tabiques:** Estos elementos se comportan como elementos dobles, en que cada uno de los revestimientos actúa como un elemento macizo individual. Mientras menor sea el grado de interacción mecánica entre ambas caras, se logrará un mejor comportamiento acústico. Las características que deben poseer los componentes de un tabique son las siguientes:
 - Estructura soportantes: Se debe, en lo posible, disminuir la rigidez de este sistema, se recomiendan alternativas como:
 - Aumentar la distancia entre ejes de montantes o pies derechos.
 - Procurar que el espesor de la cámara de aire entre ambas caras sea el suficiente para evitar resonancias no deseadas en baja frecuencia.
 - Opcionalmente, fijar cada cara a estructuras independientes (Figura N° 3.13-a).
 - Intercalar perfiles resilientes (Figura N°3.13-b)



a)
Figura N°3.13. Estructura soportante.

- Revestimientos: Se recomienda utilizar revestimientos que combinen de manera eficaz las propiedades acústicas tales como masa, rigidez y amortiguación.

- Material absorbente: Se recomienda que los tabiques con cavidad o huecos consideren un material absorbente en el interior de la cámara de aire. El efecto de este material absorbente es disipar la energía acústica en el interior de la cámara para disminuir la transmisión desde la cara excitada por la vibración sonora, hacia la cara opuesta (Figura N°3.14).

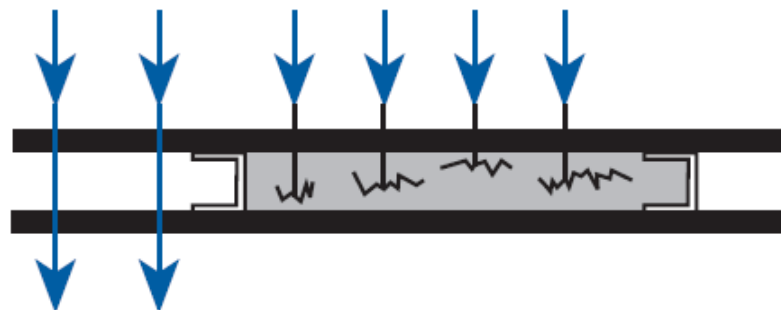


Figura N°3.14. Material absorbente en un tabique.

- Sellos perimetrales: Se recomienda utilizar bandas elásticas que atenúen el traspaso de vibraciones, es decir, disminuyan o extingan los puentes acústicos que se producen por el contacto entre materiales rígidos (por ejemplo por ejemplo, la superficie de contacto entre losas y las canales de la estructura metálica, o solera, del tabique). Esta misma banda sirve para evitar fugas

acústicas sellando los contornos, puesto que absorbe las irregularidades de las superficies, evitando la transmisión del ruido aéreo entre un recinto y otro.

- Juntas de revestimientos: Es importante tener especial cuidado en detalles como las juntas de revestimiento y continuidad de los materiales de revestimiento. Se recomienda que éstas juntas sobre los bastidores de los tabiques y /o muros sean flexibles, resistentes a fisuras y adaptables a la superficie portante (evitar uniones rígidas entre los elementos). En caso de que un revestimiento esté conformado por dos o más hojas, se recomienda que la unión entre éstas sea flexible. Además se debe procurar que la cantidad de fijaciones a la estructura soportante sea la menor posible.

- **Puertas:** Si bien el aporte de su masa es un factor importante en el aislamiento acústico, la falta de sellos, burletes o la existencia de holguras visibles irá en desmedro de su comportamiento acústico. Alternativas para solucionar este problema se especifica más adelante.
- **Ventanas:** El aislamiento acústico de las ventanas, depende de la masa del cristal utilizado, de la hermeticidad al aire de la ventana y de la calidad de la instalación. Cuanto mayor sea el espesor, peso e independencia del vidrio respecto del marco, menos entrará en vibración la ventana y más la aislará. Los vidrios laminados y vidriados dobles, contribuyen a aumentar la atenuación acústica de las ventanas. En estos elementos es recomendable tener especial cuidado con el ajuste de las hojas móviles, debido a que en las uniones se puede producir traspaso de ruido. La ventana debe ser lo suficientemente hermética (a través del buen uso del burlete, felpa, espuma de polietileno, silicona y perfilería adecuada) para no dejar “fugas acústicas”.
- **Entrepisos:** A diferencia de los elementos anteriormente mencionados, los entrepisos deben aislarse del ruido aéreo y ruido de impacto, siendo el factor mas importante la aislación del ruido de impacto debido a que pisos y techos constituyen los elementos separadores de mayor superficie de contacto. Para alcanzar un aislamiento eficaz, se debe considerar lo siguiente:

- Utilización de alfombras. Las alfombras de muro a muro, al ser materiales blandos tienen las características necesarias para controlar los ruidos, principalmente de impacto.

- Sobrelosas. Es recomendable separar la superficie del pavimento por el que se transita, del resto de los elementos. Para ello, las sobrelosas consideran intercalar un elemento elástico entre la losa de hormigón estructural de entepiso y la sobrelosa o pavimento, que finalmente será la encargada de recibir la terminación. Para que la capa amortiguadora, cumpla su función de

inhibir los ruidos molestos, es recomendable que la sobrelosa, donde descansan las cargas útiles y las cargas de tránsito, quede absolutamente aislada de los elementos estructurales de la edificación. Estos elementos elásticos deben tener una baja rigidez y una buena amortiguación. Mientras menor sea la rigidez dinámica de esta capa intermedia, tanto mejor será la amortiguación y la reducción de los ruidos molestos por impacto y las vibraciones (ver figura N°3.15).

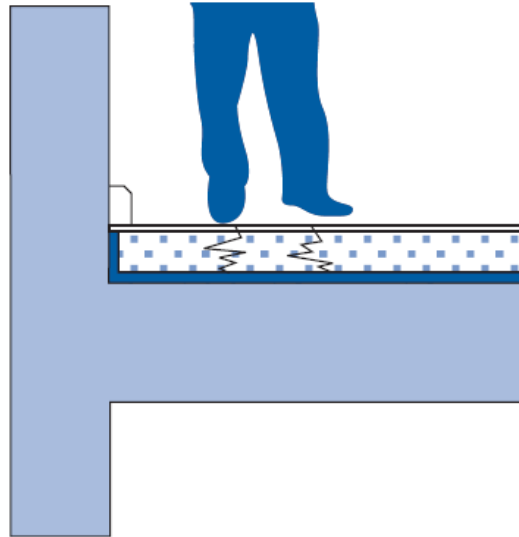


Figura N°3.15. Sobrelosas.

- Piso flotante. Los pisos flotantes aíslan el impacto transmitido hacia la losa estructural a través de un elemento elástico instalado bajo éste. Se recomienda que el piso a instalar quede absolutamente aislado de los elementos estructurales de la edificación. Al igual que la sobrelosa, la eficacia de esta solución dependerá de la interacción de las propiedades tales como masa, rigidez y amortiguación.

- Cielos falsos. Los cielos flotantes, colgantes o rasos no actúan sobre la transmisión indirecta de ruido de impacto que pueda transmitirse por muros. Se recomienda considerar el aislamiento acústico a partir de la incorporación de materiales aislantes bajo el elemento estructural.

3.4.2 Sistemas de sellos

3.4.2.1 Sellos para puertas

- Sellos para puertas ZERO. Sonoflex. Diseñados para dotar a la puerta de una total estanqueidad en todo su perímetro, evitando el paso del ruido y también de otros agentes contaminantes. El sistema consiste en que al cerrar la puerta, se acciona un mecanismo que deja caer un sello de aluminio anodizado y neopreno hacia el piso ejerciendo presión sobre la superficie, con lo cual se desarrolla la estanqueidad que evita el paso del ruido y otros contaminantes. Este producto tiene un STC de entre 49 y 59.

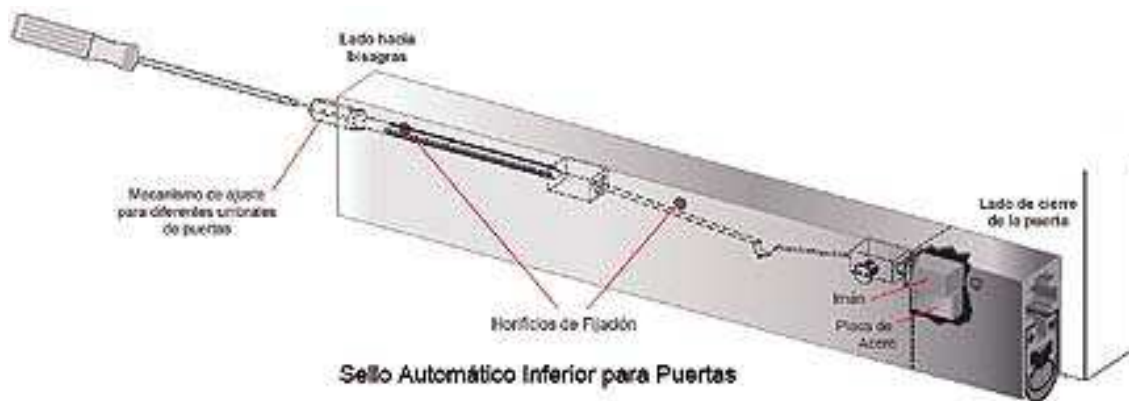


Figura N°3.7. Sellantes para puertas.

- Sello acústico para puertas. Acoustical Soluciones, Inc. Este sistema al igual que el anteriormente descrito, consiste en que al cerrar la puerta se acciona un mecanismo que deja caer un sello de neopreno.



Figura N°3.8. Sellantes para puertas.

3.4.2.2 Sellos para ventanas

- Burletes. Marca DVP. El burlete es el elemento que cumple la función de asentar el vidrio dentro del perfil de la ventana. Además sella y absorbe los movimientos propios entre el vidrio y los perfiles, ya sean de madera, PVC o aluminio. Fabricado en base a PVC (Poli Cloruro de Vinilo). Dependiendo de su uso se pueden clasificar en 4 grupos:

- Tipo U. Son los más usados en hojas correderas o integradas. Estos burletes abrazan el vidrio dentro del perfil de aluminio o PVC.

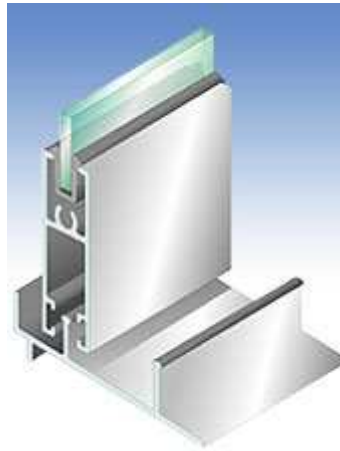


Figura N°3.9. Burlete tipo U.

- Bases. Son aquellos que se colocan en los perfiles hojas donde va un junquillo (generalmente ventanas proyectantes).

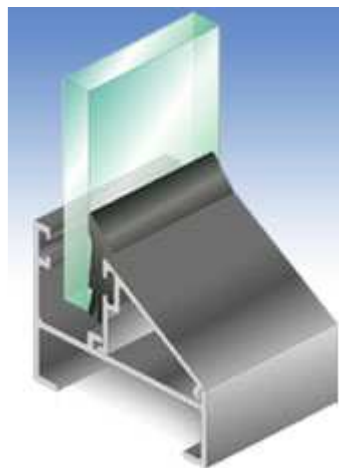


Figura N°3.10. Burlete tipo Base.

- Cuñas. Se complementan con las bases en el lado contrario del perfil (junquillo). Se diferencian según el espesor del vidrio.

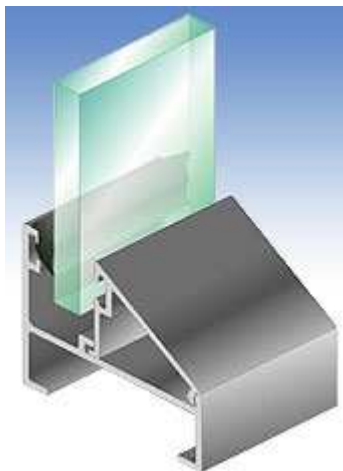


Figura N°3.11. Burlete tipo Cuña.

- Especiales. Burletes para muros cortina, juntas de dilatación.

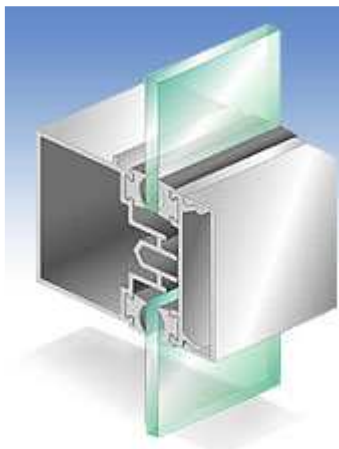


Figura N°3.12. Burletes especiales.

3.4.2.3 Sellos para juntas

- Sellador ignífugo- Acústico. Marca Knauf.

Es un material acrílico de base acuosa y alta concentración de sólidos no inflamables que por su elasticidad y composición química, es adecuado para el sellado de juntas en tabiques de yeso-cartón, cemento, hormigón y cualquier otro material absorbente en donde se requiera establecer una barrera al fuego y acústica.

- Sellador acústico Sheetrock. Marca Sheetrock.

Es un material de alta elasticidad en base a agua, que se adhiere fácilmente a los materiales ya sean porosos o no porosos. Posee además resistencia al fuego.

- Sellador acústico. Marca TREMCO.

Es un sellante de goma sintética mono componente. Es usado en el diseño y construcción de tabiques y separaciones entre habitaciones o entre oficinas. En la aplicación, el sellante inhibe el movimiento del aire y amortiguar la vibración, las cuales contribuyen a la transmisión del sonido.

4. DESCRIPCIÓN DE LAS SALAS DE CLASES A ESTUDIAR.

Los recintos a estudiar corresponden a 6 salas de clases, correspondientes a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Las fotografías se encuentran en el Anexo B. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de ellas.

4.1 Sala B103. Edificio Computación.

Esta sala se encuentra en el primer piso del edificio y se encuentra entre 2 salas, una más pequeña y una de mayor tamaño. Un pasillo pasa por la parte delantera de la sala.

Sus muros perimetrales son de hormigón armado. Los muros que separan una sala de otra corresponden a tabiques de yeso-cartón. El piso se encuentra revestido con cubrepiso boucle 900 gr, y el cielo es un cielo falso (Romeral nieve) de yeso.

Posee ventanas de en todo el perímetro que da hacia el exterior del edificio, a las calles Club Hípico y Blanco Encalada específicamente (ver figura N° 4.9). Una imagen general de la sala se muestra en la figura N° 4.1.



Figura N° 4.1 . Imagen general Sala B103.

Sus dimensiones son:

Tabla 4.1. Dimensiones Sala B103.

Altura=	2,9	m
Ancho=	6,24	m
Largo=	9,69	m
Volumen=	242	m ³

4.2 Sala B112. Edificio de computación.

Esta sala se encuentra en el primer piso del edificio y se encuentra entre 2 salas mas pequeñas .Un pasillo pasa por la parte delantera de la sala.

Sus muros son de hormigón armado. Los muros que separan una sala de otra corresponden a tabiques de yeso-cartón. El piso se encuentra revestido con cubrepiso boucle 900 gr, y el cielo es un cielo falso (Romeral nieve) de yeso. Posee ventanas con vista a la calle Beauchef (ver figura N° 4.9). Una imagen general de la sala se muestra en la figura N° 4.2.



Figura N°4.2. Imagen general Sala B112.

Sus dimensiones son:

Tabla 4.2. Dimensiones Sala B112.

Altura=	3,1	m
Ancho=	9,87	m
Largo=	14,06	m
Volumen=	555	m ³

4.3 Sala15 Sur. Hall sur.

Esta sala se encuentra en el primer piso del edificio. Existe un hall al costado izquierdo además de escaleras, por lo que existe un flujo permanente de personas.

Sus muros son de hormigón armado. Posee una ventana con vista a la calle Tupper y al parque de entretenimientos, Fantasilandia (ver figura N°4.9). Además tres ventanas con vista a la calle Beauchef. El piso se encuentra revestido con cubrepiso boucle 900 gr, y el cielo es un cielo falso de poliestireno expandido que se encuentra en forma escalonada(ver figura n°4.3). También existe una parte del piso entablada de madera a una altura mayor del resto de la sala de modo que allí se ubique el profesor (ver figura N°4.4). Una imagen general de la sala se muestra en la figura N°4.5.



Figura N°4.3 . Cielo falso en sala 15 Sur.



Figura N°4.4 . Ubicación fuente sonora (profesor).



Figura N°4.5 . Vista general sala 15 Sur.

Sus dimensiones son las siguientes:

Tabla N°4.3. Dimensiones Sala 15 Sur.

Altura_prom=	5,4	m
Ancho=	7,78	m
Largo=	11,18	m
Volumen=	522	m ³

4.4 Sala Q10. Edificio de química.

Esta sala se encuentra en el primer piso del edificio. Existe un pasillo en la parte delantera de la sala.

Sus muros son de hormigón. Posee ventanas con vista al patio de la escuela (ver figura N° 4.9). Su piso es de baldosa y el cielo posee una parte de hormigón y también colgando del techo, cielo falso de poliestireno expandido de dimensiones 6,1 m x 11,5 m (ver figura n °4.6). Esta sala posee distintas alturas debido a su forma escalonada.



Figura N° 4.6. Cielo Sala Q10.

Las dimensiones de esta sala son las siguientes:

Tabla N°4.4 . Dimensiones Sala Q10.

Altura promedio=	7,5	m
Ancho=	11,63	m
Largo=	9,9	m
Cóncava largo=	18,3	m
Cóncava ancho=	5,85	m
Volumen=	1223	m ³

4.5 Sala Q12. Edificio de química.

Esta sala se encuentra en el primer piso del edificio. Existe un pasillo en la parte delantera de la sala.

Sus muros son de hormigón. Posee ventanas con vista a la calle Tupper y también al patio de la escuela (ver figura N°4.9), su piso se encuentra revestido con un cubrepiso boucle 900 gr, y el cielo es un cielo falso (Romeral nieve) de yeso. Una imagen general de la sala se observa en la figura N°4.7.

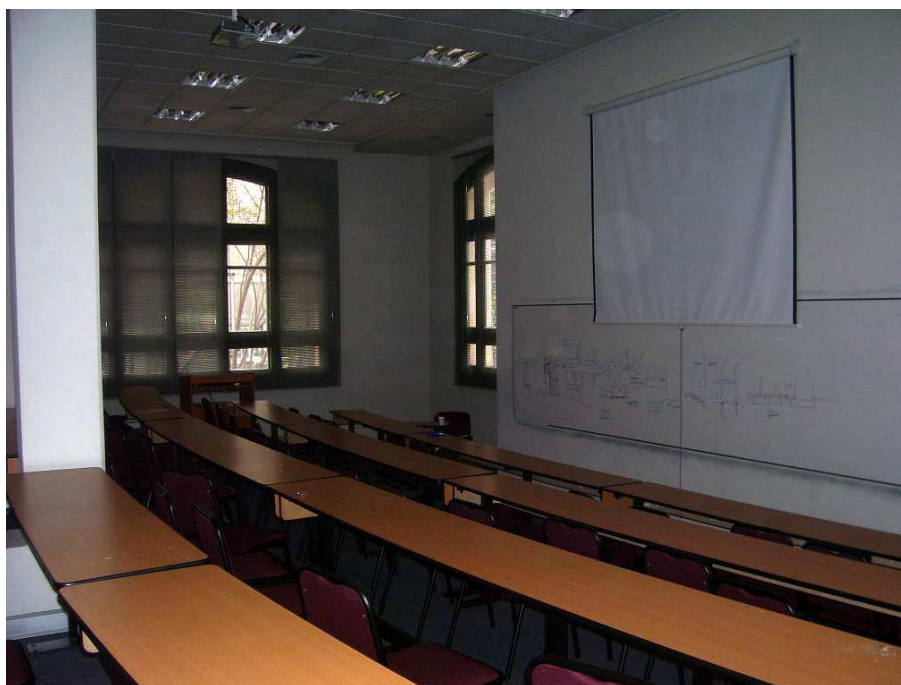


Figura N°4.7 . Vista general Sala Q12.

Las dimensiones son las siguientes:

Tabla N°4.5 . Dimensiones Sala Q12.

Altura_prom=	3,54	m
Ancho=	14,5	m
Largo=	9,19	m
Volumen=	472	m ³

4.6 Sala G110. Edificio de geología.

Esta sala se encuentra en el primer piso del edificio. Se encuentra a un costado de otra sala con similares características. Existe un hall a un costado de la sala.

Sus muros son de hormigón armado. La tabiquería corresponde a hormigón celular. Posee ventanas con vista a la calle Blanco Encalada (ver figura N° 4.9), su piso se encuentra revestido con un cubrepiso boucle 900 gr, y el cielo es un cielo falso (Romeral Brisa) de yeso. Una imagen general de la sala se observa en la figura N°4.8.



Figura N° 4.8. Imagen general Sala G110.

Las dimensiones son las siguientes:

Tabla N° 4.6. Dimensiones Sala G110.

Altura=	3,7	m
Ancho=	6,85	m
Largo=	8,05	m
Volumen=	204	m ³

La ubicación de las salas dentro de la Facultad se muestra en la figura N°4.9

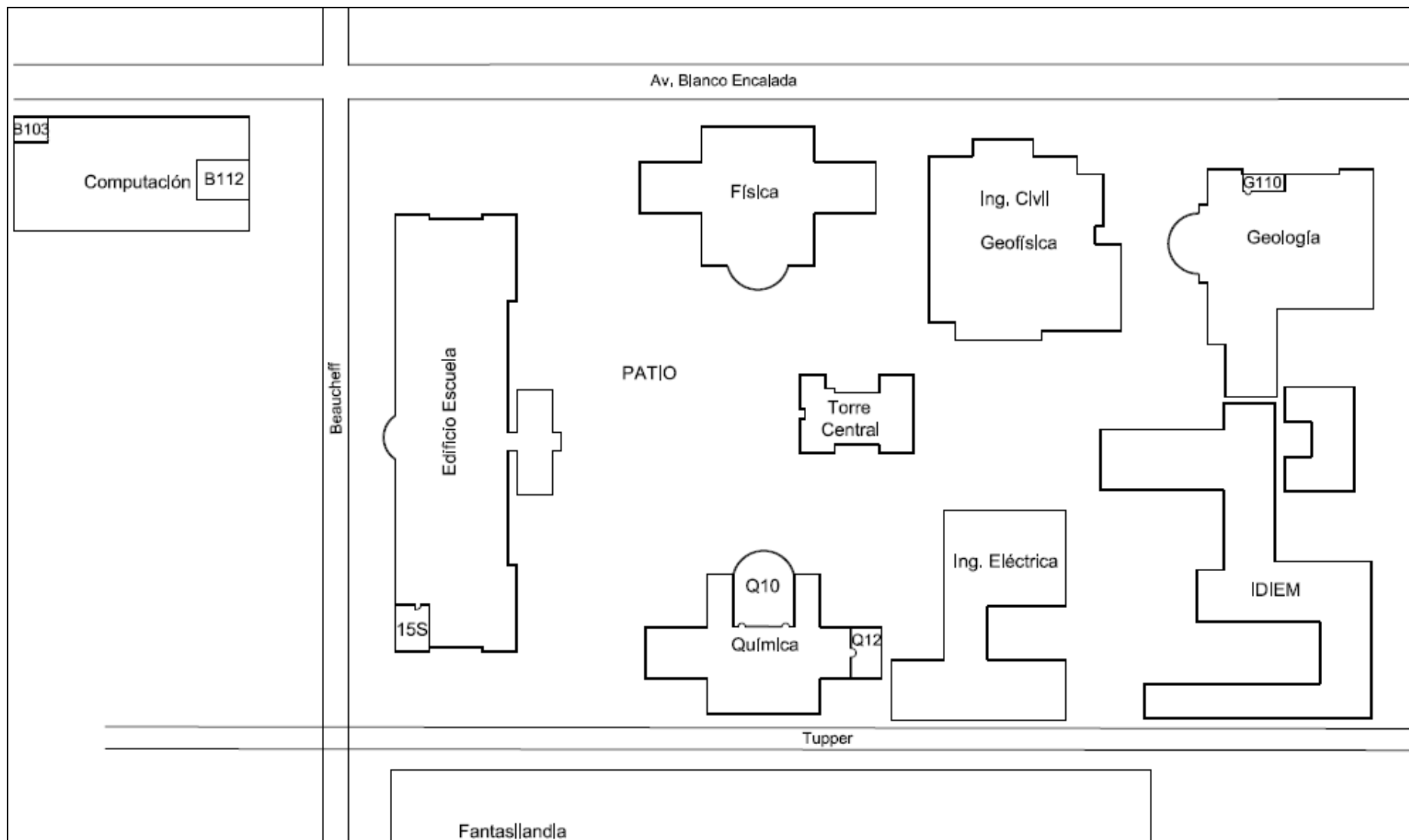


Figura N° 4.9. Ubicación Salas de clases en estudio.

5. ENCUESTA A ESTUDIANTES DE LA FACULTAD.

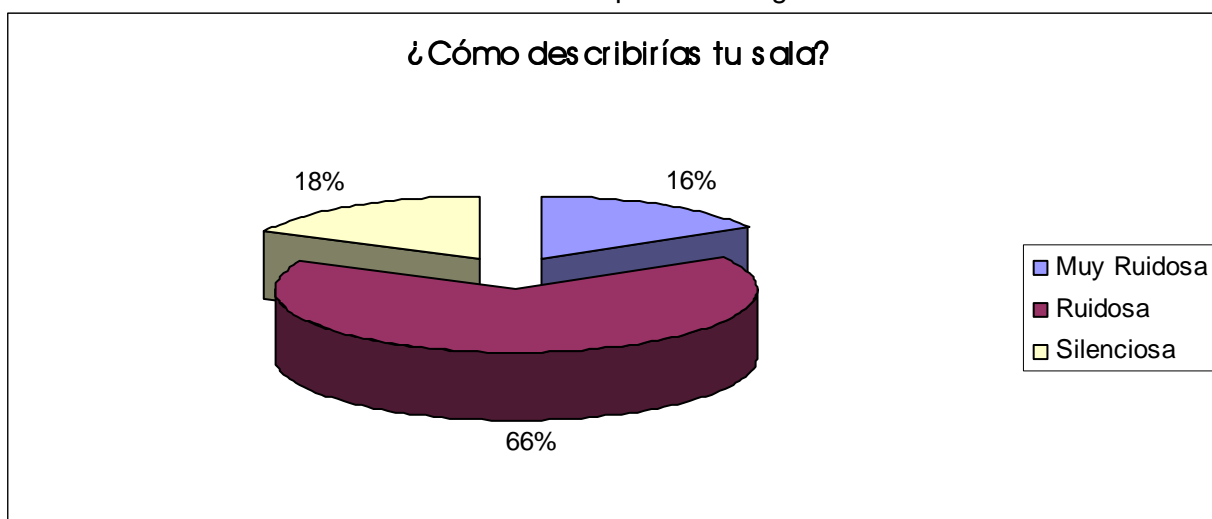
Se realizó una encuesta a alumnos que utilizan las salas de clases en estudio, de tal forma de poder corroborar la opinión de los alumnos con los resultados de las mediciones que se realizaron. Un resumen de las respuestas de los estudiantes se muestra a continuación, sin embargo la encuesta detallada se presenta en el Anexo C.

Pregunta N°1. ¿Cómo describirías tu sala?

Tabla N°5.1. Respuestas Pregunta 1.

	n° alumnos	%
Muy Ruidosa	25	16
Ruidosa	100	66
Silenciosa	27	18
Total	152	100

Gráfico N°5.1. Respuestas Pregunta 1.



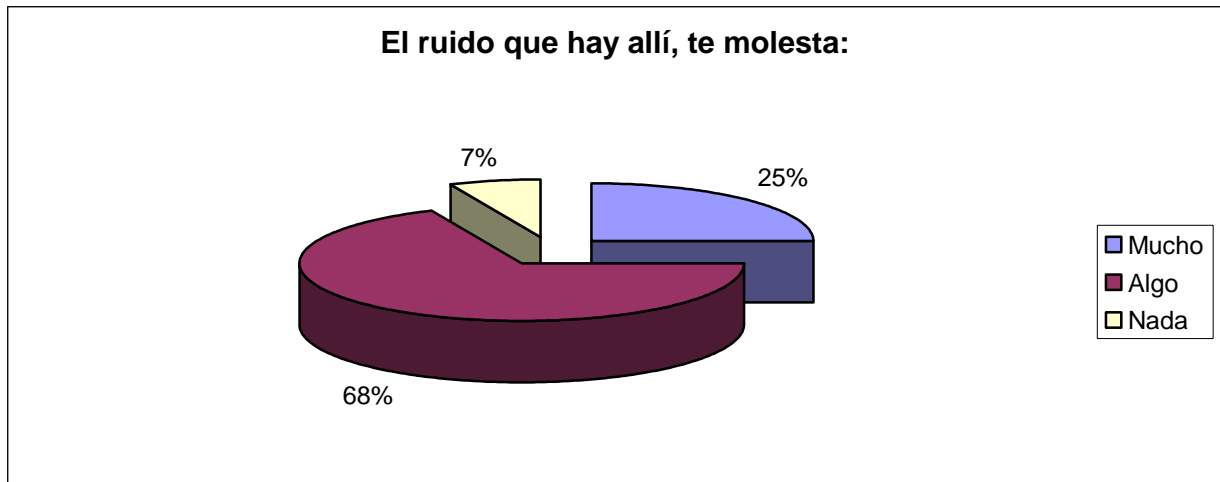
En el gráfico anterior es posible observar que la mayor parte de los alumnos encuestados considera que en general la sala en cuestión es ruidosa.

Pregunta N2. El ruido que hay allí, te molesta:

Tabla N°5.2 . Respuestas Pregunta 2.

	n° alumnos	%
Mucho	38	25
Algo	104	68
Nada	10	7
Total	152	100

Gráfico N°5.2. Respuestas Pregunta 2.



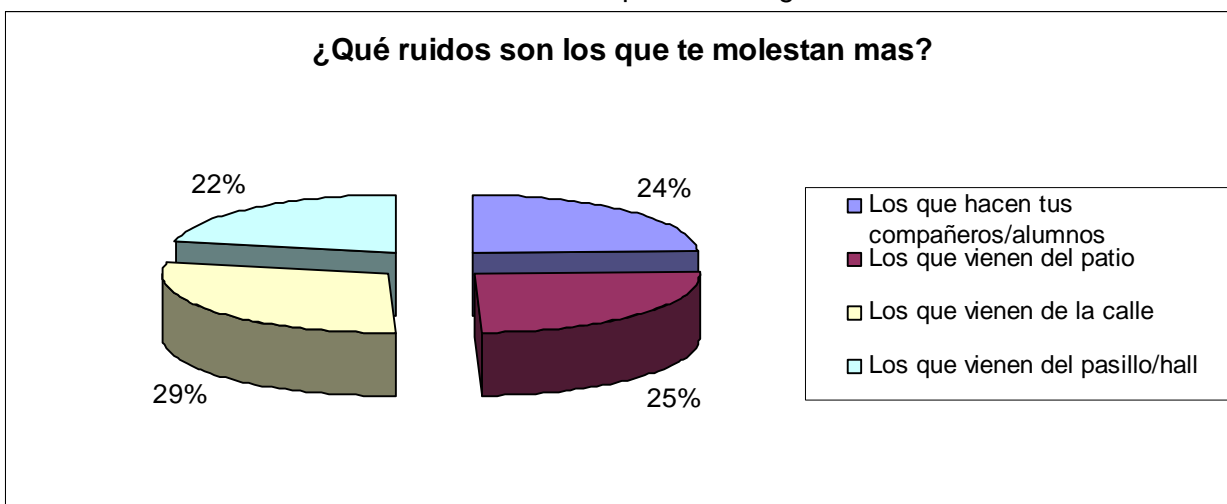
En el gráfico anterior es posible observar que la mayor parte de los alumnos encuestados considera que el ruido presente en la sala en cuestión le molesta Mucho o Algo.

Pregunta N°3. ¿Qué ruidos son los que te molestan más?

Tabla N°5.3. Respuestas Pregunta 3.

	n° respuestas	%
Los que hacen tus compañeros/alumnos	37	24
Los que vienen del patio	38	25
Los que vienen de la calle	44	29
Los que vienen del pasillo/hall	33	22
Total	152	100

Gráfico N°5.3. Respuestas Pregunta 3.



Si bien esta respuesta depende de la ubicación de la sala de clases, en el gráfico anterior es posible observar que existen fuentes de ruido externas o internas que están afectando el buen funcionamiento de la sala de clases, entre ellas la más importante es la proveniente de la calle.

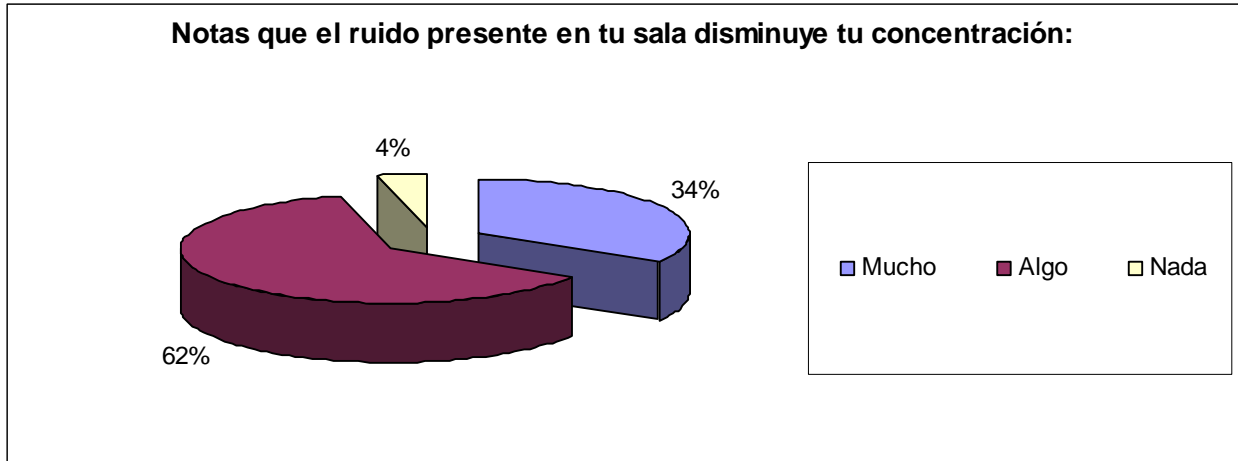
La **Pregunta N°4** se muestra en el Anexo C, ya que las respuestas son particulares para cada sala.

Pregunta N°5. ¿Notas que el ruido presente en tu sala la disminuye tu concentración?

Tabla N°5.4. Respuestas Pregunta 5.

	n° respuestas	%
Mucho	51	34
Algo	95	63
Nada	6	4
Total	152	100

Gráfico N°5.4. Respuestas Pregunta 5.



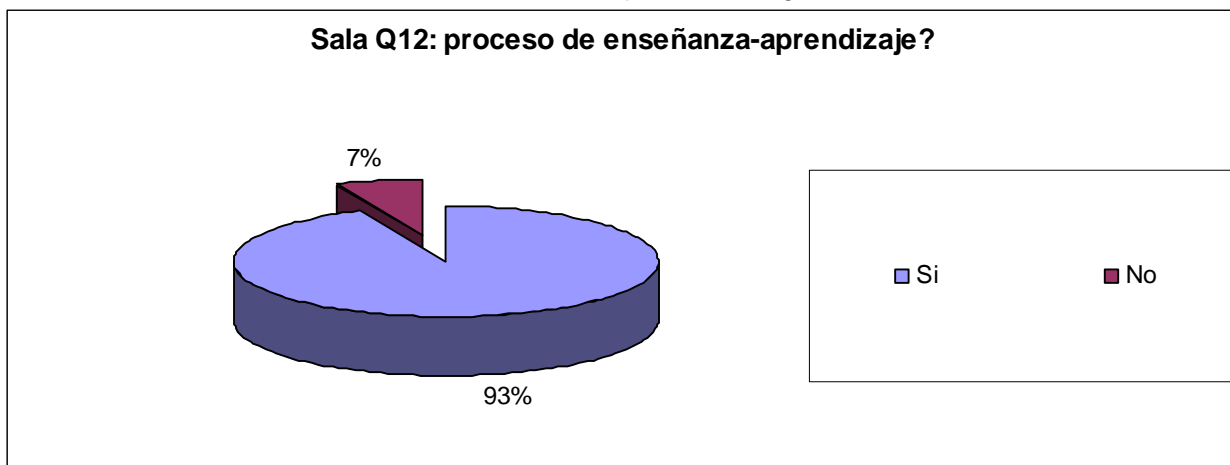
Como se observa en el gráfico anterior, la gran mayoría de los alumnos encuestados considera que el ruido presente en la sala de clases disminuye su concentración en gran medida.

Pregunta N°6. ¿Consideras que el ruido en tu sala es perjudicial para el proceso de enseñanza-aprendizaje?

Tabla N°5.5 . Respuestas Pregunta 6.

	n° respuestas	%
Si	142	93
No	10	7
Total	152	100

Gráfico N°5.5. Respuestas Pregunta 6.



Como se observa en el gráfico anterior, la gran mayoría de los alumnos encuestados considera que el ruido presente en la sala de clases es perjudicial para el proceso de enseñanza-aprendizaje. Este punto es muy importante ya que así como los mismos estudiantes reconocen que el ruido afecta su nivel de concentración, a su vez ven que se ve disminuido su nivel de aprendizaje, lo cual pone en evidencia que el ruido presente en las salas de clases afecta la calidad de la enseñanza.

6. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DE LAS SALAS EN ESTUDIO.

6.1 Caracterización según ubicación, geometría y materialidad.

Según lo expuesto en el capítulo 2.2 es posible caracterizar un recinto, y en este caso, una sala de clases, según la ubicación, geometría y también según la ubicación de algunos materiales, ya sean reflectantes o absorbentes, por tanto, de acuerdo a esto, podemos describir las posibles anomalías que tendrá la sala de clases.

A continuación se describirá cada sala y se detallarán los posibles problemas acústicos que pueden ocurrir en ella de acuerdo a su ubicación, materialidad y geometría.

6.1.1 Sala B103.

De acuerdo a su ubicación (como se aprecia en la figura N° 6.1) las fuentes de ruido que pueden afectar a esta sala, son las provenientes de las calles Club Hípico y Av. Blanco Encalada, éste ruido, producto principalmente del tráfico vehicular es de 65 dB (60,5 dBA), el cual puede considerarse como muy ruidoso según NCh 352 Of.62 .Se utiliza esta norma y no la más actual que es del año 2000, ya que esta última es aplicable solo a viviendas.

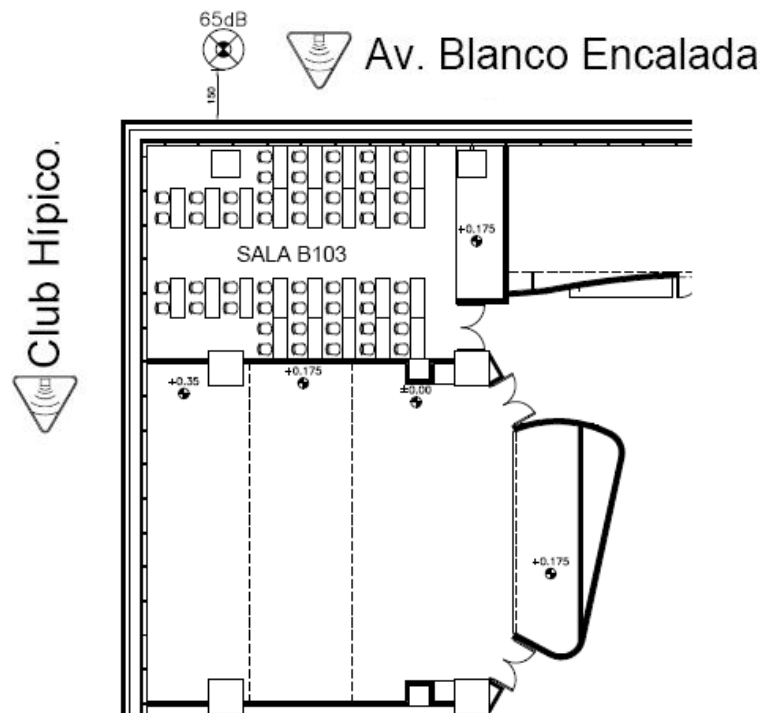


Figura N° 6.1. Fuentes de ruido que afectan a esta sala.

