



# Universidad Católica de Salta

FACULTAD DE ARTES Y CIENCIAS  
Licenciatura en Imagen y Sonido

## LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA EN EL AULA

Un estudio para conocer el comportamiento del sonido en un recinto cerrado

Tesis presentada para cumplir con los requisitos finales para la obtención del título de Licenciado en Imagen y Sonido.

Autor: Facundo Martinez  
Director: Mauricio Antonio Orellana  
Codirector: Jose Saavedra

Mayo del 2016

## Abstract

En el siguiente trabajo de investigación se desarrollo la propuesta de entender como se comporta el sonido en el aula UM-5 del edificio Usos múltiples de la Universidad Católica de Salta, con el fin de conocer cuales son los factores que afectan a la inteligibilidad de la palabra en el recinto.

Este tipo de trabajo es de suma importancia para la preservación de la salud auditiva, como para la voz, tanto para alumnos como para docentes.

La finalidad de la investigación, es plantear una solución al problema para que el aula cumpla con los parámetros óptimos que requiere este tipo de recinto y obtener un confort acústico que beneficie a todas las personas en el aula.

**Palabras claves:** Inteligibilidad; recinto; Tiempo de reverberación; Ruido de fondo; sonido; Acústica; Arquitectónica; Acondicionamiento acústico; Universidad Católica de Salta; mediciones.

## TABLA DE CONTENIDOS

---

Introducción	4
<b>Marco Metodológico</b>	<b>5</b>
1.1 Tema	6
1.2 Pregunta inicial	6
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivos	7
1.5 Estados de arte	8
1.6 Hipótesis	15
<b>Marco Teórico</b>	<b>35</b>
2.1 Acústica	36
2.2 Acústica arquitectónica	51
2.3 Sistema de fonación humano	59
2.4 Análisis de inteligibilidad de la palabra en un recinto	63
2.5 Medición del sonido	67
2.6 Universidad Católica de Salta	67
<b>Recolección de datos</b>	<b>72</b>
3.1 Mediciones	73
3.1.1 Posiciones del micrófono	73
3.1.2 Instrumentos de medición	74
<b>Análisis de datos</b>	<b>75</b>
4.1 Herramientas de análisis	76
<b>Resultados de la Investigación</b>	<b>80</b>
5.1 Curva NC	81
5.2 Tiempo de reverberación (RT)	82
5.3 %ALCons	83
<b>Propuesta de acondicionamiento acústico</b>	<b>84</b>
6.1 Objetivos acústicos	85
6.2 Materiales acústicos	85
6.4 Instalación del acondicionamiento acústico	91
<b>Conclusión</b>	<b>93</b>
Bibliografía	96

## Introducción

Siempre que un profesor realiza su función docente para un grupo de alumnos de cualquier nivel, se esfuerza en alcanzar los objetivos del aprendizaje, haciendo uso de un gran número de herramientas, una de las herramientas mas importante es la palabra hablada.

Por lo tanto, es conveniente tener la garantía de que el mensaje que se está transmitiendo sea de la forma mas nítida posible entre los sujetos de la comunicación, para ello es de suma importancia el confort acústico del aula.

El confort acústico es un aspecto subjetivo que varia en cada persona, pero podríamos definirlo como el conjunto de condiciones acústicas que nos permitan realizar nuestras actividades de forma adecuada y con normalidad sin que exista riesgo de molestia o enfermedad. Esto es fundamental en la educación, ya que es primordial para el aprendizaje que los alumnos mantengan la atención y la concentración, para lo cual son necesarios bajos niveles de ruido y una buena inteligibilidad de la palabra que favorezcan el estudio y la escucha del profesor.

En este trabajo se plantea el estado actual acústico en que se encuentra el aula UM-5 de la facultad de usos múltiples de la Universidad Católica de Salta y su mejoramiento con la propuesta de diseño acústico, el cual constara de un acondicionamiento que permitirá que el sonido se propague adecuadamente en el interior de la sala.

## **Marco Metodológico**

## **1.1 Tema**

La inteligibilidad de la palabra en el aula (UM-5) de la Facultad de Usos Múltiples de la Universidad Católica de Salta.

## **1.2 Pregunta inicial**

¿Que factores dificultan la inteligibilidad de la palabra en el aula UM-5 del edificio de usos múltiples de la Universidad Católica de Salta?

## **1.3 Justificación**

Este proyecto de investigación abordaría la problemática de la acústica en el aula UM-5, ya que la misma presenta interferencias cuando un orador expone su clase, a partir de este problema se realizarían los análisis correspondientes para entender el comportamiento del sonido en el recinto, que luego nos permitiría determinar cual sería el acondicionamiento acústico mas eficiente para solucionar las dificultades que tendría la inteligibilidad de la palabra del orador.

## 1.4 Objetivos

### Objetivo General

- Analizar los factores que dificultan la inteligibilidad de la palabra en el aula UM-5 de la Universidad Católica de Salta.

### Objetivos Específicos

- Medir el ruido de fondo y calcular el tiempo de reverberación del aula.
- Calcular el índice de porcentaje de la inteligibilidad de la palabra para conocer la pérdida de la definición de las consonantes.
- Comparar las características del aula con los valores óptimos para aulas o sala de conferencias.
- Elaborar una propuesta de acondicionamiento acústico para el aula UM-5 de la Universidad Católica de Salta.

## 1.5 Estados de arte

**Autores:** Sánchez Ortiz, C., Serrano Castro, H. (2009).

**Título:** Diseño acústico del templo evangélico “el divino redentor”.

**Instituto Politécnico Nacional.**

**Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, México D.F.**

**Disponible en:** <http://tesis.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/3185/1/DISENOACUSTICO.pdf>.

**Visto el 15 de abril de 2015.**

En este trabajo se plantea el estado actual acústico en que se encuentra el templo y de cómo mejorara con la propuesta del diseño acústico, el cual constara de un acondicionamiento lo que permitirá que el sonido se propague adecuadamente en el interior de la sala; un aislamiento que evitara que el ruido externo interfiera con el mensaje durante las ceremonias religiosas; y un sistema de refuerzo electroacústica mejorado que ayudara a que el mensaje sea escuchado con claridad por el asistente más alejado y sin distorsionar el audio de la música que se interpreta en el recinto.

Para llevar a cabo la propuesta de diseño acústico es necesario empezar desde conceptos básicos como: Acústica y sonido. Así como, recordar las propiedades del sonido y sus características, donde trataremos la relación que hay entre decibel, presión acústica y nivel de presión acústica y así tener una idea clara y cuantitativa de lo que se quiere mejorar en el templo “El divino redentor”.

Como conclusión, se propone reducir el nivel de ruido de fondo con el aislamiento acústico; así mismo se propone aumentar el nivel sonoro de la fuente, permitiendo que el mensaje sea comprendido con claridad y con un buen nivel, mediante el acondicionamiento del recinto y del sistema de refuerzo electroacústico.

Esta tesis aporta al investigador como guía con respecto a la teoría que se aborda en base a las características del sonido para solucionar la problemática del aula UM-5 del edificio usos múltiples de la Universidad Católica de Salta.

**Autores: Cárdenas Martínez, S., Gálvez Muñoz, K. (2010).**

**Título: Diseño acústico de un salón de clases.**

**Instituto Politécnico Nacional.**

**Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, México D.F.**

**Disponible en: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6855/DISENOACUSTICO.pdf?sequence=1>.**

**Visto en 15 de abril de 2015.**

Para llevar acabo nuestro proyecto nos basamos en encuestas, hechos reales y mediciones prácticas, dando a conocer de manera teórica los pasos a seguir para obtener un ambiente con la seguridad de poder escuchar y entender lo que diga el profesor o el compañero que exponga, etc., pero sobretodo que el estudiante se sienta cómodo para que pueda poner atención y no pierda ni una palabra que diga el profesor.

Es necesario emplear la acústica arquitectónica como herramienta, considerando los niveles de ruido existentes en el interior del salón, para planear el aislamiento requerido e investigar los materiales adecuados y proponerlos.

Se considera que los altos niveles de ruido, se pueden aminorar con un reacondicionamiento acústico de los salones de clases. Así como una organización en las áreas de trabajo para que las actividades más ruidosas se realicen en tiempos controlados y en zonas alejadas y acondicionadas que no afecten las actividades de las instalaciones aledañas.

En el salón analizado, se filtraba mucho ruido producido por los salones aledaños por eso se recomienda cambiar las paredes que dividen salón con salón. Platicando con los alumnos se llega a concluir que casi no se escuchaba la voz del profesor en turno, por eso se decidió colocar en la parte central del techo un material reflejante, para que se escuche más clara la voz del profesor y se pueda entender mejor lo que se hable dentro del salón de clases.

Esta tesis aporta al investigador las pruebas de inteligibilidad de la palabra, que le sirve como guía en la problemática del aula UM-5 de la Universidad Católica de Salta.

**Autor: Rodríguez Alves, R. (2012).**

**Título: Campo acústico en recintos de planta en i en l y en u.**

**Universidad politécnica de Madrid.**

**Escuela técnica superior de arquitectura de Madrid. Madrid, España.**

**Disponible en: [http://oa.upm.es/10904/1/ROSA\\_MARIA\\_RODRIGUEZ\\_ALVES\\_3.pdf](http://oa.upm.es/10904/1/ROSA_MARIA_RODRIGUEZ_ALVES_3.pdf).**

**Visto el 17 de abril de 2015.**

Este trabajo aborda el estudio de la calidad acústica de restaurantes y propone la inteligibilidad como magnitud adecuada para su valoración.

La relación señal-ruido juega un papel primordial en todos los modelos objetivos de predicción de la inteligibilidad en recintos comúnmente aceptados en la actualidad. La calificación de la inteligibilidad de un recinto de restauración requiere un mapa de inteligibilidad en una retícula suficientemente fina que cubra la zona de público, en cuyos puntos se necesita calcular los niveles de señal y de ruido, así como el tiempo de reverberación u otro parámetro relacionado con la señal recibida en el tiempo de integración auditiva.

Se ha estudiado la influencia en los mapas de inteligibilidad del ruido de fondo, de la absorción sonora, de la distribución de las mesas, de la densidad de mesas por unidad de superficie, del porcentaje de ocupación y su distribución espacial así como de la posición de la mesa de señal.

El ruido conversacional resulta ser el factor más adverso a la inteligibilidad. Al aumentar la densidad de mesas (ocupadas) la valoración de la inteligibilidad disminuye e inversamente.

La subdivisión del restaurante en subespacios menores mediante septa de separación parcial media y alta, presenta ventajas ya que dentro de cada subespacio la inteligibilidad no depende más que de las características de éste.

Esta tesis aporta al investigar sobre la teoría basada en la inteligibilidad en recintos que le sirve como referencia con respecto al aula UM-5 de la Universidad Católica de Salta.

**Autores: Del Río Romero, J., Gutiérrez Martínez, A., Lara Sosa, L.**

**Título: Diseño electroacústico de un centro de doblaje de voz.**

**Instituto Politécnico Nacional.**

**Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, México D.F.**

**Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/8608/232.pdf?sequence=1>.**

**Visto en 15 de abril de 2015.**

El objetivo de esta tesis es diseñar un centro de estudio de grabación el cual contenga todas las especificaciones para cubrir las necesidades que la industria del doblaje requiere, cumpliendo con las normas requeridas para diseñar un estudio de doblaje.

En el presente trabajo se emplearon aspectos fundamentales de la acústica arquitectónica para lo cual se requirió del conocimiento de conceptos básicos hasta conceptos aplicados para este trabajo.

Tres puntos importantes a concluir son el aislamiento al ruido, el tiempo de reverberación obtenido y la difusión del sonido.

El ruido es uno de los problemas más notables en la rama de la acústica hablando en términos generales.

El tiempo de reverberación adecuado es imprescindible para el diseño de recintos que se requieren para el uso de actividades en las que la acústica tiene relevancia. En un centro de doblaje usamos criterios que son utilizados para recintos donde la inteligibilidad de la palabra es importante, es decir, donde el tiempo de reverberación no debe ser extenso.

La inteligibilidad de la palabra es muy buena en todas las salas ya que el tiempo de reverberación es el adecuado para que esto sea posible, el diseño logro que la distribución sonora no tenga ningún punto de focalización y los modos sean dispersados gracias a la difusión. El aislamiento de la sala también es el adecuado, lo que contribuye a la calidad sonora de los recintos.

Viendo los resultados calculados se puede concluir que cada una de las salas cumple adecuadamente con el cometido para la que se ha construido, el cual nos permitirá realizar de una manera óptima el doblaje de voz.

Esta tesis aporta al investigador sobre la teoría basada en reverberación y tiempo de reverberación, como en tipos de ruidos y ecualizaciones.

**Autor: Núñez Ochoa, J. (2011).**

**Título: Diseño acústico del auditorio del centro regional de cultura de ciudad Nezahualcóyotl.**

**Instituto Politécnico Nacional.**

**Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, México D.F.**

**Disponible en:**

**<http://tesis.ipn.mx/dspace/bitstream123456789/9753/1/72.pdf>.**

**Visto en 15 de abril de 2015.**

En este trabajo de tesis se encuentra la teoría necesaria para poder entender con perfección los conceptos básicos para un análisis y diseño acústico, así como las formulas y criterios necesarios para su elaboración.

Al conocer las actividades que se realizan dentro del auditorio del Centro Regional de Cultura, se realiza un análisis de las condiciones acústicas del auditorio para poder conocer si el recinto necesita de aislamiento acústico, acondicionamiento acústico y además si es necesario complementarlo con un sistema de refuerzo sonoro.

Al haber evaluado acústicamente el auditorio del Centro Regional de Cultura de Ciudad Nezahualcóyotl se concluyó que el tiempo de reverberación es mayor que el tiempo de reverberación óptimo, lo cual indicó que es necesaria una propuesta de acondicionamiento acústico. Después de haber realizado mediciones del espectro acústico en puntos estratégicos, se concluyó que el recinto no necesita de una propuesta de aislamiento acústico y se evaluó el sistema de altavoces y se concluyó que es el adecuado para el auditorio, ya que se logra un compromiso entre el ruido de fondo y la protección de la audición de los escuchas, así como una excelente inteligibilidad.

Esta tesis aporta al investigador sobre acondicionamiento y aislamiento acústico con el fin de aportar una solución a la problemática del aula UM-5 de la Universidad Católica de Salta.

## 1.6 Hipótesis

En el aula UM-5 de la Universidad Católica de Salta existen factores físicos que impactan negativamente en la inteligibilidad de la palabra.

### **Definiciones conceptuales de las variables**

**Ruido de Fondo:** Se considera ruido de fondo todo aquel ruido que se percibe en una sala cuando en la misma no se realiza ninguna actividad.

**Tiempo de Reverberación:** La obtención del RT a cada frecuencia de interés, a partir de la correspondiente curva ETC, no se lleva a cabo directamente por simple observación del tiempo que transcurre hasta que el nivel disminuye 60 dB.

**Factor de Directividad:** La manera de expresar la directividad de una fuente sonora en un punto cualquiera del espacio es mediante el denominado factor de directividad Q. El factor Q depende de la relación entre el nivel de presión sonora producido por dicha fuente en la dirección considerada y el nivel que se obtendría si la fuente no fuese directiva.

**Distancia Crítica:** Es la distancia donde la intensidad del sonido reflejado es igual a la intensidad del sonido directo.

## Operacionalización de variables

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS
FACTORES QUE DIFICULTAN LA INTELIGIBILIDAD	RUIDO DE FONDO	CURVA NC	MEDICION
	TIEMPO DE REVERBERACION	ABSORCION MEDIA	CALCULO Y OBSERVACION
		VOLUMEN DEL AULA	CALCULO Y OBSERVACION
INTELIGIBILIDAD DEL MENSAJE HABLADO	FACTOR DE DIRECTIVIDAD	VOZ HUMANA	OBSERVACION
	DISTANCIA CRITICA	CAMPO DIRECTO	CALCULO Y OBSERVACION
		CAMPO REVERBERANTE	CALCULO Y OBSERVACION

## **1.7 Marco Metodológico**

### **1.7.1 Paradigma**

En primer lugar, para poder desarrollar la etapa metodológica de esta investigación, es necesario delimitarla dentro de un paradigma de investigación, ya que funciona como un sistema de creencias básicas que determinan el modo de orientarse y de mirar la realidad, como también engloban los diferentes métodos y técnicas adecuados para seguir con esta investigación.

Según lo expuesto por Hernández Sampieri (2006), en la investigación científica tenemos dos tipos de enfoques: el enfoque cuantitativo y el cualitativo. El autor menciona que los estudios cuantitativos proponen relaciones entre variables con la finalidad de arribar a proposiciones precisas y hacer recomendaciones específicas. También se espera que, en los estudios cuantitativos, los investigadores elaboren un reporte con sus resultados y ofrezcan recomendaciones aplicables a una población mas amplia, las cuales servirán para la solución de problemas o la toma de decisiones. Mientras que el alcance final de los estudios cualitativos muchas veces consiste en comprender un fenómeno social complejo, el acento no esta en medir las variables involucradas en dicho fenómeno, sino en entenderlo.

Después de exponer, en líneas generales, los diferentes paradigmas, fijamos que la investigación se desarrollará dentro del enfoque cuantitativo.

### 1.7.1.1 Enfoque cuantitativo

Hernández Sampieri (2006) recalca que el enfoque cuantitativo “usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías” (p. 5).

Hernández Sampieri (2006) señala que:

El enfoque cuantitativo tiene las siguientes características:

1. Que el investigador realiza los siguientes pasos:
  - A. Plantea un problema de estudio delimitado y concreto. Sus preguntas de investigación versan sobre cuestiones específicas.
  - B. Una vez planteado el problema de estudio, revisa que se ha investigado anteriormente. A esta actividad se le conoce como la revisión de la literatura.
  - C. Sobre la base de la revisión de la literatura construye un marco teórico (la teoría que habrá de guiar su estudio).
  - D. De esta teoría deriva hipótesis (cuestiones que va a probar si son ciertas o no).
  - E. Somete a prueba las hipótesis mediante el empleo de los diseños de investigación apropiados. Si los resultados corroboran las hipótesis o son congruentes con estas, se aporta evidencia en su favor. Si se refutan, se descartan en busca de mejores explicaciones y nuevas hipótesis. Al apoyar las hipótesis se genera confianza en la teoría que las sustenta. Si no es así, se descartan las hipótesis y, eventualmente, la teoría.
  - F. Para obtener tales resultados el investigador recolecta datos numéricos de los objetos, fenómenos o participantes, que estudia y analiza mediante procedimientos estadísticos. De este conjunto de pasos, denominado proceso de investigación cuantitativo, se derivan

otras características del enfoque cuantitativo que se precisan a continuación:

2. Las hipótesis se generan antes de recolectar y analizar los datos. Por esto se explica que las hipótesis se establecen previamente.
3. La recolección de los datos se fundamenta en la medición (se miden variables o conceptos contenidos en las hipótesis). Esta recolección o medición se lleva a cabo al utilizar procedimientos estandarizados y aceptados por una comunidad científica. Para que una investigación sea creíble y aceptada por otros investigadores, debe demostrarse que se siguieron tales procedimientos. Como en este enfoque se pretende medir, los fenómenos estudiados deben poder observarse o medirse en el "mundo real".
4. Debido a que los datos son producto de mediciones, se representan mediante números (cantidades) y se deben analizar a través de métodos estadísticos. Dicho de otra manera, las mediciones se transforman en valores numéricos (datos cuantificables) que se analizarán por medio de la estadística.
5. En el proceso se busca el máximo control para lograr que otras explicaciones posibles, distintas (rivales) a la propuesta del estudio (hipótesis), sean desechadas y se excluya la incertidumbre y minimice el error. Es por esto que se confía en la experimentación y los análisis de causa - efecto.
6. Los análisis cuantitativos fragmentan los datos en partes para responder al planteamiento del problema.
7. La investigación cuantitativa debe ser lo mas "objetiva" posible. Los fenómenos que se observan y/o miden no deben ser afectados de ninguna forma por el investigador.
8. Los estudios cuantitativos siguen un patrón predecible y estructurado (el proceso) y se debe tener en cuenta que las decisiones críticas son efectuadas antes de recolectar los datos.

9. En una investigación cuantitativa se pretende generalizar los resultados encontrados en un grupo (muestra) a una colectividad mayor (universo o población). También se busca que los estudios efectuados puedan replicarse.
10. Al final, con los estudios cuantitativos se pretende explicar y predecir los fenómenos investigados, buscando regularidades y relaciones causales entre elementos. Esto significa que la meta principal es la construcción y demostración de teorías (que explican y predicen).
11. Para este enfoque, si se sigue rigurosamente el proceso y, de acuerdo con ciertas reglas lógicas, los datos generados poseen los estándares de validez y confiabilidad, las conclusiones derivadas contribuirán a la generación de conocimiento.
12. Este enfoque utiliza la lógica o razonamiento deductivo, que comienza con la teoría y de esta se derivan expresiones lógicas denominadas hipótesis que el investigador busca someter a prueba.
13. La búsqueda cuantitativa ocurre en la realidad externa al individuo.  
(p. 6)

Este proyecto de investigación se delimita en dicho enfoque debido a sus características, ya que el estudio del campo sonoro en el interior de un recinto se da a través de la teoría estadística (expuesta en el marco teórico) que nos permite entender los conceptos básicos de los procesos sonoros además de obtener un modelo matemático de los mismos, en este caso, la inteligibilidad de la palabra en el aula UM-5 de la Universidad Católica de Salta. Por otra parte, la forma de comprobar las distintas variables de la investigación sería a través de cálculo y mediciones.

### 1.7.2 Tipos de investigación

El siguiente paso consiste en visualizar el alcance que tendrá este proyecto.

Hernández Sampieri (2006) explica que del alcance del estudio depende la estrategia de investigación. Así, el diseño, los procedimientos y otros componentes del proceso serán distintos en estudios con alcance exploratorio, correlacional o explicativo.

Los estudios exploratorios sirven para preparar el terreno y por lo común anteceden a investigaciones con alcances descriptivos, correlacionares o explicativos. Estos estudios se realizan cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes. Es decir, cuando la revisión de la literatura revelo que tan solo hay guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con el problema de estudio, o bien, si deseamos indagar sobre temas y áreas desde nuevas perspectivas.

Los estudios descriptivos, buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, miden, evalúan o recolectan datos sobre diversos conceptos (variables), aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno a investigar. Por lo general estos estudios, son la base de las investigaciones correlacionares.

La utilidad principal de los estudios correlacionares es saber como se puede comportar un concepto o una variable al conocer el comportamiento de otras variables relacionadas. Es decir, intentar predecir el valor aproximado que tendrá un grupo de individuos o casos en una variable, a partir del valor que poseen en la o las variables relacionadas, a partir de esto proporcionan información para llevar a cabo estudios

explicativos que generan un sentido de entendimiento y son altamente estructurados.

Los estudios explicativos van mas allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; es decir, están dirigidos a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales. Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar por que ocurre un fenómeno y en que condiciones se manifiesta, o por que se relacionan dos o mas variables.

Las investigaciones que se realizan en un campo de conocimiento especifico pueden incluir diferentes alcances en las distintas etapas de su desarrollo. Es posible que una investigación se inicie como exploratoria, después puede ser descriptiva y correlacional, y terminar como explicativa.

Este proyecto de investigación se encuadra dentro del alcance explicativo, como se explica anteriormente, este tipo de estudio se centra en explicar porque ocurre un fenómeno y como se manifiesta, en este caso, se explicaría el porque se produce la perdida de inteligibilidad de la palabra en el aula UM-5 de la Universidad Católica de Salta, ademas de la relación que tienen las variables de la problemática.

También los estudios explicativos abordan los anteriores alcances, por lo que se debe señalar que para establecer los factores que dificultan la inteligibilidad se debe realizar mediciones, así los estudios descriptivos serian aplicados para recolectar datos de las variables del proyecto.

### 1.7.3 Diseño de investigación

El diseño de la investigación incluye en primer lugar la selección de la metodología de investigación y las técnicas de recolección y análisis de la información. En segundo lugar, la operacionalización de las preguntas de investigación, convirtiéndolas en variables. En tercer lugar, el muestreo.

Hueso y Cascant (2012) explica que: La metodología es la estrategia de investigación que elegimos para responder a las preguntas de investigación. Dependerá tanto de éstas como del marco teórico de la investigación. Se trata pues de optar por una estrategia de investigación general ... En segunda instancia, se escogerán las técnicas de recolección ... y las técnicas de análisis, esto es, las herramientas más específicas de investigación. Éstas también dependen de las preguntas y del marco teórico y deben ser coherentes con la metodología. (p.8)

En el proceso cuantitativo es posible encontrar diferentes clasificaciones de los diseños ... se clasifican en: investigación experimental e investigación no experimental.

Este proyecto se delimita en la investigación experimental, siguiendo la perspectiva del autor Hernández Sampieri (2006) expone que el termino “experimento, se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o mas variables independientes, para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o mas variables dependientes, dentro de una situación de control para el investigador.” (p. 160)

En relación con el proyecto, se manipularían las variables que afectan a la inteligibilidad de la palabra (variables independientes), para analizar o medir los cambios que se producen en el aula UM-5 (variable dependiente).

### 1.7.4 Recolección de datos

Una vez completado el diseño de la investigación, llega el momento de recolectar la información que se ha identificado como relevante, es decir, las variables identificadas.

Hernández Sampieri (2006) explica que:

Recolectar los datos implica elaborar un plan detallado de procedimientos que nos conduzcan a reunir datos con un propósito específico. Este plan ... se nutre de diversos elementos:

1. Las variables, conceptos o atributos a medir (contenidas en el planteamiento e hipótesis del estudio)
2. Las definiciones operacionales. La manera como hemos operacionalizado las variables es crucial para determinar el método para medirlas.
3. La muestra.
4. Los recursos disponibles. (p. 274)

Esta investigación se centra en realizar mediciones y cálculos para llevar a delante la recolección de datos, como expone Hueso y Cascant (2012), la medición consiste en utilizar aparatos de medición para determinar la magnitud de un indicador o variable de interés. Para realizar las mediciones correspondientes, se utilizaría un sonómetro.

Para recolectar los datos del aula UM-5 es necesario, en primera instancia, medir los niveles de ruido de fondo, luego realizar otra medición, para establecer el tiempo de reverberación del recinto. A partir de estos parámetros, recién el investigador puede, mediante calculo, establecer el índice de pérdida de inteligibilidad de la palabra.

Las mediciones se basará en lo expuesto en la norma UNE-EN ISO 3382-2 (2008), publicado por AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación).

Ademas, hay que señalar que para llevar a cabo los procesos de medición se necesita un estímulo, el estímulo utilizado será un señal sonora del tipo impulso, estas señales se caracterizan por estar compuestas por todas las frecuencias de un mismo nivel.

Este estímulo se generaría mediante una explosión.

A continuación, se detalla como se realizan estas mediciones.

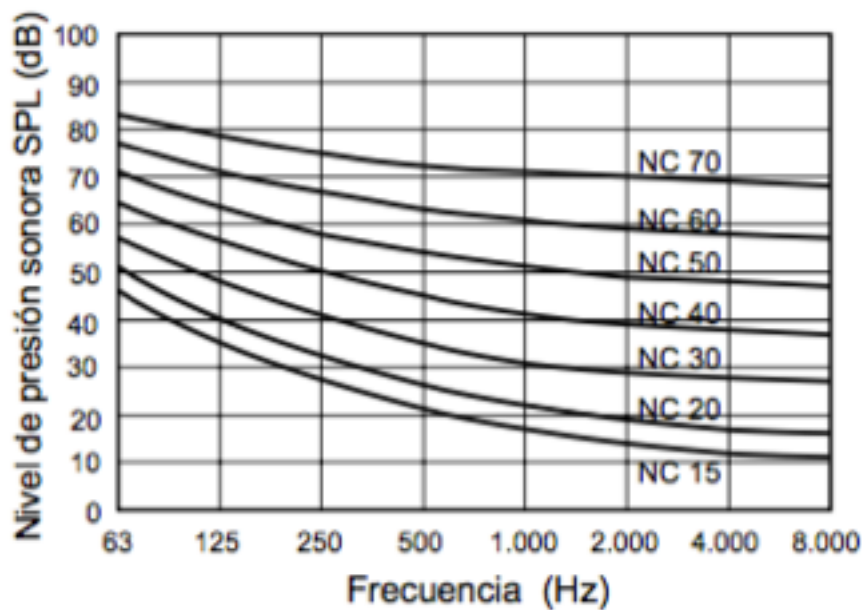
#### **1.7.4.1 Ruido de fondo (curvas NC)**

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 42):

Se considera ruido de fondo todo aquel ruido que se percibe en una sala cuando en la misma no se realiza ninguna actividad ... la evaluación del grado de molestia que un determinado ruido de fondo provoca sobre un oyente se hace por comparación de los niveles de ruido existentes en la sala ... con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC ("Noise Criteria").

Las curvas NC son, además, utilizadas para establecer los niveles máximos recomendados para diferentes tipos de espacios en función de su uso.

Se dice que un recinto cumple una determinada especificación NC (por ejemplo: NC-15, NC-20, etc.) cuando los niveles de ruido de fondo, medidos por bandas de octava, están por debajo de la curva NC correspondiente, para todas las frecuencias comprendidas entre 63 Hz y 8 kHz.



Ahora bien, el nivel de ruido de fondo en un recinto se puede representar, alternativa- mente, por el nivel global de presión sonora  $L_A$  o  $L_{eq}$  (medidos en dBA).

Se puede comprobar que, a partir de la curva NC-35, dicho nivel está aproximadamente 10 dB por encima del correspondiente valor NC. Por ejemplo, si el nivel de ruido de fondo existente en un recinto es de 50 dBA, ello significa que dicho recinto cumple la especificación NC-40.

(Harris, Manual de medidas acústicas y control de ruido, 1995, p. 37):

Una serie de curvas de los espectros de sonido de banda de octava en un sistema para evaluar el ruido de un espacio interior ocupado; se compara un espectro real de banda de octava con este conjunto de curvas para determinar el nivel NC del espacio.

La curva NC recomendada para aulas o sala de conferencias es de NC 20 a NC 30. El cumplimiento de la especificación NC supone el primer paso para conseguir un confort acústico y un grado de inteligibilidad adecuados.

### 1.7.4.2 Medida del tiempo de reverberación (RT)

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 66):

El RT se calcula a partir de la curva de decaimiento energético, medida en un punto cualquiera de una sala.