Esta sala tiene una forma rectangular, sin embargo no es muy larga (9,7 m) .La ubicación de la fuente sonora, que en este caso es el profesor, generalmente es en la parte delantera. De aquí se desprende, dado que la voz se distribuye a lo largo de la sala y no abarca todo el ancho, que la sala posee una geometría adecuada dada la ubicación de la fuente sonora (profesor) ya que el ángulo interior en el que queda la audiencia es menor a 140° .

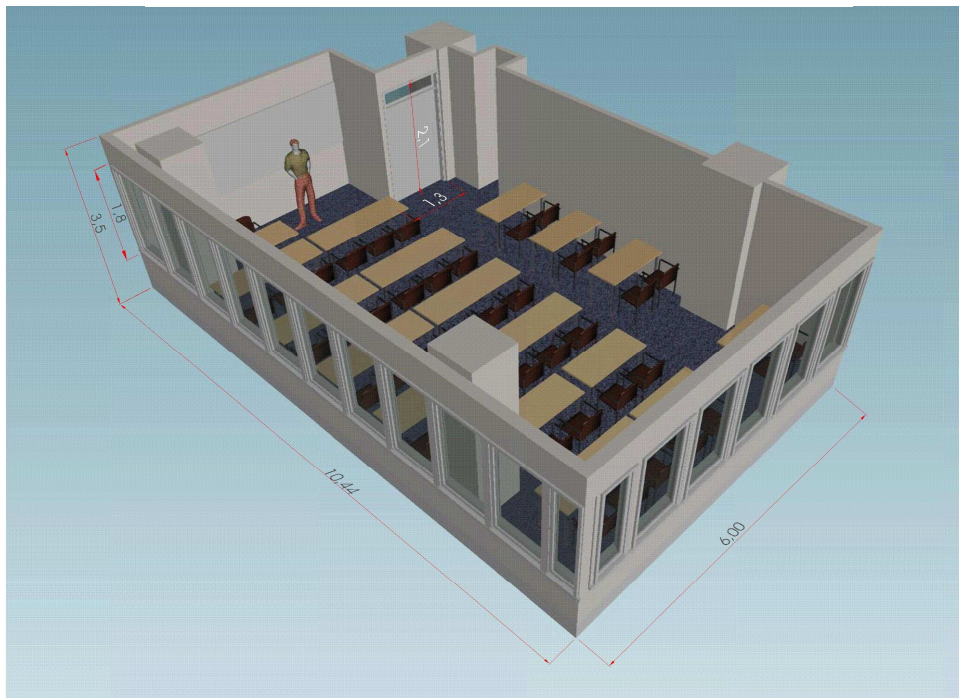


Figura N°6.2. Geometría y dimensiones sala B103.

Toda la superficie de la sala corresponde a materiales planos y duros, por lo tanto según lo descrito en el punto a) del capítulo 2.1, las paredes actuarán como espejos, reflejando el sonido. Pero a la vez, estos tipos de materiales aumentan el tiempo de reverberación.

El techo es de un material absorbente de yeso (cielo falso tipo Romeral Nieve) el cual ayuda a minimizar el tiempo de reverberación, según lo dispuesto en Antecedente (5).

Un factor que tiende a aumentar el nivel de ruido presente en la sala, es la ubicación de la puerta de la sala que se encuentra a un costado de la sala en estudio, ya que la cercanía entre ellas genera un camino corto para la fácil transmisión de ruido entre salas (ver figura N°6.3).

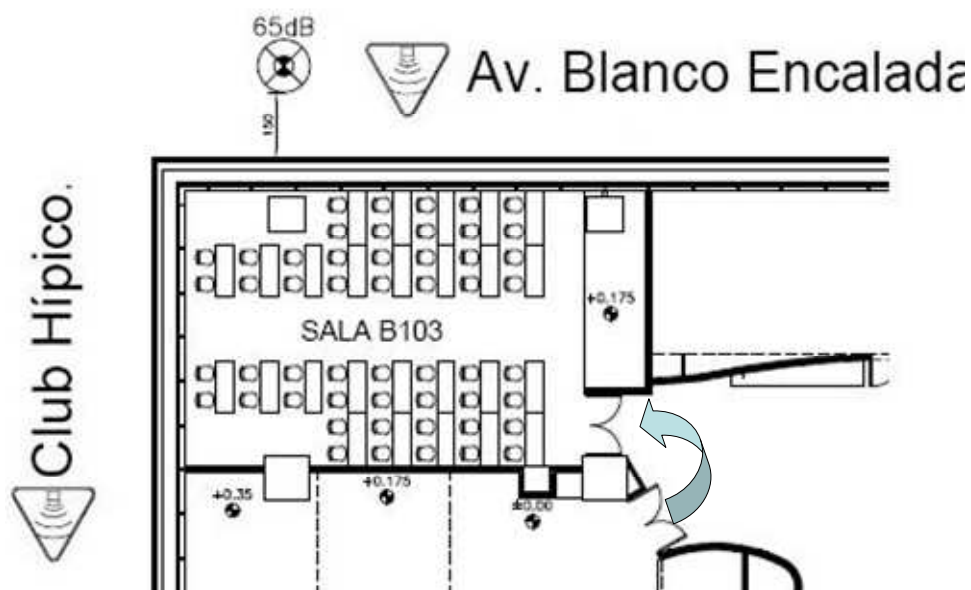


Figura N°6.3. Camino que recorre el sonido desde la sala contigua.

6.1.2 Sala B112.

De acuerdo a su ubicación (como se aprecia en la figura N° 6.4) las fuentes de ruido que pueden afectar a esta sala, son las provenientes de las calles Beauchef y Av. Blanco Encalada, éste ruido producto principalmente del tráfico vehicular es de 60 dB (55,6 dBA), el cual puede considerarse como ruidoso o muy ruidoso, según NCh 352 Of.62.

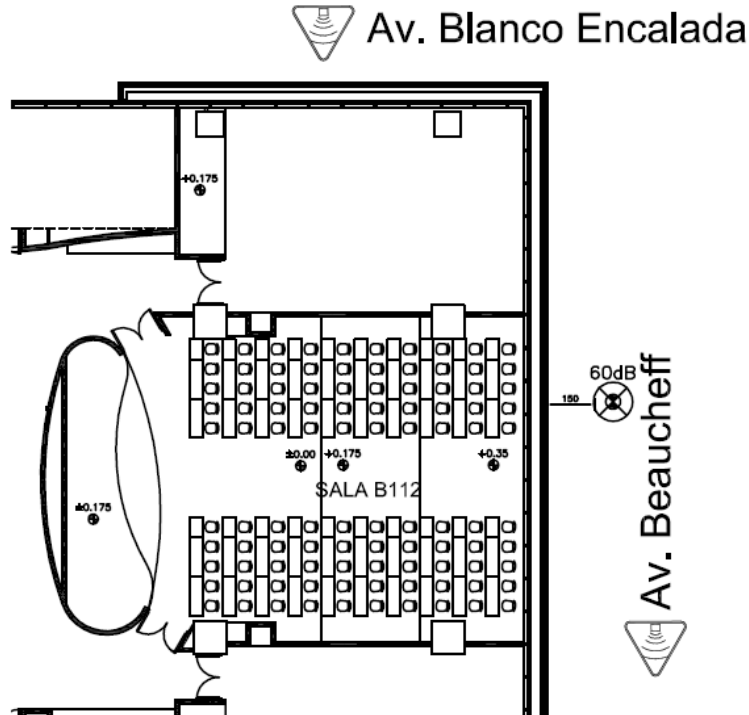


Figura N° 6.4. Fuentes de ruido que afectan a esta sala.

Esta sala posee una forma rectangular, con un largo bastante superior al ancho (14 m de largo contra 9,8 m de ancho), y dada la ubicación destinada para el profesor (fuente sonora), el sonido se distribuye a lo largo de la sala abarcando a gran parte de los alumnos, ya que el ángulo interior en el que queda la audiencia es menor a 140°.

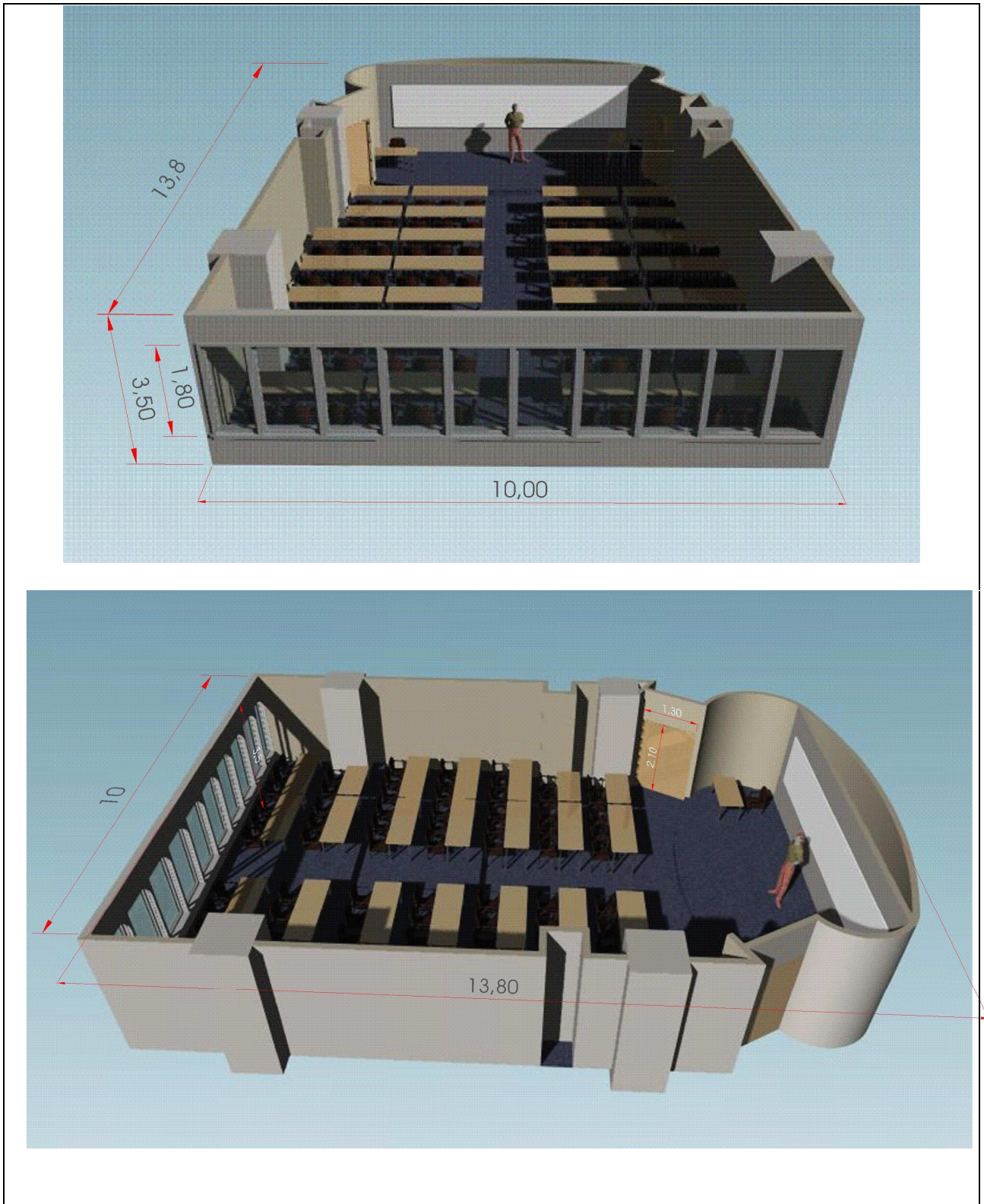


Figura N°6.5. Geometría y dimensiones sala B112.

Toda la superficie de la sala corresponde a materiales planos y duros, por lo tanto según lo descrito en el punto a) del capítulo 2.1, las paredes actuarán como espejos,

reflejando el sonido. Pero a la vez, estos tipos de materiales aumentan el tiempo de reverberación.

En la parte delantera de la sala, la superficie es cóncava, por tanto el sonido se concentra en esta parte de la sala, por lo tanto se produce una sensación de amplitud del sonido (voz del profesor).

El techo es de un material absorbente (cielo falso tipo Romeral Nieve) el cual ayuda a minimizar el tiempo de reverberación.

Un factor que tiende a aumentar el nivel de ruido presente en la sala, es la ubicación de las puertas de las salas que se encuentran a ambos costados de la sala en estudio, ya que la cercanía entre ellas genera un camino corto para la fácil transmisión de ruido entre salas (ver figura N°6.6).

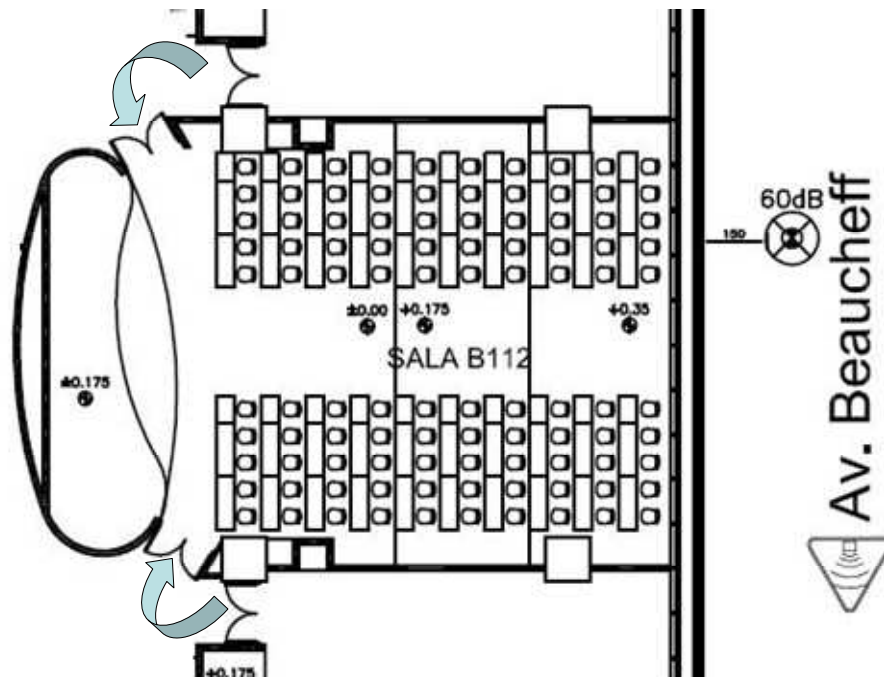


Figura N°6.6. Camino que recorre el sonido desde salas contiguas.

6.1.3 Sala 15 Sur.

De acuerdo a su ubicación (como se aprecia en la figura N° 6.7) las fuentes de ruido que afectan a esta sala, son las provenientes del Hall ubicado a un costado de la sala y el proveniente de las calles Beaucheff y Tupper. Este ruido, producto principalmente del tráfico vehicular es de 48,5 dB, el cual puede considerarse como un ambiente moderadamente tranquilo, según NCh 352 Of.62.

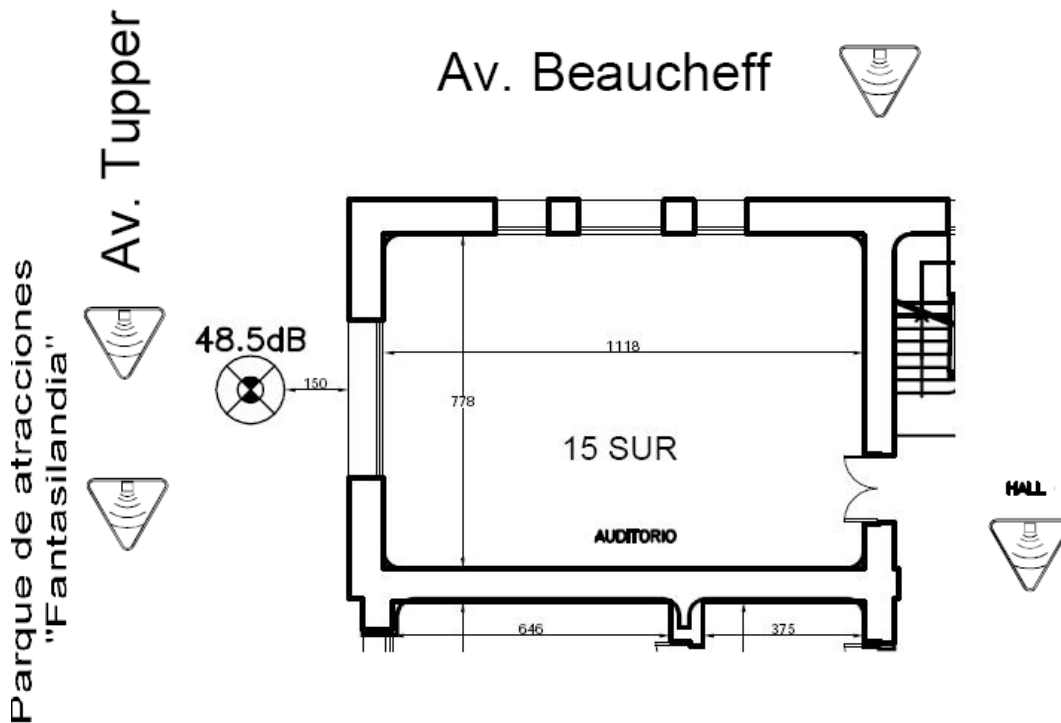


Figura N°6.7. Fuentes de ruido que afectan a esta sala.

Esta sala de clases posee una forma rectangular, con un ancho mayor que el largo de la sala (con respecto a la posición del profesor). Esto afecta el rango de alcance del sonido que emite la fuente, ya que no alcanza a cubrir todo el ancho. Además dado el ancho de la sala (aproximadamente 11 m), es posible que se presenten problemas de ecos debido a que el camino que recorren las reflexiones del sonido podría ser mayor a 17 m; suponiendo la ubicación de la fuente en una esquina, y el oyente en la otra (según lo descrito en el capítulo 2.1).

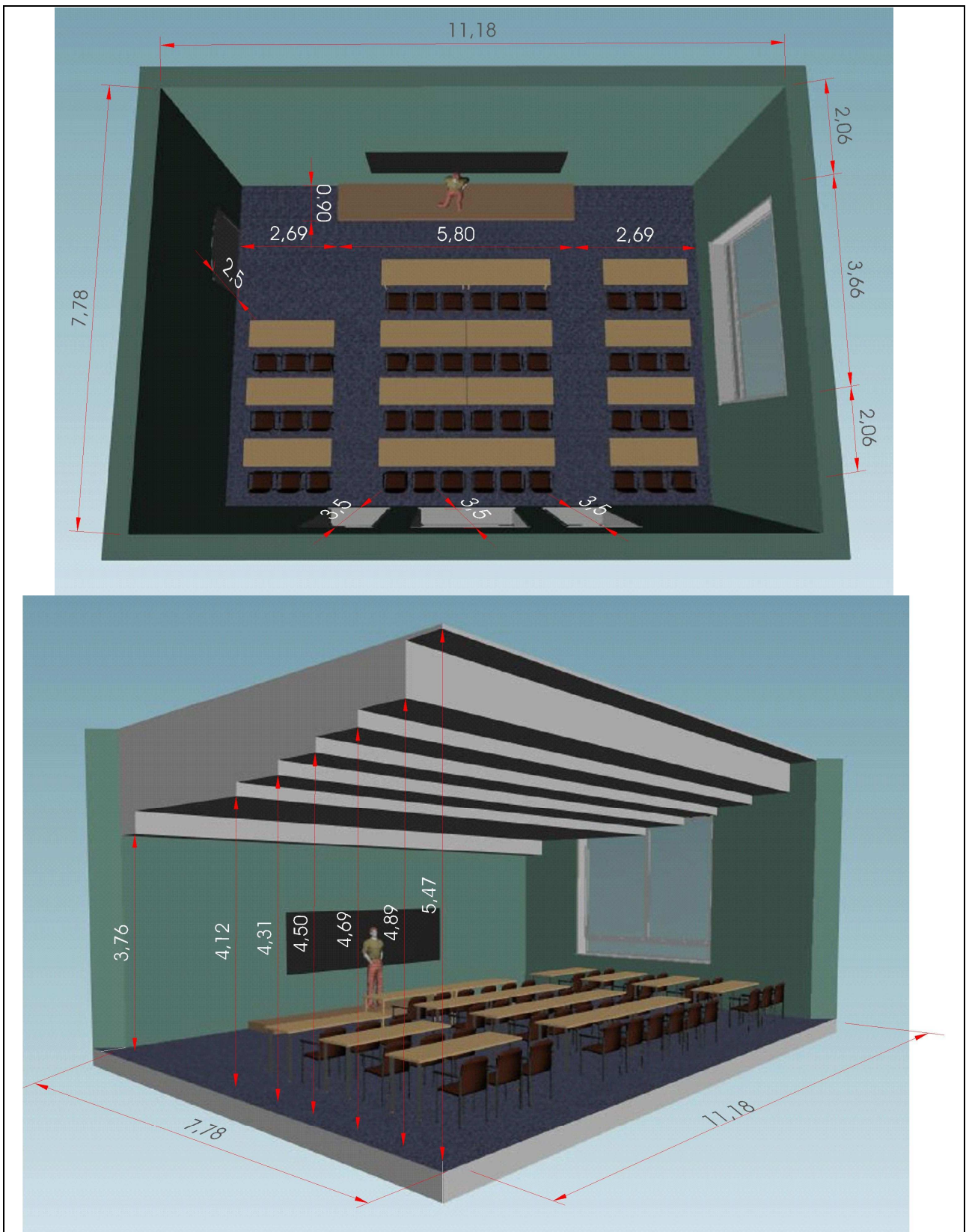


Figura N° 6.8. Geometría y dimensiones sala 15 Sur.

La superficie total de la sala corresponde a materiales planos y duros, por lo tanto según lo descrito en el punto a) del capítulo 2.1, las paredes actuarán como espejos, reflejando el sonido pero también aumentando el tiempo de reverberación.

El techo es de un material absorbente (cielo falso de poliestireno expandido) el cual ayuda a minimizar el tiempo de reverberación. Este se encuentra ubicado de forma escalonada, de tal manera que es aún mayor la superficie absorbente en comparación a un cielo plano.

6.1.4 Sala Q10.

De acuerdo a su ubicación (como se aprecia en la figura N° 6.9) las fuentes de ruido que afectan a esta sala, son las provenientes del patio de la facultad.

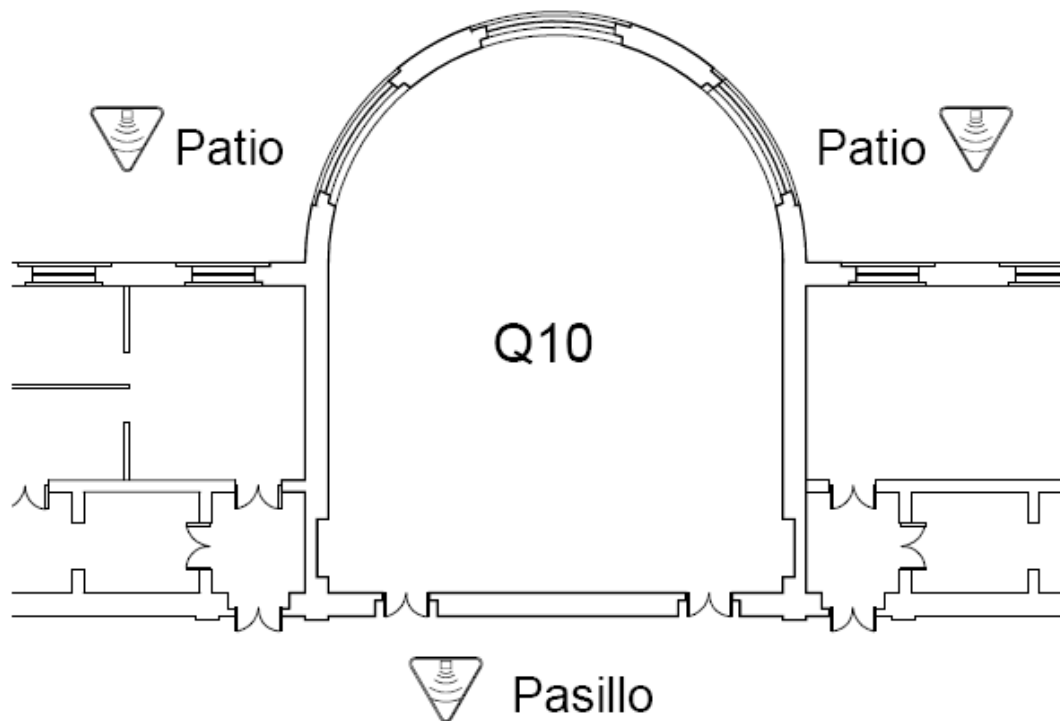


Figura N° 6.9. Fuentes de ruido que afectan a esta sala.

Esta sala es de forma cóncava en la parte posterior, además en ese lugar posee material reflectante (enchapes de madera), lo cual ayuda a que se generen focalizaciones del sonido hacia un sector específico dentro de la sala, lo cual afecta negativamente al oyente que se encuentre lejos de ese foco, ya que el sonido no alcanzará a llegar hasta su ubicación. Ver figuras N° 6.10. y 6.11.

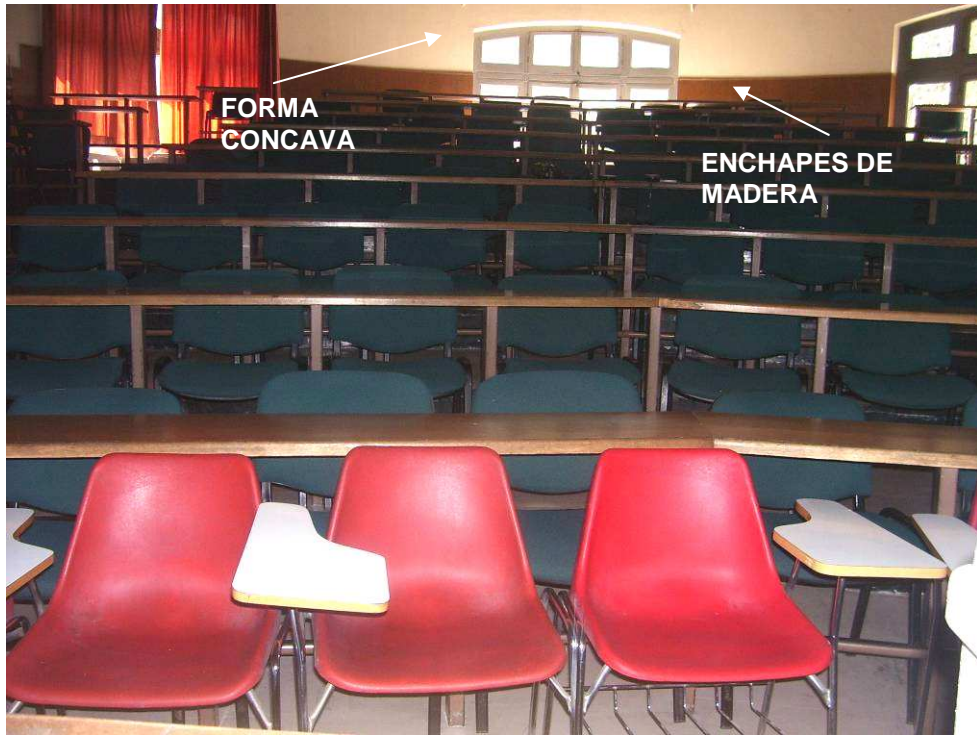


Figura N°6.10. Forma sala Q10.

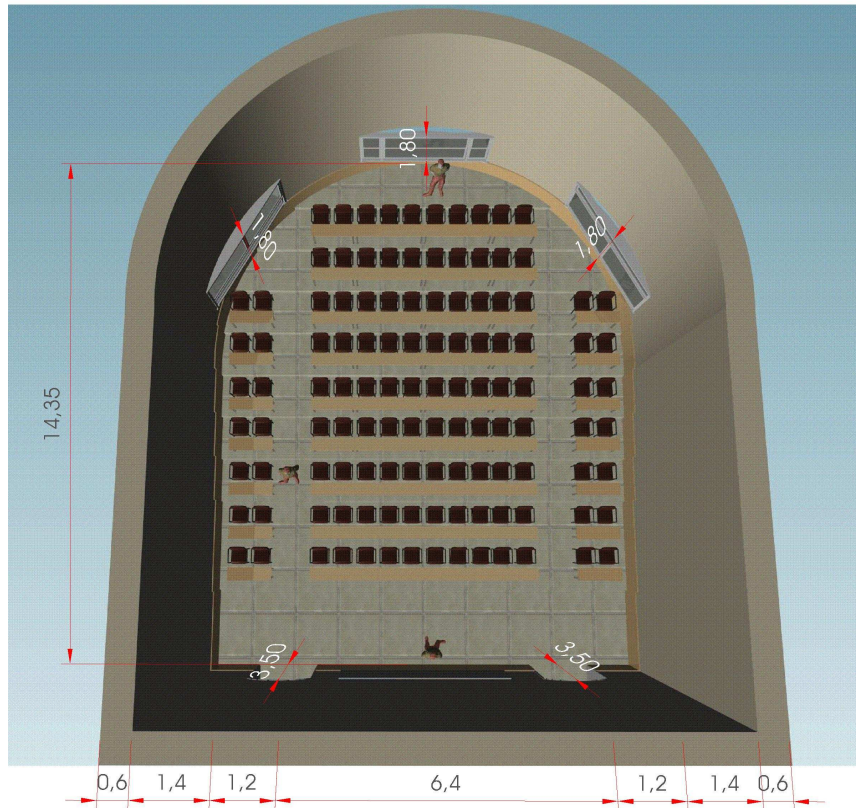


Figura N°6.11. Geometría y dimensiones sala Q10.

Además esta sala se presenta en forma escalonada, siendo los escalones y piso de material reflectante (ver figura N°6.12), y como tiene alturas bastante elevadas, cuando la fuente emite el sonido este se refleja hacia la fuente. Como posee un largo superior a 8,5 m. la reflexión llega con un retardo superior a 50 ms, generando la percepción de eco.



Figura N°6.12. Escalones sala Q10.

En las paredes laterales se encuentra 1,2 m de altura de un material reflectante (enchapes de madera), por lo que cuando el sonido directo y las primeras reflexiones llegan a estas paredes, logran reflejarse hacia los alumnos para ayudar a aumentar la sonoridad, pero como se ubica a más de 8,5 m, su reflexión genera un retardo superior a 50 ms lo que provoca una repetición del sonido directo y sensación de eco.

6.1.5 Sala Q12.

De acuerdo a su ubicación (como se aprecia en la figura N°6.13) las fuentes de ruido que pueden afectar a esta sala, son las provenientes de la calle Tupper, pero también el que provoca un extractor ubicado justo bajo la ventana y el cual provoca un ruido de 70,8 dB (66,4 dBA), el cual puede considerarse como insoportable, según NCh 352 Of.62.

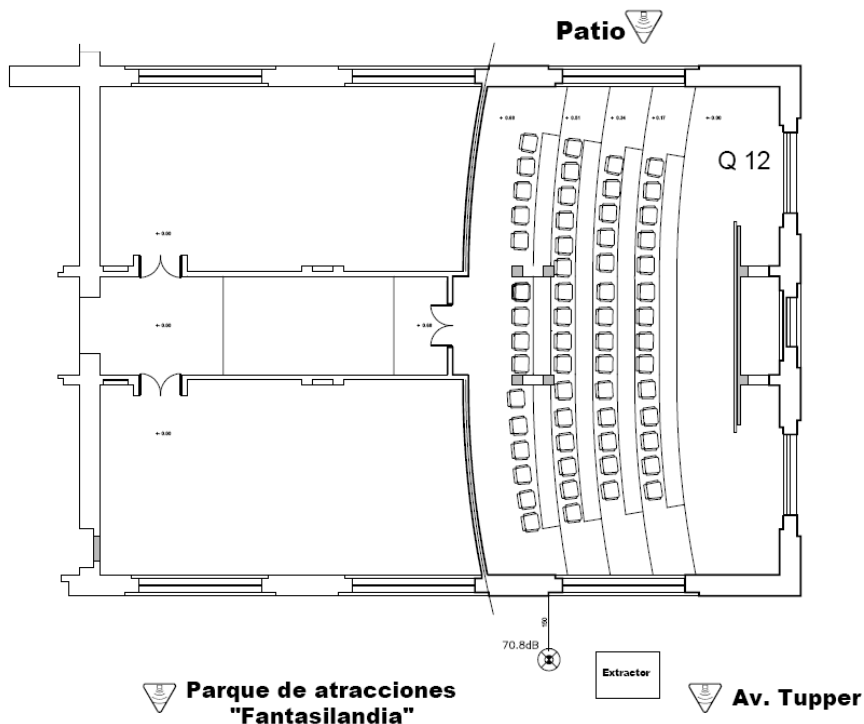


Figura N°6.13. Fuentes de ruido que afectan a esta sala.

Esta sala posee una forma rectangular, con un ancho mucho mayor al largo, por lo cual, debido a la ubicación del profesor o fuente sonora, el sonido no lograr cubrir todo el ancho. Sin embargo, como los muros son de un material reflectante (hormigón), esto ayuda a que estas paredes actúen como espejos, dirigiendo el sonido hacia los alumnos. Pero también aumentando el tiempo de reverberación. Además dado el ancho de la sala (aproximadamente 14 m), es posible que se presenten problemas de ecos debido a que el camino que recorren las reflexiones del sonido podría ser mayor a 17 m; suponiendo la ubicación de la fuente en una esquina, y el oyente en la otra (según lo descrito en el capítulo 2.1).

Posee un forma escalonada, pero dado el largo de la sala no alcanza alturas muy grandes (alrededor de 60 cm.) por lo que no afecta ningún parámetro acústico.

El techo es de un material absorbente (cielo falso tipo Romeral Nieve) el cual ayuda a minimizar el tiempo de reverberación.

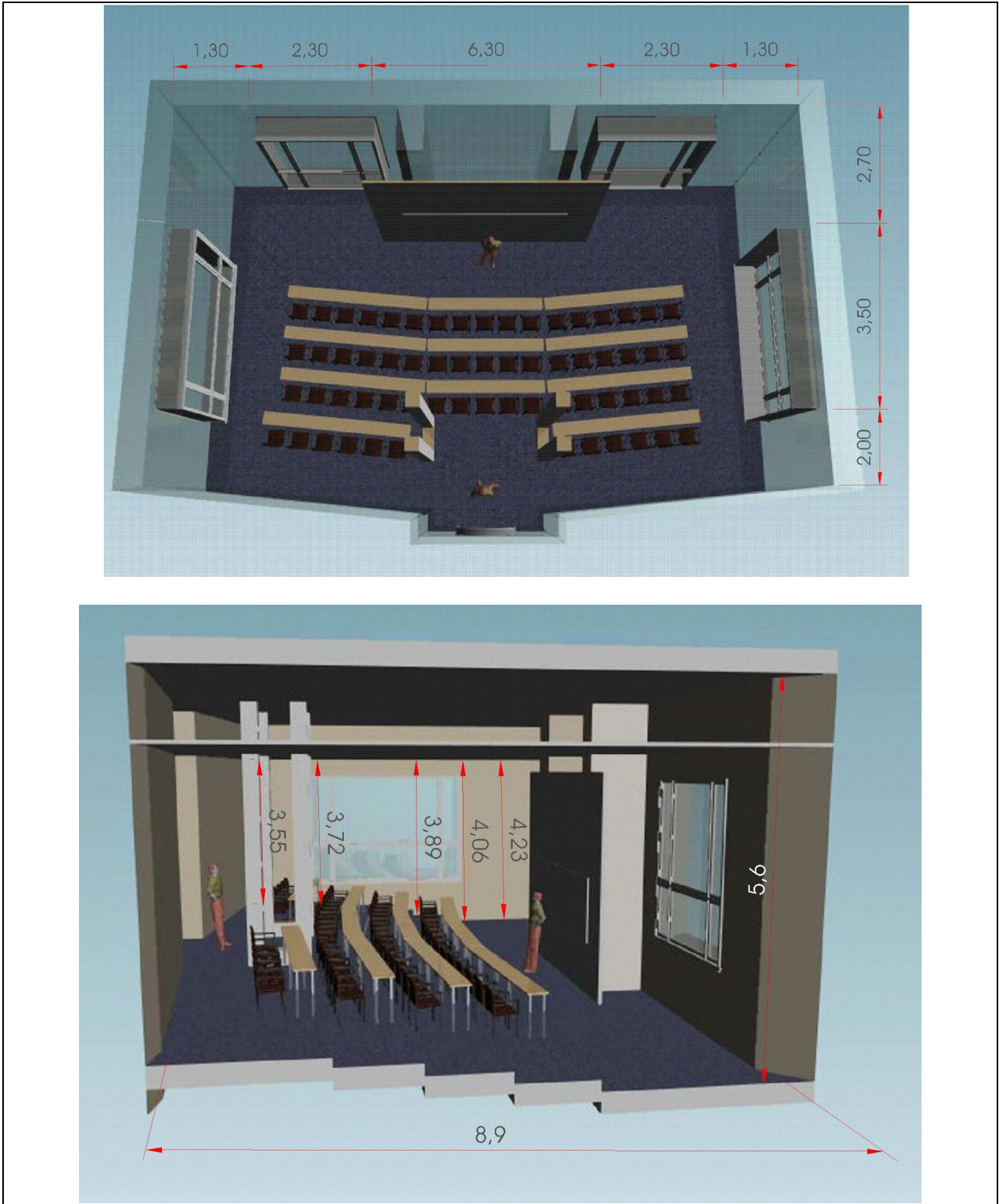


Figura N°6.14. Geometría y dimensiones sala Q12.

6.1.6 Sala G110.

De acuerdo a su ubicación (como se aprecia en la figura N° 6.15) las fuentes de ruido que pueden afectar a esta sala, son las provenientes de Av. Blanco Encalada, éste ruido, producto principalmente del tráfico vehicular es de 63,8 dB (59,4 dBA), el cual puede considerarse como muy ruidoso, según NCh 352 Of.62. Otra fuente de ruido, es el hall ubicado a un costado de esta sala.

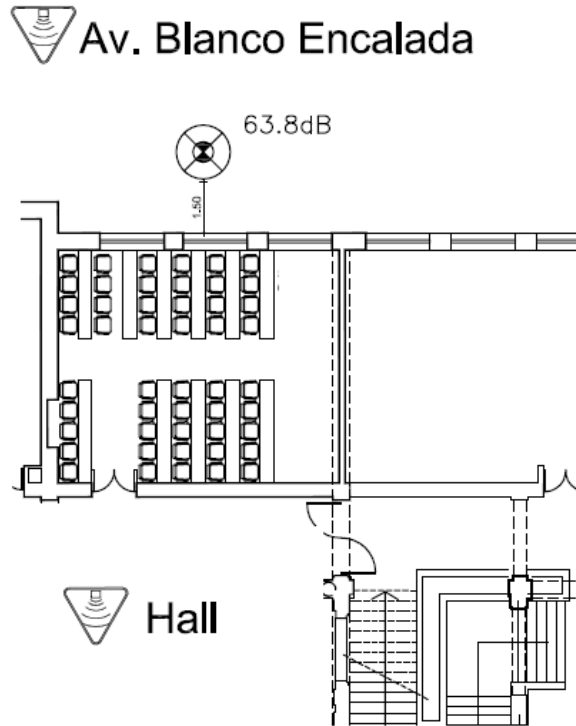


Figura N°6.15. Fuentes de ruido que afectan a esta sala.

Esta sala posee un largo y ancho muy similares, lo que podría provocar un descontrol de reverberaciones a bajas frecuencias.