...La obtención del RT a cada frecuencia de interés, a partir de la correspondiente curva ETC, no se lleva a cabo directamente por simple observación del tiempo que transcurre hasta que el nivel disminuye 60 dB. Ello es debido a que dicha curva presenta irregularidades, a pesar de que su decaimiento asintótico es efectivamente en forma de línea recta. El motivo de la aparición de dichas irregularidades es que en ningún recinto real existe un campo sonoro perfectamente difuso. Teóricamente, sería necesario repetir la medida de la curva ETC un número infinito de veces para, posteriormente, obtener una curva promedio exenta ya de irregularidades.

En la práctica, la determinación del RT se realiza aplicando el método de Schroeder. Dicho investigador demostró matemáticamente que la curva promedio anterior se puede obtener de forma totalmente equivalente a base de integrar (sumar) todas las contribuciones energéticas asociadas a una única curva ETC, desde un instante de tiempo infinito (en la práctica, habitualmente entre 1 y 3 segundos) hasta el instante inicial.

### 1.7.4.3 Cálculo de la inteligibilidad de la palabra: %ALCons y STI/RASTI

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 67-69):

Aparte del perjuicio que representa para la inteligibilidad de la palabra la existencia de eco o de eco flotante en una sala, la comprensión de un mensaje oral depende fundamentalmente de la correcta percepción de sus consonantes.

A principios de la década de los años 70, el investigador holandés V.M.A. Peutz llevó a cabo un exhaustivo trabajo a partir del cual estableció una fórmula para el cálculo de la inteligibilidad.

El trabajo se dividió en dos partes perfectamente diferenciadas: la primera consistió en realizar una serie de pruebas de audiencia en diferentes recintos basadas en la emisión de un conjunto preestablecido de "logatomos" (palabras sin significado formadas por: consonante- vocal-consonante). Cada individuo receptor tomaba nota de lo que escuchaba y, posteriormente, se procesaba toda la información recogida y se establecía una estadística de los resultados obtenidos. Si, por ejemplo, el porcentaje medio de logatomos detectados correctamente en uno de los recintos era de un 85%, entonces se consideraba que la pérdida de información era de un 15%. Como dicha pérdida se asociaba a una percepción incorrecta de las consonantes, Peutz la denominó: % de Pérdida de Articulación de Consonantes, o lo que es lo mismo, %ALCons ("Articulation Loss of Consonants"). En el ejemplo anterior, se tendría un %ALCons de un 15%. Huelga decir que, al tratarse de un parámetro indicativo de una pérdida, cuanto mayor sea, peor será el grado de inteligibilidad existente.

La segunda parte del trabajo consistió en encontrar una ley matemática que, a partir del conocimiento de una serie de parámetros acústicos del recinto en estudio, permitiese hallar el valor de %ALCons en cada punto del mismo, sin necesidad de tener que realizar las laboriosas pruebas de audiencia.

Lógicamente, una vez establecida dicha ley, sería posible predecir la inteligibilidad de la palabra en cualquier punto de un recinto todavía por construir.

Haciendo uso de la teoría acústica estadística, Peutz dedujo que el valor el %ALCons en un punto dado se podía determinar, simplemente, a partir del conocimiento del tiempo de reverberación RT y de la diferencia entre los niveles de presión sonora de campo directo (LD) y de campo reverberante (LR) en dicho punto.

... Para el cálculo de LD-LR , la fórmula a emplear es la siguiente:

$$L_D - L_R = 10 \log \left( \frac{QR}{r^2} \right) - 17 \text{ (en dB)}$$

Dónde:

log = logaritmo decimal.

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

R = constante de la sala (en m<sup>2</sup>).

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

Como tanto RT como R dependen del coeficiente medio de absorción  $\alpha$ , su conocimiento, junto con el del volumen (V) y el de la superficie total (St) permiten calcular los valores de RT y de LD-LR.

Las expresiones que regulan el calculo de ALCons es:

$$\%ALCons = \frac{200 r^2 RT^2}{VQ} \quad (\text{para: } r \leq 3,16 D_0)$$

$$\%ALCons = 9RT \quad (\text{para: } r > 3,16 D_0)$$

donde:

r = distancia fuente sonora - receptor (m)

T = tiempo de reverberación de la sala (seg)

V = volumen del recinto ( $m^3$ )

Q = factor de directividad de la fuente sonora

R = constante de la sala:  $R = (S\alpha_{mid}) / (1 - \alpha_{mid})$  (m)

$r_c$  = radio de campo reverberante

S = superficie total del recinto

$\alpha_{mid}$  = coeficiente de absorción medio de la sala

A nivel práctico, se suele elegir para el cálculo el valor de  $\alpha$  correspondiente a la banda de 2 kHz, por ser la de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

Es preciso indicar que existe otro parámetro alternativo que permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra. Dicho parámetro, conceptualmente más complejo, se denomina STI ("Speech Transmission Index") y su valor oscila entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad total).

Asimismo, existe una versión simplificada del STI denominada RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”).

Habitualmente, el RASTI es el parámetro medido en recintos, debido a su rapidez de cálculo en relación con el STI.

### Valoración del grado de inteligibilidad

%ALCons	STI / RASTI	Valoración Subjetiva
1,4% - 0%	0,88 - 1	Excelente
4,8% - 1,6%	0,66 - 0,86	Buena
11,4% - 5,3%	0,50 - 0,64	Aceptable
24,2% - 12%	0,36 - 0,49	Pobre
46,5% - 27%	0,24 - 0,34	Mala

#### 1.7.4.4 Medición de parámetros acústicos en recintos

Según lo expuesto en la norma UNE-EN ISO 3382-2 las condiciones de medición son:

- En muchos recintos, el número de personas presentes puede influir en el tiempo de reverberación. Las mediciones del tiempo de reverberación se deberían realizar en un recinto sin personas. Sin embargo, se puede permitir que un recinto con hasta dos personas presentes represente su estado vacío, salvo que se especifique lo contrario. Si el resultado de la medición se utiliza para la corrección de un nivel de presión acústica medido, el número de personas presentes en el recinto debería ser el mismo para esa medición.
- En recintos grandes, la atenuación por el aire puede contribuir de manera significativa a la absorción acústica a frecuencias elevadas. Para las

mediciones de precisión, se debe medir la temperatura y la humedad relativa del aire en el recinto.

- La importancia de la contribución de la absorción del aire es baja si el tiempo de reverberación es inferior a 1,5 a 2 s e inferior a 0,8 a 4 kHz. En este caso, no es necesario medir la temperatura y la humedad relativa.
- La fuente acústica debería ser lo más omnidireccional posible... Debe producir un nivel de presión acústica suficiente para generar curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido sin contaminación por ruido de fondo.
- Se deben utilizar micrófonos omnidireccionales para detectar la presión acústica y la salida se puede conectar directamente a un amplificador, un conjunto de filtros y un sistema donde se muestren las curvas de decrecimiento o a un equipo de análisis que permita calcular las repuestas impulsivas; o a un registrador de señal para un análisis posterior.
- No debe admitir ninguna sobresaturación en ninguna fase del equipo de medición. Cuando se utilizan fuentes acústicas impulsivas, se deben utilizar dispositivos indicadores de niveles de pico para detectar la sobresaturación.
- La respuesta impulsiva se puede crear de múltiples maneras (disparos de pistola, impulsos producidos por chispazos, salvas de ruidos, barridos sinusoidales o secuencias de longitud máxima). Esta parte de la norma no pretende excluir ningún otro método que pueda generar una respuesta impulsiva correcta.

- Se requieren al menos doce combinaciones de fuente micrófono independientes, para al menos dos posiciones de la fuente.
- Las posiciones de micrófono deben estar preferiblemente separadas por al menos 2 m.
- La distancia desde cualquier posición de micrófono a la superficie reflectante más cercana debería ser de al menos 1 m.
- Ninguna posición de micrófono debe estar muy próxima a la posición de la fuente, para evitar una influencia demasiado fuerte del sonido directo. La distancia mínima,  $d_{\text{mín.}}$ , en metros, se puede calcular a partir de la ecuación:

$$d_{\text{mín.}} = 2\sqrt{\frac{V}{c\hat{T}}}$$

Donde,  $V$  es el volumen, en metros cúbicos,  $c$  es la velocidad del sonido, en metros por segundo; y  $T$  es la estimación del tiempo de reverberación esperado, en segundos.

### **1.7.5 Técnicas de análisis de datos**

La finalidad del análisis de datos es la obtención de información para poder comprobar o no la hipótesis planteada en esta investigación, como así también para que nos ayude a llegar a la conclusión final del estudio.

Para poder llevar a cabo un análisis de los datos recolectados a través de las mediciones se debe recurrir a los principios teóricos desarrollados en el marco teórico.

Los factores que se analizarán son la curva NC, el tiempo de reverberación y el porcentaje de inteligibilidad de la palabra.

Una vez que se tengan los resultados correspondientes, se realizaría una comparación de los datos obtenidos, con los datos óptimos para el tipo de recinto estudiado en esta investigación, toda la teoría que corresponde a lo que se menciona anteriormente se encuentra en el marco teórico de este estudio.

## **Marco Teórico**

## 2.1 Acústica

(Recuero López, Ingeniería Acústica, 2000, p. 1):

Desde las épocas mas remotas de nuestra historia, los fenómenos acústicos han formado parte del ambiente de la vida humana, puesto que la mayor parte de los organismos vivos producen sonidos, y responde a su vez a los mismo, esto hace de suponer que el hombre primitivo, al refugiarse contra los elementos descubriría la acústica en diferentes refugios naturales de la superficie terrestre, y en su necesidad de comunicación con otros seres de su misma especie, produciría diferentes sonidos guturales.

(Leo Beranek, Acústica, 1954, p. 1-2):

... Hace cien años, la acústica era un arte. Como instrumentos de medición, los ingenieros utilizaban en este campo especialmente sus oídos. Las únicas fuentes de ruido controladas disponibles eran silbatos, gongs y sirenas. Los micrófonos consistían en un diafragma articulado con una punta metálica que delineaba la forma de onda sobre la superficie ennegrecida de un tambor rotativo ... cuya altura variaba de acuerdo con la presión acústica. Por esa época aparecieron en la literatura técnica los grandes nombres de Rayleigh, Stokes, Thomson, Lamb, Helmholtz, Konig, Tyndall, Kundt, y otros. Sus contribuciones a la acústica física fueron seguidas por la publicación del tratado en dos volúmenes de Lord Rayleigh, "Theory of Sound" (1877-1878). La acústica no hizo más progresos hasta que W. C. Sabine, en una serie de artículos (1900-1915) llevó la acústica arquitectónica a la categoría de una ciencia. Aunque la contribución de estos primeros investigadores fue muy importante, el mayor interés en el campo de la acústica siguió a la invención del trío de alto vacío (1907) y al advenimiento de la radio difusión (1920). Con los amplificadores de válvula ya disponibles, podían producirse sonidos de la frecuencia deseada con la intensidad conveniente y, a la vez, podían medirse los sonidos muy débiles. Por

encima de todo, la válvula permitió construir instrumentos de medición compactos, robustos, e insensibles a las corrientes de aire.

... La acústica arquitectónica recibió un gran impulso gracias a los aportes teóricos y experimentales de la Universidad de Harvard, el Instituto Tecnológico de Massachusetts, y la Universidad de California en Los Angeles (1930-1940), y varios centros de investigación en Europa, especialmente Inglaterra y Alemania.

... Finalmente, llegó la segunda guerra mundial con su demanda de dispositivos para la detección de submarinos sumergidos y de medios de comunicación confiables en ambientes muy ruidosos, por ejemplo, en las aeronaves. Instalándose grandes laboratorios en Inglaterra, Alemania, Francia y, en los Estados Unidos de Norte América, en las universidades de Harvard, Columbia y California, para ocuparse de estos problemas. Las investigaciones acústicas alcanzaron proporciones no soñadas hasta el momento y se han mantenido desde entonces en el mismo nivel...

A modo de conclusión, el autor Recuero López (2000) expone que la acústica ha sido precedida por grandes avances a través de observaciones empíricas, a lo largo del tiempo . La música, la arquitectura, la ingeniería, la medicina, la lingüística, etc. buscan la acústica como herramienta de trabajo, por ejemplo, para realizar: A) proyectos de auditorios, B) estudios de grabación sonora, C) percepción subjetiva de sonidos, D) producción artificial de la voz, E) aislamiento contra el ruido, F) utilización de la acústica en la medicina, etc.

La acústica incluye la generación, recepción, absorción, conversión, detección, reproducción y control del sonido. (p.4)

A continuación es necesario, desde el punto de vista del investigador, desarrollar los conceptos básicos del sonido.

## 2.1.1 Sonido

### 2.1.1.1 Definición del sonido

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 27):

El sonido se puede definir de formas muy diversas. De todas ellas, las más habituales son las siguientes:

- Vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso (habitualmente el aire), y que es capaz de producir una sensación auditiva. De dicha definición se desprende que, a diferencia de la luz, el sonido no se propaga a través del vacío y, además, se asocia con el concepto de estímulo físico.
- Sensación auditiva producida por una vibración de carácter mecánico que se propaga a través de un medio elástico y denso.

“Dícese que hay sonido cuando un disturbio que se propaga por un material elástico causa una alteración de la presión o un desplazamiento de las partículas del material que puedan ser reconocidos por una persona o por un instrumento.” (Leo Beranek, Acústica, 1954, p. 3).

### 2.1.1.2 Generación y propagación del sonido

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 27):

El elemento generador del sonido se denomina fuente sonora (tambor, cuerda de un violín, cuerdas vocales, etc.). La generación del sonido tiene lugar cuando dicha fuente entra en vibración. Dicha vibración es transmitida a las partículas de aire adyacentes a la misma que, a su vez, la transmiten a nuevas partículas contiguas.

Las partículas no se desplazan con la perturbación, sino que simplemente oscilan alrededor de su posición de equilibrio.

La manera en que la perturbación se traslada de un lugar a otro se denomina propagación de la onda sonora.

Si se considera como fuente sonora, por ejemplo, un tambor, un golpe sobre su membrana provoca una oscilación. Cuando la membrana se desplaza hacia fuera, las partículas de aire próximas a su superficie se acumulan creándose una zona de compresión, mientras que en el caso contrario, dichas partículas se separan, lo cual da lugar a una zona de enrarecimiento o dilatación.

La oscilación de las partículas tiene lugar en la misma dirección que la de propagación de la onda. En este caso se habla de ondas sonoras longitudinales, en contraposición a las ondas electromagnéticas que son transversales (oscilación de la señal generadora perpendicular a la dirección de propagación de la onda).

La manera más habitual de expresar cuantitativamente la magnitud de un campo sonoro es mediante la presión sonora, o fuerza que ejercen las partículas de aire por unidad de superficie.

### **2.1.1.3 Frecuencia del sonido (f)**

(Harris, Manual de medidas acústicas y control de ruido, 1995, p. 4):

Por definición, la frecuencia de un fenómeno periódico, como una onda sonora, es el número de veces que este fenómeno se repite a sí mismo en un segundo (el número de ciclos por segundo). Habitualmente la frecuencia se designa mediante un número seguido de la unidad hertzio (símbolo de la unidad: Hz).

Por ejemplo, los dientes (púas) del diapasón ... realizan 440 oscilaciones completas en un segundo. Por tanto, su frecuencia de vibración es 440 Hz.

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 29):

La gran mayoría de los sonidos que percibimos no constan únicamente de una sola frecuencia, sino que están constituidos por múltiples frecuencias superpuestas.

Se puede conocer qué frecuencias componen un sonido observando el denominado espectro frecuencial (o simplemente espectro) del mismo...

(Recuero López, Ingeniería Acústica, 2000, p. 4):

De las posibles divisiones que se pueden hacer en la acústica, una es atendiendo al rango de frecuencias, de la siguiente forma: Infrasonidos ( $0\text{Hz} < f < 20\text{Hz}$ ), Sonidos audibles ( $20\text{Hz} < f < 20\text{KHz}$ ) y Ultrasonidos ( $f > 20\text{kHz}$ ).

#### 2.1.1.4 Longitud de onda del sonido ( $\lambda$ )

El autor Carrión (1998) define como “la distancia entre dos puntos consecutivos del campo sonoro que se hallan en el mismo estado de vibración en cualquier instante de tiempo” (p. 33).

(Harris, Manual de medidas acústicas y control de ruido, 1995, p. 4):

La longitud de onda de un sonido es la distancia perpendicular entre dos frentes de onda que tienen la misma fase. Esta longitud es la misma distancia que la recorrida por la onda sonora en un ciclo completo de vibración.

La longitud de onda, que se designa mediante la letra griega lambda ( $\lambda$ ), está relacionada con la frecuencia ( $f$ ) (en hertzios) y la velocidad del sonido ( $c$ ) (en metros por segundo) mediante la ecuación:

$$\lambda f = c$$

El período  $T$  del movimiento ondular en segundos se obtiene mediante la expresión:

$$T = 1/f$$

### 2.1.1.5 Velocidad de propagación del sonido (c)

(Harris, Manual de medidas acústicas y control de ruido, 1995, p. 2-3):

La velocidad del sonido es la velocidad a la que se desplazan las ondas sonoras. A una temperatura de 20°C, la velocidad del sonido en el aire es de aproximadamente 344 m/seg. La temperatura del aire tiene un efecto significativo sobre la velocidad del sonido. La velocidad aumenta en aproximadamente 0,61 m/seg por cada aumento de 1° C en la temperatura. En casi todos los problemas de control del ruido, se puede asumir que la velocidad del sonido es independiente de la frecuencia y la humedad. El sonido viaja mucho más deprisa en los sólidos que en el aire.

### 2.1.1.6 Nivel de presión sonora (SPL)

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 34-35):

...la presión sonora constituye la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro. La unidad de medida es el Newton/metro<sup>2</sup> (N/m<sup>2</sup>) o Pascal (Pa).

En principio, el valor a considerar es la diferencia entre el valor fluctuante de la presión sonora total (PT) y su valor de equilibrio (P0). Debido a la variación de dicha magnitud con el tiempo, se utiliza como valor representativo su promedio temporal, que recibe el nombre de valor eficaz o r.m.s. ("root-mean-square").

Ahora bien, la utilización de dicho valor eficaz da lugar a una serie de problemas cuyo origen se halla en el comportamiento del oído humano y que a continuación se exponen:

- La gama de presiones a las que responde el oído, desde el valor umbral de audición hasta el que causa dolor, extraordinariamente amplia. En

concreto, la presión eficaz sonora más débil que puede ser detectada por una persona, a la frecuencia de 1 kHz, es de  $2 \times 10^{-5}$  Pa, mientras que el umbral de dolor tiene lugar para una presión eficaz del orden de 100 Pa (milésima parte de la presión atmosférica estática  $P_0 \approx 10^5$  Pa, equivalente a 1 atmósfera). En consecuencia, la escala de presiones audibles cubre una gama dinámica de, aproximadamente, 1 a 5.000.000...

- Nuestro sistema auditivo en el hombre no responde linealmente a los estímulos que recibe, sino que más bien lo hace de forma logarítmica. Por ejemplo, si la presión de un tono puro de 1 kHz se dobla, la sonoridad, o sensación subjetiva producida por el mismo, no llegará a ser el doble. De hecho, para obtener una sonoridad doble, es necesario multiplicar la presión sonora por un factor de 3,16.

Por los dos motivos expuestos, resulta razonable y conveniente hacer uso de una escala logarítmica para representar la presión sonora. Dicha escala se expresa en valores relativos a un valor de referencia. Se trata de la presión eficaz correspondiente al umbral de audición, a 1 kHz ( $2 \times 10^{-5}$  Pa). En tal caso, se habla de nivel de presión sonora SPL o Lp. La unidad utilizada es el decibelio (dB).

La utilización del umbral de audición como referencia tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores SPL positivos.

El uso de dB reduce la dinámica de presiones sonoras de  $1:5 \times 10^6$  a niveles de presión sonora de 0 a 135 dB, donde 0 dB representa una presión igual al umbral de audición (no significa, por tanto, ausencia de sonido) y 135 dB el umbral aproximado de dolor.

De esta manera, las cifras manejadas son mucho más simples y, además, se dan las siguientes relaciones entre cambios de nivel sonoro y su efecto subjetivo:

- 1 dB: mínimo cambio de nivel sonoro perceptible
- 5 dB: cambio de nivel claramente percibido
- 10 dB: incremento asociado a una sonoridad doble

Leo Beranek (1949) señala que “El nivel de presión sonora de un sonido, en decibel, es 20 veces el logaritmo de base 10 de la relación de la presión sonora efectiva de la presión sonora eficaz de referencia.

Esto es:  $SPL = 20 \log_{10} p / p_{ref} \text{ dB}$  (p. 13).

### 2.1.2 Campo sonoro en recintos

(Recuero López, Acondicionamiento Acústico, 2001, p. 13-14):

La característica de un campo sonoro que está encerrado total o parcialmente, está íntimamente relacionada con las dimensiones lineales de un recinto. Cuando las dimensiones lineales son pequeñas frente a la longitud de onda ( $\lambda$ ) ... los modos normales de vibración en el espacio son sólo de unas pocas frecuencias. Los que tienen unas dimensiones lineales que son grandes frente a la longitud de onda; incluso para las frecuencias bajas, el volumen de aire que encierran estos recintos son sistemas vibratorios con un gran número de modos normales de vibración.

Cuando se conecta una fuente sonora en un recinto, como consecuencia de las reflexiones; existe un crecimiento gradual de la energía, cesando posteriormente el aumento después de cierto tiempo, alcanzando la energía en el recinto un valor constante.

Si una vez alcanzado este valor, la fuente deja de emitir, el sonido que recibe el observador no desaparece inmediatamente. Un corto tiempo después de que la fuente ha dejado de emitir, desaparece la onda directa y el observador recibe la energía de la primera onda reflejada, después la segunda, tercera, etc., ondas reflejadas y así sucesivamente, siendo la energía de estas ondas cada vez mas pequeña. Después de un cierto intervalo de tiempo, la energía de las ondas que llegan al observador, ha disminuido tanto, que el oído no puede percibir las y el sonido desaparece.

... El proceso de persistencia y disminución de la energía en un recinto, una vez desconectada la fuente sonora, recibe el nombre de reverberación, y el tiempo que la señal sonora necesita para reducirse hasta el umbral de la audición, se conoce como tiempo de reverberación.

... La reverberación que acompaña a cada impulso de una señal irregular (palabra o música), puede ser útil siempre que la duración sea la debida, escuchándose la palabra más clara ... Si la reverberación es muy grande, la palabra es menos inteligible...

En ciertas condiciones, el nivel de presión sonora de la señal básica se incrementa, como consecuencia de la excitación de los modos propios de vibración del recinto, lo que es útil ya que este incremento en el nivel de la presión sonora, es sensible especialmente para los oyentes que se encuentran mas alejados de la fuente; pero es indeseable la posible desigualdad en el incremento del nivel de presión sonora en los diferentes puntos del recinto, debido a la variaciones en la absorción de energía en los limites del mismo, puesto que perturba la uniformidad de las condiciones de audición de los oyentes situados en las distintas posiciones del recinto.

Por todo lo expuesto anteriormente, se observa que es necesario un cuidadoso estudio del campo sonoro creado en un recinto por las fuentes, con el fin de determinar en qué condiciones ciertos cambios producidos por un recinto en la señal básica, son útiles o perjudiciales, así como determinar que factores tienen influencia sobre la calidad de la palabra ... las teorías que permiten estudiar la acústica de un recinto son: teoría estadística, teoría geométrica, teoría ondulatoria y teoría psicoacústica.

### **2.1.2.1 Teoría estadística**

(Recuero López, Acondicionamiento Acústico, 2001, p. 27):

El estudio del campo sonoro en el interior de un recinto a través de la teoría estadística nos permite entender los conceptos básicos de los procesos sonoros además de obtener un modelo matemático de los mismo.

Esta teoría se fundamenta en una proposición básica, y es que considera el campo sonoro como aquel que consta de un gran número de ondas reflejadas por las superficies interiores del recinto, y dispersas en diferentes direcciones, a lo largo de las cuales se transfieren la energía sonora.

Si una fuente sonora se conecta en un recinto, emite ondas que se reflejan en sus superficies interiores, perdiendo parte de su energía en cada reflexión, siendo redistribuidas antes de volver a chocar con otra superficie, produciendo este impacto nuevas reflexiones y nuevas pérdidas de energía y así sucesivamente.

La pérdida de energía se origina debido a que cuando una onda pasa de un medio a otro, parte de la energía que transporta se absorbe por el nuevo medio, siendo caracterizada la capacidad de absorción de los diferentes materiales por el coeficiente de absorción sonora.

### 2.1.2.2 Teoría geométrica

(Recuero López, Acondicionamiento Acústico, 2001, p. 75):

La teoría estadística solo se puede utilizar para el estudio de recintos caracterizados por una distribución de energía uniforme. Pero existe un gran número de recintos que no cumplen esta condición, por lo que en estos casos, es necesario realizar un minucioso estudio del recinto, especialmente de las superficies interiores, que originan esa falta de uniformidad en la distribución de la energía, encontrándolas y neutralizando sus efectos. Si los materiales absorbentes se distribuyen arbitrariamente dentro del recinto, algunas superficies reflejantes pueden crear una fuerte onda reflejada, en ciertas partes del mismo.

Cuando esta fuerte onda reflejada se suma a otras reflexiones difusas, se perturba notablemente el proceso normal de reverberación, produciendo el efecto de una segunda fuente sonora en el recinto. Estas superficies reflectantes deben localizarse y neutralizar sus efectos, cambiándolas de posición o tratándolas con materiales absorbentes de buena calidad.

... La localización de las superficies perjudiciales a las condiciones acústicas de un recinto, así como las concentraciones de energía sonora en determinadas regiones, se realiza mediante el llamado "método geométrico", que consiste en la construcción, valientes de las reglas ópticas, de diagramas que indican las trayectorias de los rayos reflejados, que es el termino generalmente aceptado para indicar las direcciones de propagación de las ondas según un ángulo solido infinitamente pequeño.

### 2.1.2.3 Teoría ondulatoria

(Recuero López, Acondicionamiento Acústico, 2001, p. 105):

El análisis de los procesos sonoros de un recinto no solo se realiza mediante una idealización particular del campo, como en las teorías estadística y geométrica, sino que puede efectuarse también sobre la base de un plano físico real del fenómeno ondulatorio. La importancia de realizar este tipo de análisis de una forma sistemática reside en el hecho de que al contrario del análisis estadístico o geométrico, este método revela la realidad del fenómeno sonoro en un recinto, así como sus características básicas.

### 2.1.2.4 Teoría psicoacústica

(Recuero López, Acondicionamiento Acústico, 2001, p. 133):

Dado que la valoración final de la acústica de un recinto la establece el oyente que escucha ... una conferencia, éste no va a exigir que el tiempo de reverberación tenga a determinadas frecuencias unos ciertos valores, ni tampoco exigirá que la distribución del sonido tenga una forma prefijada. Es por ello que entramos en un polémico campo, el de la apreciación subjetiva. Debemos, por tanto, centrar nuestra atención en el problema de que propiedades del campo sonoro están relacionadas con ciertas impresiones subjetivas.

### 2.1.2.4.1 Sistema auditivo

(Leo Beranek, Acústica, 1954, p. 414):

...el sonido entra al oído por el canal auditivo externo (oído externo). Este canal tiene un diámetro de alrededor de 0,7 cm y una longitud de cerca de 2,7 cm. El tímpano es una delgada membrana que sirve como terminación para este canal y tiene un área de alrededor de 0,8 cm<sup>2</sup>.

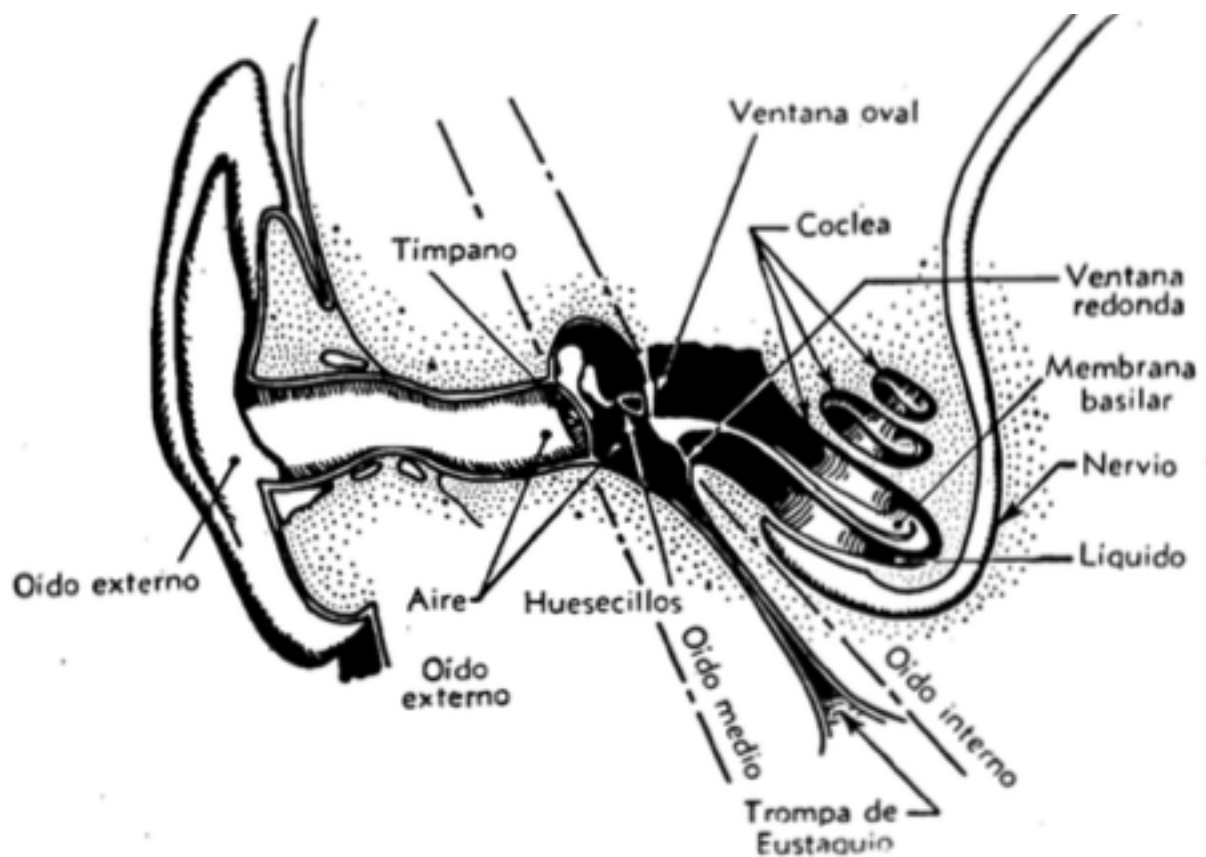
En el oído medio se encuentran tres pequeños huesos, o huesecillos, interacoplados, llamados martillo, yunque y estribo. El primero de los huesecillos se une al tímpano, y el tercero, a una segunda membrana denominada ventana oval. La ventana oval constituye la entrada al oído interno.