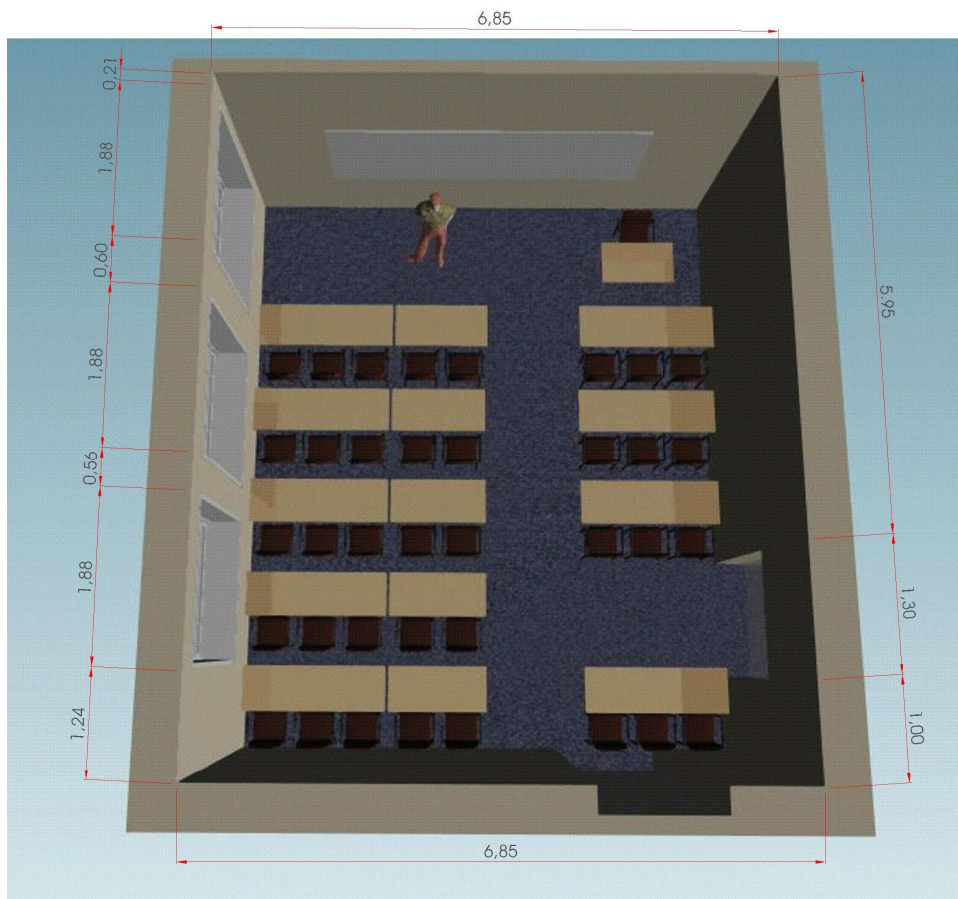
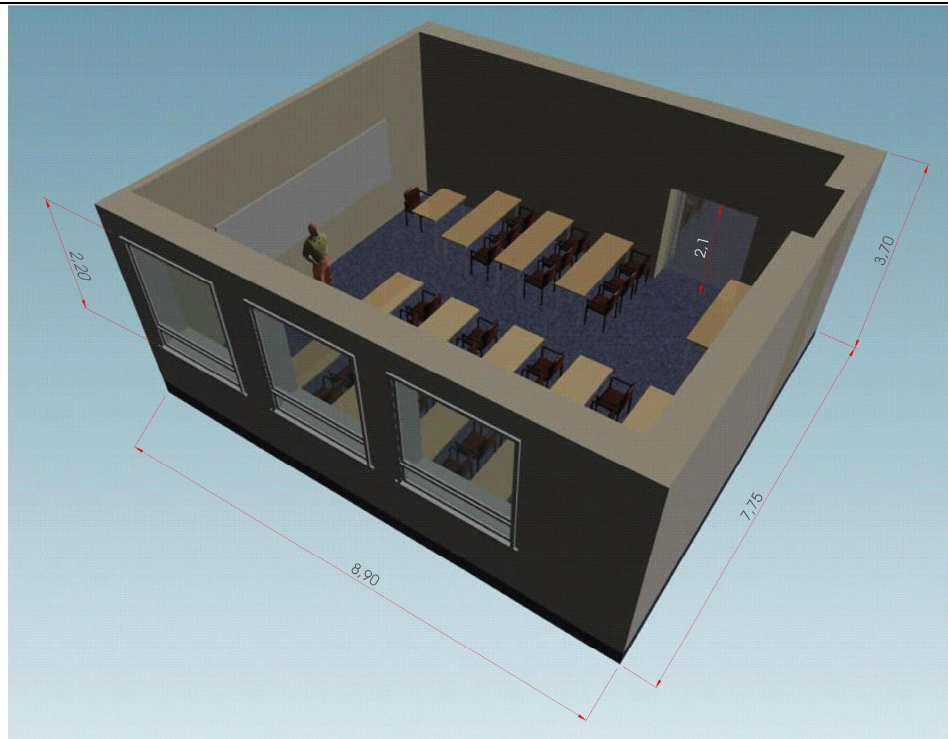


Figura N°6.16. Geometría y dimensiones sala G110.

Posee en su parte delantera un tabique de hormigón celular el cual es un material absorbente y ayuda a disminuir el tiempo de reverberación. Pero el resto de las paredes son de hormigón armado, material plano y duro que aumentan la reverberación pero también reflejan el sonido hacia los alumnos lo cual ayuda a aumentar la sonoridad.

El techo es de un material absorbente de yeso (cielo falso tipo Romeral Nieve) el cual ayuda a minimizar el tiempo de reverberación.

6.2 Caracterización según tiempo de reverberación.

6.2.1 Cálculo del tiempo de reverberación en cada sala.

6.2.1.1 Sala B103.

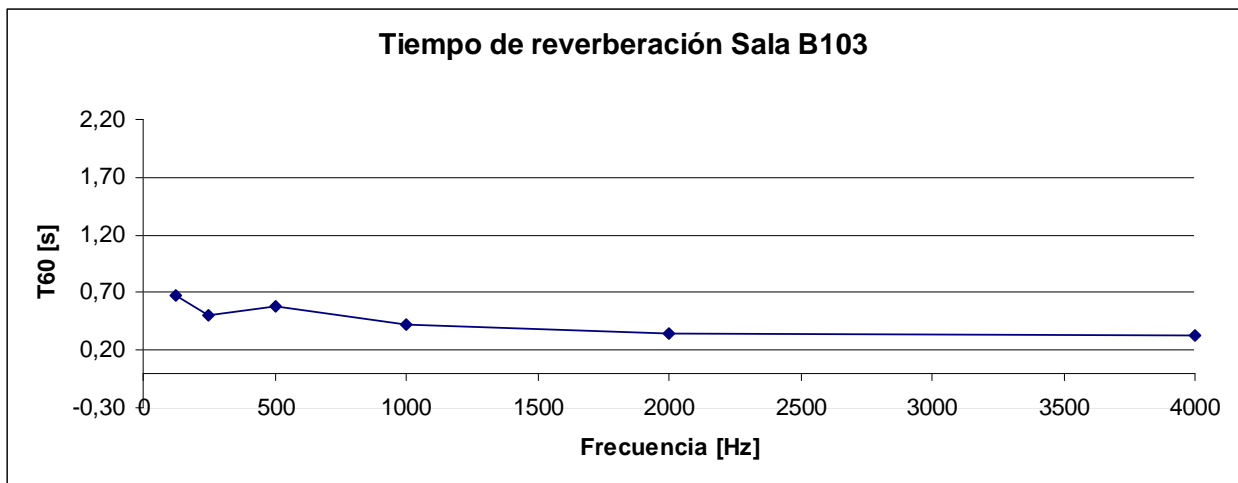
El volumen de esta sala es de 175 m^3 , y dadas las dimensiones de la sala y las características de sus materiales, es posible establecer teóricamente el tiempo de reverberación:

Tabla N°6.1. Tiempo de reverberación sala B 103.

Tiempo de Reverberación [s]	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
	0,67	0,50	0,58	0,43	0,35	0,34	0,45

En el siguiente gráfico es posible observar el Tiempo de reverberación en función de la octava de banda, donde se puede ver cómo va disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia.

Gráfico N°6.1. Tiempo de reverberación sala B 103



Según la tabla N° 2.1, el valor máximo debe ser 0,6 [s] y también según la OMS, por tanto esta sala no debiese presentar problemas de ecos.

6.2.1.2 Sala B112.

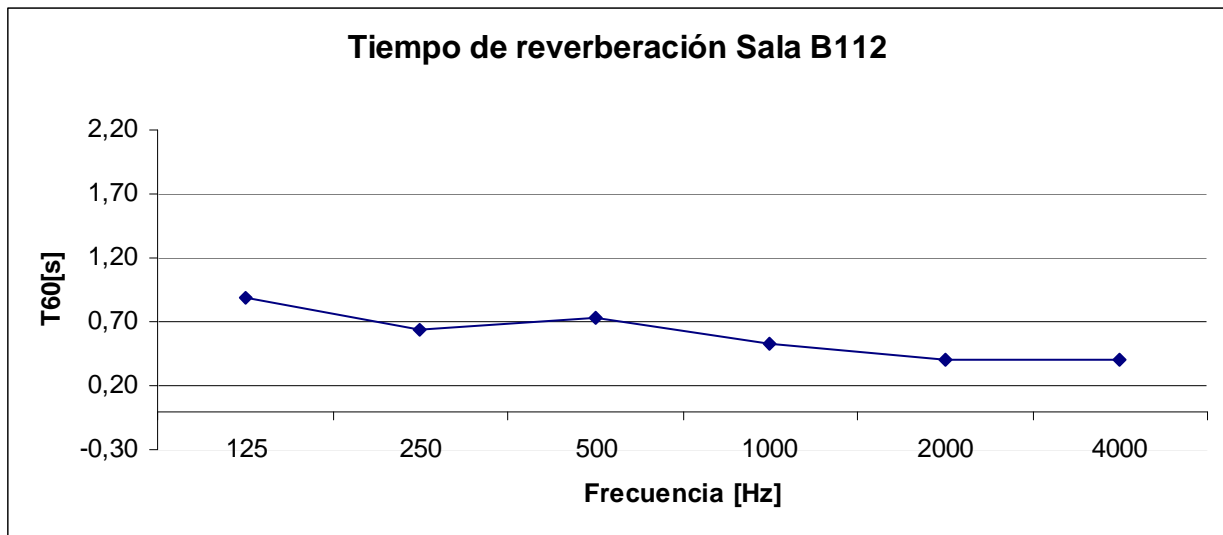
Esta sala tiene un volumen de 421 m³, y dadas las características entregadas en el capítulo 3, es posible calcular teóricamente el tiempo de reverberación para cada octava de banda:

Tabla N°6.2. Tiempo de reverberación sala B 112.

Tiempo de Reverberación [s]	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
	0,89	0,63	0,73	0,52	0,41	0,40	0,56

En el siguiente gráfico es posible observar el tiempo de reverberación en función de la octava de banda, donde se puede ver cómo va disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia.

Gráfico N°6.2. Tiempo de reverberación sala B 112.



Según la tabla N°2.1, el límite del tiempo de reverberación es de 0,7[s] y según la OMS es 0,6 [s] , por tanto esta sala no debiese presentar problemas de ecos.

6.2.1.3 Sala 15 Sur.

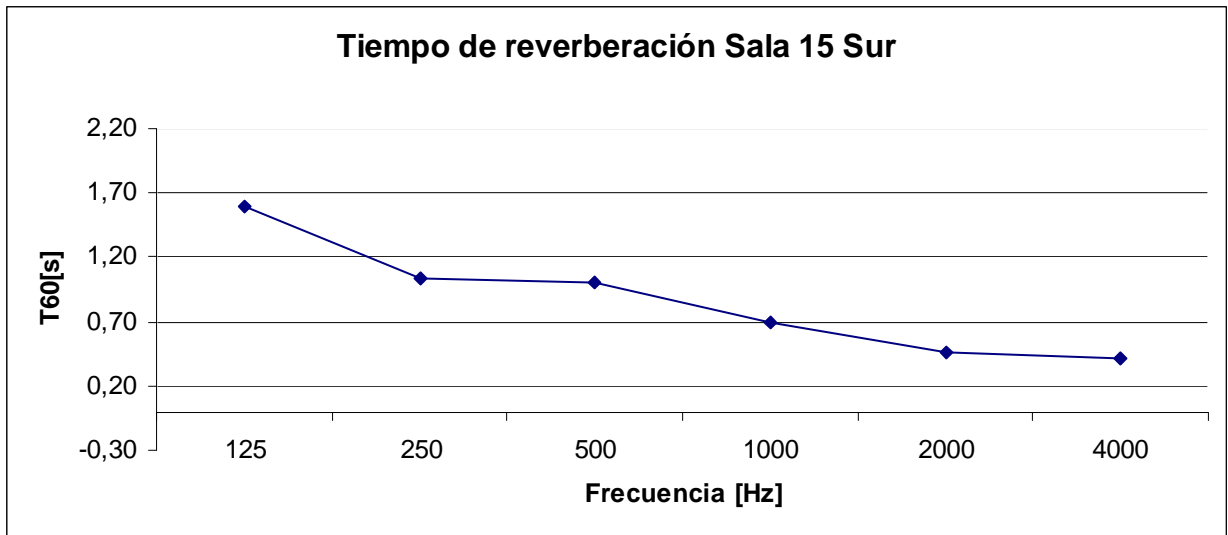
Dadas las dimensiones del aula en el capítulo 3, y con un volumen de 448 m^3 es posible establecer el tiempo de reverberación teórico de esta sala de clases para distintas octavas de bandas:

Tabla N° 6.3. Tiempo de reverberación sala 15 S.

Tiempo de Reverberación [s]	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
	1,61	1,03	1,00	0,69	0,45	0,41	0,71

En el siguiente gráfico es posible observar el tiempo de reverberación en función de la octava de banda, donde se puede ver cómo va disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia.

Gráfico N° 6.3. Tiempo de reverberación sala 15 S.



Según la tabla N° 2.1 el máximo valor para el tiempo de reverberación en una sala con este volumen es de 0,7 [s] y según la OMS es de 0,6 [s]. Por lo tanto, a pesara de estar en un valor límite, podría decirse que cumple con lo normado y no debiese presentar problemas de ecos.

6.2.1.4 Sala Q10.

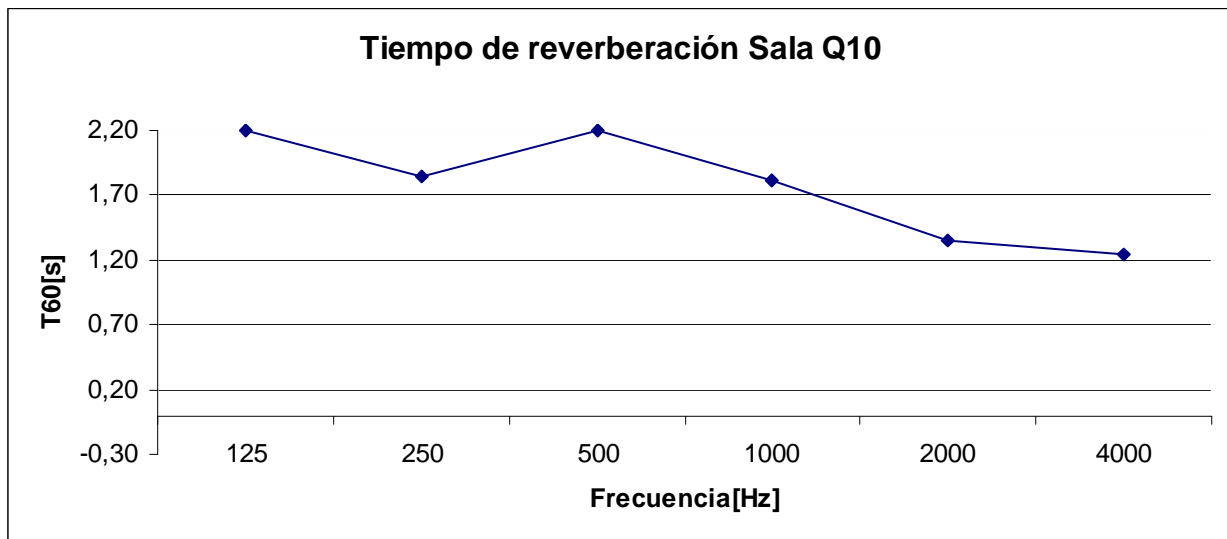
Esta sala tiene un volumen de 1223 m^3 , y dadas las características entregadas en el capítulo 3, es posible calcular teóricamente el tiempo de reverberación para cada octava de banda:

Tabla N° 6.4. Tiempo de reverberación sala Q10.

Tiempo de Reverberación [s]	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
	2,21	1,85	2,21	1,82	1,36	1,25	1,79

En el siguiente gráfico es posible observar el tiempo de reverberación en función de la octava de banda, donde se puede ver cómo va disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia.

Gráfico N° 6.4. Tiempo de reverberación sala Q10.



Según la tabla N° 2.1, el volumen de esta sala de clases no está dentro de los rangos para establecer un límite a su tiempo de reverberación. Sin embargo, según la OMS el límite es de $0,6 \text{ [s]}$, y claramente el valor teórico es muy alto para una sala de clases, por tanto tendría problemas de ecos.

6.2.1.5 Sala Q12.

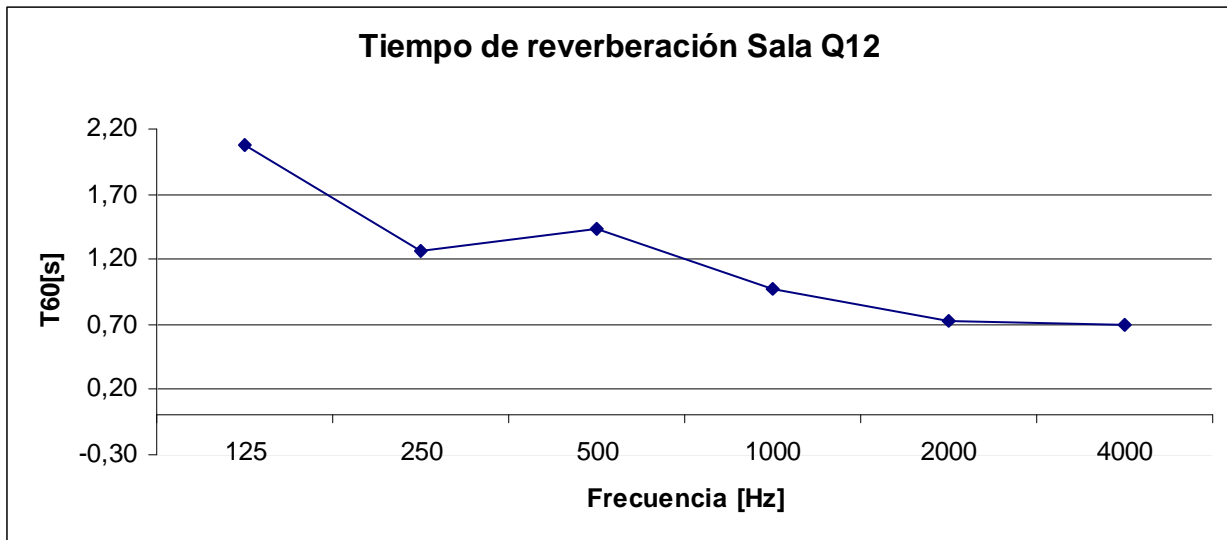
Esta sala tiene un volumen de 472 m^3 , y dadas las características entregadas en el capítulo 3, es posible establecer el tiempo de reverberación teórico de esta sala de clases para distintas octavas de bandas:

Tabla N°6.5. Tiempo de reverberación sala Q12.

Tiempo de Reverberación [s]	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
	2,07	1,26	1,43	0,97	0,72	0,70	1,04

En el siguiente gráfico es posible observar el tiempo de reverberación en función de la octava de banda, donde se puede ver cómo va disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia.

Gráfico N°6.5. Tiempo de reverberación sala Q12.



Según la tabla N°2.1 el máximo valor para el tiempo de reverberación en una sala con este volumen es de 0,7 [s] y según la OMS es de 0,6 [s]. Por lo tanto, teóricamente no cumple con lo normado y podrían existir problemas de ecos.

6.2.1.6 Sala G110.

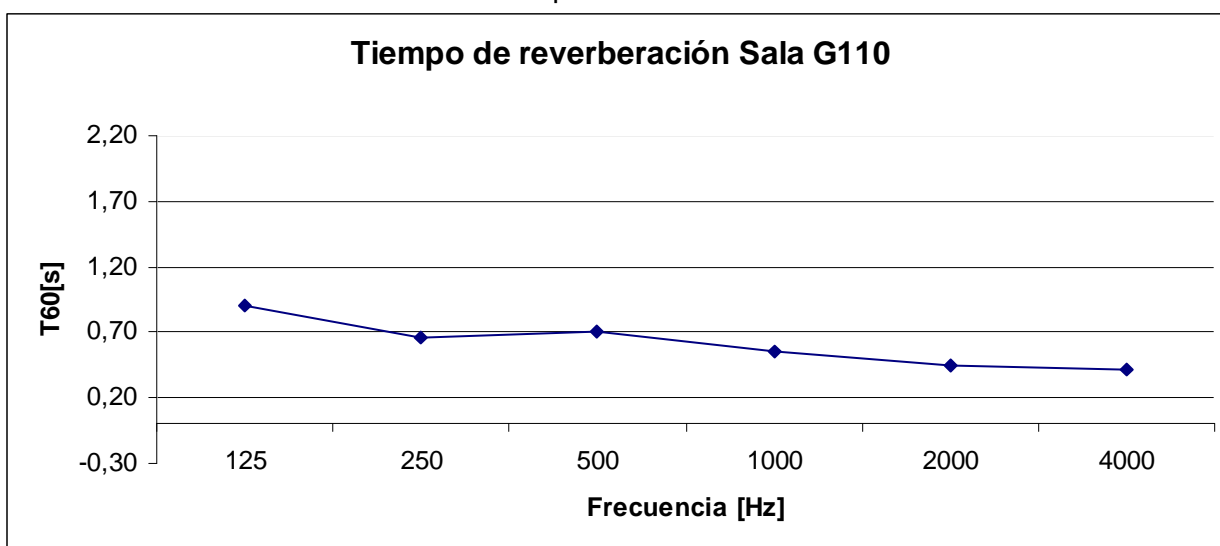
Dadas las dimensiones del aula en el capítulo 3, y con un volumen de 204 m^3 es posible establecer el tiempo de reverberación teórico de esta sala de clases para distintas octavas de bandas:

Tabla N° 6.6. Tiempo de reverberación sala G 110.

Tiempo de Reverberación [s]	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
	0,91	0,65	0,71	0,55	0,45	0,42	0,57

En el siguiente gráfico es posible observar el Tiempo de reverberación en función de la octava de banda, donde se puede ver cómo va disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia.

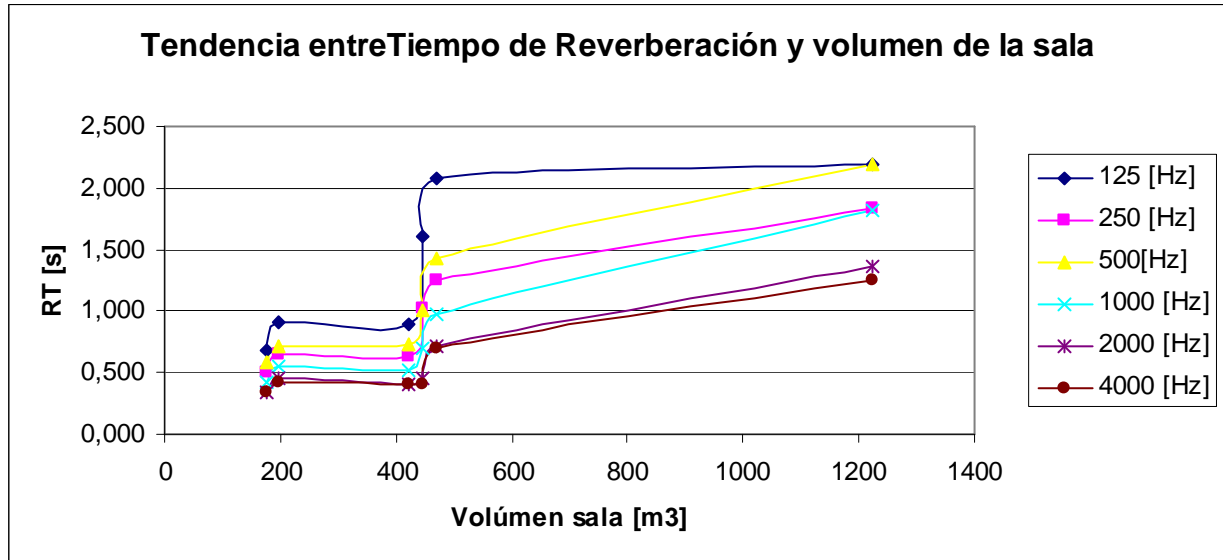
Gráfico N° 6.6. Tiempo de reverberación sala G110.



Según la tabla N° 2.1 el máximo valor para el tiempo de reverberación en una sala con este volumen es de 0,6 [s] y según la OMS es de 0,6 [s]. Por lo tanto, teóricamente cumple con lo normado, aunque este valor está en el límite de lo permitido, entonces en general no debiesen existir problemas de ecos.

Finalmente podemos representar los datos anteriores según el volumen de la sala, en donde observando el gráfico que se muestra a continuación, podemos comprobar cómo el tiempo de reverberación sigue una tendencia y aumenta junto con el volumen de la sala.

Gráfico N°6.7. Tendencia entre Tiempo de reverberación y volumen de las salas.



6.3 Caracterización según inteligibilidad de la palabra.

Existen dos formas de cálculo de la inteligibilidad. La primera consiste en realizar una serie de pruebas de audiencia en diferentes recintos basados en la emisión de un conjunto preestablecido de palabras sin significado, en la cual el individuo receptor toma nota de lo escuchado. Posteriormente se realiza una estadística de los resultados obtenidos.

Otra forma consiste en una ley matemática que a partir del conocimiento de una serie de parámetros acústicos del recinto; como el tiempo de reverberación y la diferencia de niveles de presión sonora, es posible conocer el porcentaje de pérdida de articulación de consonantes (%ALCons). Esta fórmula es la siguiente:

$$\%ALCons = \frac{200 \cdot r^2 RT^2}{VQ} \quad (\text{para: } r \leq 3,16 D_C) \quad \text{Fórmula N°6.1}$$

$$\%ALCons = 9 \cdot RT \quad (\text{para } r > 3,16 D_C) \quad \text{Fórmula N°6.2}$$

Donde:

r= distancia entre el emisor (orador) y el receptor (en m)

RT= tiempo de reverberación de la sala (en s)

V= volumen de la sala (en m³)

D_C=distancia crítica = $0,14 \cdot \sqrt{QR}$

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

$$R = \frac{S_{TOT} \cdot \bar{\alpha}}{1 - \alpha} = \text{Constante de la sala en m}^2$$

S_{TOT} = superficie total de la sala en m²

$\bar{\alpha}$ = coeficiente medio de absorción de la sala.

El %ALCons se calcula en la banda 2000 Hz, por tratarse de la banda de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

De la fórmula anterior, se puede desprender que:

- Cuanto más cerca esté situado el receptor de la fuente, menor será el valor de %ALCons, es decir, mayor inteligibilidad.
- Cuanto menor sea el RT, igualmente menor será el %ALCons, es decir, mayor inteligibilidad.
- El valor de %ALCons va aumentando a medida que el receptor se aleja de la fuente, hasta una distancia $r > 3,16 D_C$, esto significa que a partir de dicha distancia, la inteligibilidad de la palabra ya no empeora.

Según Antecedente bibliográfico N^º4, se detalla a continuación la valoración subjetiva de este índice:

Tabla N^º7. Valoración subjetiva del grado de inteligibilidad

% ALCons	Valoración subjetiva
1,4%-0%	Excelente
4,8%-1,6%	Buena
11,4%-5,3%	Aceptable
24,2%-12%	Pobre
46,5%-27%	Mala

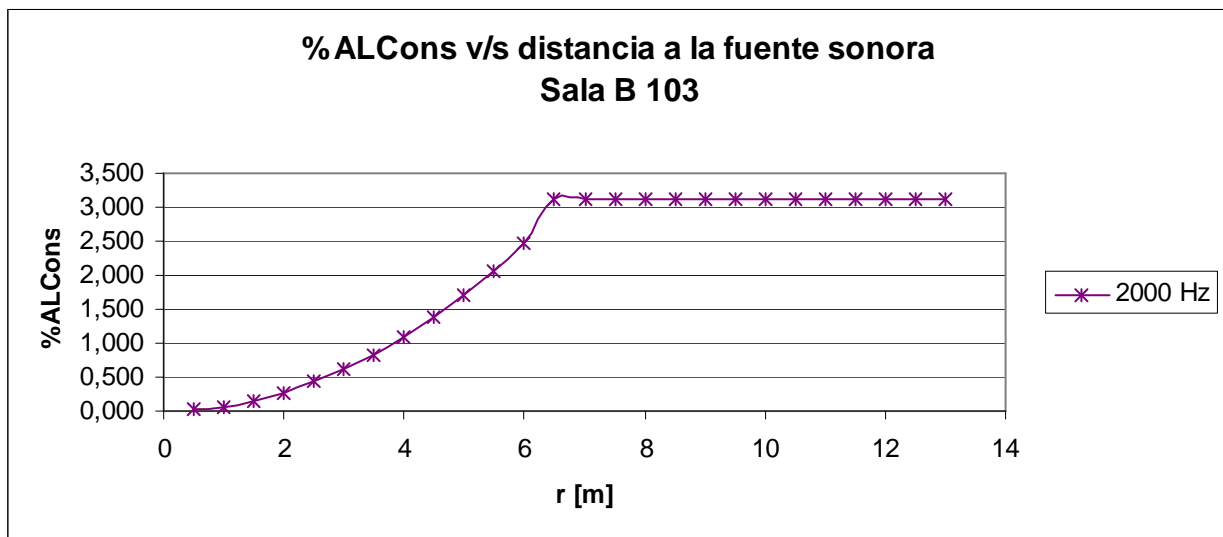
6.3.1 Cálculo del %ALCons en cada sala.

A continuación se detalla por sala de clases el cálculo del %ALCons con la fórmula anteriormente descrita:

6.3.1.1 Sala B103.

Como es posible observar en el gráfico N° 6.8 , a medida que se aleja la fuente sonora, mayor es el porcentaje de pérdida de inteligibilidad, teniendo un máximo a una distancia de 6,5 m y una pérdida de 3,1% , la cual puede ser clasificada como buena.

Gráfico N° 6.8. %ALCons. Sala B103.

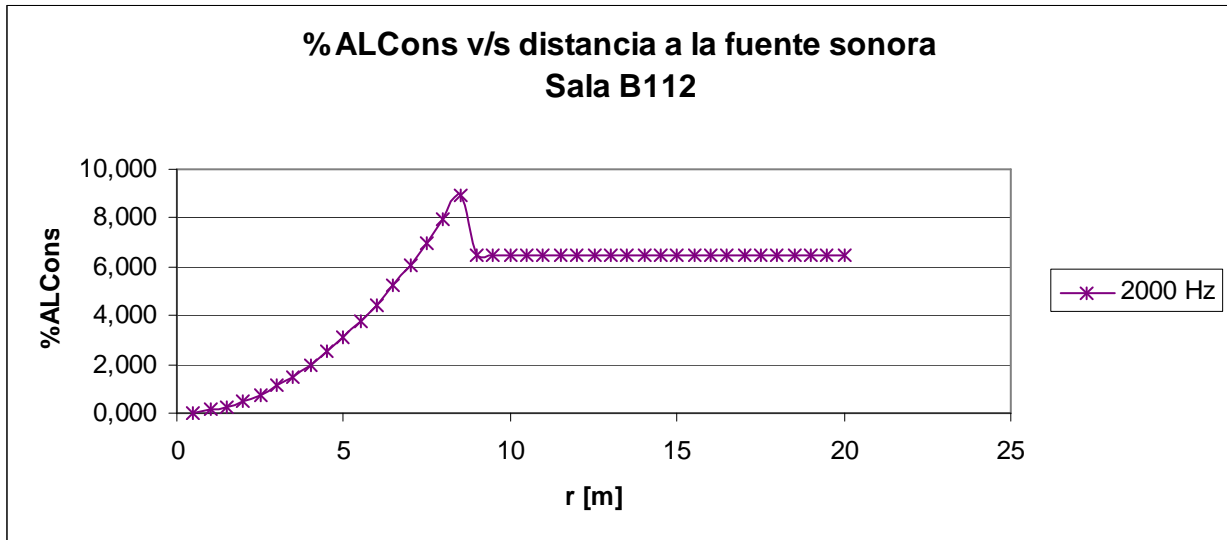


El tiempo de reverberación en la banda de 2000 Hz, calculado anteriormente, es de 0,45 [s], valor que está dentro del rango permitido, por lo cual es posible concluir que como el tiempo de reverberación influye en la inteligibilidad de la palabra, y existe por tanto un nivel bajo de reverberación, entonces en esta sala de clases, existe una buena inteligibilidad; esto que concuerda con el valor obtenido de %ALCons, y que se considera como bueno.

6.3.1.2 Sala B112.

Como es posible observar en el gráfico N°6.9 , a medida que se aleja la fuente sonora, mayor es el porcentaje de pérdida de inteligibilidad, teniendo un máximo a una distancia de 8,5 m y una pérdida de 3,7% , la cual puede ser clasificada como buena.

Gráfico N°6.9. %ALCons. Sala B112.

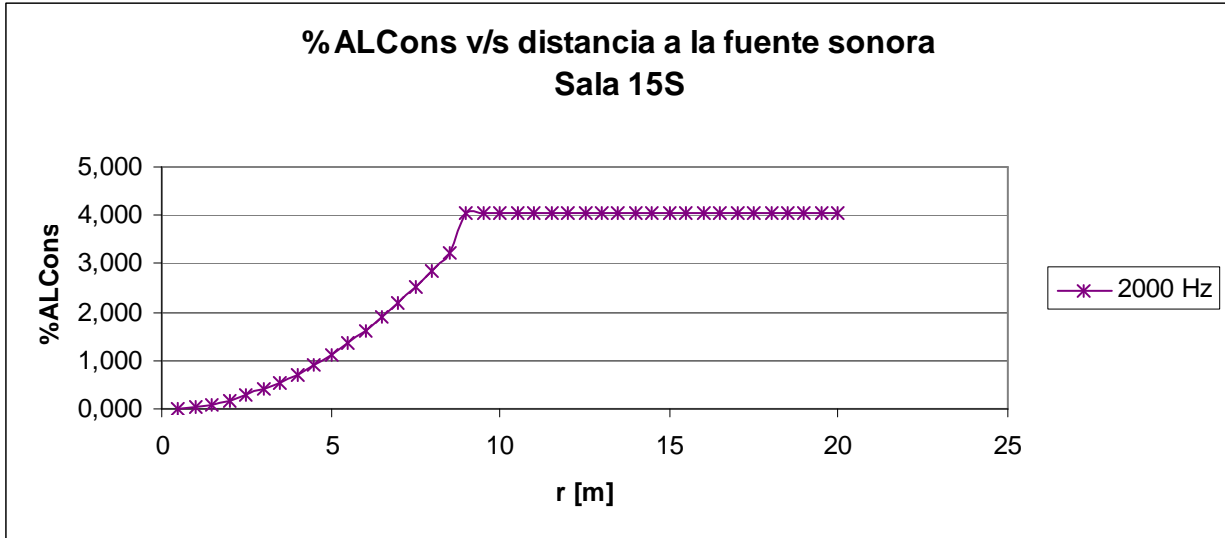


El tiempo de reverberación en la banda de 2000 Hz, calculado anteriormente, es de 0,56 [s], valor que está dentro por lo del rango permitido, por lo cual es posible concluir que como el tiempo de reverberación influye en la inteligibilidad de la palabra, y existe por tanto un nivel bajo de reverberación, entonces en esta sala de clases, existe una buena inteligibilidad; esto que concuerda con el valor obtenido de %ALCons, y que se considera como bueno.

6.3.1.3 Sala 15 Sur.

Como es posible observar en el gráfico N°6.10, a medida que se aleja la fuente sonora, mayor es el porcentaje de pérdida de inteligibilidad, teniendo un máximo a una distancia de 9 m y una pérdida de 4,0% , la cual puede ser clasificada como aceptable.

Gráfico N°6.10. %ALCons. Sala 15 Sur.

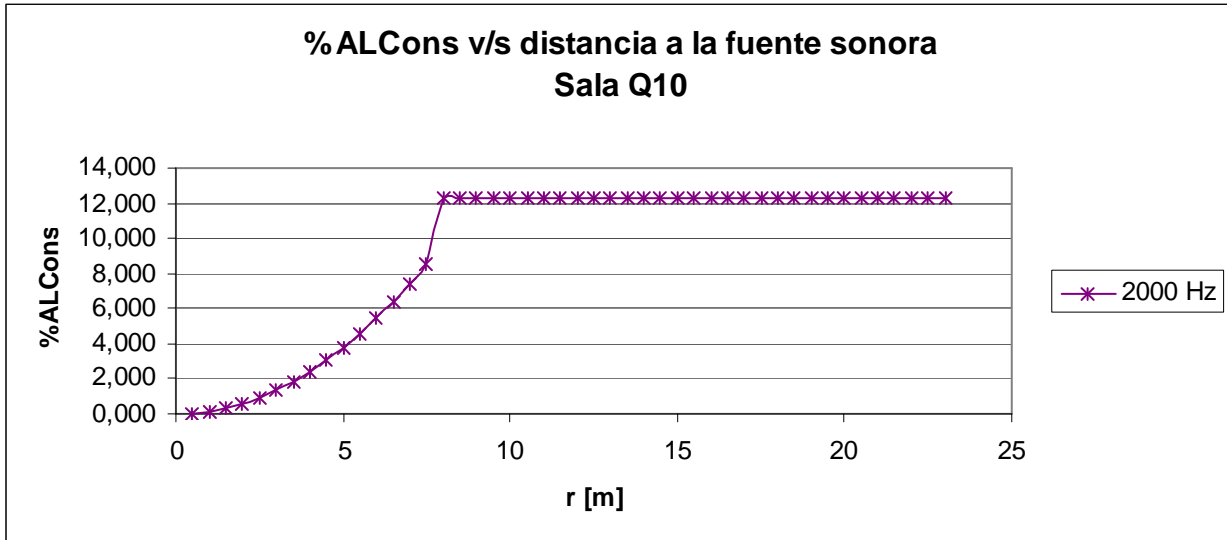


El tiempo de reverberación en la banda de 2000 Hz, calculado anteriormente, es de 0,71 [s], valor que está en el límite de lo permitido, por lo cual es posible concluir que como el tiempo de reverberación influye en la inteligibilidad de la palabra, y podrían existir leves problemas de pérdida de inteligibilidad, pero son considerados aceptables.

6.3.1.4 Sala Q10.

Como es posible observar en el gráfico N°6.11, a medida que se aleja la fuente sonora, mayor es el porcentaje de pérdida de inteligibilidad, teniendo un máximo a una distancia de 8 m y una pérdida de 12,2% , la cual puede ser clasificada como pobre.

Gráfico N°6.11. %ALCons. Sala Q10.

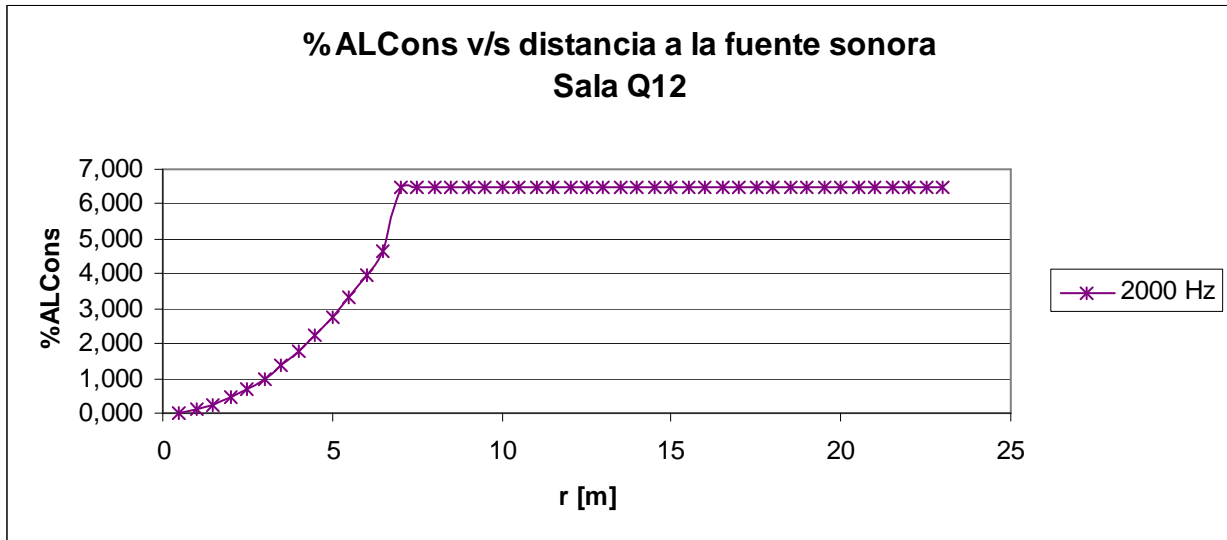


El tiempo de reverberación en la banda de 2000 Hz, calculado anteriormente, es de 1,79 [s], valor que sobrepasa en gran cantidad el límite de lo permitido, por lo cual es posible concluir que como el tiempo de reverberación influye en la inteligibilidad de la palabra, y existe un nivel bastante importante de reverberación, entonces en esta sala de clases, existe una mala inteligibilidad, esto concuerda con el valor obtenido de %ALCons, y que se considera como pobre.