La ventana oval está situada en un extremo de la cóclea. La cóclea es una pieza con forma de caracol formada por el hueso y llena de un líquido incoloro. Su forma espiral tiene una longitud de unos 35 mm y una sección transversal de cerca de 4 mm<sup>2</sup> en el extremo conectado al estribo, decreciendo a la cuarta parte de esta medida en el otro extremo.

Está dividida por el medio por la partición coclear la que se extiende a todo lo largo de la cóclea. Este tabique es en parte óseo y en parte una membrana gelatinosa llamada membrana basilar. Por sorprendente que parezca, la membrana basilar es más estrecha en el extremo más grueso de la cóclea. Sobre la superficie de la membrana basilar terminan alrededor de 25.000 filetes nerviosos que forman el nervio auditivo principal. La cámara llena de líquido está además dividida en dos partes por una membrana muy fina llamada membrana de Reissner. Además de la ventana oval, que comunica la cámara de líquido que está encima de la partición coclear, hay una ventana redonda abierta en la mitad inferior de la cámara y que funciona como un ecualizador de presión. El

área de la ventana oval es de alrededor de 3 mm<sup>2</sup> y el de la ventana redonda, de alrededor de 2 mm<sup>2</sup>.

...El movimiento de la ventana oval producida por el movimiento del tímpano establece una o más ondas que se propagan a lo largo de la membrana y del líquido, con el resultado de que hay para cada frecuencia un punto de máxima excitación. El extremo de la membrana más próximo a la ventana oval resuena a las frecuencias más altas, mientras que el extremo remoto lo hace a las frecuencias más bajas.

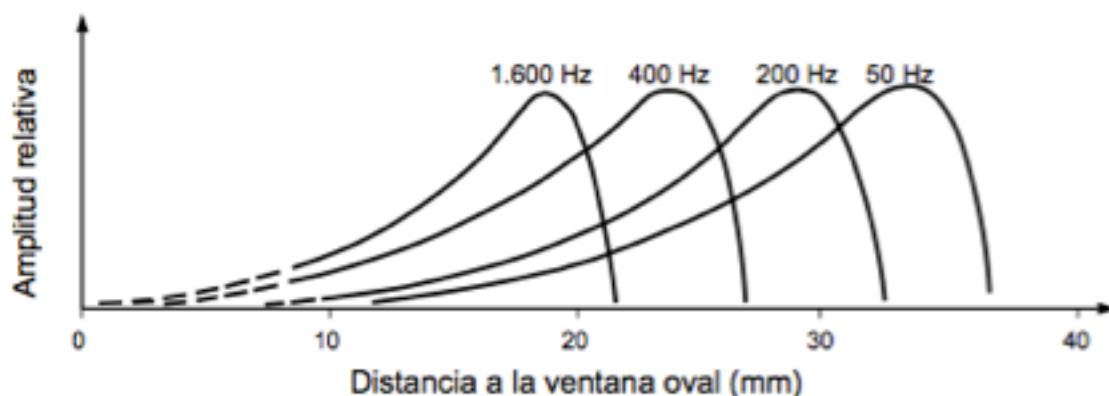


### 2.1.2.4.1.1 Enmascaramiento del sonido

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 38):

Cuando el oído está expuesto a dos o más tonos puros de frecuencias diferentes, existe la posibilidad de que uno de ellos enmascare los demás y, por tanto, evite su percepción de forma parcial o total. Del mismo modo, es evidente la dificultad que entraña entender una conversación en presencia de ruido.

El fenómeno del enmascaramiento se explica de una manera simplificada considerando la forma en que la denominada membrana basilar es excitada por tonos puros de diferente frecuencia. En la siguiente figura se muestra la amplitud relativa del desplazamiento de la membrana basilar en función de la distancia a la ventana oval, para cuatro tonos de frecuencia diferente.



Se observa que los tonos de alta frecuencia producen un desplazamiento máximo en la zona próxima a la ventana oval y que, a medida que la frecuencia disminuye, dicho máximo se va desplazando hacia puntos más alejados de la misma. Por otra parte, la excitación es asimétrica puesto que presenta una cola que se extiende hacia la ventana oval (zona de frecuencias altas), mientras que por el lado contrario (frecuencias bajas) sufre una brusca atenuación.

La consecuencia de tal asimetría es que un tono de baja frecuencia puede enmascarar otro de frecuencia más elevada, tanto más, cuanto mayor sea su nivel de presión sonora. Ello es debido a que la zona de frecuencias cubierta por su cola será más extensa. En cambio, al considerar la situación inversa, el grado de enmascaramiento es claramente inferior.

## **2.2 Acústica arquitectónica**

La acústica arquitectónica es una rama de la acústica aplicada a la arquitectura, que estudia el control acústico en recintos, bien sea para lograr un adecuado aislamiento acústico o para mejorar el acondicionamiento acústico en el interior de locales. La acústica arquitectónica estudia el control del sonido en lugares abiertos como en espacios cerrados.

### **2.2.1 Aislamiento acústico**

“El aislamiento acústico consiste en impedir la propagación de una señal sonora a través del aire, mediante obstáculos reflectores, para las que son necesarias paredes duras y pesadas, que reflejan el sonido, pero no la absorben” (Recuero López, Acondicionamiento Acústico, 2001, p. 17).

Según expone el autor Carrión (1998) “se refiere al conjunto de acciones encaminadas a la obtención de una correcta atenuación en la transmisión de ruido y vibraciones entre los diferentes espacios que integran un recinto” (p. 19).

Los materiales empleados para aislar el ruido aéreo, que es el sonido no deseado transmitido por el aire, son ladrillos de diferentes tipos, huecos, macizos, etc. Así mismo, se emplean otros tipos de materiales como yeso, cartón - yeso, fibras de diferentes densidades, así como otros muchos tipos de materiales.

## 2.2.2 Acondicionamiento acústico

“... el acondicionamiento acústico consiste en la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de un recinto con objeto de conseguir las condiciones acústicas más adecuadas para el tipo de actividad a la que se haya previsto destinarlo” (Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 19).

### 2.2.2.1 Absorción del sonido

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 72):

En un recinto cualquiera, la reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, tanto en su propagación a través del aire como cuando inciden sobre sus superficies límite, es determinante en la calidad acústica final del mismo. Básicamente, dicha reducción de energía, en orden de mayor a menor importancia, es debida a una absorción producida por:

- El público y las sillas.
- Los materiales absorbentes y/o los absorbentes selectivos (resonadores).
- Todas aquellas superficies límite de la sala susceptibles de entrar en vibración (como, por ejemplo, puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras).
- El aire.
- Los materiales rígidos y no porosos utilizados en la construcción de las paredes y techo del recinto (como, por ejemplo, el hormigón).

...las características de absorción de los materiales absorbentes y de los resonadores dependen no sólo de sus propiedades físicas, sino también en gran parte de un sinfín de condicionantes y de detalles constructivos, que varían sustancialmente de un caso a otro y que no se pueden representar mediante una expresión matemática.

Es por ello que, para realizar cualquier diseño acústico, resulta imprescindible disponer de los coeficientes de absorción  $\alpha$  obtenidos mediante ensayos de laboratorio, según un procedimiento homologado (norma ISO 354 / UNE-EN 20354).

### 2.2.2.1.1 Coeficiente de absorción sonora ( $\alpha$ )

(Recuero López, Acondicionamiento Acústico, 2001, p. 19):

Las pérdidas de energía en los materiales se puede caracterizar mediante el coeficiente de absorción sonora, entendiendo por tal la relación entre la energía sonora absorbida por un material y la energía sonora incidente sobre dicho material por una unidad de superficie y que puede variar desde un 1 o 2% al 100%, para diferentes materiales. El coeficiente de la onda sonora y del ángulo con el que la onda incide sobre la superficie. Ya que el coeficiente de absorción varía con la frecuencia, se suele dar los mismo de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz.

### 2.2.2.1.2 Materiales acústicos

(Recuero López, Acondicionamiento Acústico, 2001, p. 21-22):

Los materiales acústicos comerciales utilizados para recubrir superficies de paredes y techos, se puede clasificar de diferentes formas, dependiendo de las propiedades físicas y estructurales que se consideren.

- A. **Materiales Porosos:** son de estructura granular o fibrosa, siendo importante el espesor de la capa y la distancia entre ésta y la pared. El espesor del material se elige de acuerdo con el valor de coeficiente de absorción deseado, ya que si es demasiado delgado se reduce el coeficiente de absorción a las bajas frecuencias, mientras que si es muy grueso resulta más caro.

- B. **Materiales para argamasa:** son materiales acústicos que se aplican en estado húmedo con paleta o pistola para formar superficies continuas de un espesor deseado. Estos materiales están compuestos de una mezcla de ingredientes secos, a los cuales se les añade un aglutinante líquido.
- C. **Sistema de paneles metálicos perforados:** son de aluminio o chapa perforada, con un relleno de fibra mineral, siendo este relleno el elemento absorbente, de unos 3 cm de espesor con un sistema ignífugo. Todos estos materiales, tienen un alto rendimiento como absorbentes, variando sus valores en función de la forma de perforación y espesor del elemento absorbente, así como el espacio de aire existente detrás de él.
- D. **Sistema de paneles rígidos:** La absorción de cada elemento del sistema, se determina mediante los datos de construcción, tales como tipo de material, dimensiones del sistema, distancia a la que está colocada de la pared, forma de ensamblaje, debiendo prestar gran atención, ya que todo ello repercute en los parámetros acústicos del sistema. Los sistemas de paneles rígidos se suelen emplear para corregir la absorción a bajas frecuencias, creando un campo sonoro más difuso.
- E. **Absorbentes suspendidos:** se utilizan en algunos recintos en lo que existen pocas superficies susceptibles de colocar materiales absorbentes. En este caso, se suelen emplear unidades de materiales suspendidos libremente en el recinto a cierta distancia de sus superficies límites. Normalmente toman la forma de láminas planas o pantallas de material absorbente colgadas verticalmente en hileras continuas.

Dentro de la clasificación de sistema de paneles rígidos se debe incorporar a la teoría lo expuesto por el autor Carrión.

### **2.2.2.1.2.1 Elementos absorbentes selectivos (resonadores)**

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 88):

...por regla general, los materiales absorbentes de espesor estándar colocados sobre una pared rígida presentan una pobre absorción a bajas frecuencias. Al separarlos de la pared, se produce una notable mejora de la absorción a dichas frecuencias.

De todas formas, si se pretende obtener una gran absorción a frecuencias bajas con objeto de reducir sustancialmente los valores del tiempo de reverberación, es preciso hacer uso de absorbentes selectivos o resonadores. Se trata de elementos que presentan una curva de absorción con un valor máximo a una determinada frecuencia. Dicha frecuencia recibe el nombre de frecuencia de resonancia, y depende de las características tanto físicas como geométricas del resonador. Generalmente, está situada por debajo de los 500 Hz.

Básicamente, existen los siguientes tipos de resonadores: de membrana o diafragmático, simple de cavidad (Helmholtz), múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados o rasurados y múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de listones.

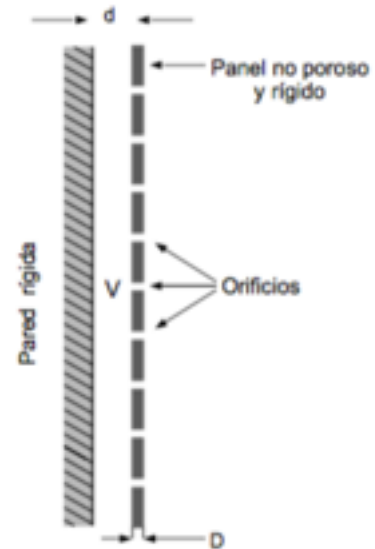
#### **2.2.2.1.2.1.1 Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de paneles perforados o ranurados**

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 96):

Está formado por un panel de un material no poroso y rígido de espesor  $D$ , en el que se han practicado una serie de perforaciones circulares o ranuras, montado a una cierta distancia " $d$ " de una pared rígida, a fin de dejar una cavidad cerrada de aire entre ambas superficies.

Partiendo de la base de que, a las frecuencias de diseño normalmente bajas, se cumple que " $d \ll \lambda$ " el resonador múltiple de cavidad puede ser considerado de cualquiera de las siguientes maneras:

- Como un resonador de membrana en el que la masa del panel ha sido sustituida por la masa del aire contenido en cada perforación o ranura. En este caso, es precisamente dicho aire, y no el panel, el que entra en vibración cuando una onda sonora incide sobre el elemento.
- Como un conjunto de resonadores simples de Helmholtz que comparten una misma cavidad. Dicha cavidad actúa a modo de elemento acoplador entre los diferentes orificios practicados.



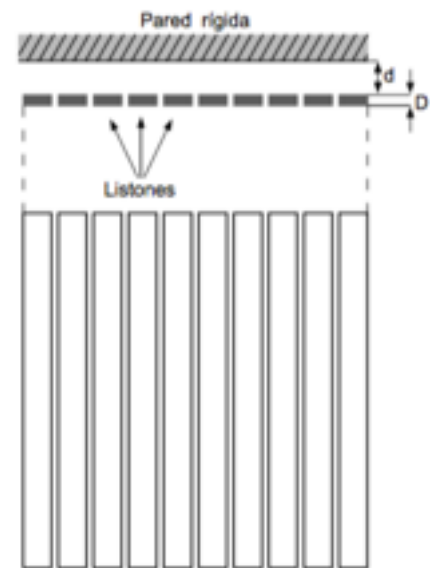
### 2.2.2.1.2.1.2 Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) a base de listones

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 105):

Está formado por un conjunto de listones de espesor  $D$  espaciados y montados a una cierta distancia " $d$ " de una pared rígida con objeto de dejar interpuesta una cavidad cerrada de aire ... el comportamiento de este tipo de resonador es totalmente equivalente al del resonador múltiple a base de paneles en cuanto a:

- Las características de absorción con y sin material absorbente en la cavidad: al rellenar parcial o totalmente la cavidad de aire con un material absorbente, la absorción aumenta a todas las frecuencias y la frecuencia de resonancia disminuye.

- La influencia en la forma de la curva de absorción de la ubicación concreta del material absorbente dentro de la cavidad: cuando el absorbente se sitúa inmediatamente detrás de los listones, la absorción es relativamente poco selectiva, y a medida que dicho material se va separando de los mismos, la curva se va estrechando. La absorción más selectiva se obtiene cuando el absorbente se coloca sobre la pared rígida.
- La obtención de una curva de absorción mucho menos selectiva a base de modificar la estructura del resonador. En este caso, las posibles modificaciones consisten en variar la distancia entre listones consecutivos, o entre los listones y la pared a base de montarlos con una cierta inclinación, o bien, incrementando apreciablemente el porcentaje de superficie abierta.



### 2.2.2.1.2.2 Protección de los materiales absorbentes

(Carión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 84):

En muchas ocasiones, resulta conveniente cubrir los materiales absorbentes por la cara expuesta al recinto. Los principales motivos son los siguientes:

- En el curso del tiempo, algunos materiales desprenden partículas que pueden llegar a contaminar el aire de la sala.
- Si los materiales están al alcance del público, existe el peligro de que puedan resultar dañados.
- El arquitecto habitualmente desea ocultarlos por razones eminentemente estéticas.

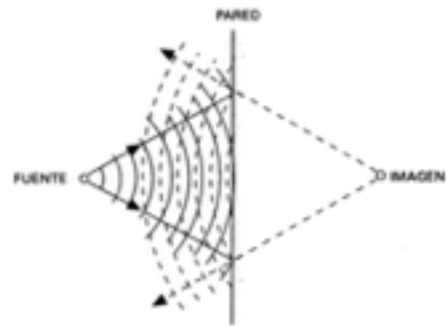
A continuación se indican los recubrimientos más comúnmente utilizados:

- Listones de madera
- Velo acústicamente transparente
- Superficie microporosa
- Panel perforado o ranurado de madera, chapa metálica o cartón-yeso

### 2.2.2.2 Reflexión del sonido

(Harris, Manual de medidas acústicas y control de ruido, 1995, p. 113):

Las ondas sonoras viajan hacia fuera en todas direcciones a partir de la fuente. Cuando chocan con un obstáculo, como una pared, su dirección de propagación cambia; se reflejan.



Las ondas sonoras reflejadas se transmiten como si se hubieran originado a partir de la «imagen» de la fuente de sonido. Una «imagen» es una fuente imaginaria de sonido localizada a la misma distancia detrás de la pared que la fuente real delante de ella (a lo largo de una línea perpendicular dibujada entre la fuente y la pared). Si la superficie reflectante no es porosa y es perfectamente rígida, no hay pérdida de energía acústica por la reflexión. Entonces las ondas reflejadas producen el mismo nivel de presión sonora en un punto determinado que el que produciría la fuente imagen si el muro se retirara y tuviera la misma potencia sonora que la fuente real. Sin embargo, ninguna superficie física es un reflector perfecto; parte de la energía acústica siempre es absorbida por la superficie.

Ademas (Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 115) expone que:

...el diseño específico de elementos reflectores posibilita la aparición de reflexiones útiles en la zona del público ... solo resultan ser necesarias, y en ocasiones imprescindibles, en salas destinadas a la palabra ... se entiende por reflexiones útiles todas aquellas que llegan al receptor dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo. Dichas reflexiones, al ser integradas por el oído humano juntos con el sonido directo, contribuyen a mejorar la inteligibilidad de la palabra...

#### **2.2.2.2.1 Difusión del sonido**

Según Carrión (1998), la difusión acústica en un recinto determinado se logra a partir de la colocación de elementos diseñados para dispersar, de forma uniforme y en múltiples direcciones, la energía acústica que incide sobre los mismos.

Hoy en día existe una diversa disponibilidad de elementos difusores contruidos a base de superficies irregulares, de acuerdo a secuencias matemáticas previamente fijadas. Sin embargo, debemos tener en cuenta que para cada elemento en particular solo hay una respuesta óptima de difusión en una banda de frecuencias delimitada, y que dicha banda frecuencial depende de las dimensiones del difusor.

### **2.3 Sistema de fonación humano**

(Recuero López, Ingeniería Acústica, 2000, p. 275):

El órgano de la voz incluyen los pulmones, la laringe y la boca, realizando una función determinada cada una de estas partes, exponiéndose seguidamente su mecanismo.

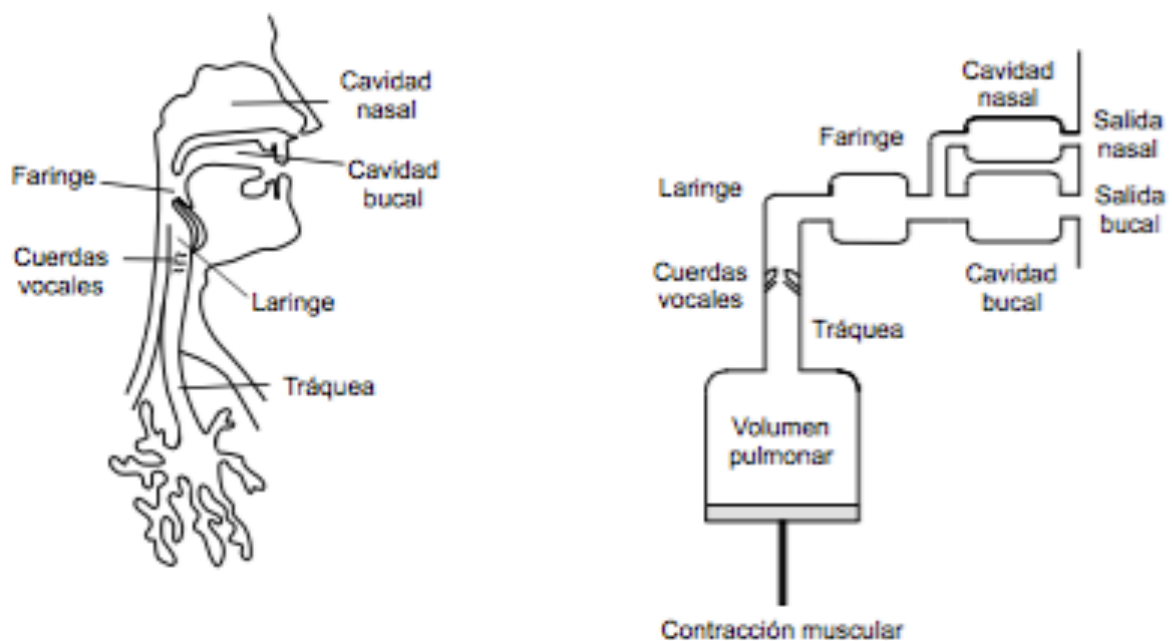
Por contracción de los músculos del tórax se expulsa el aire de los pulmones, que genera un exceso de presión, dando origen a una corriente de aire, pudiendo considerarla como portadora de energía que estuviese modulada en su velocidad, y por consiguiente en presión, para la producción de sonidos, realizando la modulación para dos tipos distintos de sonido, vocales y consonantes.

Esta corriente de aire pasa a travez de la glotis, que es un espacio situado entre la base de la laringe, siendo el primer elemento modulador, formando membrana cercana a laringe, constituyendo su membrana un diafragma que al abrirse y cerrarse modula una corriente de aire que pasa por ella. La longitud de esta abertura es de unos 2,5 cm para el hombre y 1,5 cm para la mujer, estando determinada la frecuencia fundamental de esta modulación por la tensión a las que están sometidas las cuerdas vocales. La parte frontal de cada pliegue vocal esta unido al cartílago del tiroides o la nuez.

Los pliegues vocales no sirven para producir sonidos, sino que su función es proteger los pulmones de las partículas que se arrastran al inspirar el aire. Encima de los pliegues vocales existen unos falsos pliegues, que entran en acción cuando se llenan los pulmones con una cantidad de aire superior a la normal. Los pliegues vocales están situados en la parte superior de la laringe, que es una cavidad que une la boca con el esófago. La parte superior de la faringe es el velo del paladar o paladar blando que comunica la cavidad nasal.

Cuando el velo del paladar esta en su posición mas alta, el paso a la nariz se cierra y el aire circula a travez de la boca. La laringe, faringe y la boca constituyen el aparato vocal formado por numerosas cavidades resonantes y orificios, configurando una red que modula la onda de presión.

La voz, como instrumento sonoro, esta determinada por la posiciones de los labios, la mandíbula, la lengua, y la laringe. Los movimientos de estos elementos cierran o dilatan el aparato vocal según las posiciones, lo que permite producir una gran variedad de sonidos vocales. También se puede producir sin emplear las cuerdas vocales, denominandose sonidos respiratorios, pudiendose incluir en este grupo a las consonantes fricativas (F y S). En este caso, la señal se produce por modulación de la corriente de aire mediante los labios, dientes y lengua.



### 2.3.1 Características del mensaje oral

Cuando una persona emite un mensaje, emplea un tiempo mayor en la emisión de las vocales que en la de las consonantes. Es por ello que las vocales constituyen el llamado régimen permanente del habla, mientras que las consonantes se asocian al régimen transitorio. La duración en promedio de una vocal es del orden de 90 ms, reduciéndose a 20 ms en el caso de una consonante.

El hecho de que la duración de las vocales sea más elevada hace que el nivel de presión sonora asociado a las mismas sea, en promedio, del orden de 12 dB mayor que el correspondiente a las consonantes. Por otra parte, su contenido frecuencial es más rico en bajas frecuencias, mientras que las consonantes presentan una mayor contribución de altas frecuencias.

Por otro lado, el grado de inteligibilidad de la palabra está estrechamente relacionado con la correcta percepción de las altas frecuencias. En consecuencia, son las consonantes las que determinan la comprensión del mensaje oral. En cambio, la información contenida en las vocales es redundante.

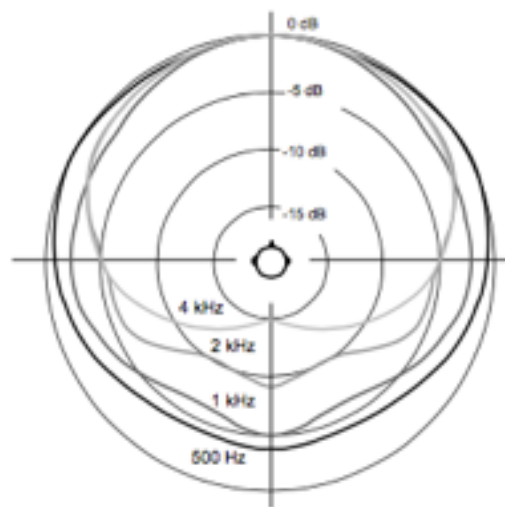
### 2.3.2 Directividad de la voz humana

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 46):

En general, cualquier fuente sonora radia más potencia en unas direcciones que en otras y, por tanto, presenta una cierta directividad. Dicha directividad depende de la frecuencia y aumenta con la misma.

La manera de expresar la directividad de una fuente sonora en un punto cualquiera del espacio es mediante el denominado factor de directividad  $Q$ . El factor  $Q$  depende de la relación entre el nivel de presión sonora producido por dicha fuente en la dirección considerada y el nivel que se obtendría si la fuente no fuese directiva.

Cuanto mayor sea el nivel de presión sonora en una dirección determinada, mayor será el valor de  $Q$  en dicha dirección. La voz humana presenta unas características de directividad que vienen determinadas por el sistema de fonación y la forma de la cabeza, siendo la dirección frontal la de mayor directividad. Si bien la directividad aumenta con la frecuencia, a efectos prácticos, se considera que el factor de directividad de la voz humana en la dirección frontal es  $Q=2$ .



## 2.4 Análisis de inteligibilidad de la palabra en un recinto

Los factores que afectan principalmente a la inteligibilidad del habla son el espectro y la estructura temporal del habla y del ruido, la cantidad de reverberación, el nivel de la voz del hablante; la distancia entre hablante y oyente y la familiaridad de este último con las palabras que emplee quien habla. También son importantes los factores lingüísticos y pragmáticos.

Estos incluyen consideraciones tales como la redundancia del mensaje que hay que entender, el contexto en que se produce, los dialectos de hablante y oyente, la tasa de habla, la claridad de la articulación y de cómo altera el hablante sus hábitos verbales en presencia del ruido. Incluso el estado emocional o el grado de estrés del hablante producen cambios en su conducta verbal y, por tanto, cambios en la inteligibilidad del habla.

La inteligibilidad puede medirse directamente. También puede predecirse a partir de medidas físicas del habla y del ruido y/o la reverberación.

### **2.4.1 Campo sonoro directo**

La porción del campo sonoro de una fuente de sonido en que la presión sonora (debida a esta fuente) no ha sufrido ninguna reflexión.

### **2.4.2 Campo sonoro reverberante**

Un campo sonoro en un espacio total o parcialmente cerrado, una vez que la fuente ha cesado, en que las ondas sonoras se reflejan repetida o continuamente sobre los límites.

### **2.4.3 Ruido de fondo**

El ruido total de todas las fuentes distintas al sonido de interés.

#### **2.4.3.1 Curvas NC (curvas de ruido de criterio)**

Una serie de curvas de los espectros de sonido de banda de octava en un sistema para evaluar el ruido de un espacio interior ocupado; se compara un espectro real de banda de octava con este conjunto de curvas para determinar el nivel NC del espacio.

## 2.4.4 Reverberación

La persistencia del sonido en un espacio total o parcialmente cerrado, después de que la fuente de sonido ha cesado; la persistencia es el resultado del reflejo repetido y/o la dispersión.

### 2.4.4.1 Tiempo de reverberación (RT)

(Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, 1998, p. 63):

Con el fin de poder cuantificar la reverberación de un recinto, se define el tiempo de reverberación (de forma abreviada RT) a una frecuencia determinada como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60 dB con respecto a su valor inicial.

Un recinto con un RT grande se denomina “vivo” (nave industrial, iglesia, etc.), mientras que si el RT es pequeño recibe el nombre de recinto “apagado” o “sordo” (locutorio, estudio de grabación, etc.). Ambas denominaciones coinciden con las del apartado anterior, lo cual es lógico habida cuenta de que el nivel de campo reverberante aumenta con el tiempo de reverberación.

Por lo general, el RT varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que ésta aumenta. Ello es debido, en parte, a las características de mayor absorción con la frecuencia de los materiales comúnmente empleados como revestimientos, así como a la absorción del aire, especialmente manifiesta en recintos grandes y a altas frecuencias.

### 2.4.4.2 $RT_{mid}$

Habitualmente, cuando se establece un único valor recomendado de RT para un recinto dado, se suele hacer referencia al obtenido como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1kHz. Se representa por  $RT_{mid}$ .

En general, el valor más adecuado de  $RT_{mid}$  depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinarlo. Por ejemplo, como se verá en capítulos sucesivos, cuando se trata de salas destinadas a la palabra, es conveniente que los valores de RT sean bajos, con objeto de conseguir una buena inteligibilidad, mientras que en el caso de salas de conciertos son recomendables unos valores apreciablemente más elevados a fin de que la audición musical resulte óptima.

### Valores recomendados de $RT_{mid}$

TIPO DE SALA	$RT_{mid}$ (en S)
Locutorio de radio	0,2 - 0,4
Sala de conferencias / Aulas	0,7 - 1,0
Cine	1,0 - 1,2
Sala polivalente	1,2 - 1,5
Teatro de ópera	1,2 - 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 - 1,7
Sala de conciertos (música de sinfónica)	1,8 - 2,0
Iglesia / Catedral	2,0 - 3,0

## 2.5 Medición del sonido

A la hora de ver como se comporta un recinto, es necesario hacer mediciones. Denominamos medición a los procedimientos llevados a cabo para realizar grabaciones de audio con un micrófono de medición para recolectar datos, para después realizar procesos digitales de filtrado, modulación, etc. y, a través de operaciones de cálculo poder obtener resultados significativos que contribuyan a concluir la investigación.