6.3.1.5 Sala Q12.

Como es posible observar en el gráfico N°6.12, a medida que se aleja la fuente sonora, mayor es el porcentaje de pérdida de inteligibilidad, teniendo un máximo a una distancia de 7 m y una pérdida de 6,5%, la cual puede ser clasificada como aceptable.

Gráfico N° 6.12. %ALCons. Sala Q12.

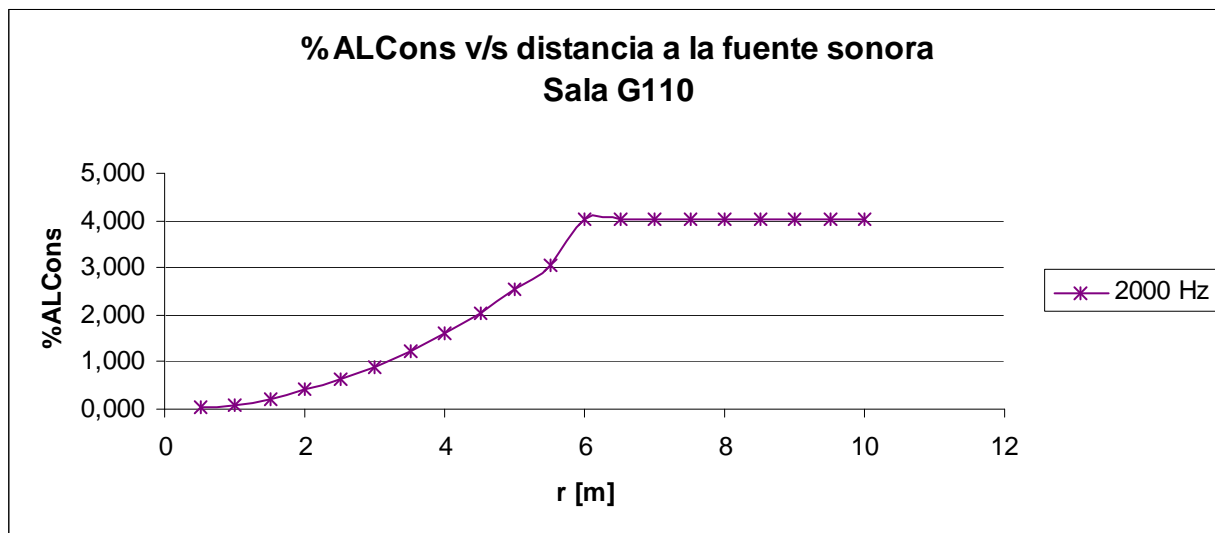


El tiempo de reverberación en la banda de 2000 Hz, calculado anteriormente, es de 1,04 [s], el cual es considerado como alto, por lo tanto es posible concluir que como el tiempo de reverberación influye en la inteligibilidad de la palabra, y existe un nivel importante de reverberación, entonces en esta sala existen problemas de pérdida de inteligibilidad, pero son considerados aceptables.

6.3.1.6 Sala G110.

Como es posible observar en el gráfico N°6.13, a medida que se aleja la fuente sonora, mayor es el porcentaje de pérdida de inteligibilidad, teniendo un máximo a una distancia de 6 m y una pérdida de 4% , la cual puede ser clasificada como buena.

Gráfico N°6.13. %ALCons. Sala G110.



El tiempo de reverberación en la banda de 2000 Hz, calculada anteriormente, es de 0,57 [s], valor que sobre el valor permitido, cual es posible concluir que como el tiempo de reverberación influye en la inteligibilidad de la palabra, y existe por tanto un nivel importante de reverberación, entonces en esta sala existen problemas de pérdida de inteligibilidad, pero son considerados aceptables.

Finalmente antes de realizar estudios prácticos en las salas de clases, tenemos caracterizadas según tiempo reverberación e inteligibilidad de la palabra cada unas de estas salas, y en resumen se tiene lo siguiente:

Tabla N°6.8. Caracterización según reverberación e inteligibilidad de la palabra.

Sala	T 60mid [s]	%ALCons maximo	Comentarios acondicionamiento acústico
B103	0,45	3,1	Bueno
G110	0,57	4,0	Bueno
B112	0,56	3,7	Bueno
15S	0,71	4,0	Aceptable
Q12	1,04	6,5	Aceptable
Q10	1,79	12,2	Pobre

7. MEDICIONES REALIZADAS A SALAS DE CLASES.

7.1 Equipos utilizados.

Para realizar todas las mediciones se utilizó un sonómetro, instrumento electrónico que permite medir sonidos bajo condiciones rigurosamente prefijadas, de manera que los resultados obtenidos sean siempre objetivos y repetitivos, dentro de unos márgenes de tolerancia conocidos. El sonómetro mide exclusivamente niveles de presión sonora. Su unidad de procesado permite realizar medidas globales, o bien por bandas de frecuencia, que es como se realizaron las mediciones en este trabajo de título.

Para medir ruido de fondo, se ubicó el micrófono del sonómetro (previamente calibrado) en una o dos posiciones dentro de la sala, como se explicará mas adelante, en ausencia de ruidos impulsivos e imprevistos.

Para medir tiempo de reverberación se ubicó una fuente acústica en distintas posiciones dentro de la sala (excluyendo puntos demasiado cerca de las paredes), siguiendo las recomendaciones de la norma UNE ISO 3382.



Figura N°7.1 . Sonómetro.

7.2 Descripción de las mediciones.

7.2.1 Sala B103.

Para medir tiempo de reverberación, en esta sala se realizaron 6 posiciones de micrófono para cada una de las 2 posiciones de caja. El objetivo es abarcar toda la sala. La fuente sonora emitió un ruido Rosa⁽¹³⁾ de 103 dB.

Además se midió ruido de fondo en un solo punto. La configuración de las posiciones instrumentales es como se muestra en la siguiente figura:

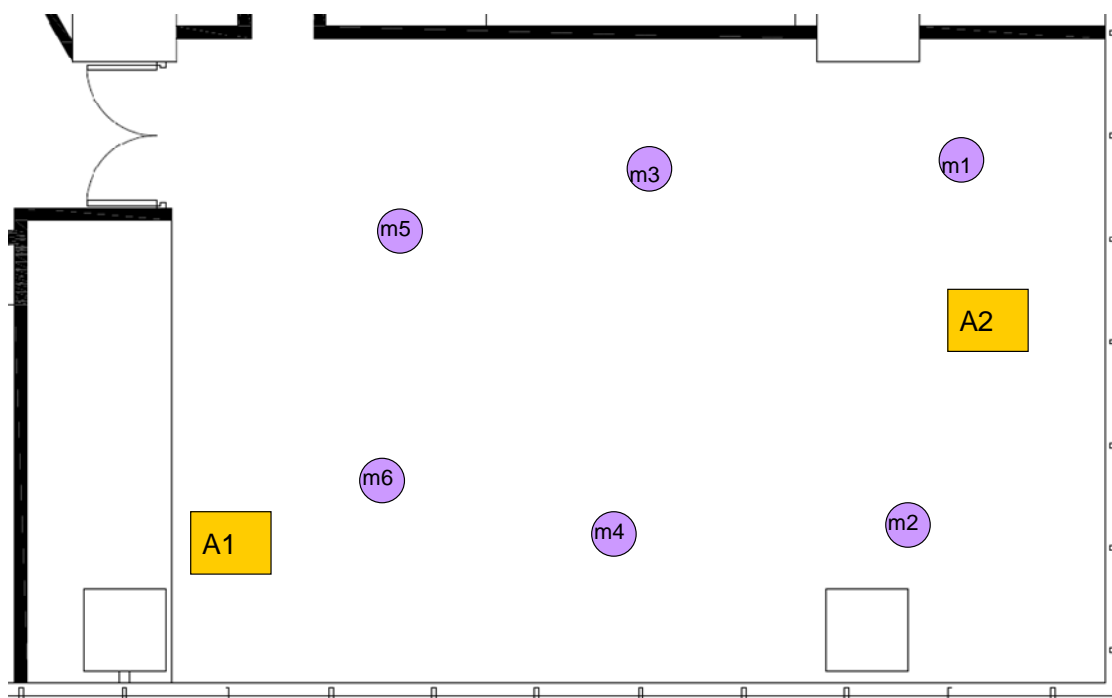


Figura N°7.2. Posiciones instrumentales sala B103.

7.2.2 Sala B112.

Para medir tiempo de reverberación, en esta sala se realizaron 6 posiciones de micrófono para cada una de las 2 posiciones de caja. El objetivo es abarcar toda la sala. La fuente sonora emitió un ruido Rosa de 108 dB.

Además se midió ruido de fondo en un solo punto. La configuración de las posiciones instrumentales es como se muestra en la siguiente figura:

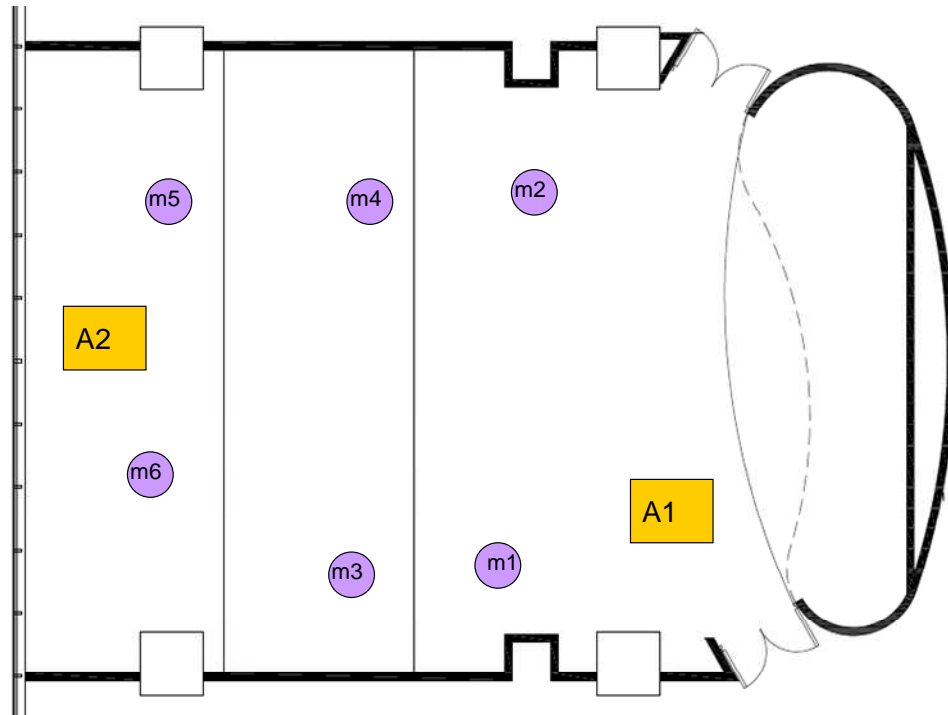


Figura N°7.3. Posiciones instrumentales sala B112.

7.2.3 Sala 15 Sur.

Para medir tiempo de reverberación, en esta sala se realizaron 4 posiciones de micrófono para cada una de las 3 posiciones de caja. El objetivo es abarcar toda la sala. La fuente sonora emitió un ruido Rosa de 105 dB para la primera posición de caja y 106 dB para el resto.

Además se midió ruido de fondo en dos puntos, uno en la zona central y otra a un costado de la ventana lateral, con la ventana abierta y cerrada. La configuración de las posiciones instrumentales es como se muestra en la siguiente figura:

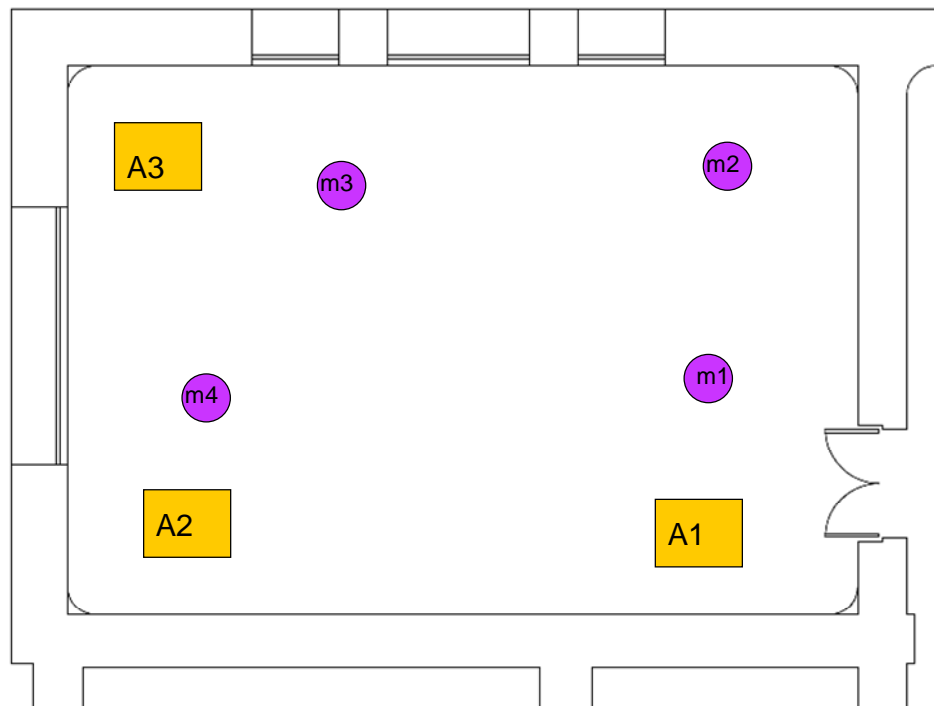


Figura N°7.4. Posiciones instrumentales sala 15 Sur.

7.2.4 Sala Q10.

Para medir tiempo de reverberación, en esta sala se realizaron 4 posiciones de micrófono para cada una de las 4 posiciones de caja. El objetivo es abarcar toda la sala. La fuente sonora emitió un ruido Rosa de 104 dB.

Además se midió ruido de fondo en un solo punto. La configuración de las posiciones instrumentales es como se muestra en la siguiente figura:

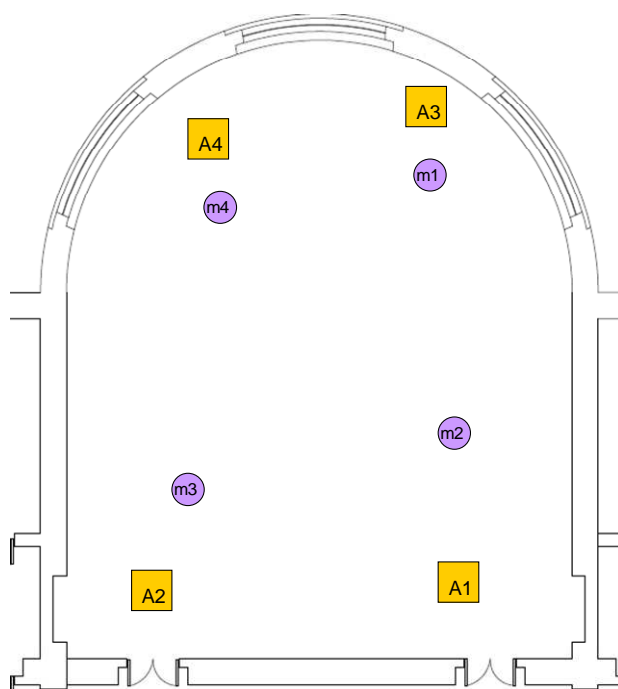


Figura N° 7.5. Posiciones instrumentales sala Q10.

7.2.5 Sala Q12.

Para medir tiempo de reverberación, en esta sala se realizaron 4 posiciones de micrófono para cada una de las 3 posiciones de caja. El objetivo es abarcar toda la sala. La fuente sonora emitió un ruido Rosa de 106 dB.

Además se midió ruido de fondo en un punto central de la sala cuando el extractor que se encuentra fuera de la sala estaba funcionando y otra medición cuando estaba apagado. También se midió el nivel de ruido que emite dicho extractor.

La configuración de las posiciones instrumentales es como se muestra en la siguiente figura:

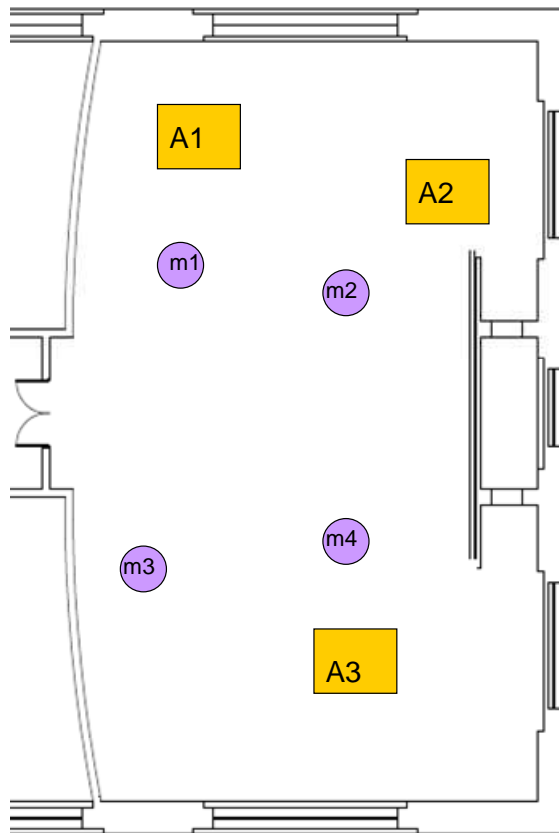


Figura N° 7.6. Posiciones instrumentales sala Q12.

7.2.6 Sala G110.

Para medir tiempo de reverberación, en esta sala se realizaron 6 posiciones de micrófono para cada una de las 2 posiciones de caja. El objetivo es abarcar toda la sala. La fuente sonora emitió un ruido Rosa de 104 dB.

Además se midió ruido de fondo en un solo punto. La configuración de las posiciones instrumentales es como se muestra en la siguiente figura:

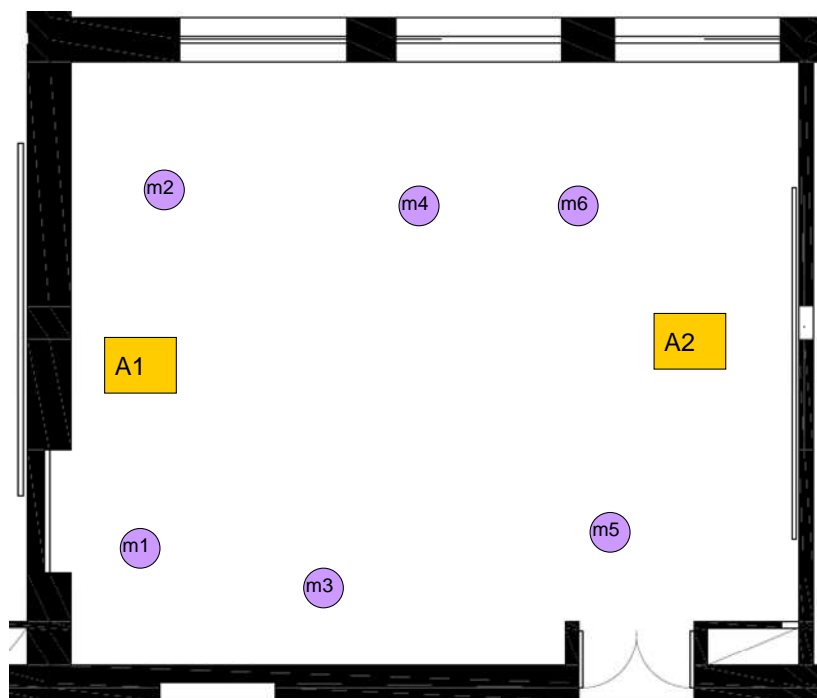


Figura N°7.7. Posiciones instrumentales sala G110.

7.3 Mediciones de tiempo de reverberación.

7.3.1 Sala B103.

Esta sala posee un volumen de 175 m³ por lo que según las distintas normas mencionadas en el capítulo n° 2.3, el valor límite del tiempo de reverberación debe ser:

Tabla N°7.1 .Valores límite para tiempo de reverberación.

	ANSI	OMS	HR.Protección frente al ruido
T ₆₀ [s]	0,6	0,6	0,5

Los resultados de las mediciones realizadas se muestran a continuación, en donde el valor característico del tiempo de reverberación para esta sala es el promedio para las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz.

Tabla N°7.2 .Valores del tiempo de reverberación medido.

Tiempo de Reverberación [s]												
posicion caja	A1						A2					
posicion microfono	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
125	0,84	0,64	0,92	0,66	0,88	1,16	0,94	0,97	0,83	0,79	0,44	0,92
250	0,54	1,00	0,56	0,51	0,58	0,53	0,66	0,73	0,85	0,58	0,62	0,65
500	0,35	0,47	0,41	0,58	0,59	0,47	0,58	0,68	0,55	0,57	0,43	0,40
1000	0,50	0,39	0,50	0,38	0,44	0,54	0,46	0,49	0,44	0,44	0,40	0,47
2000	0,62	0,45	0,55	0,61	0,61	0,55	0,49	0,49	0,47	0,53	0,40	0,38
4000	0,59	0,61	0,55	0,49	0,63	0,53	0,49	0,55	0,54	0,44	0,41	0,42
Promedio para 500, 1000 y 2000 Hz	0,49	0,43	0,49	0,52	0,54	0,52	0,51	0,55	0,48	0,51	0,41	0,42
	T60 med [s]											0,49

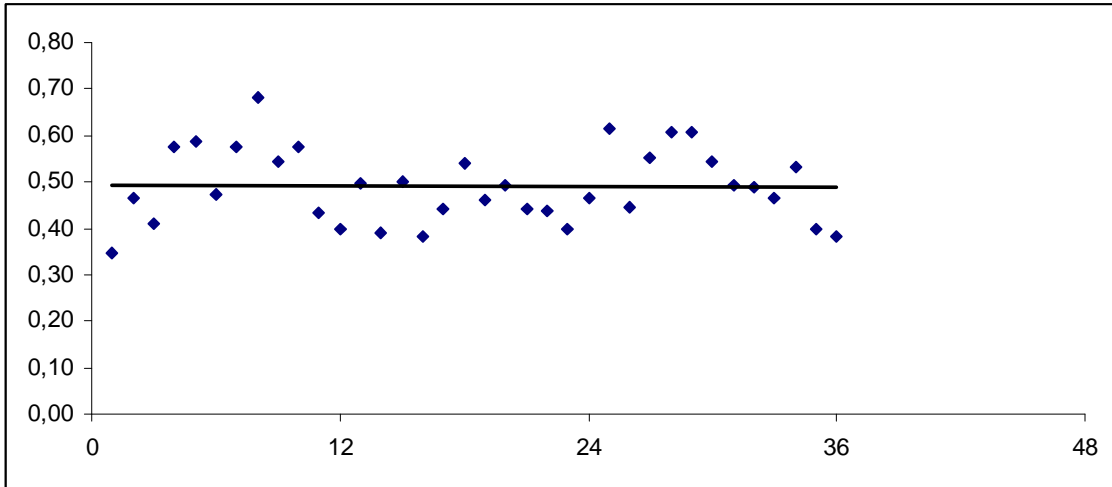
Como se puede observar, el valor del T₆₀ característico para esta sala es de 0,49[s] y está por debajo de lo estipulado en las diferentes normas y criterios de diseño. Por tanto en esta sala no existen problemas de ecos.

Realizando un análisis mas detallado a estos valores medidos:

Análisis estadístico Sala B103

Si graficamos los valores de T_{60} de las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz , ordenados de la siguiente forma: los T_{60} para la banda de 500 Hz son los primeros 12 puntos, luego de los puntos 13 a 24 son para la banda de 1000 Hz y el resto para la de 2000 Hz . Luego obtenemos lo siguiente:

Gráfico N°7.1. Distribución de los T_{60} .



Se puede observar que los puntos siguen una tendencia parecida, aunque se encuentran dispersos en torno a esta línea recta. Esta dispersión se debe a la baja difusión presente en la sala debido a la presencia de modos normales de vibración (esto se explicará mas adelante, capítulo n°8.1).

Haciendo un histograma de los puntos para todas las frecuencias (500, 1000 y 2000 Hz) podemos saber que puntos eliminar:

Gráfico N°7.2. Histograma.

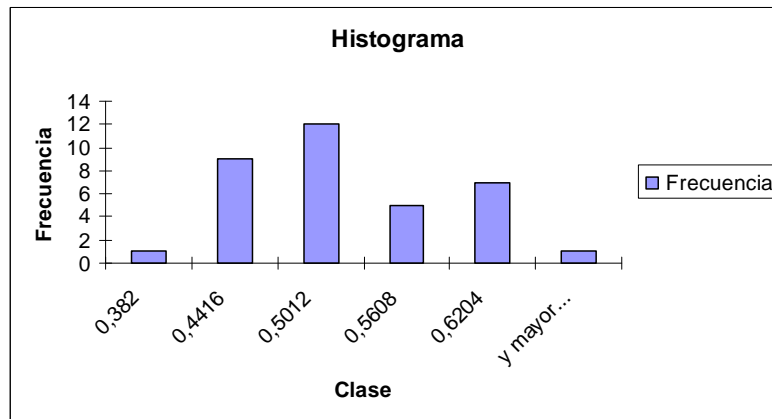
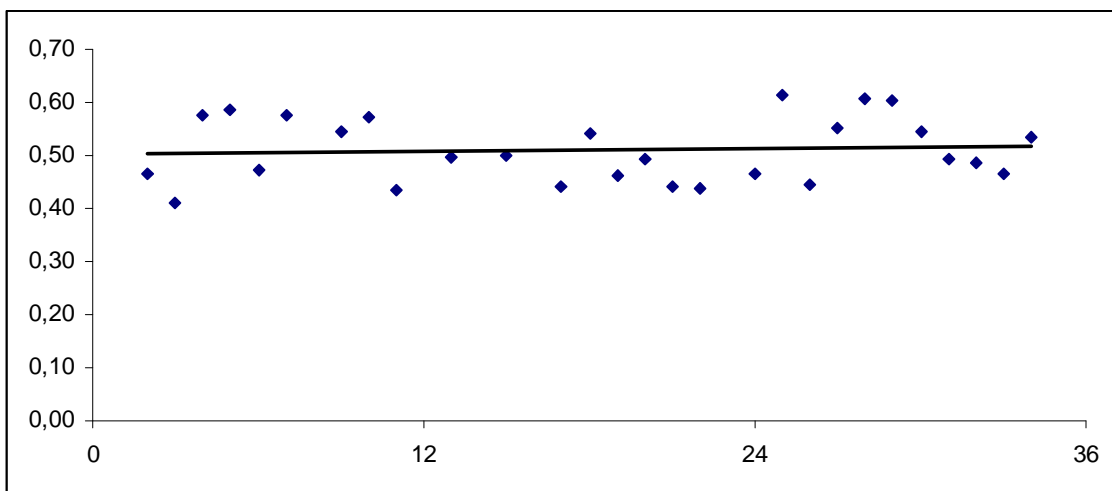


Tabla N°7.3. Frecuencia para valores de T_{60} .

<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>
0,38	1
0,44	9
0,50	12
0,56	5
0,62	7
y mayor...	1

Entonces quitando algunos puntos de tal forma de obtener una línea de tendencia mas clara, tenemos lo siguiente:

Gráfico N°7.3. Distribución de los T_{60} .



Y con estos datos:

Tabla N°7.4. Estadísticos.

<i>Estadísticos</i>	
Media	0,511
Error típico	0,012
Mediana	0,496
Moda	0,576
Desviación estándar	0,061
Varianza de la muestra	0,004

Entonces el valor del tiempo de reverberación varía del calculado anteriormente y corresponde a la media de los datos analizados, es decir:

$$T_{60} \text{ sala B103} = 0,51 \text{ [s]}$$

Pero de todas formas, este valor cumple con lo estipulado en distintas normativas y criterios de desempeño.

7.3.2 Sala B112.

Esta sala posee un volumen de 421 m³ por lo que según las distintas normas y criterios mencionados en el capítulo n°2.3, el valor límite del tiempo de reverberación debe ser:

Tabla N°7.5 .Valores límite para tiempo de reverberación.

	ANSI	OMS	HR.Protección frente al ruido
T ₆₀ [s]	0,7	0,6	0,5

Los resultados de las mediciones realizadas se muestran a continuación, en donde el valor característico del tiempo de reverberación para esta sala es el promedio para las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz.

Tabla N°7.6 .Valores del tiempo de reverberación medido.

Tiempo de Reverberación [s]													
posicion amplificador	A1						A2						
posicion caja	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
125	0,74	1,12	0,85	0,91	0,86	1,20	0,96	0,83	0,69	0,82	0,82	0,60	
250	0,66	0,86	0,72	0,63	0,64	0,62	0,79	0,77	0,72	0,52	0,63	0,71	
500	0,44	0,51	0,48	0,44	0,51	0,44	0,54	0,42	0,60	0,57	0,50	0,66	
1000	0,45	0,60	0,48	0,41	0,51	0,56	0,42	0,47	0,44	0,45	0,44	0,45	
2000	0,43	0,52	0,56	0,65	0,64	0,73	0,67	0,47	0,45	0,45	0,45	0,55	
4000	0,37	0,49	0,67	0,51	0,65	0,56	0,43	0,47	0,61	0,58	0,58	0,27	
Promedio para 500, 1000 y 2000 Hz	0,44	0,54	0,50	0,50	0,55	0,58	0,54	0,45	0,49	0,49	0,46	0,55	
													T60 prom[s] 0,51

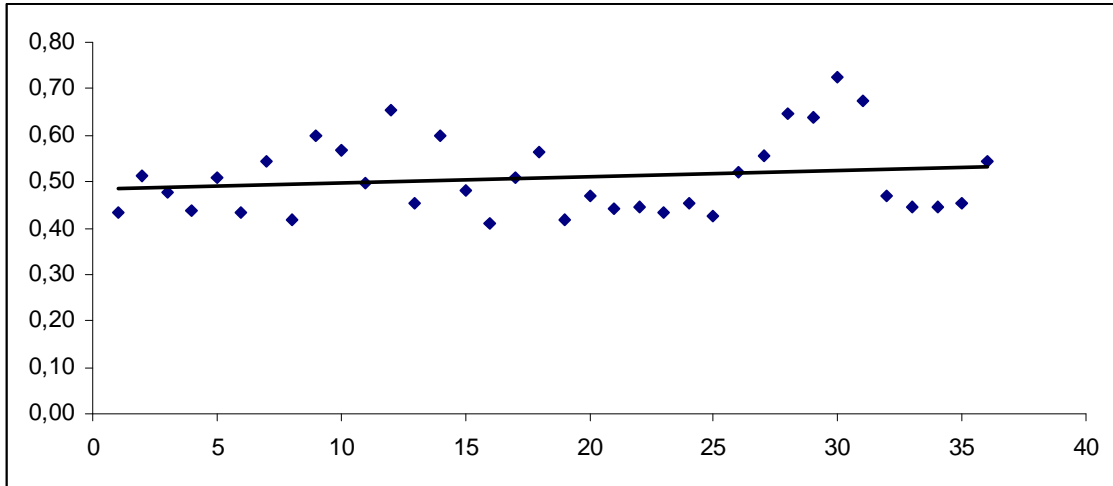
Como se puede observar, el valor del T₆₀ característico para esta sala es de 0,51[s] y está por debajo de lo estipulado en las diferentes normas y criterios de diseño, salvo en la normativa española HR de protección frente al ruido en donde el valor medido se encuentra en el límite de lo permitido. Por tanto en esta sala no existen problemas de ecos.

Realizando un análisis mas detallado a estos valores medidos:

Análisis estadístico Sala B112

Si graficamos los valores de T₆₀ de las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz , ordenados de la siguiente forma: los T₆₀ para la banda de 500 Hz son los primeros 12 puntos, luego de los puntos 13 a 24 son para la banda de 1000 Hz y el resto para la de 2000 Hz . Luego obtenemos lo siguiente:

Gráfico N°7.4. Distribución de los T_{60} .



Se puede observar que los puntos siguen una tendencia parecida, aunque se encuentran dispersos en torno a esta línea recta. Esta dispersión se debe a la baja difusión presente en la sala debido a la presencia de modos normales de vibración (esto se explicará mas adelante, capítulo n°8.1).

Haciendo un histograma de los puntos para todas las frecuencias (500, 1000 y 2000 Hz) podemos saber que puntos eliminar:

Gráfico N°7.5. Histograma.

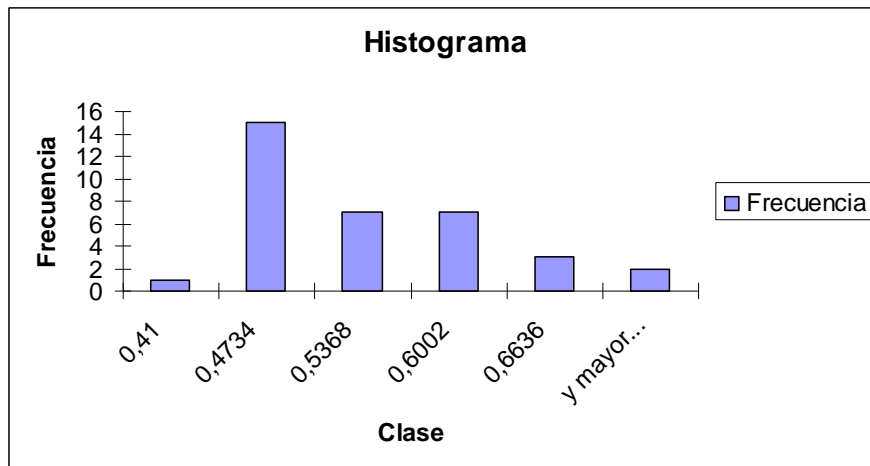
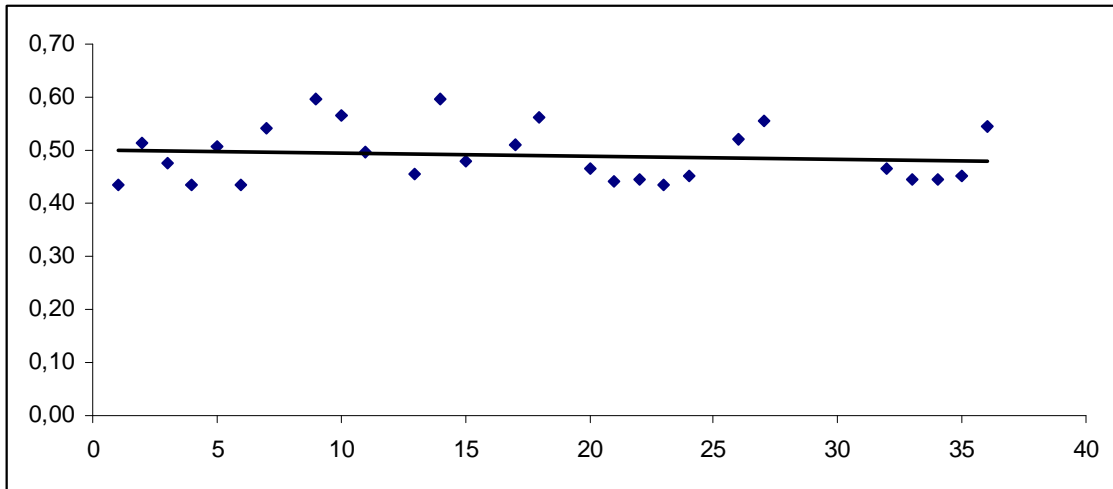


Tabla N°7.7. Frecuencia para valores de T_{60} .

<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>
0,41	1
0,47	15
0,54	7
0,60	7
0,66	3
y mayor...	2

Entonces quitando algunos puntos de tal forma de obtener una línea de tendencia mas clara, tenemos lo siguiente:

Gráfico N°7.6. Distribución de los T_{60} .



Y con estos datos:

Tabla N°7.8. Estadísticos.

<i>Estadísticos</i>	
Media	0,49
Error típico	0,01
Mediana	0,48
Moda	0,44
Desviación estándar	0,05
Varianza de la muestra	0,00

Entonces el valor del tiempo de reverberación varía del calculado anteriormente y corresponde a la media de los datos analizados, es decir:

$$T_{60} \text{ sala B112} = 0,49 \text{ [s]}$$

7.3.3 Sala 15 Sur.

Esta sala posee un volumen de 448 m³ por lo que según las distintas normas y criterios mencionados en el capítulo n°2.3, el valor límite del tiempo de reverberación debe ser:

Tabla N°7.9 .Valores límite para tiempo de reverberación.

	ANSI	OMS	HR.Protección frente al ruido
T ₆₀ [s]	0,7	0,6	0,5

Los resultados de las mediciones realizadas se muestran a continuación, en donde el valor característico del tiempo de reverberación para esta sala es el promedio para las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz.

Tabla N°7.10 .Valores del tiempo de reverberación medido.

Tiempo de Reverberación [s]												
posicion amplificador	A1				A2				A3			
posicion microfono	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
125	1,03	1,29	1,45	0,98	1,30	1,13	1,10	1,22	1,40	1,22	1,32	1,06
250	0,40	0,95	1,02	0,89	0,61	0,53	0,67	0,63	1,15	0,49	0,71	0,72
500	0,68	0,57	0,52	0,58	0,68	0,61	0,49	0,58	0,65	0,54	0,45	0,54
1000	0,50	0,40	0,48	0,58	0,49	0,58	0,59	0,44	0,39	0,52	0,47	0,51
2000	0,44	0,43	0,49	0,60	0,36	0,50	0,45	0,50	0,44	0,45	0,36	0,49
4000	0,45	0,37	0,41	0,48	0,43	0,51	0,42	0,41	0,36	0,40	0,47	0,40
Promedio para 500, 1000 y 2000 Hz	0,54	0,47	0,50	0,59	0,51	0,57	0,51	0,50	0,49	0,51	0,43	0,52
										T60 prom[s]	0,51	

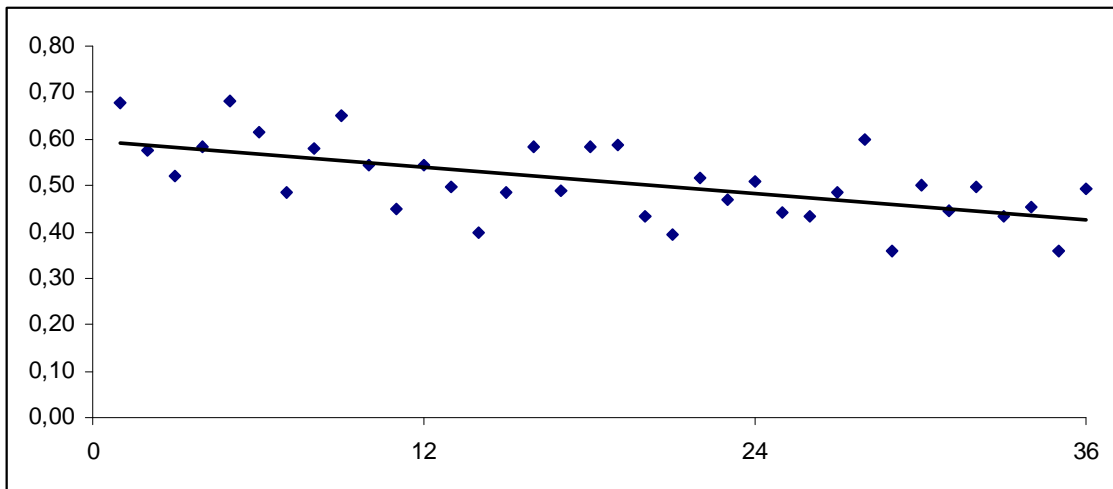
Como se puede observar, el valor del T₆₀ característico para esta sala es de 0,51[s] y está por debajo de lo estipulado en las diferentes normas y criterios de diseño, salvo en la normativa española HR de protección frente al ruido en donde el valor medido se encuentra en el límite de lo permitido. Por tanto en esta sala no existen problemas de ecos.

Realizando un análisis mas detallado a estos valores medidos:

Análisis estadístico Sala 15 Sur.

Si graficamos los valores de T₆₀ de las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz , ordenados de la siguiente forma: los T₆₀ para la banda de 500 Hz son los primeros 12 puntos, luego de los puntos 13 a 24 son para la banda de 1000 Hz y el resto para la de 2000 Hz . Luego obtenemos lo siguiente:

Gráfico N°7.7. Distribución de los T_{60} .

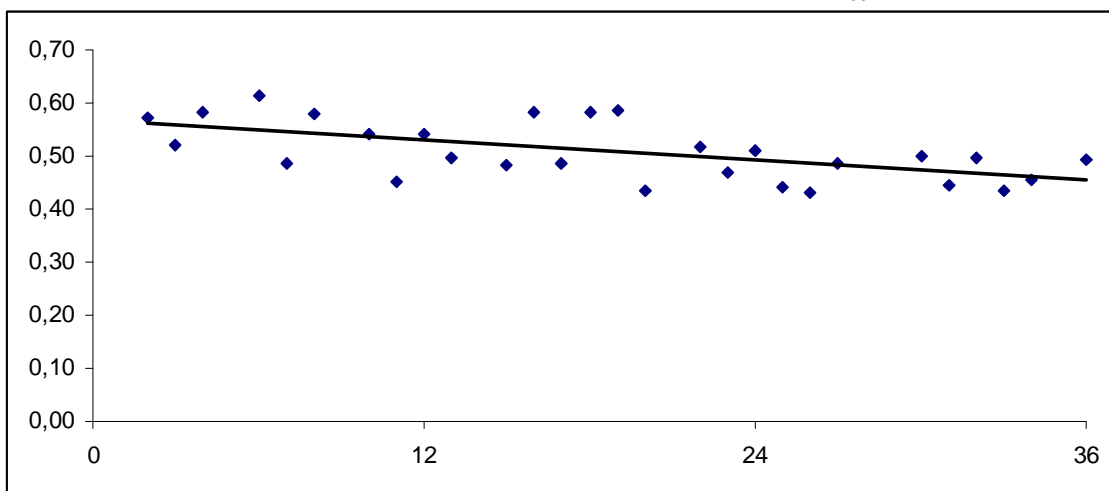


Se puede observar que los puntos siguen una tendencia parecida, aunque se encuentran dispersos en torno a esta línea recta. Esta dispersión se debe a la baja difusión presente en la sala debido a la presencia de modos normales de vibración (esto se explicará mas adelante, capítulo n°8.1).

Como los puntos siguen una tendencia decreciente, no se puede hacer un histograma.

Entonces quitando algunos puntos de tal forma de obtener una línea de tendencia mas clara, tenemos lo siguiente:

Gráfico N°7.8. Distribución de los T_{60} .



Y con estos datos

Tabla N°7.11. Estadísticos.

Estadísticos	
Media	0,51
Error típico	0,01
Mediana	0,50
Moda	0,49
Desviación estándar	0,05
Varianza de la muestra	0,51

Entonces el valor del tiempo de reverberación no varía con respecto del calculado anteriormente y corresponde a la media de los datos analizados, es decir:

$$T_{60} \text{ sala 15 Sur} = 0,51 \text{ [s]}$$

7.3.4 Sala Q10.

Esta sala posee un volumen de 1223 m³ por lo que según las distintas normas y criterios mencionados en el capítulo n° 2.3, el valor límite del tiempo de reverberación debe ser:

Tabla N°7.12 .Valores límite para tiempo de reverberación.

	ANSI	OMS	HR.Protección frente al ruido
T ₆₀ [S]	-	0,6	0,5

Los resultados de las mediciones realizadas se muestran a continuación, en donde el valor característico del tiempo de reverberación para esta sala es el promedio para las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz.

Tabla N°7.13 .Valores del tiempo de reverberación medido.

Tiempo de Reverberación [s]																	
posicion caja	A1				A2				A3				A4				
posicion microfono	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
125	2,56	2,97	2,50	2,84	2,59	3,04	3,02	2,49	3,10	3,35	2,85	2,56	2,88	2,26	2,61	2,26	
250	2,41	2,56	2,77	2,92	2,98	2,23	2,59	2,12	2,99	2,10	2,91	2,57	2,43	3,13	2,53	2,06	
500	2,12	2,04	2,22	2,18	1,85	2,00	1,73	2,09	2,13	2,19	1,54	1,82	1,59	2,11	1,90	1,21	
1000	1,25	1,43	1,39	1,47	1,54	1,52	1,57	1,33	1,56	1,46	1,33	1,53	1,31	1,36	1,56	1,44	
2000	1,54	1,47	1,54	1,64	1,54	1,41	1,57	1,43	1,56	1,58	1,50	1,50	1,40	1,45	1,39	1,42	
4000	1,24	1,18	1,28	1,25	1,12	1,20	1,22	1,24	1,27	1,28	1,21	1,24	1,22	1,25	1,29	1,34	
Promedio para 500, 1000 y 2000 Hz	1,64	1,65	1,72	1,76	1,64	1,64	1,62	1,62	1,75	1,74	1,46	1,62	1,44	1,64	1,62	1,36	
																T60 prom[s]	1,59

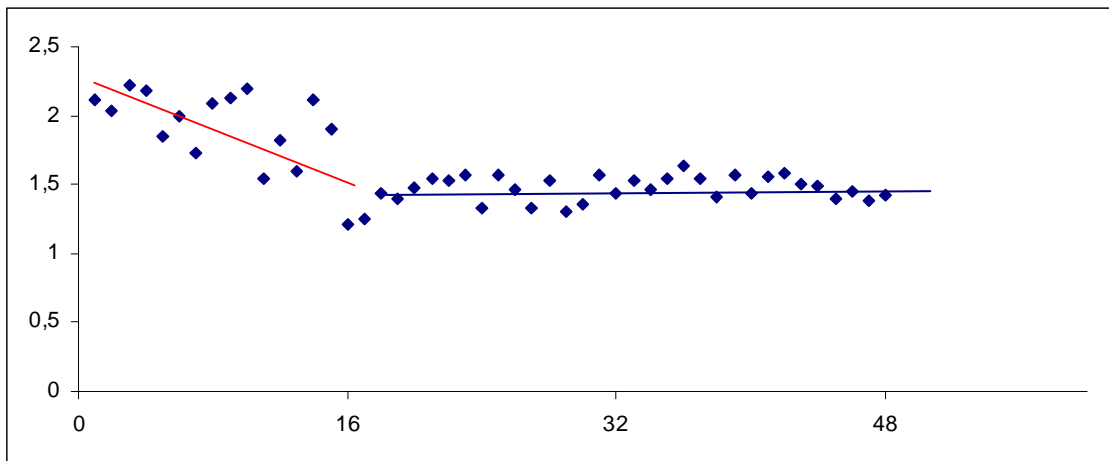
Como se puede observar, el valor del T_{60} característico para esta sala es de 1,59[s] y está muy por encima de lo estipulado en las diferentes normas y criterios de diseño, sólo la normativa ANSI no tiene un límite para este volumen de sala, ya que en este caso dice que se debe estudiar la materialidad y geometría del recinto (capítulo 6.1). Por tanto en esta sala existen claramente problemas de ecos.

Realizando un análisis mas detallado a estos valores medidos:

Análisis estadístico Sala Q10

Si graficamos los valores de T_{60} de las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz , ordenados de la siguiente forma: los T_{60} para la banda de 500 Hz son los primeros 16 puntos, luego de los puntos 17 a 32 son para la banda de 1000 Hz y el resto para la de 2000 Hz . Luego obtenemos lo siguiente:

Gráfico N°7.9. Distribución de los T_{60} .

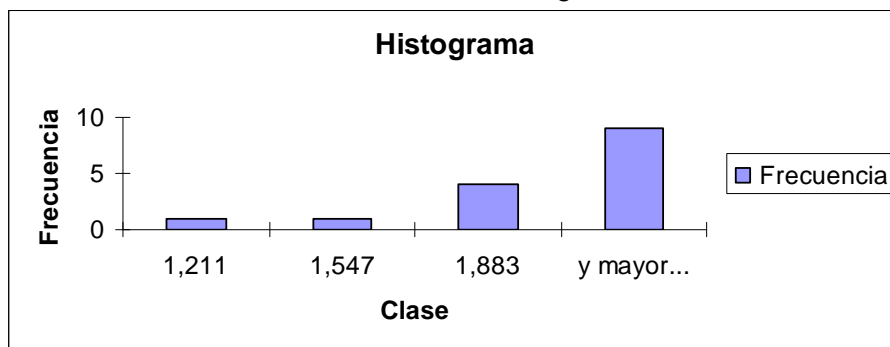


En donde los primeros puntos de la izquierda corresponden a los T_{60} de la banda de 500 Hz y se puede ver claramente que estos valores son mayores y que se encuentran dispersos. Esta dispersión se debe a la baja difusión presente en la sala debido a la presencia de modos normales de vibración (esto se explicará mas adelante, capítulo n° 8.1).

En las frecuencias de 1000 y 2000 Hz los valores de los tiempos de reverberación tienden a ser constantes.

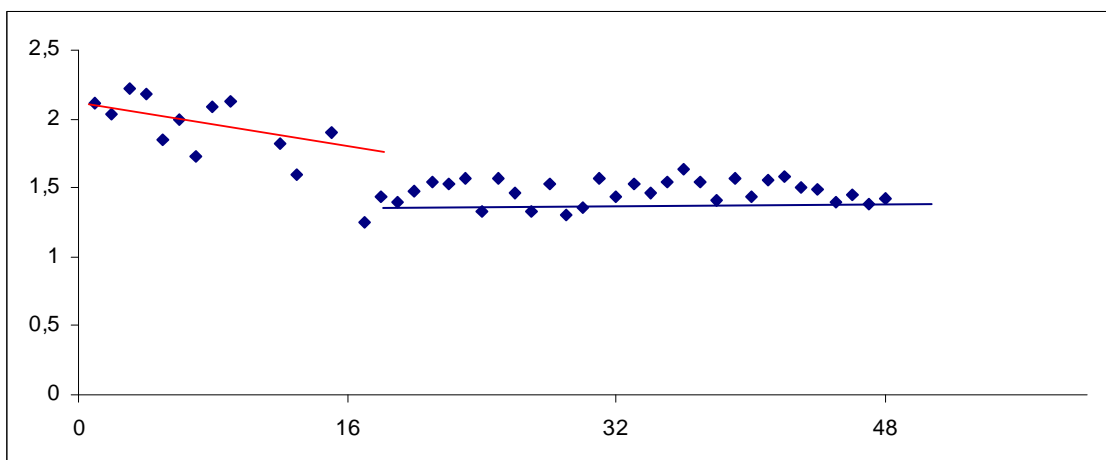
Haciendo un histograma de los puntos de la frecuencia de 500Hz podemos saber que puntos eliminar:

Gráfico N°7.10. Histograma.



Entonces quitando algunos puntos de la banda de 500Hz de tal forma de obtener una línea de tendencia más clara:

Gráfico N°7.11. Distribución de los T_{60} .



Y con estos datos

Tabla N°7.14. Estadísticos.

<i>Estadísticos</i>	
Media	1,59
Error típico	0,04
Mediana	1,54
Moda	1,43
Desviación estándar	0,25
Varianza de la muestra	0,06

Entonces el valor del tiempo de reverberación no varía del calculado anteriormente y corresponde a la media de los datos analizados, es decir:

$$T_{60} \text{ sala Q10} = 1,59 \text{ [s]}$$

Ahora si descartamos los valores de la banda de 500 Hz:

Tabla N°7.15. Estadísticos.

<i>Estadísticos</i>	
Media	1,48
Error típico	0,02
Mediana	1,47
Moda	1,43
Desviación estándar	0,09
Varianza de la muestra	0,01

El valor del tiempo de reverberación sería:

$$T_{60} \text{ sala Q10} = 1,48 \text{ [s]}$$

A pesar de mejorar el tiempo de reverberación, eliminando la banda de 500 Hz por ser mas inestable, de todas formas se obtiene un valor para el tiempo de reverberación mayor que lo dispuesto en las distintas normativas.

7.3.5 Sala Q12.

Esta sala posee un volumen de 472 m³ por lo que según las distintas normas y criterios mencionados en el capítulo n°2.3, el valor límite del tiempo de reverberación debe ser:

Tabla N°7.16 .Valores límite para tiempo de reverberación.

	ANSI	OMS	HR.Protección frente al ruido
T ₆₀ [s]	0,7	0,6	0,5

Los resultados de las mediciones realizadas se muestran a continuación, en donde el valor característico del tiempo de reverberación para esta sala es el promedio para las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz.

Tabla N°7.17 .Valores del tiempo de reverberación medido.

Tiempo de Reverberación [s]													
posicion amplificador	A1				A2				A3				
posicion microfono	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
125	1,89	1,31	1,67	1,42	1,79	1,53	1,93	1,53	2,09	1,69	1,80	1,32	
250	1,84	1,22	1,74	1,54	1,27	1,48	1,36	1,76	1,75	1,69	1,33	1,66	
500	1,59	1,19	1,37	1,63	1,62	1,41	1,38	1,50	1,64	1,52	1,33	1,31	
1000	1,23	1,20	1,35	1,26	1,48	1,29	1,25	1,09	1,13	1,15	1,46	1,13	
2000	1,00	0,82	0,84	1,04	0,82	0,80	1,11	1,21	0,97	0,97	0,98	0,89	
4000	0,51	0,69	0,77	0,77	0,73	0,67	0,76	0,77	0,87	0,80	0,66	0,72	
Promedio para 500, 1000 y 2000	1,27	1,07	1,19	1,31	1,31	1,17	1,25	1,27	1,25	1,21	1,25	1,11	
												T60 prom[s]	1,22

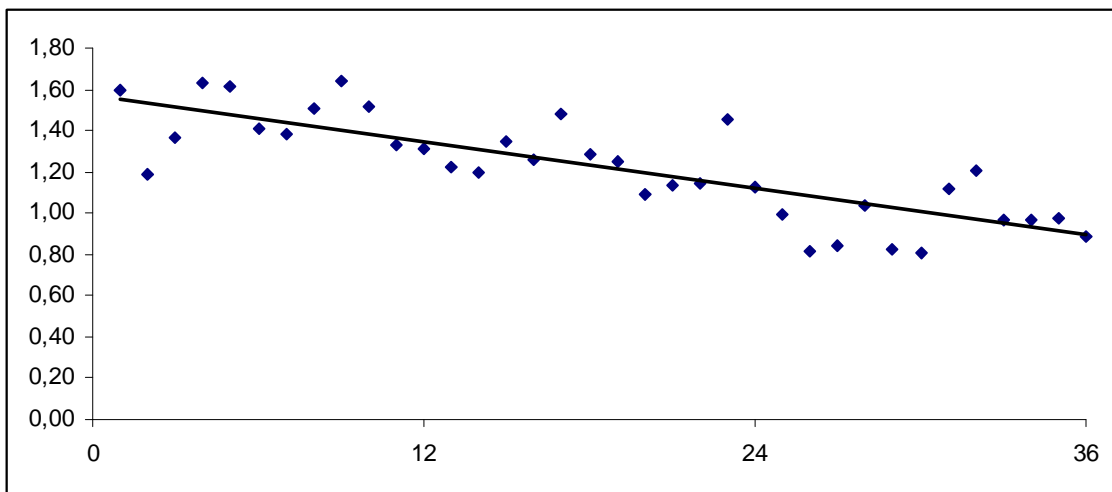
Como se puede observar, el valor del T_{60} característico para esta sala es de 1,22[s] y está muy por encima de lo estipulado en las diferentes normas y criterios de diseño. Por tanto en esta sala existen claramente problemas de ecos.

Realizando un análisis mas detallado a estos valores medidos:

Análisis estadístico Sala Q12.

Si graficamos los valores de T_{60} de las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz , ordenados de la siguiente forma: los T_{60} para la banda de 500 Hz son los primeros 12 puntos, luego de los puntos 13 a 24 son para la banda de 1000 Hz y el resto para la de 2000 Hz . Luego obtenemos lo siguiente:

Gráfico N°7.12. Distribución de los T_{60} .

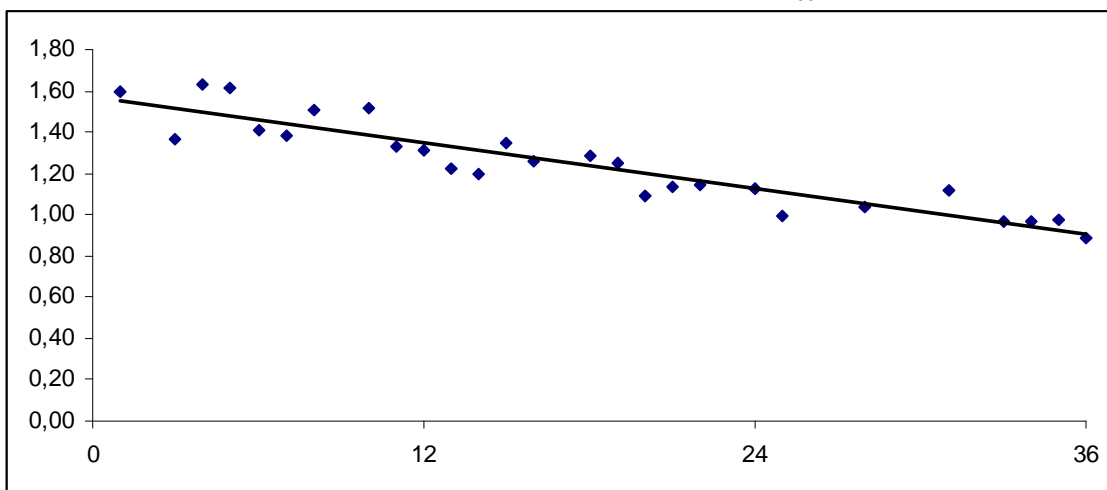


Se puede observar que los puntos siguen una tendencia parecida, aunque se encuentran dispersos en torno a esta línea recta. Esta dispersión se debe a la baja difusión presente en la sala debido a la presencia de modos normales de vibración (esto se explicará mas adelante, capítulo n°8.1).

Como los puntos siguen una tendencia decreciente, no se puede hacer un histograma.

Entonces quitando algunos puntos de tal forma de obtener una línea de tendencia mas clara, tenemos lo siguiente:

Gráfico N°7.13. Distribución de los T_{60} .



Y con estos datos

Tabla N°7.18. Estadísticos.

Estadísticos	
Media	1,23
Error típico	0,04
Mediana	1,24
Desviación estándar	0,21
Varianza de la muestra	0,04

Entonces el valor del tiempo de reverberación no varía mucho con respecto del calculado anteriormente y corresponde a la media de los datos analizados, es decir:

$$T_{60} \text{ sala Q12} = 1,23 \text{ [s]}$$

7.3.6 Sala G110.

Esta sala posee un volumen de 204 m³ por lo que según las distintas normas y criterios mencionados en el capítulo n°2.3, el valor límite del tiempo de reverberación debe ser:

Tabla N°7.19 .Valores límite para tiempo de reverberación.

	ANSI	OMS	HR.Protección frente al ruido
T ₆₀ [s]	0,6	0,6	0,5

Los resultados de las mediciones realizadas se muestran a continuación, en donde el valor característico del tiempo de reverberación para esta sala es el promedio para las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz.

Tabla N°7.20 .Valores del tiempo de reverberación medido.

Tiempo de Reverberación [s]												
posicion amplificador	A1				A2				A3			
posicion microfono	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
125	1,34	1,43	0,89	1,37	1,66	1,07	1,22	1,37	1,19	1,22	1,26	0,93
250	0,65	0,84	0,88	0,84	0,61	1,08	0,89	0,52	0,74	0,68	0,61	0,65
500	0,60	1,00	0,67	0,71	0,91	0,65	0,87	0,90	0,78	0,80	0,44	0,63
1000	0,75	0,64	0,72	0,75	0,74	0,78	0,71	0,58	0,54	0,60	0,80	0,69
2000	0,79	0,69	0,84	0,77	0,75	0,73	0,73	0,76	0,63	0,81	0,70	0,80
4000	0,58	0,49	0,56	0,61	0,66	0,56	0,55	0,60	0,50	0,48	0,57	0,55
Promedio para 500, 1000 y 2000	0,71	0,78	0,75	0,74	0,80	0,72	0,77	0,74	0,65	0,74	0,65	0,71
											T60 prom[s]	0,73

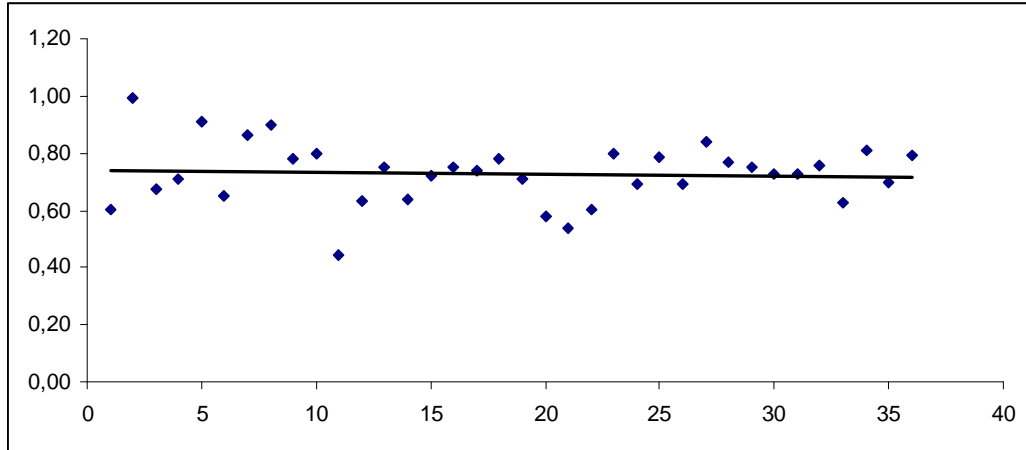
Como se puede observar, el valor del T₆₀ característico para esta sala es de 0,73 [s] y está levemente por sobre lo estipulado en las diferentes normas y criterios de diseño. Por tanto en esta sala es posible que existan problemas de ecos, pero se debe estudiar más a fondo la distribución de los materiales y geometría (capítulo 6.1) del recinto para poder concluir al respecto.

Realizando un análisis mas detallado a estos valores medidos:

Análisis estadístico Sala G110.

Si graficamos los valores de T₆₀ de las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz , ordenados de la siguiente forma: los T₆₀ para la banda de 500 Hz son los primeros 12 puntos, luego de los puntos 13 a 24 son para la banda de 1000 Hz y el resto para la de 2000 Hz . Luego obtenemos lo siguiente:

Gráfico N°7.14. Distribución de los T_{60} .



Se puede observar que los puntos siguen una tendencia parecida, aunque se encuentran dispersos en torno a esta línea recta. Esta dispersión se debe a la baja difusión presente en la sala debido a la presencia de modos normales de vibración (esto se explicará mas adelante, capítulo n°8.1).

Haciendo un histograma de los puntos para todas las frecuencias (500, 1000 y 2000 Hz) podemos saber que puntos eliminar:

Gráfico N°7.15. Histograma.

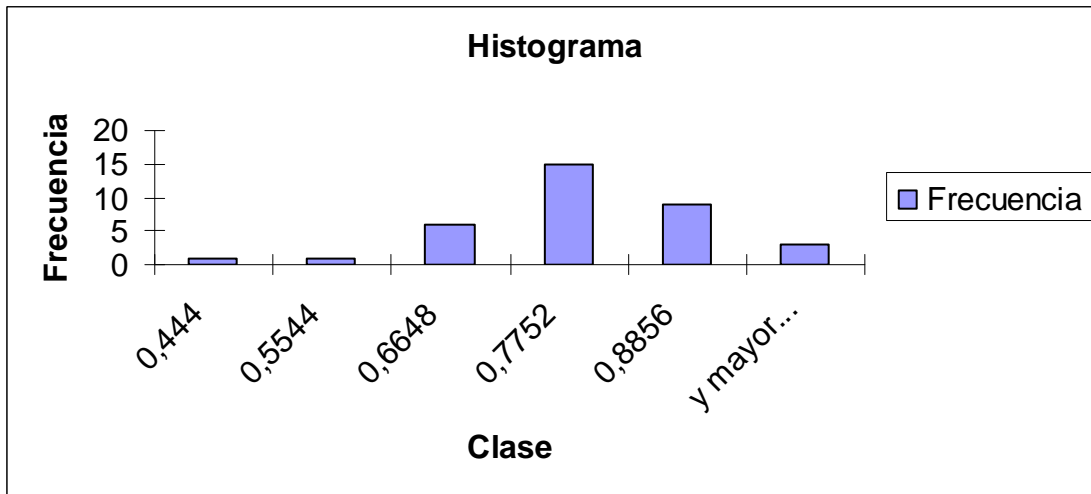
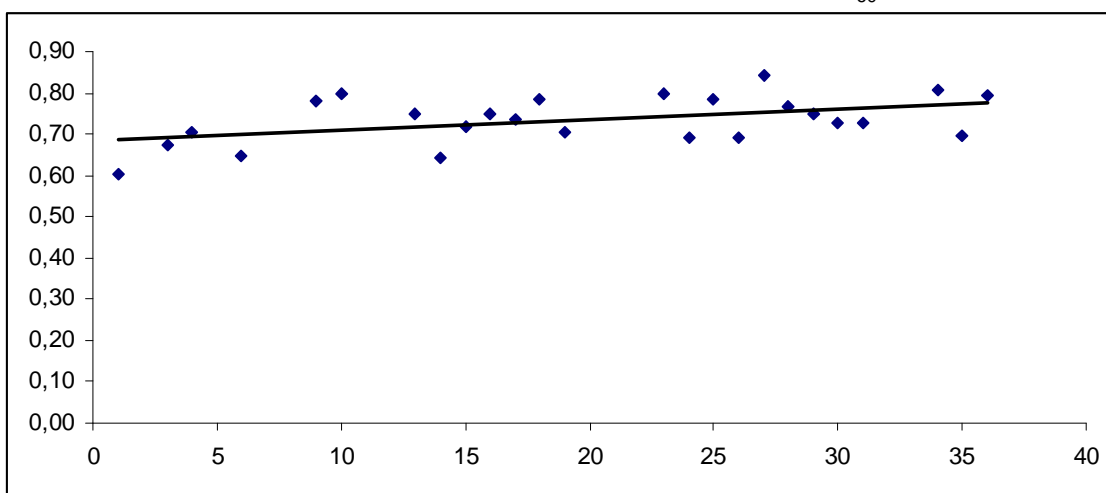


Tabla N°7.21. Frecuencia para valores de T_{60} .

<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>
0,44	1
0,55	1
0,66	6
0,78	15
0,89	9
y mayor...	3

Entonces quitando algunos puntos de tal forma de obtener una línea de tendencia mas clara, tenemos lo siguiente:

Gráfico N°7.16. Distribución de los T_{60} .



Y con estos datos:

Tabla N°7.22. Estadísticos.

<i>Estadísticos</i>	
Media	0,74
Error típico	0,01
Mediana	0,74
Moda	0,75
Desviación estándar	0,05
Varianza de la muestra	0,00

Entonces el valor del tiempo de reverberación no varía mucho con respecto del calculado anteriormente y corresponde a la media de los datos analizados, es decir:

$$T_{60} \text{ sala G110} = 0,74 \text{ [s]}$$

7.4 Mediciones de ruido de fondo.

7.4.1 Sala B103.

En esta sala se midió ruido de fondo dentro de la sala en un solo punto, y en la tabla N° 7.24 se puede observar los valores medidos y las bandas de frecuencia en las cuales se sobrepasa lo estipulado en las distintas normativas y criterios de diseño. Los valores límite de ruido de fondo según el volumen de sala son los siguientes:

Tabla N°7.23 . Valores límite para ruido de fondo.

	ANSI	OMS	NCh
RF[dBA]	35	35	25

Se debe recordar que la normativa chilena sólo establece un valor límite de 25 dBA para la banda de 1000 Hz.

Tabla N°7.24 .Valor del ruido de fondo medido.

RF [dBA]	ANSI	OMS	NCh
33	Ok	Ok	No Ok

Hay que mencionar que este valor es un caso especial, en un horario de poco ruido y un bajo tránsito de alumnos.

Además, se midió el nivel de ruido fuera de esta sala, en la calle Blanco Encalada a las 13.00 hrs y los valores registrados son los siguientes:

Tabla N°7.25 .Valores del ruido medidos fuera de la sala.

[dB]	[dBA]
65	61

Estos valores son considerados como muy ruidosos, según NCh 352 Of.62.

7.4.2 Sala B112.

En esta sala se midió ruido de fondo dentro de la sala en un solo punto, y en la tabla N° 7.27 se puede observar los valores de ruido de fondo registrados. Los valores límite de ruido de fondo según el volumen de sala son los siguientes:

Tabla N°7.26 . Valores límite para ruido de fondo.

	ANSI	OMS	NCh
RF[dBA]	35	35	25

Se debe recordar que la normativa chilena sólo establece un valor límite de 25 dBA para la banda de 1000 Hz.

Tabla N°7.27 .Valor del ruido de fondo medido.

RF[dBA]	ANSI	OMS	NCh
26	Ok	Ok	No Ok

Hay que mencionar que este valor es un caso especial, en un horario de poco ruido y un bajo tránsito de alumnos.

Se midió el nivel de ruido fuera de esta sala, en la calle Beaucheff a las 13.00 hrs. y los valores registrados son los siguientes:

Tabla N°7.28 .Valores del ruido medidos fuera de la sala.

[dB]	[dBA]
60	56

Estos valores son considerados como muy ruidosos, según NCh 352 Of.62.

7.4.3 Sala 15 Sur.

En esta sala se midió ruido de fondo dentro de la sala en dos puntos, uno en el centro de la sala y otro junto a la ventana que da a la calle Tupper, en la tabla N° 7.30 se puede observar las bandas de frecuencia en las cuales se sobrepasa lo estipulado en las distintas normativas y criterios de diseño. Los valores límite de ruido de fondo según el volumen de sala son los siguientes:

Tabla N°7.29 . Valores límite para ruido de fondo.

	ANSI	OMS	NCh
RF[dBA]	35	35	25

Se debe recordar que la normativa chilena sólo establece un valor límite de 25 dBA para la banda de 1000 Hz.

Tabla N°7.30 .Valor del ruido de fondo medido (centro de la sala)

RF[dBA]	ANSI	OMS	NCh
33	Ok	Ok	No Ok

Tabla N°7.31 .Valores del ruido de fondo medido (junto a la ventana cerrada)

RF[dBA]	ANSI	OMS	NCh
31	Ok	Ok	No Ok

Tabla N°7.32 .Valor del ruido de fondo medido (junto a la ventana abierta)

RF[dBA]	ANSI	OMS	NCh
34	Ok	Ok	No Ok

Hay que mencionar que este valor es un caso especial, en un horario de poco ruido y un bajo tránsito de alumnos.

Se midió el nivel de ruido fuera de esta sala, a un costado de la ventana que da a la calle Tupper a las 13.30 hrs y los valores registrados son los siguientes:

Tabla N°7.33 .Valor del ruido medido fuera de la sala.

[dB]	[dBA]
48	44

Estos valores son considerados como moderadamente tranquilos, según NCh 352 Of.62.

7.4.4 Sala Q10.

En esta sala se midió ruido de fondo dentro de la sala en un solo punto, en el centro de la sala, en la tabla N°7.34 se puede observar los valores de ruido de fondo registrados.

Los valores límite de ruido de fondo según el volumen de sala son los siguientes:

Tabla N°7.34 . Valores límite para ruido de fondo.

	ANSI	OMS	NCh
RF[dBA]	40	35	25

Se debe recordar que la normativa chilena sólo establece un valor límite de 25 dBA para la banda de 1000 Hz.

Tabla N°7.35 . Valor del ruido de fondo medido.

RF[dBA]	ANSI	OMS	NCh
26	Ok	Ok	No Ok

Hay que mencionar que este valor es un caso especial, en un horario de poco ruido y un bajo tránsito de alumnos.

7.4.5 Sala Q12.

En esta sala se midió ruido de fondo dentro de la sala en un solo punto, pero para dos situaciones distintas debido a la existencia de un extractor existente justo junto a la ventana que da a la calle Tupper. La primera condición que se muestra en la tabla N° 7.37 es cuando el extractor no está funcionando y la otra cuando si está funcionando (tabla N°7.38). Además se midió el nivel de ruido que genera dicho extractor (tabla N° 7.39).

Los valores límite de ruido de fondo según el volumen de sala son los siguientes:

Tabla N°7.36 . Valores límite para ruido de fondo.

	ANSI	OMS	NCh
RF[dBA]	35	35	25

Se debe recordar que la normativa chilena sólo establece un valor límite de 25 dBA para la banda de 1000 Hz.

Tabla N°7.37 .Valor del ruido de fondo medido para condición extractor apagado.

RF[dBA]	ANSI	OMS	NCh
26	Ok	Ok	No Ok

Hay que mencionar que este valor es un caso especial, en un horario de poco ruido y un bajo tránsito de alumnos.

En esta condición se puede observar que el valor está en el rango permitido, por lo cual no existen problemas de ruido de fondo.

Tabla N°7.38 .Valor del ruido de fondo medido para condición extractor encendido.

RF[dBA]	ANSI	OMS	NCh
41	No Ok	No Ok	No Ok

En esta condición se puede observar que el valor está sobre el rango permitido, por lo cual claramente existen problemas de ruido dentro del recinto cuando el extractor está funcionando.

Tabla N°7.39 .Valor del nivel de ruido que genera el extractor.

[dB]	[dBA]
71	66

Estos valores son considerados como insoportables, según NCh 352 Of.62.

7.4.6 Sala G110.

En esta sala se midió ruido de fondo dentro de la sala en un solo punto, en la tabla N° 7.41 se puede observar las bandas de frecuencia en las cuales se sobrepasa lo estipulado en las distintas normativas y criterios de diseño. Los valores límite de ruido de fondo según el volumen de sala son los siguientes:

Tabla N°7.40 .Valores límite para ruido de fondo.

	ANSI	OMS	NCh
RF[dBA]	35	35	25

Se debe recordar que la normativa chilena sólo establece un valor límite de 25 dBA para la banda de 1000 Hz.

Tabla N°7.41 .Valor de ruido de fondo medido.

RF[dBA]	ANSI	OMS	NCh
29	Ok	Ok	No Ok

Hay que mencionar que este valor es un caso especial, en un horario de poco ruido y un bajo tránsito de alumnos.

Se midió el nivel de ruido fuera de esta sala, en la calle Blanco Encalada a las 13.00 hrs. y los valores registrados son los siguientes:

Tabla N°7.42 .Valor de ruido medido fuera de la sala.

[dB]	[dBA]
64	59

Estos valores son considerados como muy ruidosos, según NCh 352 Of.62.

8. ANÁLISIS DE DATOS.

Debido a la forma rectangular que presentan en general todas las salas de clases (con excepción de la Q10), es posible comentar respecto a la presencia de los modos normales de vibración.

La combinación de ondas incidentes y reflejadas en una sala da lugar a la aparición de las denominadas ondas estacionarias⁽¹⁴⁾ o modos propios de la sala. Cada modo propio va asociado a una frecuencia, igualmente denominada propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora que varía en función del punto considerado.

El número de modos propios es ilimitado, si bien su distribución a lo largo del eje frecuencial es discreta, aumentando su densidad con la frecuencia. La presencia de todos ellos provoca en cada punto una concentración de energía alrededor de las diversas frecuencias propias, lo cual confiere un sonido característico a cada sala. Esto se pone en manifiesto en salas relativamente reducidas y rectangulares.

Esto es, en recintos no muy grandes, a bajas frecuencias, la densidad del espectro de frecuencias normales es pequeña, lo cual origina una desigualdad del campo sonoro en el recinto.

Por lo tanto si se tiene un campo reverberante dentro de una sala rectangular de dimensiones no muy grandes, como lo son las anteriores salas de clases, el campo sonoro no es igual en todo el volumen de la sala por la presencia de puntos de concentración de energía debido a los modos normales, por lo cual no existe difusividad del sonido dentro del recinto. Lo cual puede ser posible dentro de estas salas de clases.

8.1 Tiempo de reverberación.

8.1.1 Sala B103.

Comparando los resultados de las mediciones y los calculados teóricamente, ambos coinciden en que el valor del tiempo de reverberación, dado el volumen de la sala, está bajo el valor permitido por las distintas normas y criterios de desempeño, lo cual se comprueba dadas las características físicas y geométricas de la sala, esto es, el poseer gran cantidad de material absorbente en piso y cielo, el cual abarca una superficie bastante grande en comparación con la superficie total de la sala.

Además se calculó el porcentaje de pérdida de articulación de las consonantes, parámetro que determina el grado de inteligibilidad de la palabra, y valor que dio como resultado que dado un valor bajo del tiempo de reverberación, la inteligibilidad puede

considerarse como buena a una distancia de 6,5 m, y como la sala posee un largo de alrededor 9,7 m este valor no empeora entre estas distancias.

Por lo tanto, tanto experimentalmente como teóricamente, no existen problemas de eco en esta sala de clases.

8.1.2 Sala B112.

Al comparar los valores del tiempo de reverberación tanto medidos experimentalmente como teóricamente, se tienen tiempos menores que los requeridos en la normativa ANSI y lo recomendado según la OMS, salvo la normativa española HR de protección frente al ruido que recomienda un tiempo de reverberación máximo de 0,5 s. Sin embargo esta normativa es aplicable para un volumen menor a 350 m³ y esta sala posee un volumen de 421 m³, pero de todas formas puede utilizarse esta normativa como un patrón de comparación. Al estudiar la materialidad de la sala, es posible observar superficies con materiales absorbentes (cielo falso y piso alfombrado) de grandes dimensiones lo cual ayuda a disminuir el tiempo de reverberación.

Además se calculó el porcentaje de pérdida de articulación de las consonantes, el cual dio como resultado una pérdida de 3,7 %, y que dado un valor bajo del tiempo de reverberación, la inteligibilidad puede considerarse como buena.

Por lo tanto en esta sala de clases no existen problemas de eco.

8.1.3 Sala 15 Sur.

El valor del tiempo de reverberación calculado teóricamente, está justo en el límite de lo permitido según la normativa ANSI, pero al comprarlo con lo medido experimentalmente, es posible afirmar que no existen problemas de ecos en esta sala, ya que el valor está por debajo de lo permitido en distintas normativas y criterios de desempeño. Si bien estos dos valores difieren en 0,2 [s], se debe hacer mención que la base teórica del cálculo del tiempo de reverberación parte de la hipótesis que el recinto es de forma prismática, y al ser esta sala de forma escalonada, pueden existir diferencias en los cálculos, pero estos serán mínimos. Además no se sabe con certeza si el cielo posee algún tipo de aislante acústico, por lo tanto se está subestimando la absorción del cielo.

El valor bajo para el tiempo de reverberación se comprueba dadas las características físicas y geométricas de la sala, esto es, el poseer gran cantidad de material absorbente en piso y presentar un cielo falso de poliestireno expandido (material absorbente) en forma escalonada, lo que permite una superficie de cielo mayor que si se presentara en forma plana.

Además se calculó el porcentaje de pérdida de articulación de las consonantes, parámetro que determina el grado de inteligibilidad de la palabra, y valor que dio como resultado que dado un valor relativamente bajo del tiempo de reverberación, la inteligibilidad puede considerarse como aceptable a una distancia de 9 m, y como la sala posee un largo de alrededor 11,2 m este valor no empeora entre estas distancias.

8.1.4 Sala Q10.

Dadas las características geométricas de esta sala, es decir su gran volumen de alrededor de 1123 m³, su forma cóncava en la parte trasera, y su forma escalonada, además de su materialidad, esto es gran cantidad de material reflectante (muros y piso), todo esto explicado detalladamente en el capítulo 6.1, ayuda en gran medida a tener valores del tiempo de reverberación altos como los calculados teóricamente y también como los medidos experimentalmente. Todo esto nos lleva a deducir que en esta sala existen claramente problemas de eco. Esto se verifica además en la encuesta realizada a estudiantes que utilizan esta sala y que consideran que en ella se escucha con eco (Anexo C).

Además como la inteligibilidad de la palabra está ligada directamente al tiempo de reverberación, y al ser este un valor altísimo, nos lleva a calcular una pérdida de articulación de consonantes del 12,2%, el cual es considerado como pobre y presentándose este valor como máximo a los 8 m, distancia pequeña al compararla con el largo de la sala que es de alrededor de 15 m.

Por lo tanto en esta sala, además de presentar problemas de ecos, existe una inteligibilidad de la palabra bastante pobre.

8.1.5 Sala Q12.

Al comparar los valores teóricos y los medidos experimentalmente (1,04 [s] y 1,22 [s] respectivamente), ambos superan ampliamente el límite permitido. Si bien existe una superficie considerable de material absorbente, el volumen de esta sala, al ser de un valor considerable, afecta directamente (aumentando) el tiempo de reverberación.

Además las primeras reflexiones que se dirigen hacia la pared y luego a los alumnos, dado el ancho de la sala bastante superior al largo, recorren un camino largo que alcanzaría a generar un retardo en la llegada del sonido al oyente, lo cual provoca la aparición de ecos. Esto se verifica además en la encuesta realizada a estudiantes que utilizan esta sala y que consideran que en ella se escucha con eco (Anexo C).

Al calcular la pérdida de inteligibilidad, valor directamente proporcional al tiempo de reverberación, se obtuvo una pérdida del 6,5 % valor considerado aceptable, pero que comprueba nuevamente que en esta sala existen problemas acústicos.