Para la obtención del nivel de intensidad de sonido es necesario utilizar un sonómetro, que cuantifica en valores discretos la amplitud del fenómeno sonoro que es objeto de estudio; el sonómetro mide exclusivamente niveles de presión sonora (SPL) en dBA.

Por otro lado, para llevar a cabo la medición de otras cualidades físicas del sonido como por ejemplo la frecuencia, es necesario utilizar una serie de procesos y herramientas. En primera instancia, la utilización de un micrófono como transductor acústico-mecano-eléctrico resulta necesario para capturar el fenómeno físico del sonido; el segundo proceso correspondiente es el de conversión analógico-digital para poder introducir valores discretos del sonido como datos para ser posteriormente almacenados en un ordenador.

## 2.6 Universidad Católica de Salta

La Universidad Católica de Salta se define como una institución argentina de educación superior universitaria, de régimen privado, confesional católica, sin fines de lucro, con el más alto grado de autonomía que otorga la legislación vigente en el sistema universitario argentino.

Se caracteriza por sostener los principios democráticos de igualdad y libertad, el respeto por la ética, la justicia, la tolerancia, rechazando toda

forma de discriminación y garantizando a sus miembros la libertad académica, los derechos de la persona y de la comunidad dentro de las exigencias de la verdad y el bien común.

### **2.6.1 Reseña histórica**

Su creación es producto del trabajo incansable de dos visionarios: Su Excelencia Reverendísima, el primer Arzobispo de Salta Monseñor Roberto José Tavella, S.S., y el Dr. Robustiano Patrón Costas, hombre de destacadísima trayectoria en la función política y empresarial, y en ésta, fundador del Ingenio y Refinería San Martín del Tabacal.

En 1958 y durante la presidencia del Dr. Arturo Frondizi, se promulga la Ley 14.557, que autorizaba la fundación de universidades privadas.

A través de su empresa, el Dr. Robustiano Patrón Costas aportó el capital necesario, contribuyendo con ciento cincuenta millones de pesos, destinados íntegramente a la creación de esta Casa de Estudios.

La Compañía de Jesús tomó en sus manos la organización y dirección académica de la nueva Universidad, estableciendo como condición para su puesta en marcha la existencia de una biblioteca de -al menos- quince mil volúmenes y un campus de cincuenta hectáreas. Los libros fueron donados por el Dr. Juan Carlos García Santillán y la tierra por el Sr. Jaime Durán. El Arquitecto Héctor Ezcurra diseñó los planos de los edificios, donando sus honorarios a manera de contribución. La Srta. Carmen Patrón Costas donó una casa solariega, cuyo importe de venta debía ser destinado a la construcción de la Capilla y el Ing. Jorge Luis Matasi parquizó el campus, donando las plantas necesarias.

Finalmente, y mediante Decreto Arzobispal de fecha 19 de marzo de 1963, fue creada la Universidad Católica de Salta.

El 21 de mayo de 1963 murió Su Excelencia Reverendísima Monseñor Roberto José Tavella, quien durante la prolongada enfermedad que lo aquejara mantuvo como prioritario el tema de la concreción de la Universidad. Su sucesor, Su Excelencia Reverendísima Monseñor Carlos

Mariano Pérez Eslava, S.S., se abocó con igual entusiasmo a la noble causa desde el momento mismo de su asunción, el 2 de abril de 1964.

Por su parte, el 24 de Septiembre de 1965, falleció el Dr. Robustiano Patrón Costas quien, antes de morir y enfermo, había confiado la tarea a su hijo, el Ing. Eduardo Patrón Costas, quien tomó como propio el proyecto y se encargó personalmente de allanar todo obstáculo para honrar y cumplir el mandato paterno.

Los estatutos fueron aprobados el 15 de junio de 1964. El 2 de septiembre de 1965, el Ministerio de Educación y Justicia de la Nación concedió la licencia para usar el nombre de Universidad, mientras se gestionaba la autorización provisoria. Elegida Patrona de la Universidad la Doctora de la Iglesia Santa Teresa de Jesús, su día del Santoral fue elegido para colocar la piedra fundamental en Campo Castaños, el 15 de Octubre de 1966. Desde sus comienzos, el Sr. Arzobispo de Salta en ejercicio se desempeña como Gran Canciller. Las clases comenzaron a dictarse en marzo de 1967 en el edificio del Colegio Belgrano, cuyo Rector, Padre Ramón Urcelay, C.R.L., cedió gentilmente en préstamo las instalaciones hasta tanto se habilitaran las de Campo Castaños. El primer Rector fue el Pbro. Edward Justen, S.J., Ph.D., a quien acompañó como Vice Rector Académico el Pbro. Eduardo Martínez Márquez, S.J., quien puso énfasis en la importancia de los estudios generales que acompañaban los estudios específicos, al decir que "se trata y se pretende el desarrollo formal de las facultades humanas en su triple dimensión: de conocimiento básico, de conocimiento mental crítico y de interés especulativo humano. Los estudios generales otorgan al estudiante un enfoque estrictamente científico de sus estudios, enfoque que lo hará mas apto para el ejercicio profesional, con creatividad genuina y con una visión integradora de la ciencia, del hombre, de la sociedad y del mundo, mucho mas amplia que la que ha de contemplar después dentro del reducido campo de su carrera profesional."

Las unidades académicas iniciales fueron la Facultad de Artes y Ciencias, Facultad de Ingeniería, Facultad de Economía y Administración y

la Escuela de Servicio Social.

Los primeros edificios del Campus fueron inaugurados en el año 1969, donde se comenzó a dictar clases a partir del segundo semestre.

Por su parte, la Fundación Michel Torino efectuó una importante donación con la que se construyó el Auditorium y, a su disolución, donó a la Universidad distintas propiedades.

El 25 de marzo de 1985, con la muerte de Su Excelencia Reverendísima Monseñor Carlos Mariano Pérez Eslava, asumió la Arquidiócesis de Salta Su Excelencia Reverendísima Monseñor Moisés Julio Blanchoud, quien renunció por razones de edad el 6 de agosto de 1999.

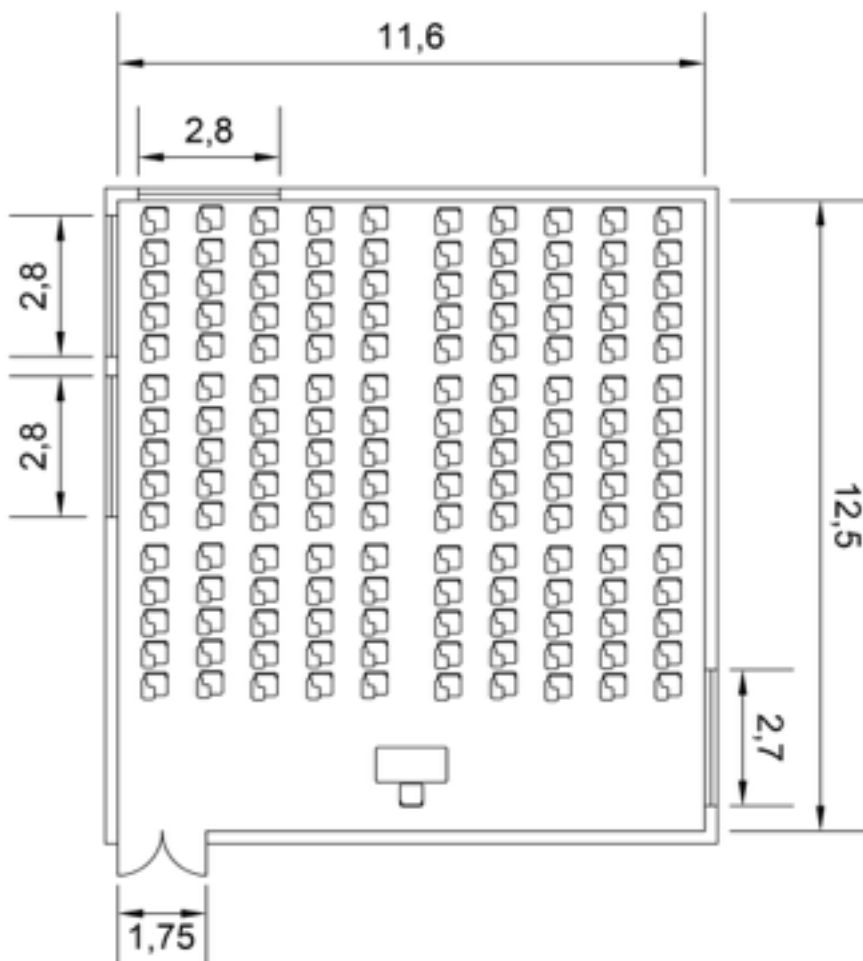
En la actualidad, se desempeña como Gran Canciller de la Universidad Católica de Salta Su Excelencia Reverendísima el Sr. Arzobispo de Salta Monseñor Mario Antonio Cagnello, quien asumió plenamente sus funciones el 6 de agosto de 1999, luego de haberse desempeñado como Arzobispo Coadjutor desde el 24 de junio de 1998 hasta la fecha de su plena asunción, convirtiéndose así en el cuarto Arzobispo, y décimo Obispo Diocesano, de la Arquidiócesis de Salta, fundada como Diócesis el 28 de marzo de 1806 por Su Santidad Pío VII mediante la bula "Regalium Principum" y elevada a Arquidiócesis por Su Santidad Pío XI el 20 de septiembre de 1934.

### **2.6.2 Aula UM-5**

El aula UM 5 se encuentra ubicado en el edificio de Usos Múltiples ubicado en el campus de la Universidad Católica de Salta en Campo Castañares. Debido a sus características de tamaño, materiales y forma; es un lugar que presenta determinadas cualidades indeseadas para un recinto cuya finalidad es la transmisión y comprensión de mensajes orales.

A continuación se presenta una descripción del espacio:

- Sala de planta rectangular de 12,5 m de largo por 11,6 m de ancho y una altura de 4m.
- Su volumen es de 580 m<sup>3</sup>.
- Capacidad para aproximadamente 150 pupitres.
- Paredes de ladrillo revocadas.



Plano del aula UM-5  
de la facultad de  
Usos multiples

## Recolección de datos

### 3.1 Mediciones

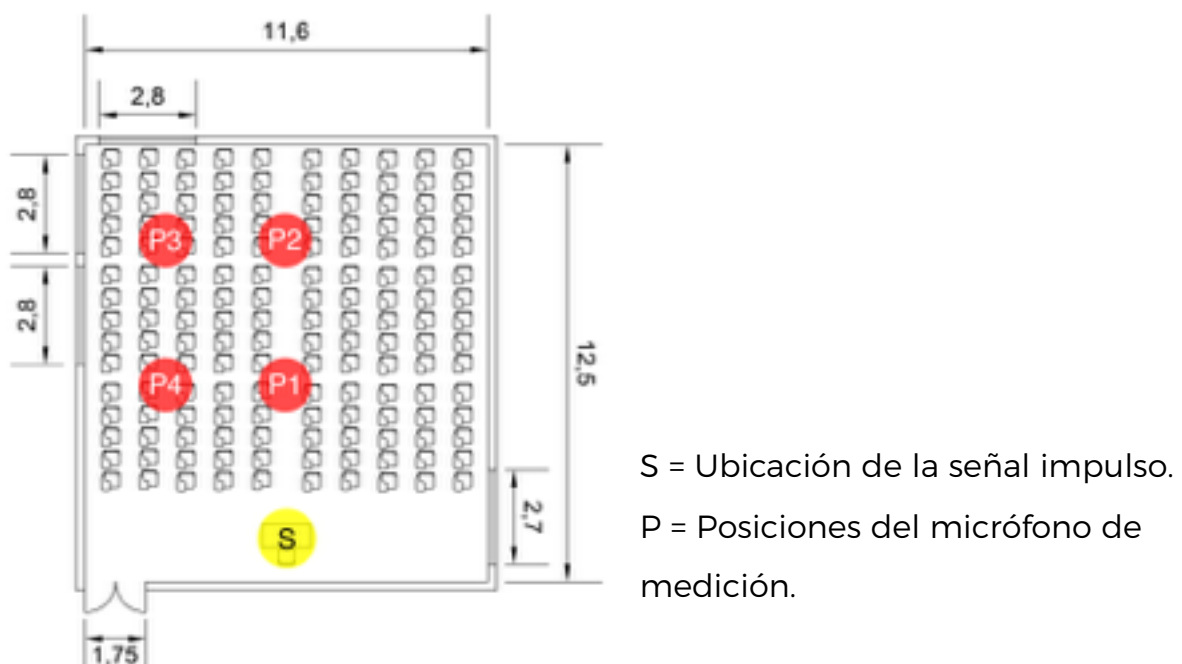
Las mediciones en el aula UM-5 de la Universidad Católica de Salta se llevaron a cabo el día Jueves 14 de abril del 2016 a las 18 horas. Al momento de realizar las mediciones, se tuvo en cuenta lo expuesto en la norma UNE-EN ISO 3382-2, donde se realizaron cuatro posiciones diferentes de micrófonos.

Los micrófonos se ubicaron siempre a una distancia superior a 1 metro de cualquier superficie limite como lo expone la norma. En cuanto al estímulo, se utilizó una señal de tipo impulso generadas por la explosión de globos en el lugar correspondiente a la fuente de sonido.

#### 3.1.1 Posiciones del micrófono

En el plano que se ve a continuación se puede ver las posiciones elegidas para la ubicación del micrófono de medición, así como también la ubicación de la fuente sonora.

Se eligió esas ubicaciones ya que el recinto es de forma simétrica y de acuerdo a lo establecido por la teoría de la acústica estadística, se puede predecir que las medidas serán igual en los lados opuestos del recinto.



### 3.1.2 Instrumentos de medición

Para realizar las mediciones correspondientes en el aula UM-5 de la Universidad Católica de Salta fue necesario usar dos formatos diferentes. Uno de ellos fue el sonómetro, que se utilizó para determinar el nivel de ruido de fondo que hay en el recinto y el segundo formato fue un micrófono de medición conectado a una placa de sonido externa para digitalizar la señal analógica y almacenar la muestra de sonido en una computadora, esta grabación se hizo a 48 kHz y 24 bits.

#### 3.1.2.1 Sonómetro

En cada una de las ubicaciones mostradas en el plano anteriormente se llevó a cabo una medición de nivel de ruido de fondo en ponderación dBA con la configuración integrada rápida cada 125 ms. Esto es necesario para conocer el valor del parámetro correspondiente a la curva NC.

#### 3.1.2.2 Micrófono de medición conectado a la computadora

Se utilizó para grabar la respuesta impulso generada de la explosión de un globo en la posición de la fuente sonora establecida anteriormente en el plano.

Con este formato de medición se recolectarán los datos necesarios de:

- Tiempo de reverberación (RT)
- Distancia crítica (Dc)
- %ALCons

## **Análisis de datos**

El análisis de datos de esta investigación se fundamenta principalmente en el procesamiento de las señales recolectadas a través de distintos software de análisis de señales y su posterior calculo, aplicando las formulas matemáticas incluidas en el marco teórico, por medio de un programa de hojas de cálculo.

#### **4.1 Herramientas de análisis**

Las herramientas que se utilizaron en el proceso de análisis de datos recolectados fueron tres programas informáticos que ayudan a la visualización y procesamiento de las señales de audio.