8.1.6 Sala G110.

Tanto el valor calculado teóricamente como el medido experimentalmente se encuentran en el límite de lo permitido (uno levemente inferior y otro superior), se debe inferir respecto a la materialidad y forma de esta sala para poder comentar si existe o no aparición de ecos.

Según lo descrito en el capítulo 6.1, esta sala posee un largo y ancho muy similares, lo que podría provocar un descontrol de reverberaciones a bajas frecuencias. Sin embargo posee gran cantidad de superficie absorbente (tabiquería, piso alfombrado cielo falso) lo cual tiende a disminuir el tiempo de reverberación, lo cual explica que el valor calculado en forma teórica sea inferior al que se midió experimentalmente, ya que las fórmulas no pueden valorizar esta característica de semejantes largo y ancho de sala.

Además se calculó el porcentaje de pérdida de articulación de las consonantes, el cual dio como resultado una pérdida del 4 %, lo cual puede considerarse como bueno.

Finalmente en esta sala no debiesen existir problemas de ecos, ya que la cantidad de material absorbente compensa la geometría poco óptima. Además la condición en que se realizan las mediciones es la más desfavorable, ya que se hicieron en salas de clases sin alumnos, ya que éstos contribuyen a la absorción del sonido, disminuyendo el tiempo de reverberación.

8.2 Ruido de fondo.

8.2.1 Sala B103.

Según lo mostrado en el capítulo anterior, el nivel de ruido en esta sala no afectaría a los ocupantes (o estudiantes).

Se midió el nivel de ruido en la calle más cercana a esta sala en un horario de tráfico vehicular relativamente alto (13.00 hrs), y arrojó un valor de 65 dB, que es considerado como muy ruidoso. Si bien este nivel de ruido exterior es alto, la aislación de la configuración muro-ventana (dado un nivel de ruido de fondo al interior de la sala de 37,7 dB como valor promedio) es de 27,3 dB, por lo tanto estos elementos están actuando en buena medida como aislantes del ruido.

8.2.2 Sala B112.

Los niveles de ruido de fondo medidos están por debajo del límite permitido en distintas normativas, salvo la norma chilena que limita vagamente este parámetro en una sola frecuencia, pero considerando que esta normativa es del año 1961 y las demás son mucho más actuales, puede pasarse por alto que se supere el límite permitido.

Se midió el nivel de ruido en la calle más cercana a esta sala en un horario de tráfico vehicular relativamente alto (13.00 hrs), y arrojó un valor de 60 dB, que es considerado como muy ruidoso. Si bien este nivel de ruido exterior es alto, la aislación de la configuración muro-ventana (dado un nivel de ruido de fondo al interior de la sala de 30,7 dB como valor promedio) es de 29,3 dB, por lo tanto estos elementos están actuando de buena forma como aislantes del ruido.

8.2.3 Sala 15 Sur.

En esta sala se hicieron distintos tipos de mediciones. En primer lugar se midió el ruido en el exterior de esta sala, junto a la ventana que da a la calle Tupper, el nivel de ruido corresponde a 44 dBA, valor considerado como moderadamente tranquilo. Por lo tanto si en esta sala existiesen problemas de ruido de fondo, no son producto del ruido proveniente de la calle.

Además se midió el ruido de fondo justo al lado de la ventana (en el interior de la sala) con la ventana cerrada, en donde se obtuvo un valor por debajo de lo permitido en distintas normativas, 31 dBA. Cuando se midió el nivel de ruido de fondo con la ventana abierta, esta arrojó un valor de 34 dBA que también está muy por debajo de lo estipulado. Estos valores pueden considerarse como un caso muy particular, con poco

tráfico vehicular y el centro de entretenimientos cercano a esta sala no se encontraba funcionando.

En cambio, la partición muro-ventana posee una aislación del ruido exterior de 13 dBA, valor considerado como bajo (tomando como ruido de fondo la medición realizada a un costado de la venta y en el exterior de esta sala). Esto se debe a la materialidad de la ventana (madera) y a su antigüedad, además de no poseer sellantes acústicos.

En las mediciones realizadas en el centro de la sala se tiene un valor de 33 dBA, que en comparación con el valor medido junto a la ventana, es mayor, por lo tanto el ruido más importante a considerar es el que viene del Hall que se encuentra a un costado de la sala y no el ruido exterior.

8.2.4 Sala Q10.

En esta sala de clases el valor límite permitido para niveles de ruido de fondo de acuerdo con el volumen de la sala es de 40 dBA. Sin embargo los valores medidos experimentalmente demuestran que el nivel de ruido de fondo es bajo, 20 [dBA] como promedio y esta muy por debajo de lo permitido. Por lo tanto en esta sala no existen problemas de ruido de fondo.

Si bien según la encuesta realizada (Anexo C), esta sala es considerada como ruidosa, esto es debido a su gran volumen lo cual permite una capacidad de alumnos bastante grande, alrededor de 120, los cuales serían la fuente de ruido, parámetro que no está en contemplado en este trabajo de título, ya que se estudiaron aquí solo salas desocupadas.

8.2.5 Sala Q12.

Existen dos condiciones en esta sala, una cuando un extractor que se encuentra justo fuera de la ventana que da a la calle Tupper esta apagado, donde el nivel de ruido de fondo cumple con los límites de las normativas existentes. Sin embargo cuando el extractor se encuentra encendido, estos límites son superados, lo cual afecta la concentración de los estudiantes y profesores.

Al medir el nivel de ruido que genera dicho extractor, se tiene un valor promedio de 66 dBA, el cual es considerado como insoportable. La aislación de la configuración muro-ventana (dado un nivel de ruido de fondo al interior de la sala de 41 dBA como valor promedio cuando el extractor está encendido) es de 25 dBA, por lo tanto estos elementos están actuando de buena forma como aislantes del ruido.

Si bien según la encuesta realizada (Anexo C), esta sala es considerada como ruidosa, las fuentes de ruido descrita por los alumnos provienen de diversos sectores, por lo que a partir de esta encuesta no es posible determinar la fuente de ruido de manera directa.

8.2.6 Sala G110.

Los niveles de ruido de fondo medidos están por debajo del límite permitido en distintas normativas.

Se midió el nivel de ruido en la calle más cercana a esta sala en un horario de tráfico vehicular relativamente alto (13.00 hrs), y arrojó un valor de 59 dBA, que es considerado como muy ruidoso. Si bien este nivel de ruido exterior es alto, la aislación de la configuración muro-ventana (dado un nivel de ruido de fondo al interior de la sala de 29 dBA como valor promedio) es de 30 dBA, por lo tanto estos elementos están actuando de buena forma como aislantes del ruido.

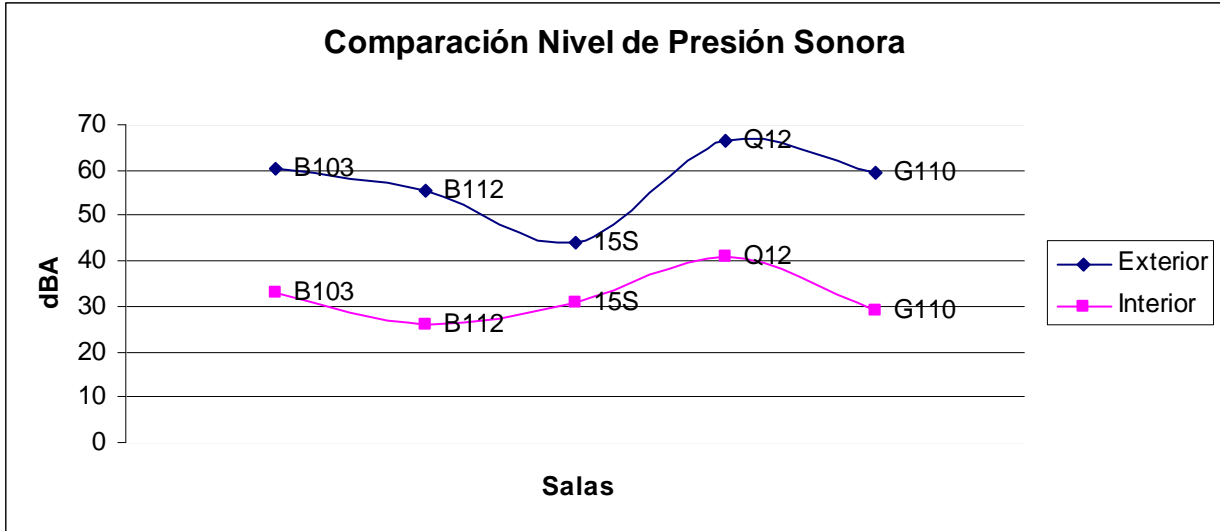
Resumiendo los valores de ruido interior y exterior, tenemos lo siguiente:

Tabla N°8.1. Resumen niveles de ruido.

Sala	[dBA]		
	NR exterior	NR interior	Δ
B103	61	33	28
B112	56	26	30
15S	44	31	13
Q12	66	41	25
G110	59	29	30

Ahora, si graficamos los distintos niveles de ruido interior y exterior para todas las salas, tenemos lo siguiente:

Gráfico N°8.1. Comparación nivel de presión sonora en las distintas salas.



Observando el grafico se puede ver claramente que existen diferencias importantes entre el nivel de ruido al interior y al exterior, por lo tanto la partición ventana-muro está actuando de buena forma como aislantes del ruido. Salvo en el caso de la sala 15 S en que el nivel de aislación es bajo, y por tanto se debe tratar acústicamente esta ventana, de tal forma de aumentar la aislación, aunque el nivel de ruido externo sea bajo, ya que pueden existir eventualidades en que estos valores sean mucho mayores, por ejemplo cuando el parque de diversiones que se encuentra a un costado está funcionando, o cuando haya un mayor tráfico vehicular en ese sector.

9. PROPUESTAS PARA EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.

9.1 Propuestas para salas que presentan problemas.

Existen dos salas de clases con valores altos del tiempo de reverberación, y son las salas Q12 y Q10. Existe además una sala de clases, la 15 Sur, que presenta problemas de aislación.

Algunas propuestas para un buen acondicionamiento de éstas se describen a continuación.

- Sala Q12.

El primer problema en esta sala, según lo expuesto en capítulos anteriores es su elevado tiempo de reverberación, y según la materialidad que ésta ya presenta, la mejor forma de disminuir su T_{60} es tratar acústicamente el cielo de la sala, según los materiales descritos en el capítulo 3.1.2.

Si utilizamos un cielo del tipo yeso reforzado con fibra de vidrio con un NRC de 0,6, obtenemos el siguiente valor para T_{60} .

Tabla N°9.1. Tiempo de reverberación.

Tiempo de Reverberación [s]	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
	1,02	1,00	0,75	0,44	0,36	0,38	0,52

Con este valor, 0,52 [s], se cumple a cabalidad lo dispuesto en la normativa ANSI y también lo recomendado por la OMS.

Por lo tanto esta sería la solución más eficiente para combatir el alto valor del tiempo de reverberación presente en la sala actualmente.

Otro problema de esta sala es su forma, ya que al ser mas ancha que larga, la voz no alcanza a cubrir todo el ancho, por lo tanto los oyentes que se encuentran en los costados podrían no oír con claridad lo que la fuente acústica, en este caso profesor, emite. La mejor solución es la utilización de amplificadores en los costados (en la parte frontal de la sala).

Un tercer problema detectado en esta sala, es el nivel de ruido de fondo cuando el quipo extractor que se encuentra a un costado de la ventana, está encendido, ya que a pesar de que la aislación de la partición muro-ventana es de aproximadamente 40 dBA,

considerado como muy bueno, en el interior de la sala se alcanzan altos niveles de ruido. Como ni la ventana ni el muro es el problema, la solución se encuentra en hacer funcionar el extractor en horarios en que la sala no esté ocupada. Esto actualmente se está realizando, y no se han presentado reclamos por parte de los alumnos ni profesores.

- Sala Q10.

En esta sala de clases existen dos tipos de problemas, el primero respecto al tiempo de reverberación y el segundo respecto a la geometría de la sala y ubicación de los materiales absorbentes y reflectantes.

Para llevar el tiempo de reverberación a valores que estén dentro los valores admisibles, podemos utilizar la normativa ANSI, que en el capítulo 2.3.1 , recomienda para lograr un T_{60} de 0,7 [s], fijando una altura máxima de 4,88 m, se debe tratar acústicamente por lo menos el 162% de la superficie de piso. Como esta superficie es de 168 m² , la superficie mínima a tratar debe ser de 272 m².

De acuerdo con el antecedente n^o2, la ubicación de los materiales absorbentes y reflectantes debe ser como sigue:

- Colocar material absorbente en el cielo, en el perímetro de la sala y el material reflectante en la parte central del cielo.
- Para reflejar mas sonido a la parte trasera, se puede ubicar material reflectante en los muros de la parte posterior de la sala, como madera contrachapada o yeso.

Y utilizando la opción 2 que recomienda la normativa española:

- Colocar material reflectante en el cielo de la parte delantera (ubicación del profesor).
- Colocar material absorbente en el cielo de la parte posterior.

Es posible por tanto llegar a la siguiente propuesta de mejoramiento:

- Alfombrar todo el piso de la sala (168 m²).
- Utilizar un cielo acústico como el mencionado en el capítulo 3.1.2, es decir utilizando un cielo del tipo yeso reforzado con fibra de vidrio con un NRC de 0,6. Este se debe ubicar a una altura de 4,9 en la parte delantera (parte más alta) por lo que en la parte posterior, como esta sala es escalonada se alcanzará una altura de alrededor 3,5 m. Este techo debe posicionarse de tal forma de dejar en

la parte delantera 4 m desde el muro hacia donde comienza este techo, para así proveer de material reflectante (cielo de hormigón actualmente existente) en la parte superior de la ubicación del profesor, y así entonces aprovechar las primeras reflexiones.

Por lo tanto se tienen 112 m² de material absorbente en el cielo. Y en total 280 m² de material absorbente en toda la sala, valor que supera el mínimo dispuesto en la normativa ANSI.

Debido al gran volumen de esta sala se debe proveer material reflectante en los muros, objeto de proporcionar primeras reflexiones a la zona donde se ubican los estudiantes. Pero este ya se encuentra en su calidad de enchapes de madera en los muros laterales.

Como esta sala en su parte posterior posee una forma cóncava, se generan focalizaciones del sonido, y para poder utilizar las reflexiones como forma de hacer llegar el sonido a lugares donde el sonido directo no alcanza a llegar, es recomendable la utilización de difusores del sonido en este sector, como los mostrados en el capítulo 3.3.1.

Con las medidas antes mencionadas se logra un tiempo de reverberación como sigue:

Tabla N°9.2. Tiempo de reverberación.

	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
Tiempo de Reverberación [s]	1,46	1,20	1,04	0,71	0,60	0,64	0,78

Este valor de T₆₀ se encuentra dentro del rango permitido, además con las propuestas antes mencionadas, se disminuye el volumen de la sala a 1000 m³ y además se logra un mejor aprovechamiento del material reflectante utilizado en muros y cielo.

Además sería importante, dada la antigüedad de las ventanas en esta sala de clases, utilizar sellantes para ventanas y vidrios dobles con cámara de aire, para el caso de tener alguna eventualidad que implique grandes niveles de ruido en el exterior de esta sala (cabe recordar que esta sala se encuentra a un costado del patio).

Una imagen general de esta sala de clases con las propuestas de mejoramiento se muestra en la Figura N°9.1.

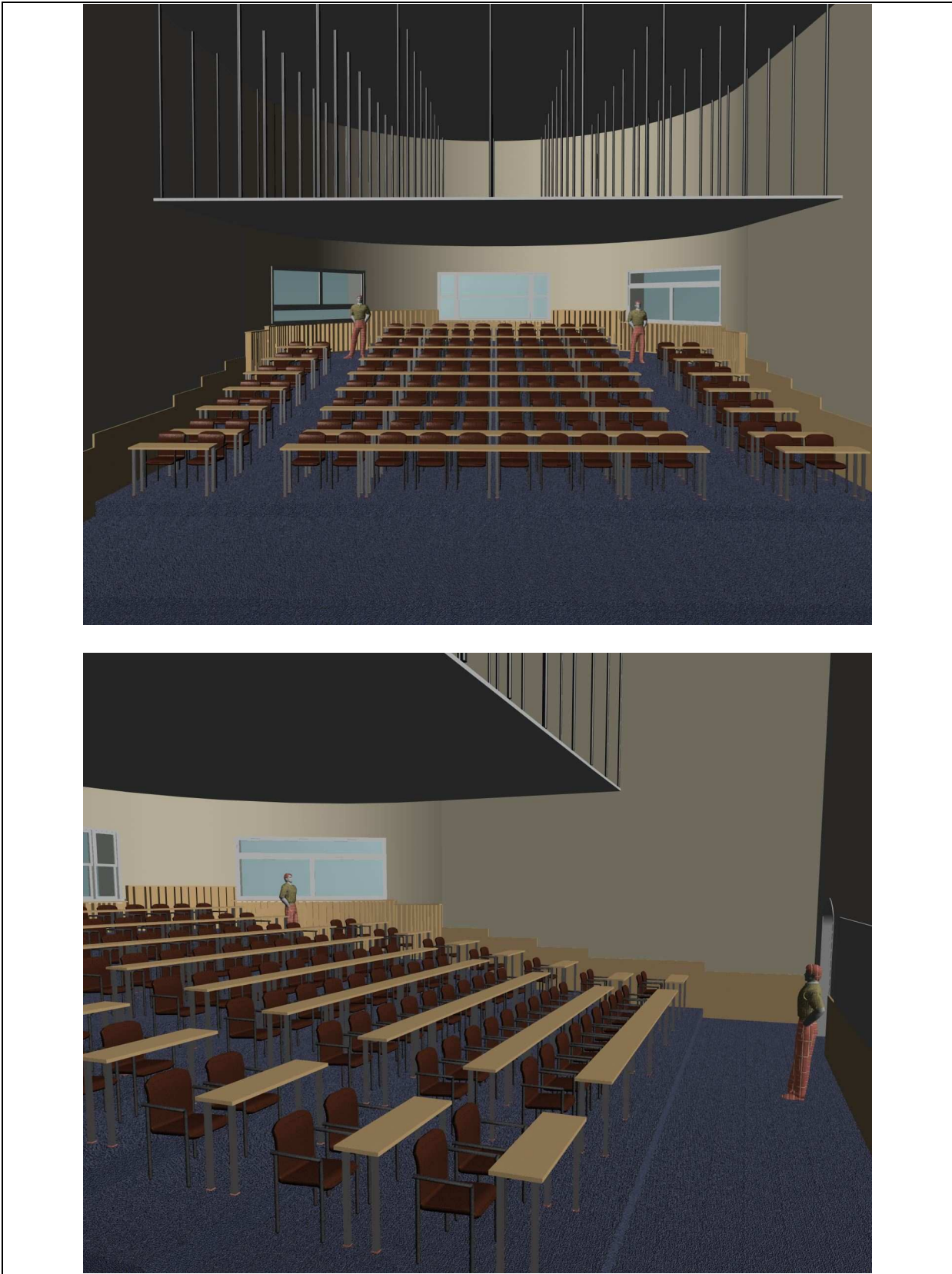


Figura N°9.1 , Sala Q10 mejorada.

- Sala 15 Sur.

Como se describió en el capítulo 8.2.3 la configuración muro-ventana posee una aislación aproximada de 13 dBA, entonces como recomienda la normativa chilena en el capítulo 2.3.4 recomienda para las ventanas una aislación de 30 dB, lo que se alcanza con vidrios dobles de espesores entre 5 y 7 mm. Además para lograr una aislación mayor, se deben utilizar sellos en las ventanas como los mostrados en el capítulo 3.4.2.2.

Pero según lo expuesto en el capítulo 8.2.3, el problema en esta sala además está en la aislación que proporciona la puerta, para esto se recomienda la utilización de sellantes para puertas como el mostrado en el capítulo 3.4.2.1. Utilizando lo dispuesto en la normativa ANSI y en particular en la tabla N° 2.6 que según lo dispuesto, si se quiere tener una aislación de 30 dB, se necesita como mínimo un STC de 36. Por tanto estos sellantes funcionarían de manera óptima ya que poseen un STC aún mayor.

9.2 Propuestas para salas de clases en general.

Finalmente, es posible generar una propuesta de forma general para tener tiempos de reverberación óptimos en salas de clases, y son las siguientes:

- Utilización de alfombra en toda la superficie del suelo.
- Tener alturas no mayores a 3,5 m de tal forma de no tener un gran volumen, valor que afecta directamente el tiempo de reverberación.
- Utilización de cielos tratados acústicamente como los dispuestos en el capítulo 3.1.2
- Poseer asientos tapizados en la sala de clases.
- Colocar cortinas en ventanas, ya que así proveerá de material absorbente a la sala y a la vez ayudará al aislamiento.
- Es recomendable poseer material reflectante en la parte delantera de la sala, que por lo general este tipo de material corresponde al pizarrón.
- En salas con anchos mucho mayor que el largo de la sala, utilizar sistemas de amplificadores en los costados de la parte delantera de la sala, de modo garantizar una adecuada distribución del sonido en la sala.
- En el diseño de salas de clases, se recomienda que la audiencia quede en el interior de un ángulo de 140° con vértice en la fuente. Además es recomendable que las relaciones entre largo y ancho sean las siguientes:

$$e_1 < \frac{2}{3} e_2$$

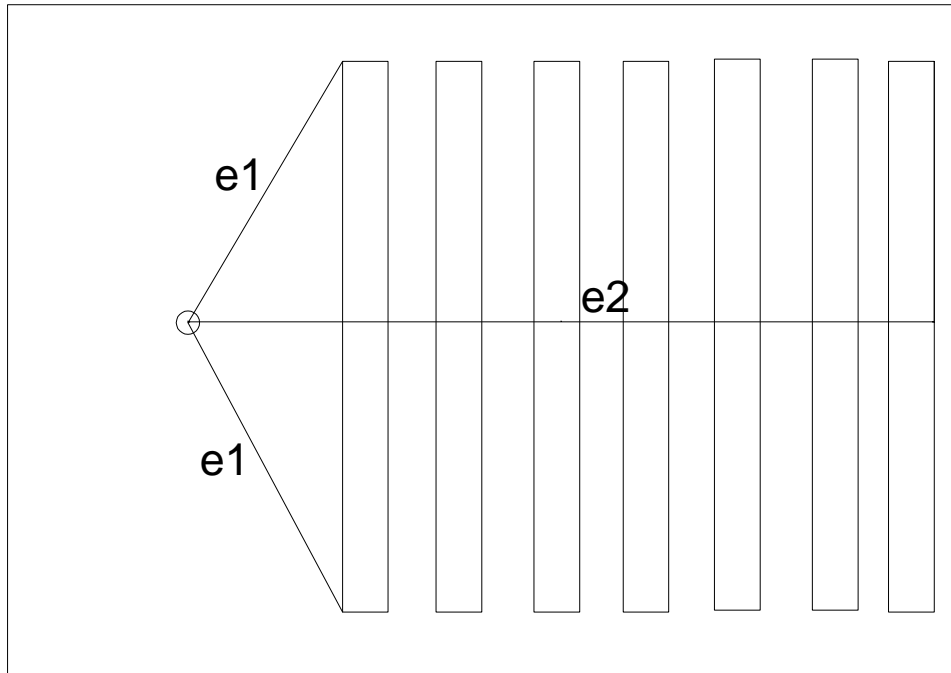


Figura N°9.2. Recomendación ancho de sala.

Para lograr niveles de aislamiento del ruido exterior óptimos se sugiere lo siguiente:

- Utilización de vidrios dobles con cámara de aire de espesores entre 5 y 7 mm, ya que proporcionan una aislación de más de 30 dB.
- Colocar en puertas y ventanas sellantes acústicos, de tal forma de proveer valores óptimos para aislamiento acústico.
- En caso de tener pasillos fuera de las salas, proveer en ellos cielos con materiales absorbentes, en caso de tener un hall u otro espacio de similares características (por lo general con cielos muy altos) utilizar los sellantes de puertas antes mencionados.

10. Discusión y conclusiones.

10.1 Discusión.

Cuando se revisa la encuesta realizada a los usuarios de las salas de clases, se evidencia la presencia de ciertos problemas en las aulas, como la molestia por el ruido que proviene de la calle, lo cual según expresado por los alumnos, perjudica la concentración. Así también se comenta la presencia notoria de eco en una sala en particular.

Al analizar detalladamente cada sala, ya sea de forma teórica o experimental, es posible observar que dichos problemas realmente existen en algunas salas, algunos problemas mas marcados que otros, pero que a nivel general perjudican la concentración y comunicación dentro de la sala.

Si bien sólo 3 aulas presentan problemas, cabe decir que son éstas las más antiguas, y a pesar de que algunas de ellas han sido tratadas, a nivel acústico y geométrico poseen serias deficiencias. El problema más notorio, es el elevado tiempo de reverberación de 2 salas, la Q10 y la Q12, pero ambas con características físicas y geométricas bastante diferentes.

En la primera, se tiene un volumen muy grande, lo cual afecta directamente en la reverberación pero también sus características geométricas, esto es, poseer una forma cóncava en la parte posterior, genera la focalización del sonido, además de su forma escalonada que provoca que las ondas que viajan desde la fuente sonora reboten y generen una serie de reflexiones y dadas las grandes dimensiones estas llegan en tiempos distintos a los oyentes provocando la sensación de eco.

La segunda sala es la Q12, que si bien posee elementos absorbentes, éstos no son suficientes. En cuanto a su geometría, esta posee un ancho mucho mayor al largo, lo cual provoca que existan lugares donde el sonido no llega, ya que el ángulo que abarca la voz, no es muy grande por lo cual no alcanza a cubrir todo el ancho.

La tercera sala que presenta deficiencias es la 15 S, pero si bien sus valores para tiempo de reverberación y ruido de fondo están dentro del rango permitido, al analizar la aislación de su ventana (13 dBA aproximadamente) ésta es bastante baja, ya que si existen eventualidades en el exterior que generen grandes niveles de ruido, en esta sala simplemente no podrán dictarse clases. Además su geometría no es la más óptima, ya que al poseer un ancho mucho mayor que el largo, nuevamente existe el problema de que el ángulo que abarca la voz no logra cubrir todo el ancho de la sala.

Un problema a considerar, particularmente en esta última sala, es el ruido proveniente de las áreas comunes, en este caso el hall presente a un costado de esta sala. Si bien

no se midió el nivel de ruido generado por esta fuente, luego de medir ruido de fondo en el centro de esta sala (sector más cercano al hall) y a un costado de la ventana, el mayor nivel de ruido de fondo fue mayor en el centro de ésta, de aquí se desprende que también se deben tratar acústicamente los elementos orientados hacia este sector, en este caso, la puerta.

Cuando se realizaron todos los análisis, la mayoría de las veces se pasó por alto la normativa chilena, ya que al ser bastante más antigua (1961) que las normativas y criterios existentes, se pierde confianza en ella, además que sus criterios y límites se alejan bastante de lo estipulado en las normativas extranjeras. Pero si bien ésta se actualizó en el año 2000, sólo regula los niveles de ruido para construcciones de uso habitacional, por lo que deja desprotegido a todos los demás recintos que al igual que una vivienda necesitan de cierto confort acústico para que en dentro de él se puedan desarrollar actividades sin inconvenientes del tipo ruido de fondo o ecos.

Por lo tanto queda a criterio de los centros de educacionales (en este caso la Universidad de Chile) , realizar las mejoras pertinentes a sus aulas pero también el diseño de futuras instalaciones, ya que está comprobado que las deficiencias a nivel acústico de un recinto con fines educacionales perjudican en gran medida el proceso enseñanza- aprendizaje, y por tanto si se está pensando en calidad de la educación, se debe pensar también en dar las condiciones para que en las aulas se ejerza de buena manera el proceso de la enseñanza.

10.2 Conclusiones.

Se evaluaron acústicamente seis salas de clases de la Facultad, caracterizándolas según tiempo de reverberación, ruido de fondo, inteligibilidad de la palabra, geometría, materialidad y ubicación. Todos estos parámetros se compararon con lo expuesto en las distintas normativas y criterios de desempeño existentes, y de estas seis salas de clases, se encontró deficiencias en tres de ellas. En la tabla N°10.1 se muestra un monto aproximado de las reparaciones a realizar a cada sala de clases y en la tabla N° 10.2 se resume la evaluación de cada sala.

Fue posible generar propuestas generales para tener tiempos de reverberación óptimos en salas de clases, y son las siguientes:

- Utilización de alfombra en toda la superficie del suelo.
- Tener alturas no mayores a 3,5 m de tal forma de no tener un gran volumen, valor que afecta directamente el tiempo de reverberación.
- Utilización de cielos tratados acústicamente como los dispuestos en el capítulo 3.1.2
- Poseer asientos tapizados en la sala de clases.
- Colocar cortinas en ventanas, ya que así proveerá de material absorbente a la sala y a la vez ayudará al aislamiento.
- Es recomendable poseer material reflectante en la parte delantera de la sala, que por lo general este tipo de material corresponde al pizarrón.
- En salas con anchos mucho mayor que el largo de la sala, utilizar sistemas de amplificadores en los costados de la parte delantera de la sala, de modo garantizar una adecuada distribución del sonido en la sala.

En el diseño de salas de clases, se recomienda que la audiencia quede en el interior de un ángulo de 140° con vértice en la fuente.

Para lograr niveles de aislamiento del ruido exterior óptimos se sugiere lo siguiente:

- Utilización de vidrios dobles con cámara de aire de espesores entre 5 y 7 mm, ya que proporcionan una aislación de más de 30 dB.
- Colocar en puertas y ventanas sellantes acústicos, de tal forma de proveer valores óptimos para aislamiento acústico.

Por lo tanto, es posible concluir que se cumplieron los objetivos generales y específicos de este trabajo de título, es decir, evaluar el acondicionamiento acústico de salas de clases de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, establecer propuestas para el mejoramiento de las existentes, y generar recomendaciones para la el diseño de futuras salas de clases.

Tabla N° 10.1. Monto aproximado de las reparaciones sugeridas.

Sala	Ruido de fondo y/o aislación			Tiempo de reverberación			Geometría	Total
	vidrios dobles con cámara de aire	sellos ventanas	sellos puertas	materiales absorbentes		materiales difusores	amplificadores	
				cielo	piso			
15 Sur	780000	127900	176300	...	...	...	...	\$ 1.084.200
Q10	504000	95900	...	797200	534000	530800	...	\$ 2.461.900
Q12	...	...	...	949800	...	...	606900	\$ 1.556.700
Total								\$ 5.102.800

Tabla N° 10.2. Tabla resumen evaluación acústica en salas de clases de la F.C.F.M. de la Universidad de Chile

Sala	Volumen [m3]	Superficie [m2]	T60 medido[s]	T60 Teorico[s]	T60 recomendado [s]	RF[dBA]	RF recomendado [dBA]	Necesita reparaciones	Monto de estas reparaciones	Observaciones
B103	175	247	0,49	0,45	0,6	33	35	No		....
B112	421	431	0,51	0,56	0,7	26	35	No		....
15 Sur	448	412	0,51	0,71	0,7	31	35	Si	\$ 1.084.200	Existen problemas en la aislación de las ventanas, además de una geometría poco óptima
Q10	1223	758	1,59	1,79	<1	26	40	Si	\$ 2.461.900	Existen problemas de reverberación
Q12	472	434	1,22	1,04	0,7	26	35	Si	\$ 1.556.700	Existen problemas de reverberación y geometría poco óptima
G110	204	218	0,73	0,57	0,6	29	35	No		....

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) “Acoustical Barriers to Learning”. A publication of the Technical Committee on Speech Communication of the Acoustical Society of America
- (2) “Classroom Acoustics”. A publication of the Technical Committee on Speech Communication of the Acoustical Society of America.
- (3) ANSI S12.60-2002. “Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools”.
- (4) Carrión, A.(1998). “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”.
- (5) “Protección frente al Ruido”. Documento básico HR.
- (6) NCh 352 Of61. “Condiciones acústicas que deben cumplir los edificios”.
- (7) Lehmann, C.(2007). “Revisión de los algoritmos de predicción del aislamiento acústico proporcionado por paredes dobles: un análisis comparativo”. Tesis para optar al título de Ingeniero Acústico.
- (8) Torres, R. “Estudio de la calidad acústica de salas de clases en colegios de Valdivia, utilizando STI”. Tesis para optar al título de Ingeniero Acústico.
- (9) OMS. “Guías para el ruido urbano”.
- (10) Recuero, M (1999). “Acústica arquitectónica aplicada”.

GLOSARIO

1.- Reflexión. Ocurre cuando la onda acústica choca con el material, parte de ella rebota y se refleja cambiando de dirección. Esto se produce fundamentalmente cuando la superficie es lisa, no porosa y totalmente rígida, la cual provoca que se refleje la mayor parte de la energía sonora que incide en la superficie.

2.- Difracción. También denominada difusión del sonido. Es un fenómeno característico de las ondas que consiste en la dispersión y curvado aparente de las ondas cuando encuentran un obstáculo. Se consigue mediante la colocación de elementos expresamente diseñados para dispersar, de forma **uniforme** y en múltiples direcciones, la energía sonora que incide sobre los mismos.

3.- Absorción. Es un fenómeno que afecta a la propagación del sonido. Cuando una onda sonora alcanza una superficie, la mayor parte de su energía se refleja, pero un porcentaje de ésta es absorbida por el nuevo medio. Todos los medios absorben un porcentaje de energía que propagan, ninguno es completamente opaco. La capacidad de absorción del sonido de un material es la relación entre la energía absorbida por el material y la energía reflejada por el mismo. Es un valor que varía entre 0 (toda la energía se refleja) y 1 (toda la energía es absorbida).

4.- c. Es la velocidad a la que viajan las ondas sonoras, se mide m/s. A una temperatura de 20°C la velocidad del sonido es de 344 m/s.

5.- Reverberación. Es el fenómeno de persistencia del sonido en el interior de un recinto, una vez cesada la fuente de ruido, debido a reflexiones sucesivas en los cerramientos del mismo.

6.- Coeficiente de absorción. Indica una relación entre la cantidad de sonido que absorbe una superficie en relación con la energía incidente.

7. dB. Decibel. Unidad adimensional utilizada para expresar el logaritmo de la razón entre una cantidad medida y una cantidad de referencia. De esta manera, decibel es utilizado para describir niveles de presión, potencia o intensidad sonora.

8. dBA. Decibel A. Unidad de medida del ruido que toma en cuenta las diferencias de sensibilidad que el oído humano tiene para las distintas frecuencias dentro del campo auditivo.

9. Aislamiento acústico. Es la capacidad que tiene un determinado material para no transmitir el ruido y también se refiere al conjunto de materiales, técnicas y tecnologías desarrolladas para aislar o atenuar el nivel sonoro en un determinado espacio.

10. Ruido aéreo. Es el sonido transmitido por el aire. Las compresiones o depresiones del aire tienen incidencia en los elementos constructivos que limitan un local produciendo vibraciones, transmitiendo sus deformaciones al aire del espacio adyacente, convirtiéndose así en una fuente productora de sonido.

11. Ruido de impacto. Se refiere al sonido transmitido por cuerpos sólidos, es decir el que se propaga por la estructura del edificio y llega al oído mediante ondas aéreas.

12. Impedancia acústica. Corresponde a la dificultad o resistencia que encuentran las ondas sonoras para su propagación por un medio. Esta resistencia se compone del amortiguamiento y rigidez que presenta el elemento constructivo.

13. Ruido Rosa. Ruido utilizado para realizar las medidas normalizadas. Contiene un nivel sonoro constante en todas las bandas de octava. Es el más utilizado para mediciones de propiedades acústicas de los materiales.

14. Onda estacionaria. Onda que no se propaga a través del espacio.

ANEXO A. Memoria de cálculo

1. Cálculos tiempo de reverberación.

- Cálculo del tiempo de reverberación sala B103.

- Dimensiones:

Altura=	2,9	m
Ancho=	6,24	m
Largo=	9,69	m
Volumen=	175	m ³

	Material	S (m ²)	α (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Piso	cuprepiso boucle 900 gr	60	0,04	0,095	0,15	0,335	0,52	0,52
Paredes	Hormigón,pintado	17	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	tabiquería(yeso)	46	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Puerta	Madera lisa	5	0,12	0,22	0,17	0,09	0,1	0,1
Cielo	cielo falso	60	0,2	0,3	0,2	0,17	0,15	0,17
Ventanas	Vidrio	57	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Asientos	tapizado	10	0,3	0,32	0,27	0,3	0,33	0,33
Mesas	Madera enchapada	14	0,05	0,06	0,06	0,1	0,1	0,1
Stotal[m²]		247						

- Absorción total:

	A					
	125	250	500	1000	2000	4000
Piso	2,419	5,744	9,070	20,256	31,442	31,442
Paredes	0,174	0,174	0,174	0,347	0,347	0,347
tabiques	0,460	0,460	0,921	1,381	1,842	2,302
Puerta	0,655	1,201	0,928	0,491	0,546	0,546
Cielo	12,093	18,140	12,093	10,279	9,070	10,279
Ventanas	2,294	2,294	1,720	1,720	1,147	1,147
Asientos	17,400	18,560	15,660	17,400	19,140	19,140
Mesas	2,900	3,480	3,480	5,800	5,800	5,800
Atotal	38,395	50,053	44,046	57,675	69,334	71,003

	Octava de Banda (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Coef medio de absorción	0,155	0,203	0,178	0,233	0,281	0,287

	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
Tiempo de Reverberación [s]	0,67	0,50	0,58	0,43	0,35	0,34	0,45

- **Cálculo del tiempo de reverberación sala B112.**

-Dimensiones:

Altura=	3,10	m
Ancho=	9,87	m
Largo=	14,06	m
Volumen=	421	m ³

	Material	S (m2)	125	250	500	1000	2000	4000
Piso	cuprepiso boucle 900 gr	139	0,04	0,095	0,15	0,335	0,52	0,52
Paredes	Hormigón, pintado	25	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	Tabiqueria	105	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Puerta	Madera lisa	5	0,12	0,22	0,17	0,09	0,1	0,1
Cielo	cielo romeral nieve 60/60	139	0,2	0,3	0,2	0,17	0,15	0,17
Ventanas	Vidrio	18	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Asientos	Tapizado	20	0,3	0,32	0,27	0,3	0,33	0,33
Mesas	Madera enchapada	24	0,05	0,06	0,06	0,1	0,1	0,1
	Stotal[m2]	431						

- Absorción total:

	A					
	125	250	500	1000	2000	4000
Piso	5,55	13,18	20,82	46,49	72,16	72,16
Paredes	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50
Puerta	0,66	1,20	0,93	0,49	0,55	0,55
Cielo	27,75	41,63	27,75	23,59	20,82	23,59
Ventanas	0,71	0,71	0,53	0,53	0,36	0,36
Asientos	30,00	32,00	27,00	30,00	33,00	33,00
Mesas	5,00	6,00	6,00	10,00	10,00	10,00
Atotal	69,92	94,98	83,28	111,61	137,38	140,16

	Octava de Banda (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Coef medio de absorción	0,16	0,22	0,19	0,26	0,32	0,32

	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
Tiempo de Reverberación [s]	0,89	0,63	0,73	0,52	0,41	0,40	0,56

- Cálculo del tiempo de reverberación sala 15 Sur.

- Dimensiones:

Altura_prom=	5,40	m
Ancho=	7,78	m
Largo=	11,18	m
Volumen=	448	m ³

	Material	S (m ²)	α (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Piso	carpetado boucle 900 gr	82	0,04	0,10	0,15	0,34	0,52	0,52
Paredes	Hormigón,pintado	172	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Puerta	Madera maciza	4	0,10	0,08	0,05	0,05	0,04	0,04
Cielo	Cielo de poliestireno	121	0,18	0,28	0,24	0,3	0,5	0,59
Ventanas	Vidrio	28	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Asientos	Tapizado	14	0,30	0,32	0,27	0,30	0,33	0,33
Mesas	Madera enchapada	14	0,05	0,06	0,06	0,10	0,10	0,10
Tarima	Entablado de madera	5	0,19	0,16	0,13	0,10	0,06	0,06
Cortinas	Tela colgando sobre pared	28	0,04	0,20	0,35	0,34	0,32	0,32
	Stotal[m²]	412						

-Absorción total

	A					
	125	250	500	1000	2000	4000
Piso	3,28	7,78	12,29	27,45	42,61	42,61
Paredes	1,72	1,72	1,72	3,44	3,44	3,44
Puerta	0,41	0,31	0,21	0,18	0,16	0,16
Cielo	21,71	33,78	28,95	36,19	60,32	71,18
Ventanas	1,14	1,14	0,85	0,85	0,57	0,57
Asientos	10,50	11,20	9,45	10,50	11,55	11,55
Mesas	1,75	2,10	2,10	3,50	3,50	3,50
Tarima	0,96	0,81	0,66	0,50	0,30	0,30
Cortinas	1,14	5,56	9,97	9,54	9,12	9,12
Atotal	42,61	64,39	66,20	92,17	131,57	142,43

	Octava de Banda (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Coef medio de absorción	0,10	0,16	0,16	0,22	0,32	0,35

	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
Tiempo de Reverberación [s]	1,60	1,03	1,00	0,69	0,45	0,41	0,71

- **Cálculo del tiempo de reverberación sala Q10.**

- Dimensiones:

Altura promedio=	7,5	m
Ancho=	11,625	m
Largo=	9,9	m
Cóncava largo	18,3	m
Volumen total	1223	m ³

	Material	S (m ²)	α(Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Piso	Vinilico	168	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Paredes	Hormigón,pintado	209	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	Madera (enchapada)	38	0,05	0,06	0,06	0,10	0,10	0,10
Puerta	Madera maciza	17	0,10	0,08	0,05	0,05	0,04	0,04
Cielo	Hormigón, pintado	168	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	Cielo falso(poliestireno)	140	0,18	0,28	0,24	0,3	0,5	0,59
Ventanas	Vidrio	18	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Asientos	Tapizado	24	0,30	0,32	0,27	0,30	0,33	0,33
Mesas	Madera	24	0,10	0,08	0,05	0,05	0,04	0,04
	Stotal[m2]	758						

- Absorción total

	A					
	125	250	500	1000	2000	4000
Piso	3,36	5,04	5,04	5,04	5,04	3,36
Paredes	2,09	2,09	2,09	4,18	4,18	4,18
madera	1,89	2,26	2,26	3,77	3,77	3,77
Puerta	1,69	1,27	0,85	0,76	0,68	0,68
Cielo	1,68	1,68	1,68	3,36	3,36	3,36
	25,25	39,28	33,67	42,09	70,15	82,78
Ventanas	0,72	0,72	0,54	0,54	0,36	0,36
Asientos	36,00	38,40	32,40	36,00	39,60	39,60
Mesas	12,00	9,00	6,00	5,40	4,80	4,80
Atotal	84,68	99,75	84,53	101,14	131,94	142,89

	Octava de Banda (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Coef medio de absorción	0,112	0,132	0,112	0,133	0,174	0,189

	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
Tiempo de Reverberación [s]	2,19	1,84	2,20	1,81	1,36	1,24	1,79

- **Cálculo del tiempo de reverberación sala Q12.**

- Dimensiones:

Altura_prom=	3,54	m
Ancho=	14,5	m
Largo=	9,19	m
Volumen=	472	m ³

	Material	S (m ²)	α(Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Piso	cubre piso boucle 900 gr	133	0,04	0,095	0,15	0,335	0,52	0,52
Paredes	Hormigón,pintado	143	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Puerta	Madera lisa	5	0,12	0,22	0,17	0,09	0,1	0,1
Cielo	cielo romeral nieve 60/60	133	0,2	0,3	0,2	0,17	0,15	0,17
Ventanas(2)	Vidrio	20	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Asientos(59)	Tapizado	12	0,3	0,32	0,27	0,3	0,33	0,33
Mesas	Madera enchapada	43	0,05	0,06	0,06	0,1	0,1	0,1
	Stotal[m2]	434						

- Absorción total.

	A					
	125	250	500	1000	2000	4000
Piso	5,33	12,66	19,99	44,64	69,29	69,29
Paredes	1,43	1,43	1,43	2,85	2,85	2,85
Puerta	0,63	1,16	0,89	0,47	0,53	0,53
Cielo	26,65	39,98	26,65	22,65	19,99	22,65
Ventanas	0,80	0,80	0,60	0,60	0,40	0,40
Asientos	0,30	0,32	0,27	0,30	0,33	0,33
Mesas	0,05	0,06	0,06	0,10	0,10	0,10
Atotal	35,18	56,39	49,88	71,61	93,49	96,15

	Octava de Banda (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Coef medio de absorción	0,08	0,13	0,11	0,16	0,22	0,22

	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
Tiempo de Reverberación [s]	2,07	1,26	1,43	0,97	0,72	0,70	1,04

- Cálculo del tiempo de reverberación sala G110.

- Dimensiones:

Altura=	3,6	m
Ancho=	6,85	m
Largo=	8,05	m
Volumen=	199	m ³

	Material	S (m ²)	α(Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Piso	Alfombra tipo Buclé	55	0,04	0,10	0,15	0,34	0,52	0,52
Paredes	Hormigón,pintado	67	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	tabique hormigón celular	25	0,16	0,22	0,28	0,20	0,20	0,31
Puerta	Vidrio	2	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
	madera	1	0,09	0,11	0,10	0,11	0,08	0,08
Cielo	ROMERAL Brisa	55	0,2	0,3	0,2	0,17	0,15	0,17
Ventanas	Vidrio doble	12	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Asientos	Tapizado	8	0,30	0,32	0,27	0,30	0,33	0,33
Mesas	Madera enchapada	8	0,05	0,06	0,06	0,10	0,10	0,10
	Stotal[m2]	218						

- Absorción total.

	A					
	125	250	500	1000	2000	4000
Piso	2,21	5,24	8,27	18,47	28,67	28,67
Paredes	0,67	0,67	0,67	1,35	1,35	1,35
tabique	3,95	5,43	6,90	4,93	4,93	7,64
Puerta (vidrio)	0,06	0,06	0,05	0,05	0,03	0,03
Puerta (madera)	0,10	0,12	0,11	0,12	0,09	0,09
Cielo	11,03	16,54	11,03	9,37	8,27	9,37
Ventanas	0,50	0,50	0,37	0,37	0,25	0,25
Asientos	12,00	12,80	10,80	12,00	13,20	13,20
Mesas	2,00	2,40	2,40	4,00	4,00	4,00
Atotal	32,52	43,77	40,61	50,67	60,80	64,61

	Octava de Banda (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Coef medio de absorción	0,149	0,201	0,187	0,233	0,279	0,297

	Octava de Banda (Hz)						T60 mid
	125	250	500	1000	2000	4000	
Tiempo de Reverberación [s]	0,91	0,65	0,71	0,55	0,45	0,42	0,57

2. Cálculo del %ALCons

Sala	Volumen [m3]	Dc						limite r					
		125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
G110	199	1,2	1,5	1,4	1,6	1,8	1,9	3,9	4,6	4,4	5,1	5,7	6,0
B103	175	1,3	1,6	1,4	1,7	1,9	2,0	4,2	5,0	4,6	5,4	6,1	6,2
B112	421	1,8	2,2	2,0	2,4	2,8	2,9	5,7	6,9	6,4	7,7	8,9	9,0
15S	448	1,4	1,8	1,9	2,3	2,9	3,1	4,5	5,8	5,9	7,2	9,3	9,9
Q12	472	1,2	1,6	1,5	1,8	2,2	2,2	3,9	5,0	4,7	5,8	6,8	7,0
Q10	1223	1,9	2,1	1,9	2,1	2,5	2,6	6,1	6,7	6,1	6,8	7,9	8,3

SALA B103	
	%ALCons
r[m]	2000 Hz
0,5	0,017
1	0,068
1,5	0,154
2	0,274
2,5	0,428
3	0,616
3,5	0,838
4	1,094
4,5	1,385
5	1,710
5,5	2,069
6	2,463
6,5	3,112
7	3,112
7,5	3,112
8	3,112
8,5	3,112
9	3,112
9,5	3,112
10	3,112
10,5	3,112
11	3,112
11,5	3,112
12	3,112
12,5	3,112
13	3,112

SALA B112	
	%ALCons
r[m]	2000 Hz
0,5	0,010
1	0,040
1,5	0,090
2	0,160
2,5	0,249
3	0,359
3,5	0,489
4	0,638
4,5	0,808
5	0,997
5,5	1,207
6	1,436
6,5	1,685
7	1,955
7,5	2,244
8	2,553
8,5	2,882
9	3,688
9,5	3,688
10	3,688
10,5	3,688
11	3,688
11,5	3,688
12	3,688
12,5	3,688
13	3,688
13,5	3,688
14	3,688
14,5	3,688
15	3,688
15,5	3,688
16	3,688
16,5	3,688
17	3,688
17,5	3,688
18	3,688
18,5	3,688
19	3,688
19,5	3,688
20	3,688

SALA 15S	
	%ALCons
r[m]	2000 Hz
0,5	0,011
1	0,045
1,5	0,101
2	0,179
2,5	0,280
3	0,404
3,5	0,550
4	0,718
4,5	0,909
5	1,122
5,5	1,357
6	1,615
6,5	1,896
7	2,199
7,5	2,524
8	2,872
8,5	3,242
9	4,033
9,5	4,033
10	4,033
10,5	4,033
11	4,033
11,5	4,033
12	4,033
12,5	4,033
13	4,033
13,5	4,033
14	4,033
14,5	4,033
15	4,033
15,5	4,033
16	4,033
16,5	4,033
17	4,033
17,5	4,033
18	4,033
18,5	4,033
19	4,033
19,5	4,033
20	4,033

SALA Q10	
	%ALCons
r[m]	2000 Hz
0,5	0,038
1	0,151
1,5	0,340
2	0,605
2,5	0,946
3	1,362
3,5	1,853
4	2,421
4,5	3,064
5	3,782
5,5	4,577
6	5,447
6,5	6,392
7	7,413
7,5	8,510
8	12,242
8,5	12,242
9	12,242
9,5	12,242
10	12,242
10,5	12,242
11	12,242
11,5	12,242
12	12,242
12,5	12,242
13	12,242
13,5	12,242
14	12,242
14,5	12,242
15	12,242
15,5	12,242
16	12,242
16,5	12,242
17	12,242
17,5	12,242
18	12,242
18,5	12,242
19	12,242
19,5	12,242
20	12,242
20,5	12,242
21	12,242
21,5	12,242
22	12,242

22,5	12,242
23	12,242

SALA Q12	
	%ALCons
r[m]	2000 Hz
0,5	0,028
1	0,110
1,5	0,248
2	0,441
2,5	0,690
3	0,993
3,5	1,352
4	1,765
4,5	2,234
5	2,758
5,5	3,337
6	3,972
6,5	4,661
7	6,493
7,5	6,493
8	6,493
8,5	6,493
9	6,493
9,5	6,493
10	6,493
10,5	6,493
11	6,493
11,5	6,493
12	6,493
12,5	6,493
13	6,493
13,5	6,493
14	6,493
14,5	6,493
15	6,493
15,5	6,493
16	6,493
16,5	6,493
17	6,493
17,5	6,493
18	6,493
18,5	6,493
19	6,493
19,5	6,493

20	6,493
20,5	6,493
21	6,493
21,5	6,493
22	6,493
22,5	6,493
23	6,493

SALA G110	
	%ALCons
r[m]	2000 Hz
0,5	0,025
1	0,101
1,5	0,228
2	0,405
2,5	0,633
3	0,911
3,5	1,240
4	1,619
4,5	2,049
5	2,530
5,5	3,062
6	4,034
6,5	4,034
7	4,034
7,5	4,034
8	4,034
8,5	4,034
9	4,034
9,5	4,034
10	4,034

ANEXO B. Fotografías.

- **Sala B103**



Fotografía B.1. Vista general.



Fotografía B.2. Cielo falso.



Fotografía B.3. Puerta entrada a sala.



Fotografía B.4. Vista exterior sala de clases.

- Sala B112



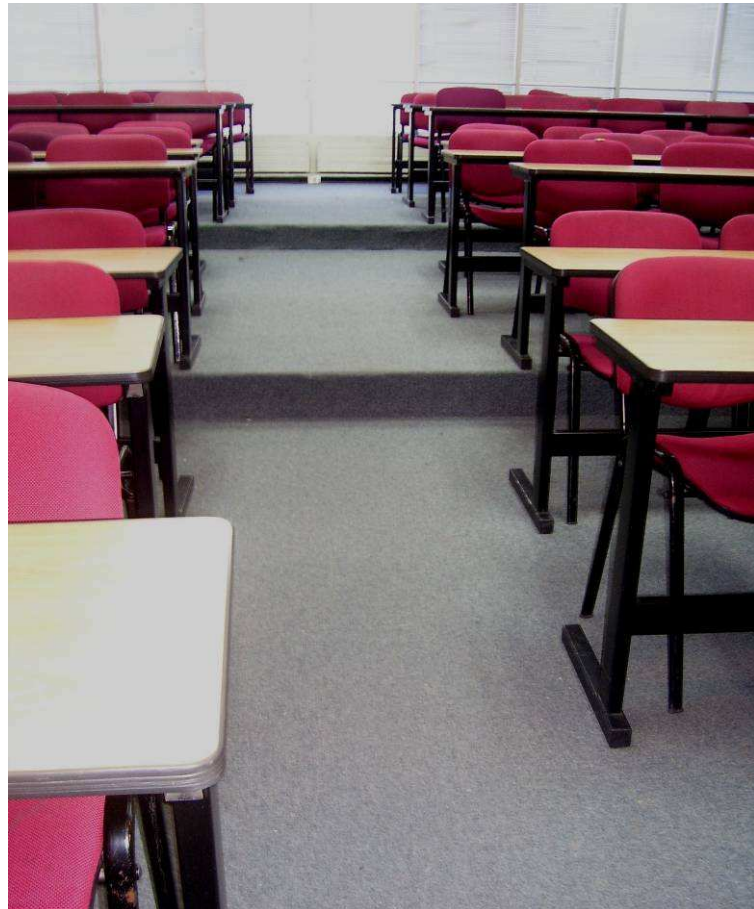
Fotografía B.5. Vista general.



Fotografía B.6. Vista parte delantera. Forma cóncava.



Fotografía B.7.Cielo falso.



Fotografía B.8. Piso alfombrado y escalonado.



Fotografía B.9. Puerta entrada a sala.



Fotografía B.10. Vista exterior sala de clases.

- Sala 15 Sur



Fotografía B.11. Vista general.



Fotografía B.12. Cielo falso dispuesto en forma escalonada.

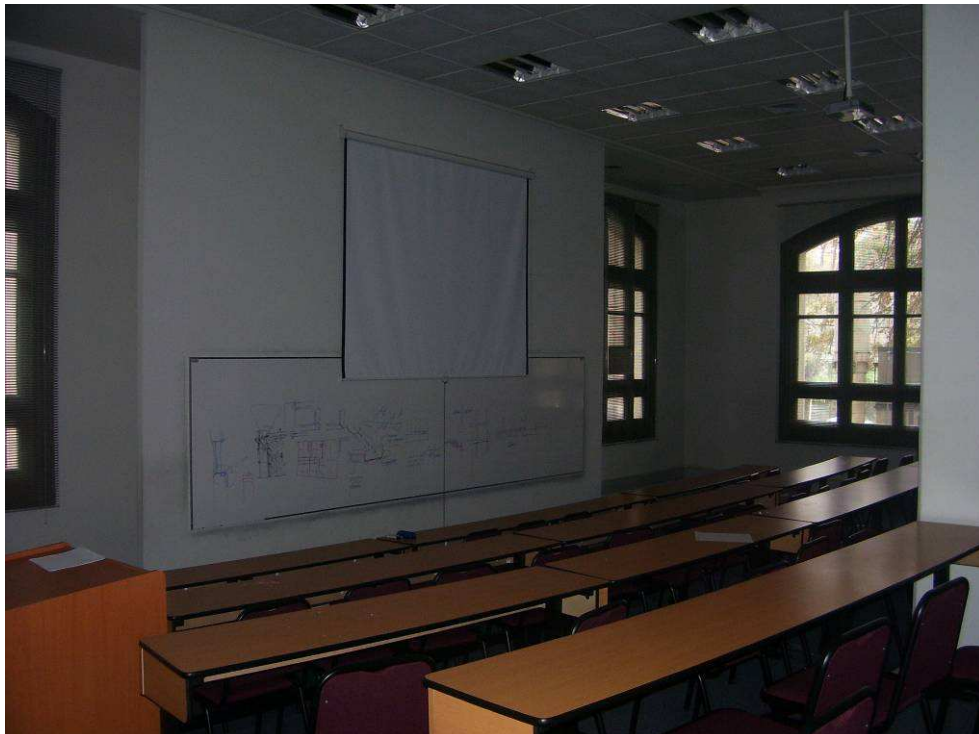


Fotografía B.13. Vista exterior sala de clases.

- Sala Q12



Fotografía B.14.Cielo falso.



Fotografía B.15.Vista general izquierda a derecha.



Fotografía B.16. Vista general derecha a izquierda.



Fotografía B.17. Extractor a un costado del aula.



Fotografía B.18. Vista exterior sala de clases.

- Sala Q10



Fotografía B.19. Vista general.



Fotografía B.20. Escalones y piso.



Fotografía B.21.Ventana.



Fotografía B.22. Cielo falso colgante.



Fotografía B.23. Vista exterior sala de clases.

- **Sala G110.**



Fotografía B.24. Vista general.



Fotografía B.25. Cielo falso.



Fotografía B.26. Puerta ingreso a sala.



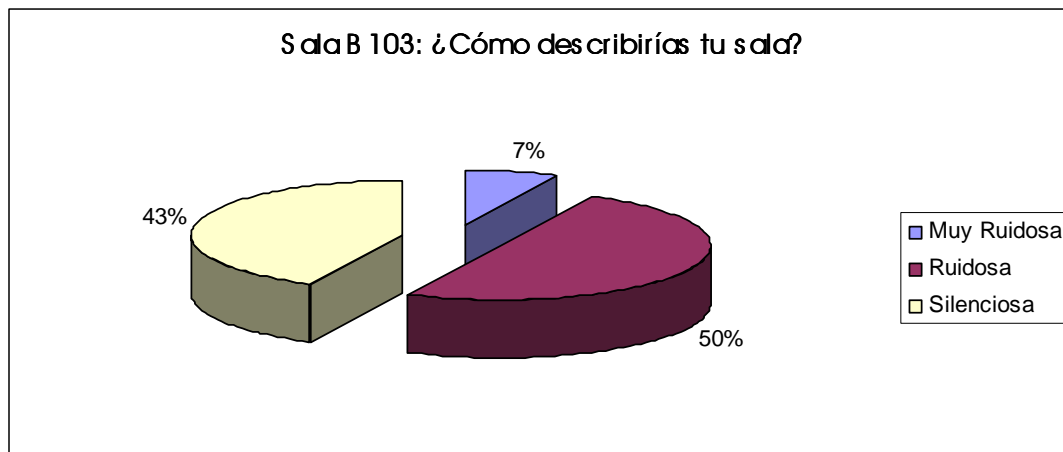
Fotografía B.27. Vista exterior sala de clases.

ANEXO C. Encuesta a estudiantes.

- Encuesta a usuarios de Sala B103.

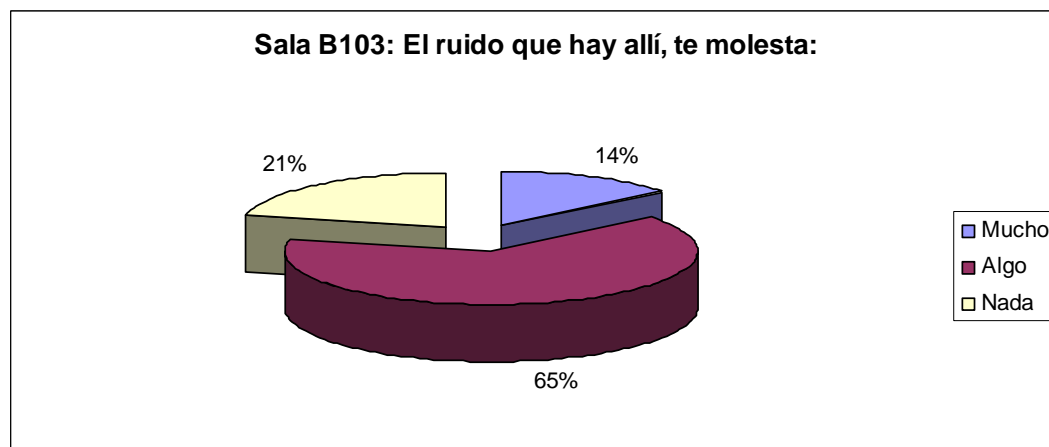
P1 ¿Cómo describirías tu sala?

	n° respuestas	
Muy Ruidosa	1	7 %
Ruidosa	7	50 %
Silenciosa	6	43 %



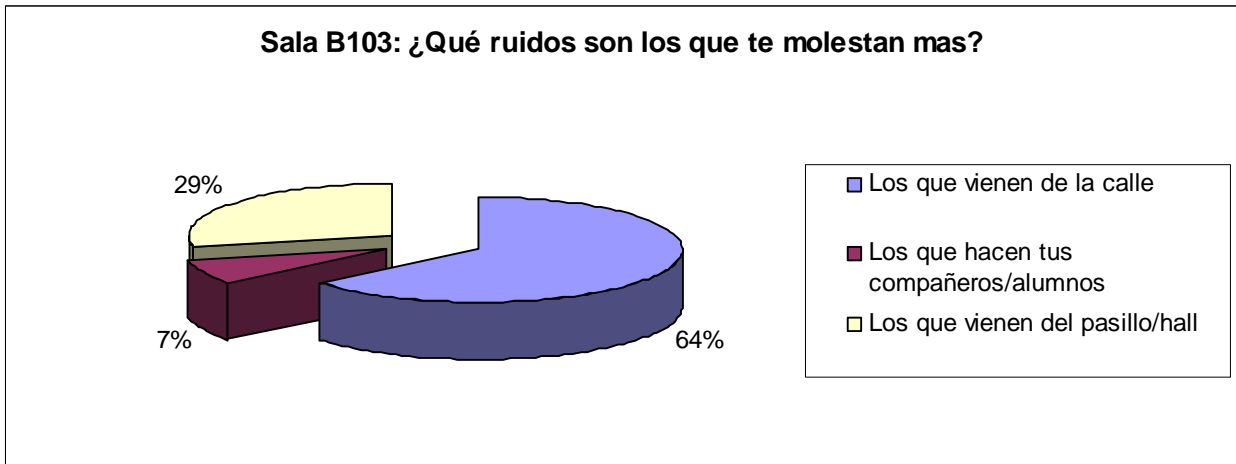
P2 El ruido que hay allí, te molesta:

	n° respuestas	
Mucho	2	14 %
Algo	9	64 %
Nada	3	21 %



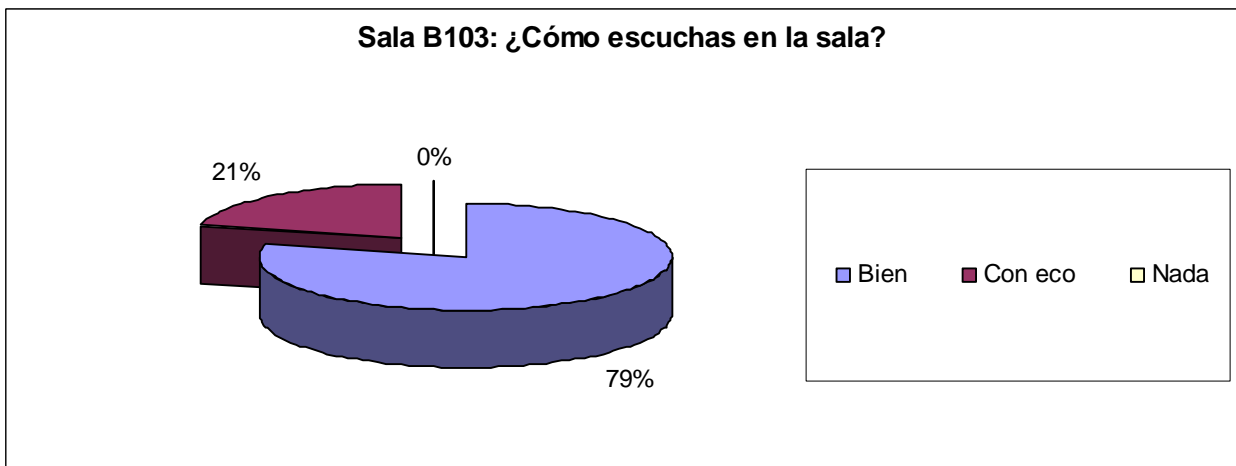
P3 ¿Qué ruidos son los que te molestan más?

	n° respuestas	
Los que vienen de la calle	9	64 %
Los que hacen tus compañeros/alumnos	1	7 %
Los que vienen del pasillo/hall	4	29 %



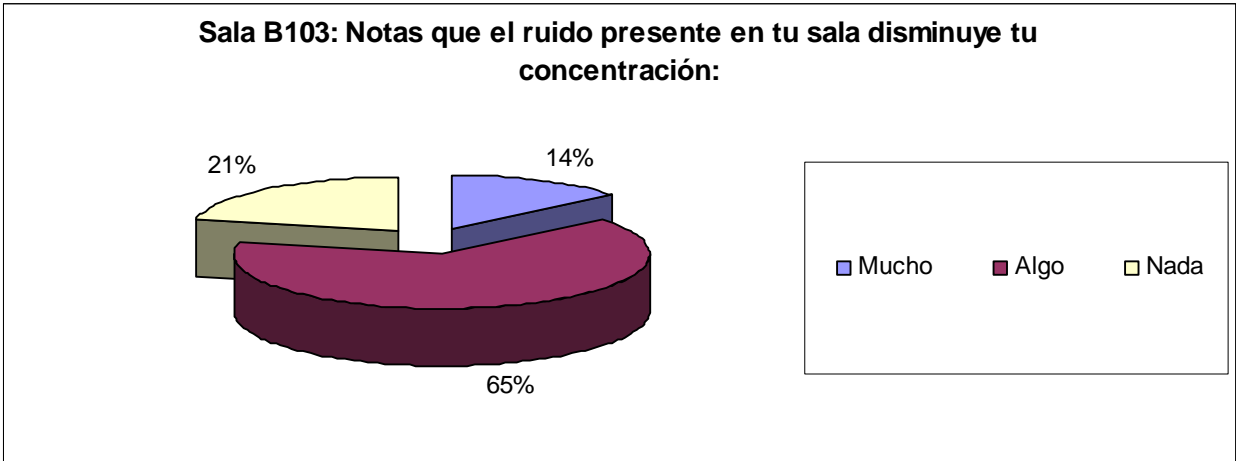
P4 ¿Cómo escuchas en la sala?

	n° respuestas	
Bien	11	79 %
Con eco	3	21 %
Nada	0	0 %



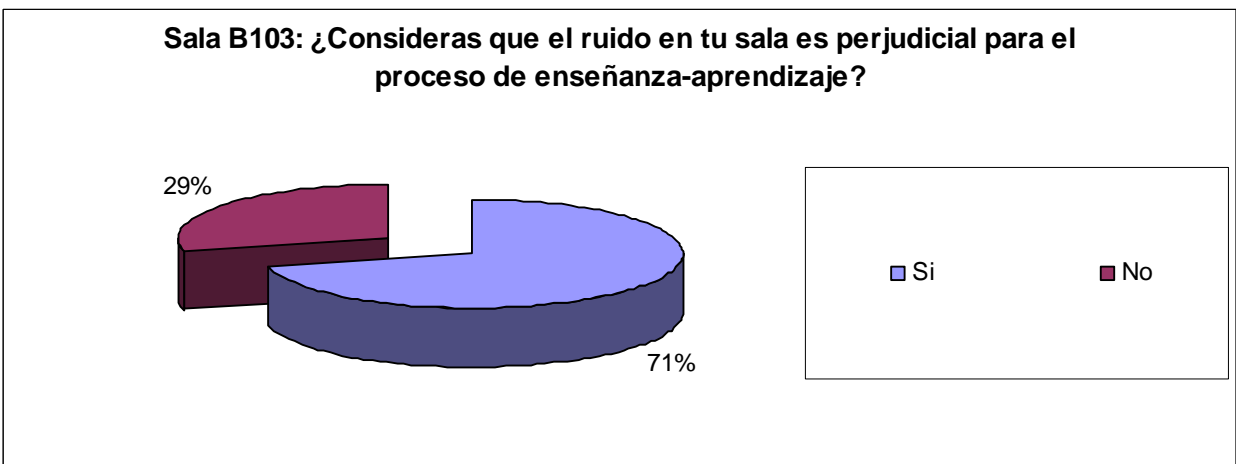
P5 Notas que el ruido presente en tu sala disminuye tu concentración:

	n° respuestas	
Mucho	2	14 %
Algo	9	64 %
Nada	3	21 %



P6 ¿Consideras que el ruido en tu sala es perjudicial para el proceso de enseñanza-aprendizaje?

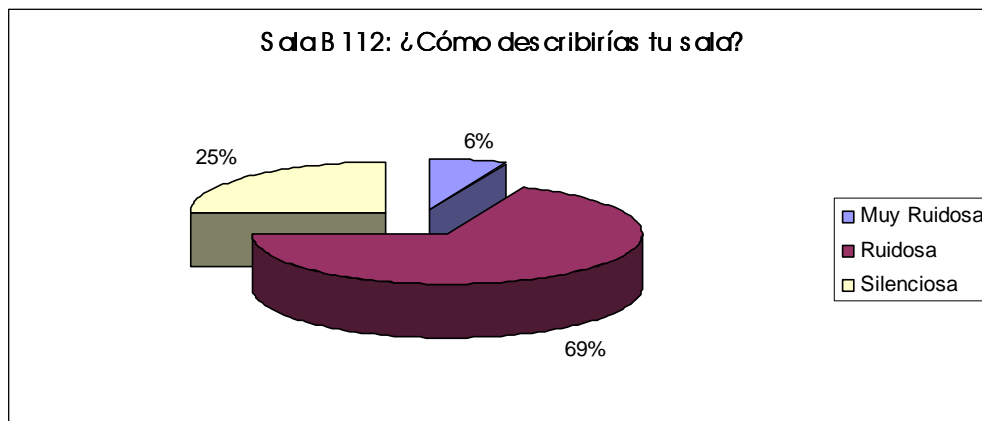
	n° respuestas	
Si	10	71 %
No	4	29 %



- Encuesta a usuarios de Sala B112.

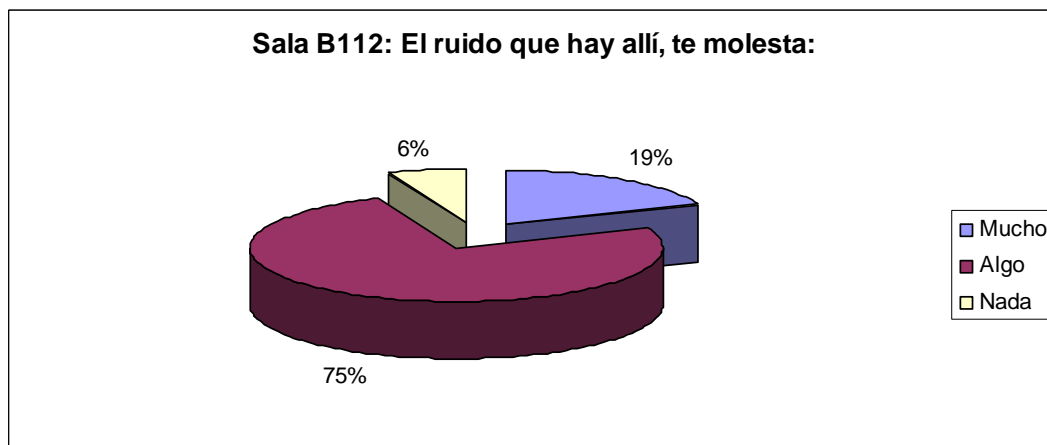
P1 ¿Cómo describirías tu sala?

	n° respuestas	
Muy Ruidosa	1	6 %
Ruidosa	11	69 %
Silenciosa	4	25 %



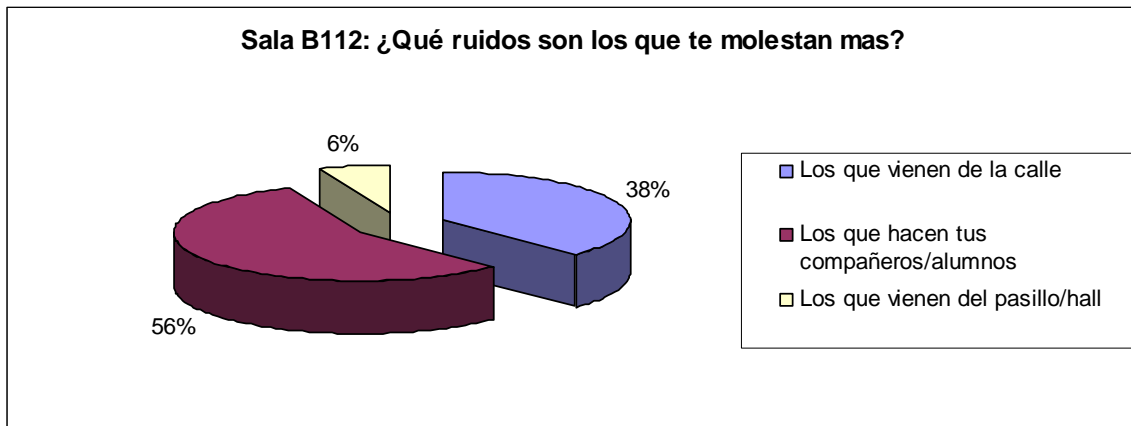
P2 El ruido que hay allí, te molesta:

	n° respuestas	
Mucho	3	19 %
Algo	12	75 %
Nada	1	6 %



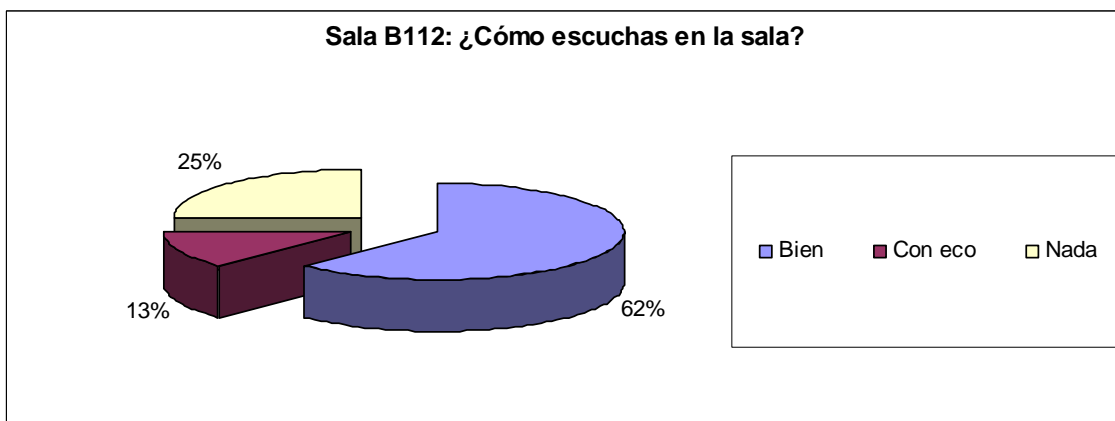
P3 ¿Qué ruidos son los que te molestan más?

	n° respuestas	
Los que vienen de la calle	6	38 %
Los que hacen tus compañeros/alumnos	9	56 %
Los que vienen del pasillo/hall	1	6 %



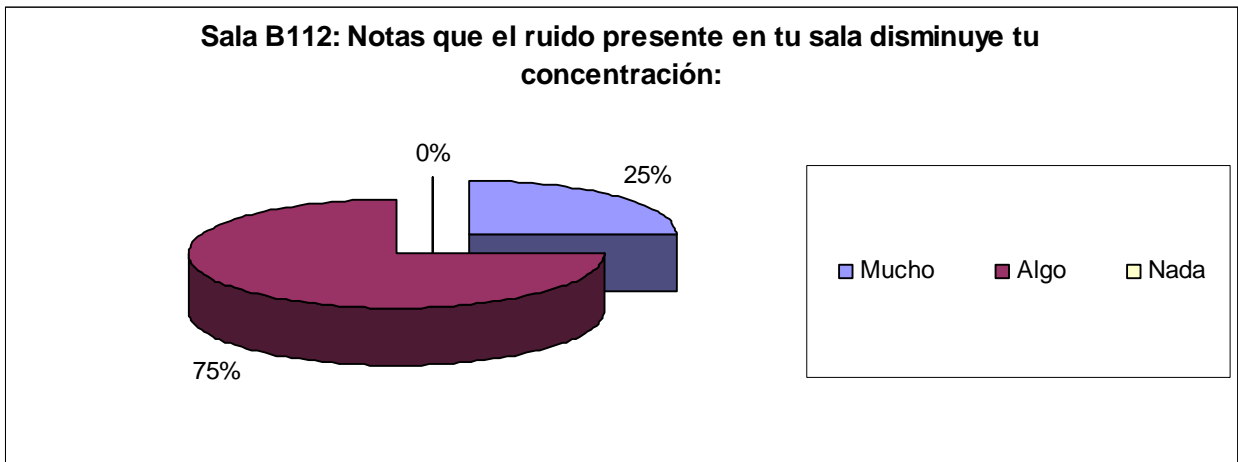
P4 ¿Cómo escuchas en la sala?

	n° respuestas	
Bien	10	63 %
Con eco	2	13 %
Nada	4	25 %



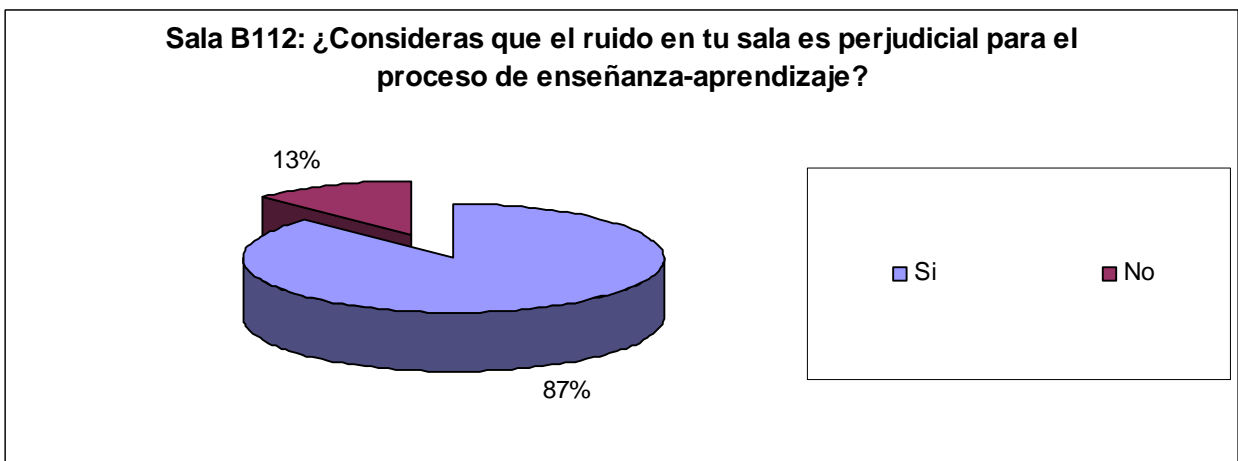
P5 Notas que el ruido presente en tu sala disminuye tu concentración:

	n° respuestas	
Mucho	4	25 %
Algo	12	75 %
Nada	0	0 %



P6 ¿Consideras que el ruido en tu sala es perjudicial para el proceso de enseñanza-aprendizaje?

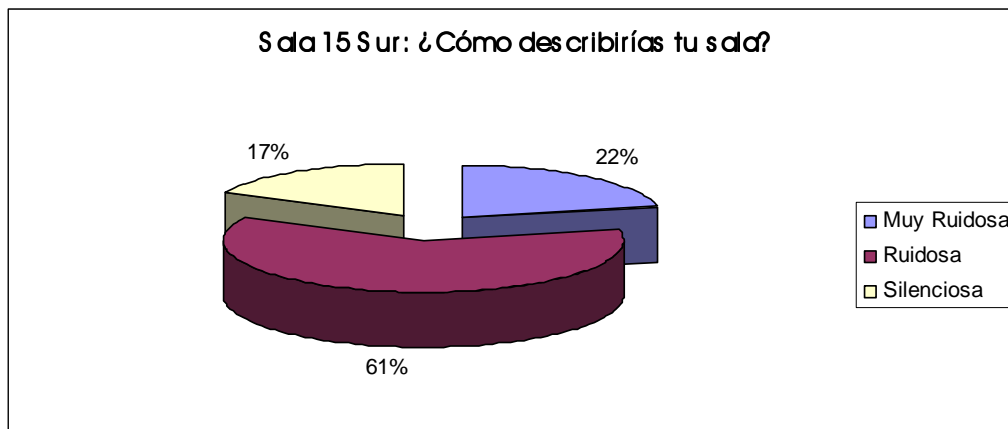
	n° respuestas	
Si	14	88 %
No	2	13 %



- Encuesta a usuarios de Sala 15 Sur.

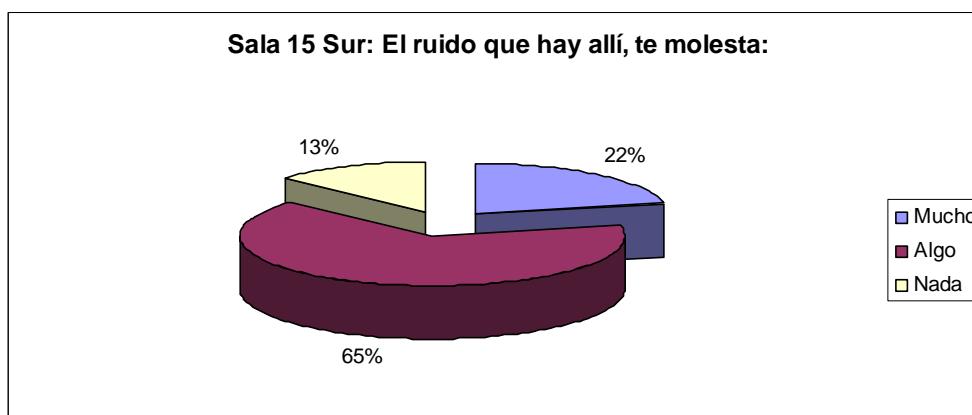
P1 ¿Cómo describirías tu sala?

	n° respuestas	
Muy Ruidosa	5	22 %
Ruidosa	14	61 %
Silenciosa	4	17 %



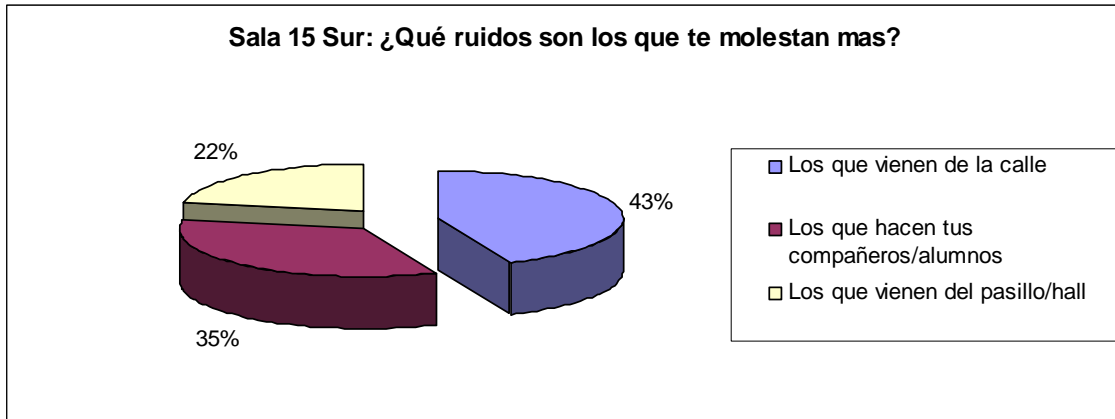
P2 El ruido que hay allí, te molesta:

	n° respuestas	
Mucho	5	22 %
Algo	15	65 %
Nada	3	13 %



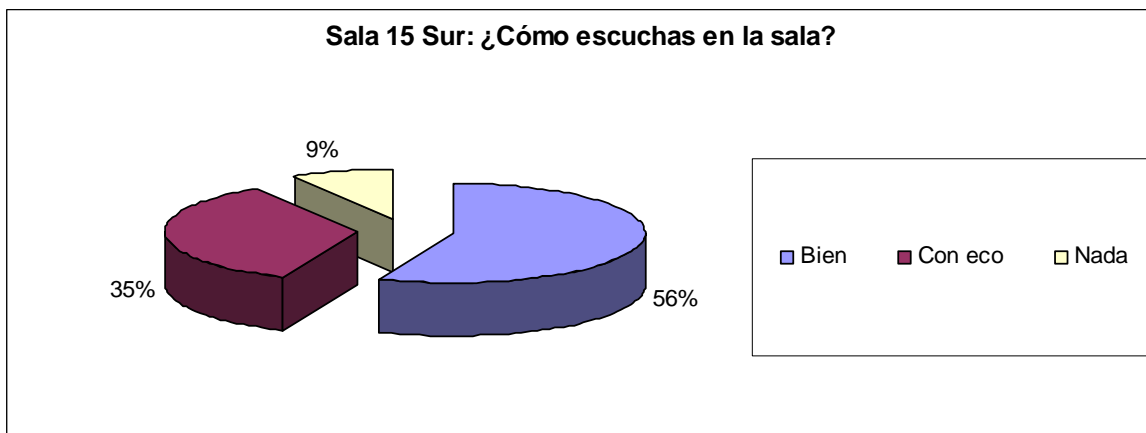
P3 ¿Qué ruidos son los que te molestan más?

	n° respuestas	
Los que vienen de la calle	10	43 %
Los que hacen tus compañeros/alumnos	8	35 %
Los que vienen del pasillo/hall	5	22 %



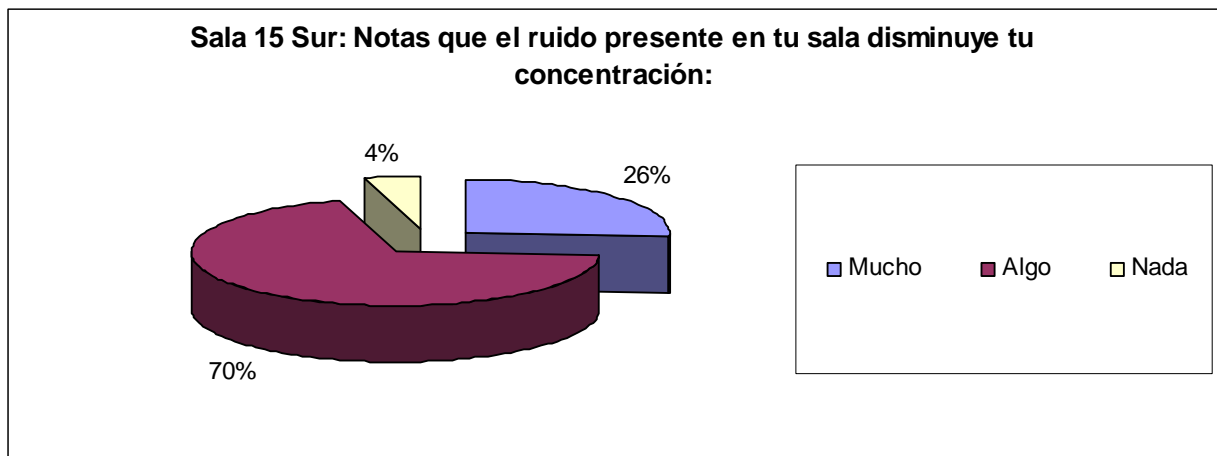
P4 ¿Cómo escuchas en la sala?

	n° respuestas	
Bien	13	57 %
Con eco	8	35 %
Nada	2	9 %



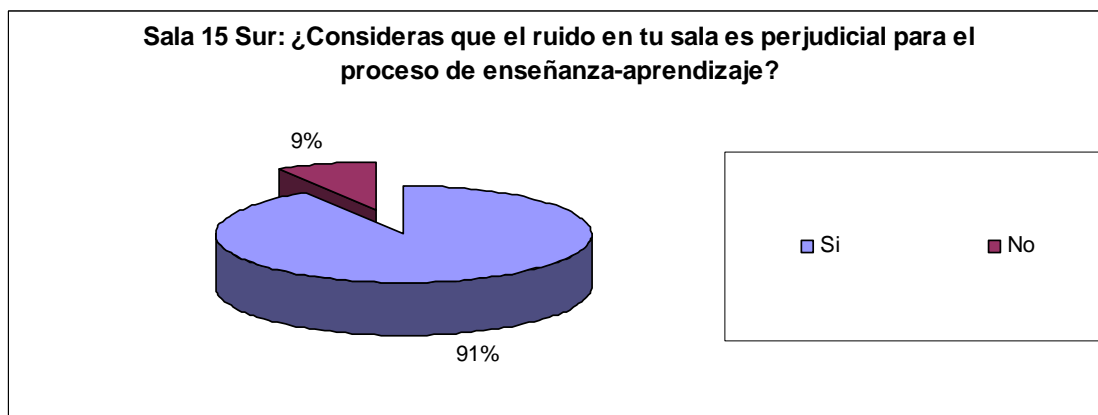
P5 Notas que el ruido presente en tu sala disminuye tu concentración:

	n° respuestas	
Mucho	6	26 %
Algo	16	70 %
Nada	1	4 %



P6 ¿Consideras que el ruido en tu sala es perjudicial para el proceso de enseñanza-aprendizaje?

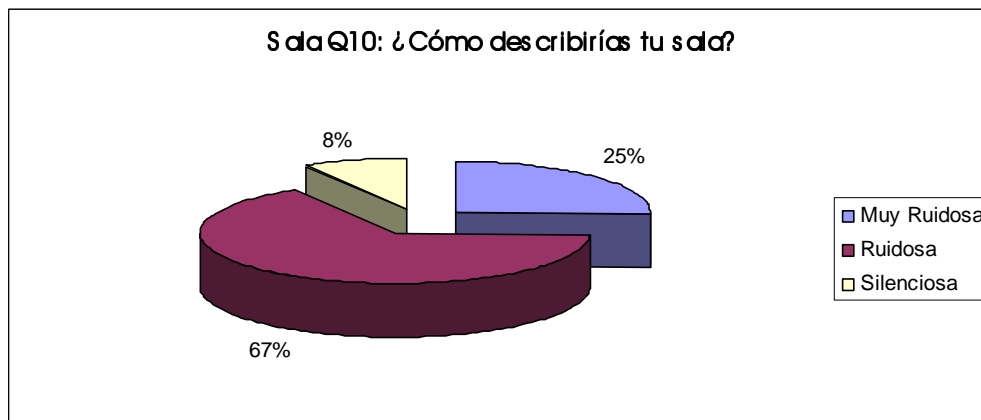
	n° respuestas	
Si	21	91 %
No	2	9 %



- Encuesta a usuarios de Sala Q10.

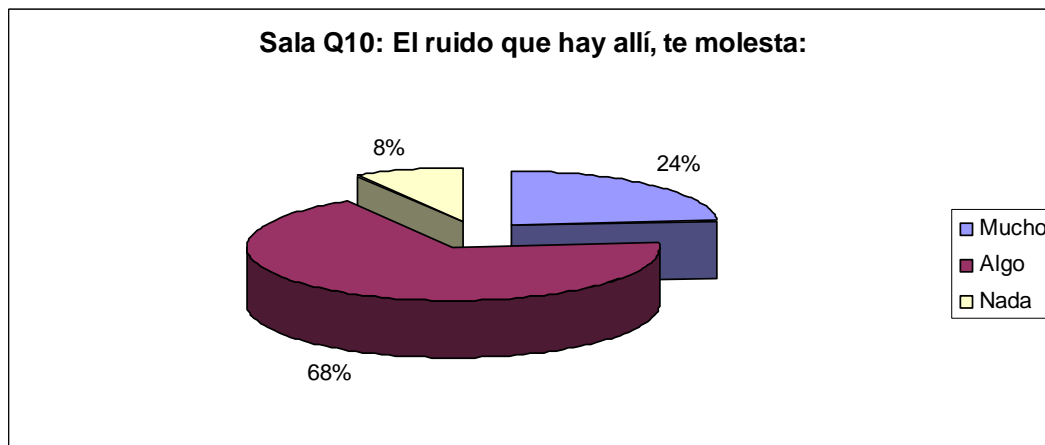
P1 ¿Cómo describirías tu sala?

	n° respuestas	
Muy Ruidosa	15	25 %
Ruidosa	39	66 %
Silenciosa	5	8 %



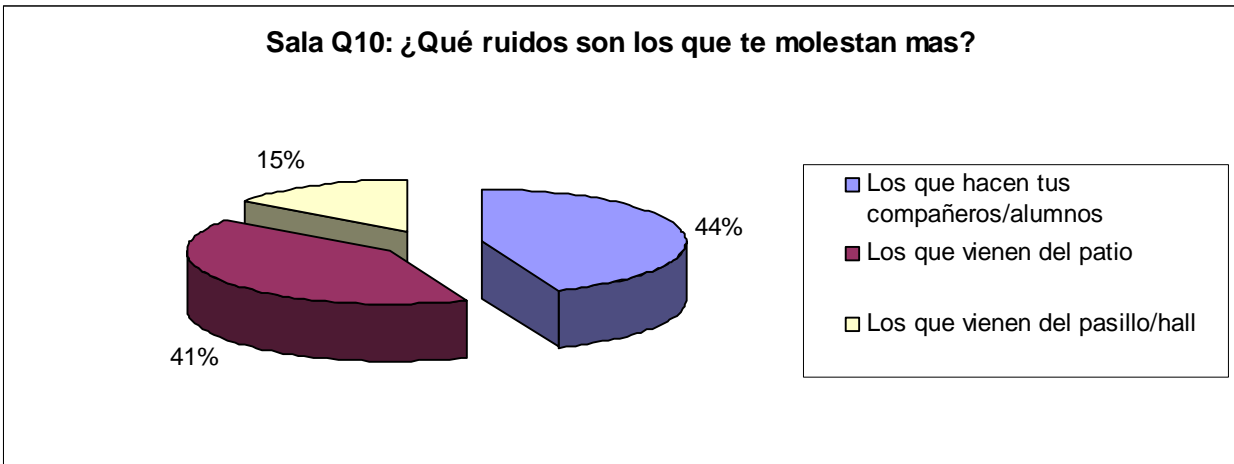
P2 El ruido que hay allí, te molesta:

	n° respuestas	
Mucho	14	24 %
Algo	40	68 %
Nada	5	8 %



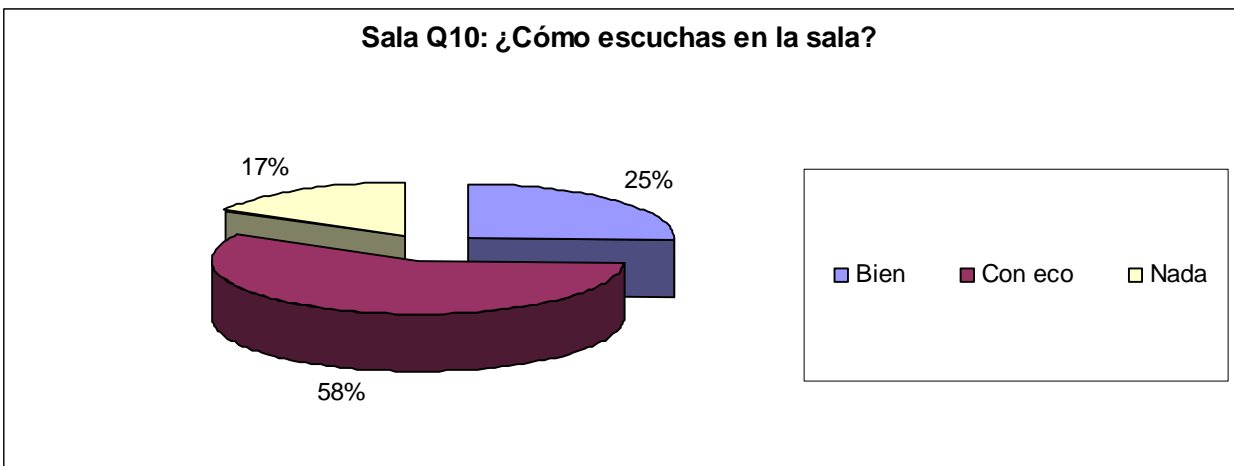
P3 ¿Qué ruidos son los que te molestan más?

	n° respuestas	
Los que hacen tus compañeros/alumnos	36	44 %
Los que vienen del patio	34	41 %
Los que vienen del pasillo/hall	12	15 %



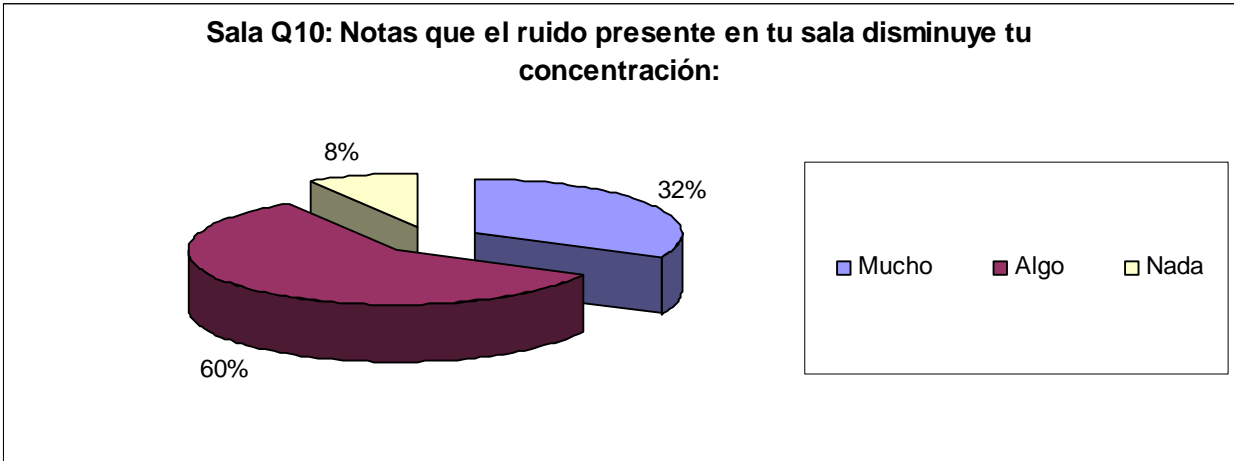
P4 ¿Cómo escuchas en la sala?

	n° respuestas	
Bien	15	25 %
Con eco	34	58 %
Nada	10	17 %



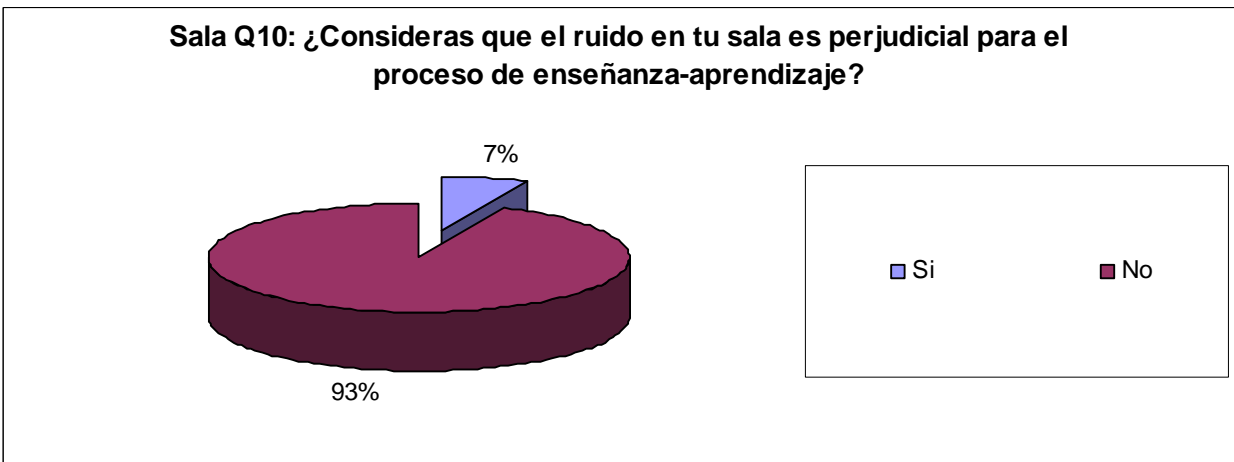
P5 Notas que el ruido presente en tu sala disminuye tu concentración:

	n° respuestas	
Mucho	19	32 %
Algo	35	59 %
Nada	5	8 %



P6 ¿Consideras que el ruido en tu sala es perjudicial para el proceso de enseñanza-aprendizaje?

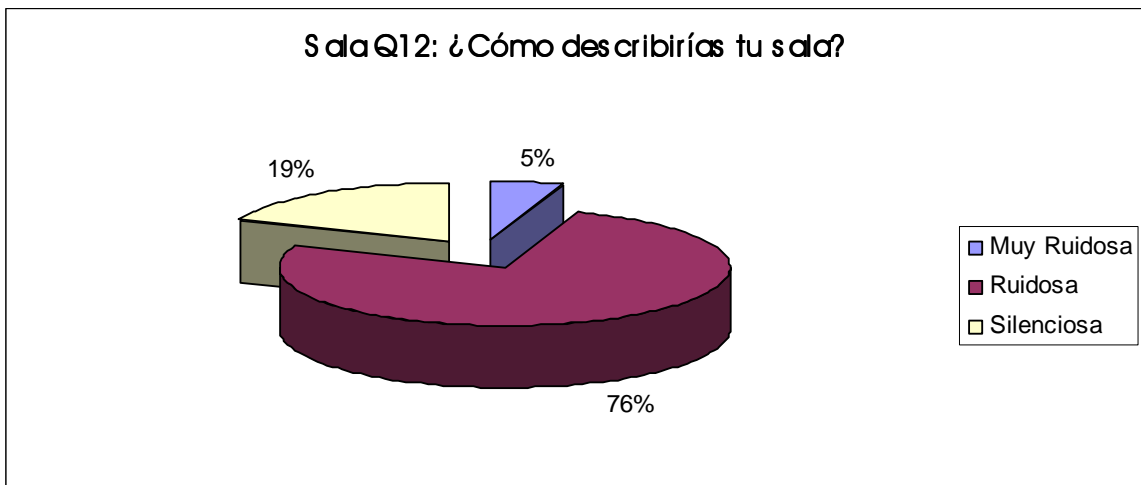
	n° respuestas	
Si	4	7 %
No	55	93 %



- Encuesta a usuarios de Sala Q12.

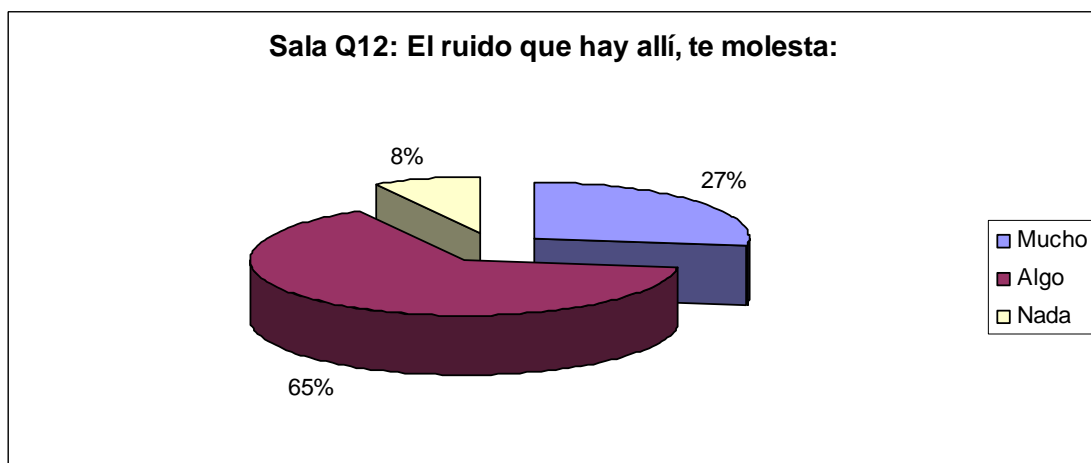
P1 ¿Cómo describirías tu sala?

	n° respuestas	
Muy Ruidosa	2	5 %
Ruidosa	28	76 %
Silenciosa	7	19 %



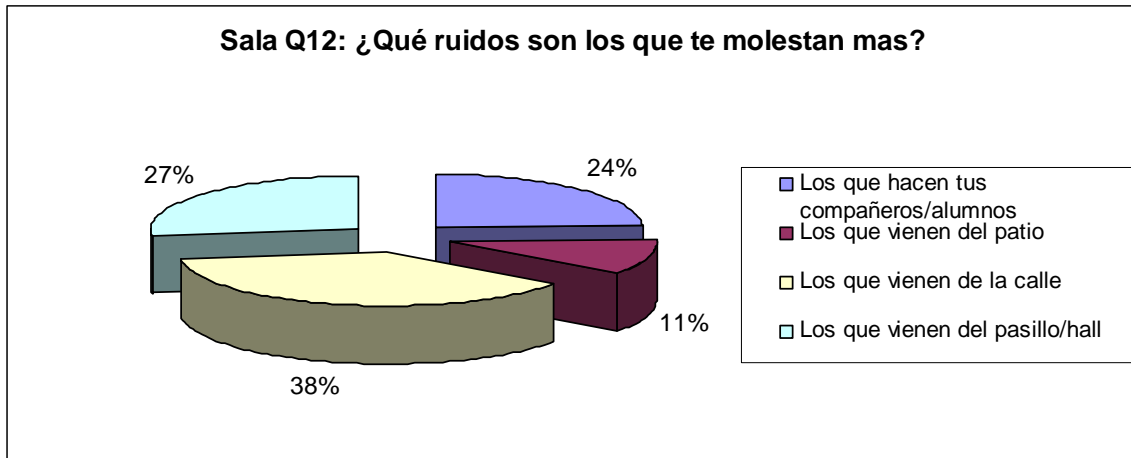
P2 El ruido que hay allí, te molesta:

	n° respuestas	
Mucho	10	27 %
Algo	24	65 %
Nada	3	8 %



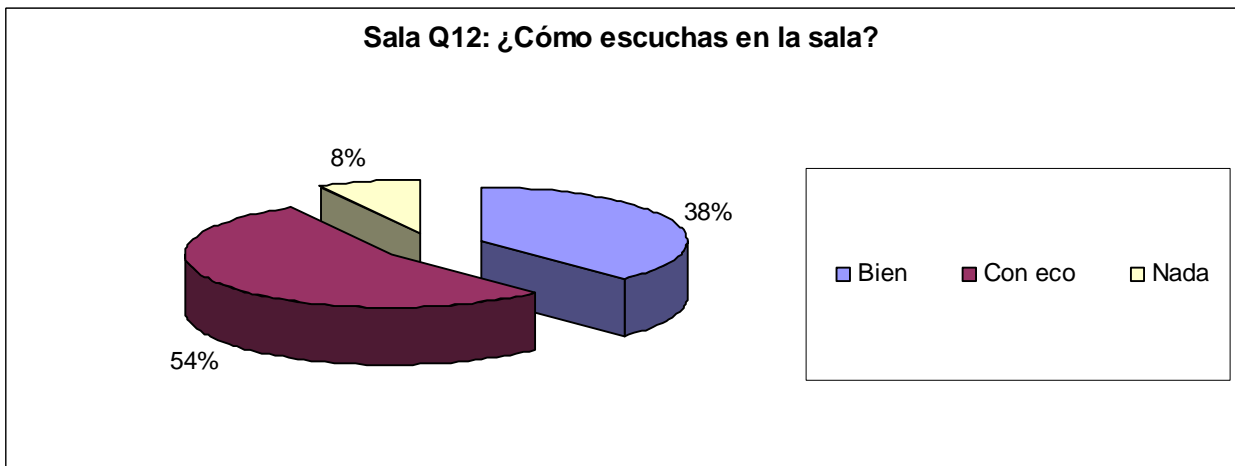
P3 ¿Qué ruidos son los que te molestan más?

	n° respuestas	
Los que hacen tus compañeros/alumnos	9	24 %
Los que vienen del patio	4	11 %
Los que vienen de la calle	14	38 %
Los que vienen del pasillo/hall	10	27 %



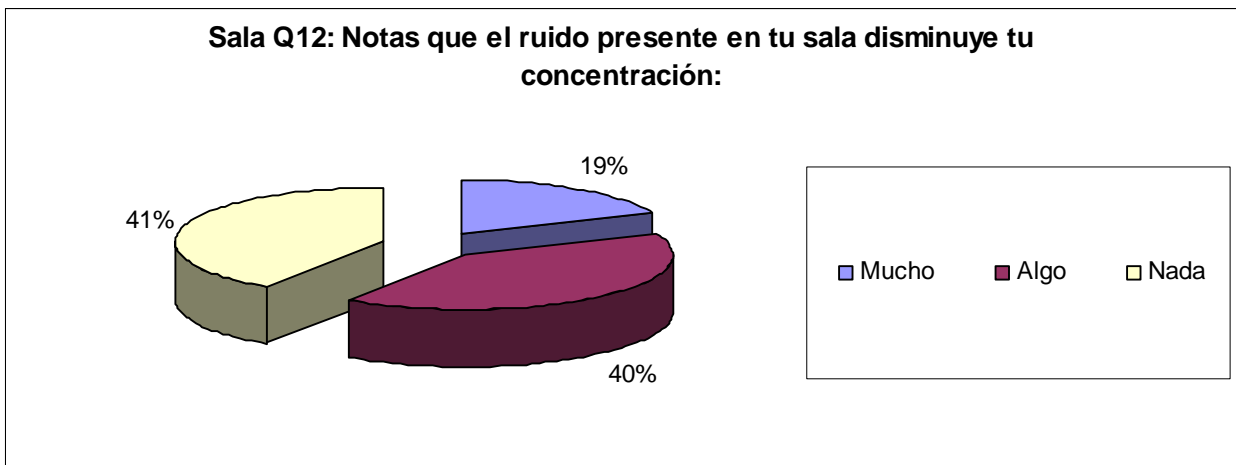
P4 ¿Cómo escuchas en la sala?

	n° respuestas	
Bien	14	38 %
Con eco	20	54 %
Nada	3	8 %



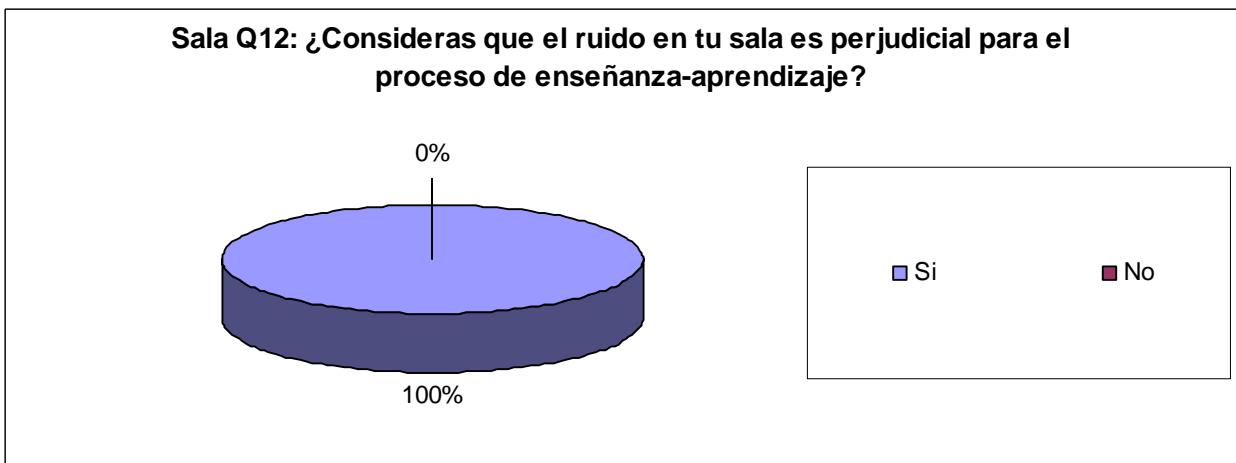
P5 Notas que el ruido presente en tu sala disminuye tu concentración:

	n° respuestas	
Mucho	17	46 %
Algo	18	100 %
Nada	2	100 %



P6 ¿Consideras que el ruido en tu sala es perjudicial para el proceso de enseñanza-aprendizaje?

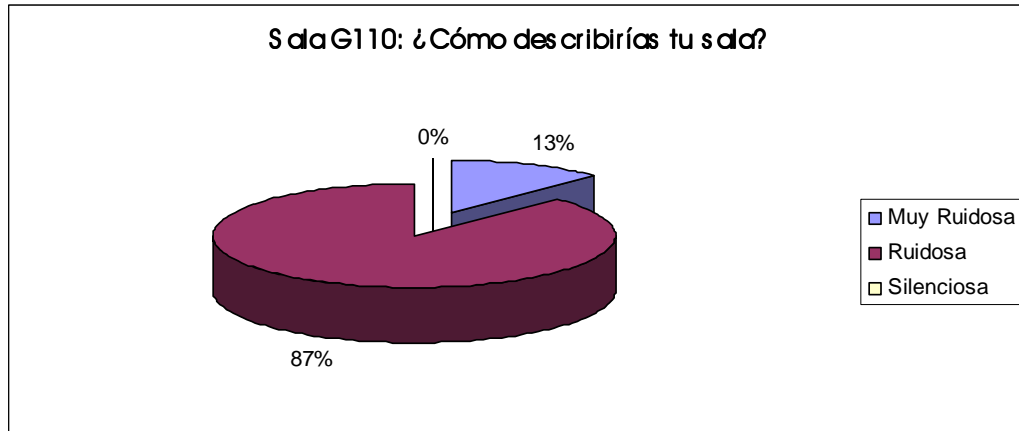
	n° respuestas	
Si	37	100 %
No	0	0 %



- Encuesta a usuarios de Sala G110.

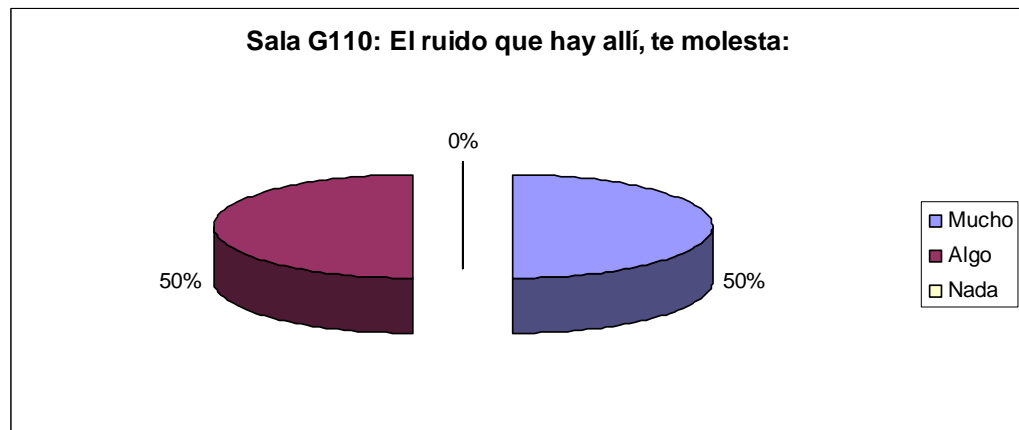
P1 ¿Cómo describirías tu sala?

	n° respuestas	
Muy Ruidosa	1	13 %
Ruidosa	7	88 %
Silenciosa	0	0 %



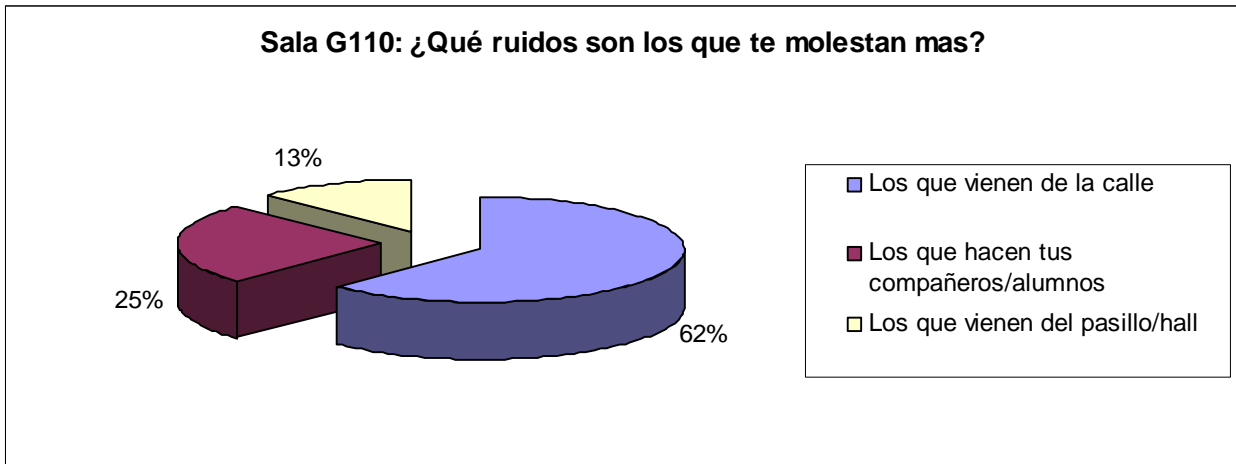
P2 El ruido que hay allí, te molesta:

	n° respuestas	
Mucho	4	50 %
Algo	4	50 %
Nada	0	0 %



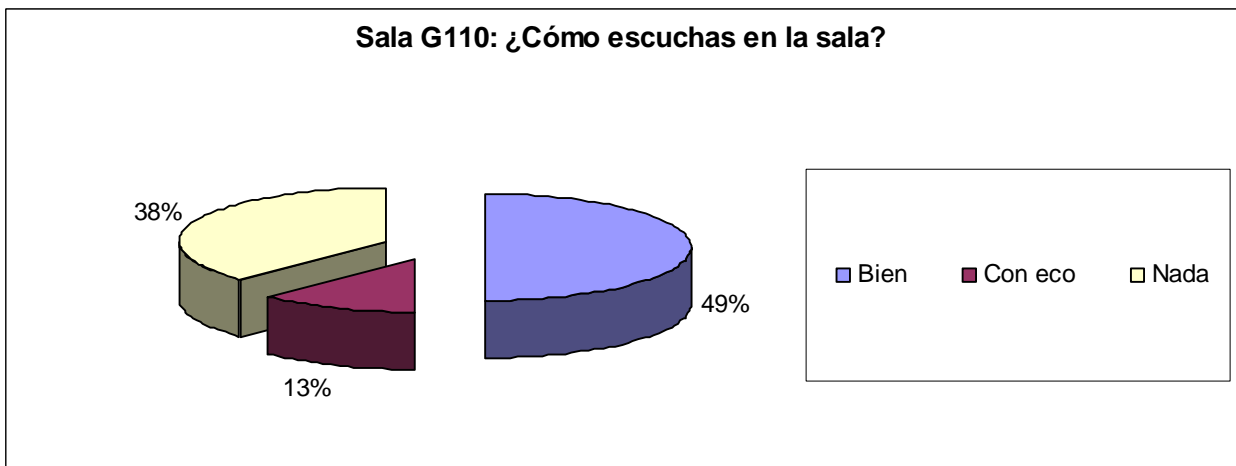
P3 ¿Qué ruidos son los que te molestan mas?

	n° respuestas	
Los que vienen de la calle	5	63 %
Los que hacen tus compañeros/alumnos	2	25 %
Los que vienen del pasillo/hall	1	13 %



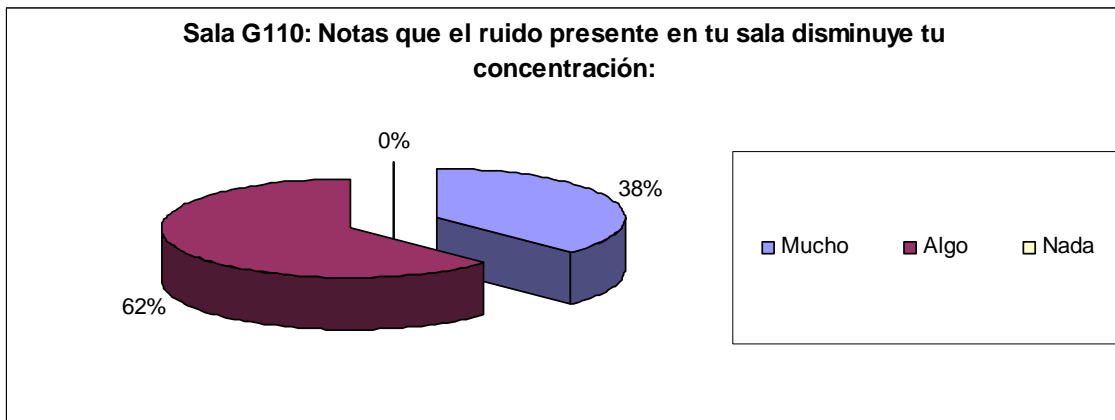
P4 ¿Cómo escuchas en la sala?

	n° respuestas	
Bien	4	50 %
Con eco	1	13 %
Nada	3	38 %



P5 Notas que el ruido presente en tu sala disminuye tu concentración:

	n° respuestas	
Mucho	3	38 %
Algo	5	63 %
Nada	0	0 %



P6 ¿Consideras que el ruido en tu sala es perjudicial para el proceso de enseñanza-aprendizaje?

	n° respuestas	
Si	8	100 %
No	0	0 %