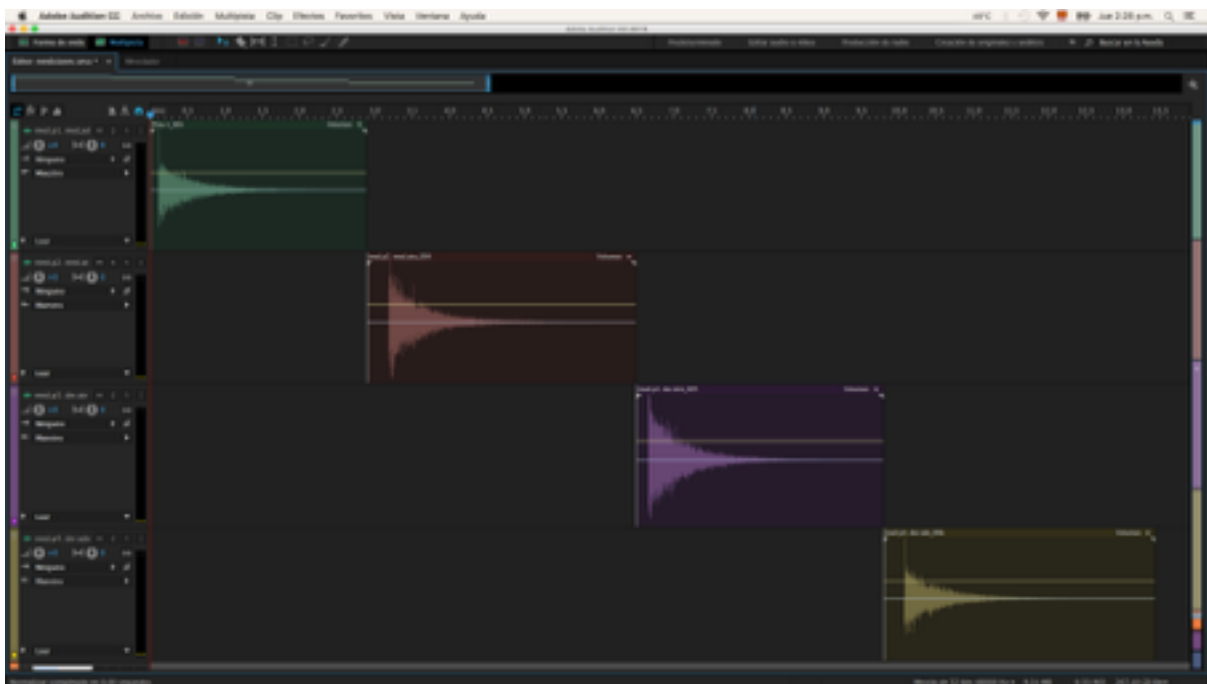
Estos programas son:

- Adobe Audition CC 2015
- Room EQ Wizard V.5.1
- Numbers

### 4.1.1 Adobe Audition CC 2015

Es una aplicación en forma de estudio de sonido destinado a la edición de audio digital de Adobe Systems Incorporated que permite tanto un entorno de edición y mezclado de ondas de sonido.

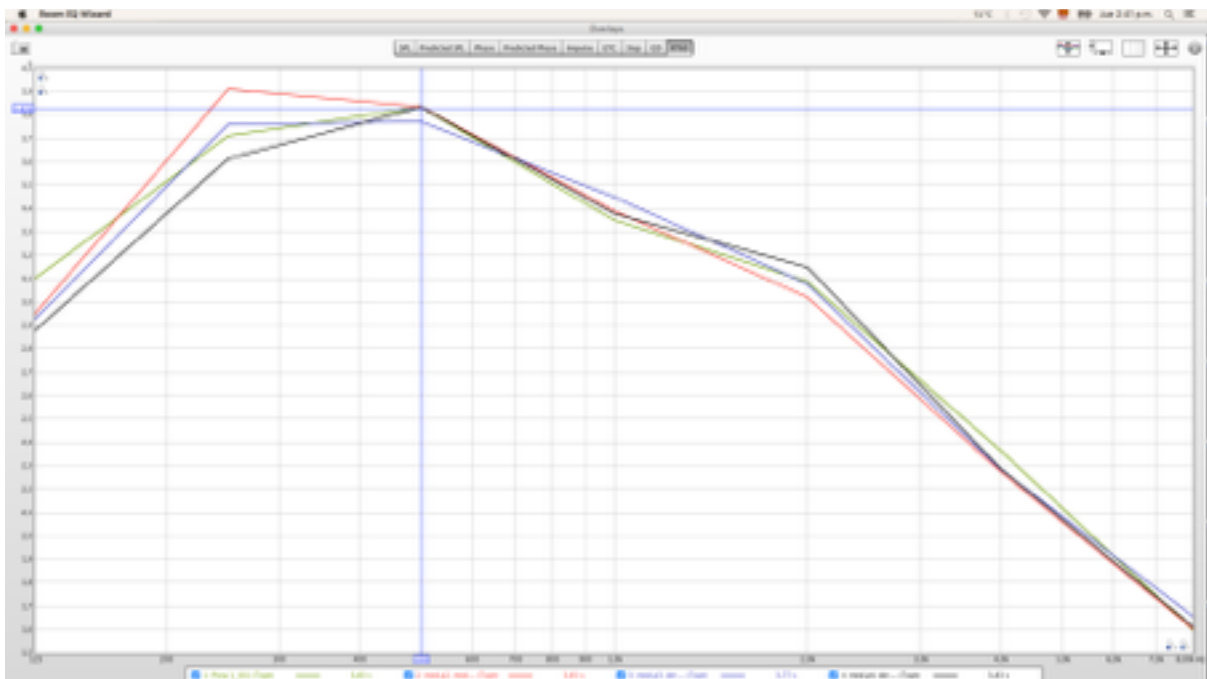
A continuación se puede ver un ejemplo de las grabaciones de los distintos puntos de muestras de sonido del recinto.



### 4.1.2 Room EQ Wizard V.5.1

Es un software libre de análisis acústica para recintos. Se basa en la medición y el análisis de señales de audio. Las funciones de análisis de audio ayudan a optimizar la acústica de la sala de audición, estudio o teatro.

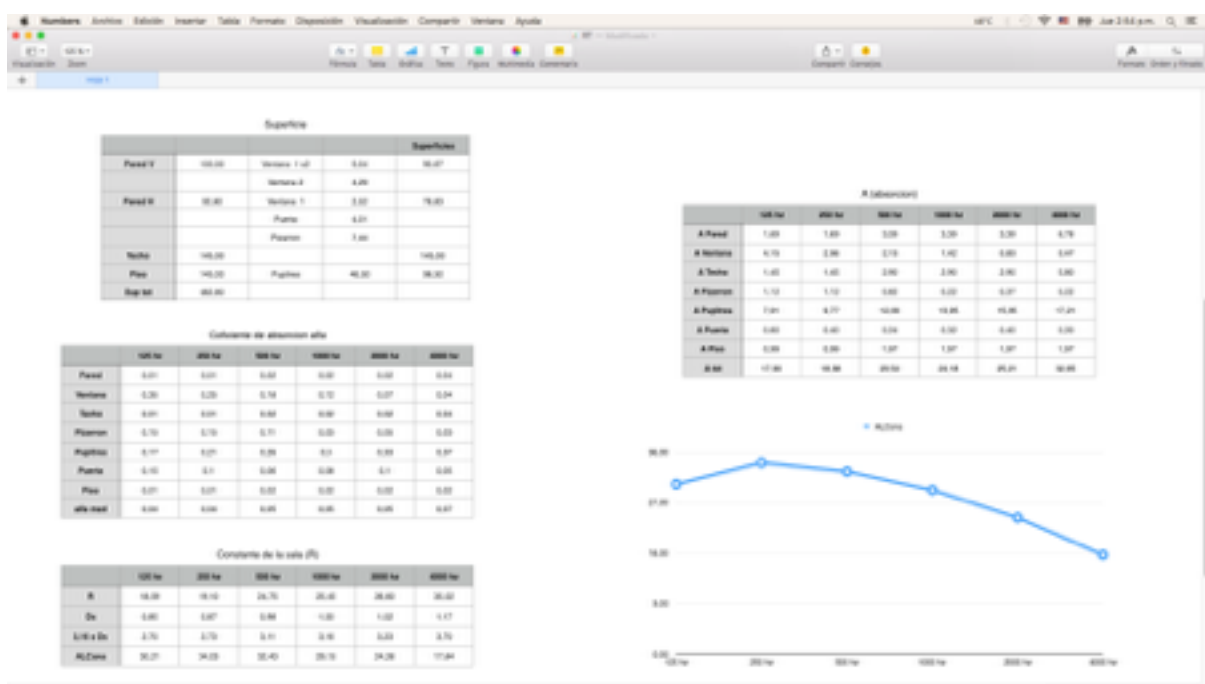
A continuación se puede ver una captura del pantalla del software donde se analiza el tiempo de reverberación de cada muestra de sonido que se capturo.



### 4.1.3 Numbers

Es una aplicación de hoja de cálculo desarrollada por Apple Inc. Como una demostración de introducción, lanzaron una interface más fácil de usar y que ofrece un mejor control sobre la apariencia y la presentación de tablas de datos.

En la siguiente imagen se puede ver un ejemplo de una hoja de cálculo utilizada en esta investigación.



## **Resultados de la Investigación**

Finalizada la etapa de análisis de datos recolectados se obtuvo los resultados correspondientes a cada uno de los parámetros establecidos en esta investigación.

Como primera instancia se expondrá el resultado de la curva NC, luego los cálculos del tiempo de reverberación y por último el porcentaje de ALCons.

Los datos se demuestran en forma de tablas, empezando por los valores que resultaron del análisis de datos y luego comparándolos con los parámetros óptimos para el recuento en cuestión.

## 5.1 Curva NC

La medición que se realizó con el sonómetro para conocer el ruido de fondo dio como resultado:

$L_{eq}$	45 dBA
----------	--------

Según lo expuesto por el autor Carrión en el marco teórico, se puede comprobar que, a partir de la curva NC 35, dicho nivel está aproximadamente 10 dB por encima del correspondiente valor NC.

Por ello, podemos establecer que la curva NC del aula UM-5 corresponde a una curva NC 35.

Como se puede observar en las técnicas de recolección de datos, la curva NC recomendada para aulas o sala de conferencias es de NC 20 a NC 30, por ende el aula UM-5 no cumple con los parámetros óptimos para este tipo de recinto.

## 5.2 Tiempo de reverberación (RT)

Luego de analizar los cuatro puntos de medición, los resultados del tiempo de reverberación por frecuencias son los siguientes:

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Promedio Punto 1</b>	3,41	3,77	3,59	3,22	2,73	1,99
<b>Promedio Punto 2</b>	3,43	3,87	3,61	3,21	2,65	1,94
<b>Promedio Punto 3</b>	3,35	3,77	3,61	3,27	2,68	1,97
<b>Promedio Punto 4</b>	3,25	3,72	3,61	3,27	2,72	1,95
<b>Promedio TOTAL</b>	<b>3,36</b>	<b>3,78</b>	<b>3,60</b>	<b>3,24</b>	<b>2,70</b>	<b>1,96</b>
<b>RT mid</b>			<b>3,42</b>			

Como se puede observar en la tabla, el RT mid da como resultado 3,42 segundos. El tiempo recomendado para aulas o sala de conferencias sería de 0,7 a 1 segundos.

Nuevamente el aula UM-5 no cumple con los parámetros óptimos para este tipo de recinto.

### 5.3 %ALCons

Para establecer el %ALCons se utilizo la siguiente formula:

$$\%ALCons = 9RT$$

Como se puede ver en el marco teórico, se utiliza esta formula porque se establece que el valor de la distancia de la fuente sonora - receptor (r) es mayor o igual a 3,16 veces el valor del radio de campo reverberante ( $r_c$ ).

Esta decisión se tomo debido que al calcular al distancia critica ( $D_c$ ) de la fuente como resultado se obtuvo lo siguiente:

	125 hz	250 hz	500 hz	1000 hz	2000 hz	4000 hz
Dc	0,85 m.	0,87 m.	0,98 m.	1 m.	1,02 m.	1,17 m.

Observando en el aula, la distancia mas cerca de los alumnos al profesor es de 2 metros, estos se encuentra en el radio de campo reverberante.

Luego de la explicación de la formula utilizada, podemos establecer los resultados del %ALCons:

	125 hz	250 hz	500 hz	1000 hz	2000 hz	4000 hz
ALCons	30,21	34,03	32,43	29,15	24,26	17,64

Como se puede observar en la tabla de valoraciones de ALCons en las técnicas de recolección de datos, los valores para una inteligibilidad de la palabra "buena" serian de 4,8% al 1,6%, mientas que el aula UM-5 el mejor caso que tenemos es de 17,64%.

Por lo tanto la inteligibilidad de la palabra en el aula es "mala".

# **Propuesta de acondicionamiento acústico**

Ahora que conocemos en profundidad como se comporta el sonido en el interior del aula y podemos observar los resultados de la investigación, es necesario plantear la solución al objeto de estudio.

El paso inicial para plantear la propuesta de acondicionamiento acústico del aula UM-5 de la Universidad Católica de Salta es exponer los objetivos que se intenta alcanzar para que el recinto cumpla con los parámetros óptimos que necesita, luego el investigador determinará que material acústico será el indicado aplicar en el aula y por ultimo se comparará el estado actual del aula con el resultado que se obtendría al instalar el material acústico.

## 6.1 Objetivos acústicos

Para que el aula cumpla con los parámetros óptimos que se pudo observar a lo largo de la investigación es necesario obtener los siguientes valores:

- $RT_{mid} = 0,7 - 1$  Segundos
- %AICons = 5,3% - 11,4% (Aceptable)

## 6.2 Materiales acústicos

El mayor problema acústico que posee el aula tiene que ver con un tiempo de reverberación excesivo, especialmente en frecuencias medias y bajas, lo que produce que la inteligibilidad de la palabra sea mala.

Por el problema expuesto el investigador decide utilizar resonadores para la absorción de frecuencias específicas, ya que estos podrán disminuir de manera significativa el tiempo de reverberación.

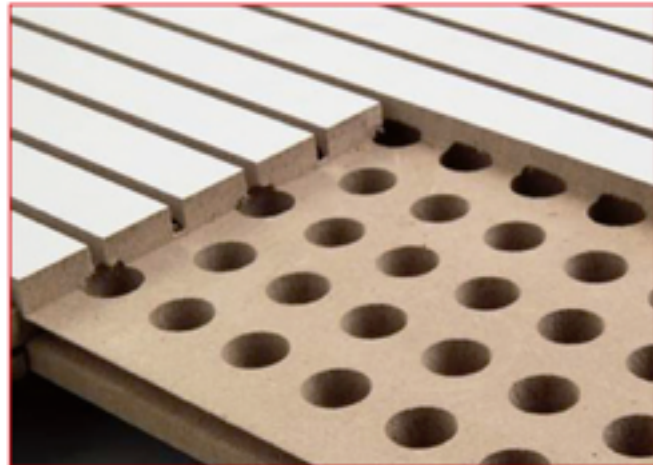
Buscando en la industria nacional, se encontró el material acústico “Fonac Tableado”, que cumple con los requisitos para tratar el sonido en el aula. Este material esta disponible en dos tipologías, por lo que se elige la tipología 2-14-2 porque presenta un coeficiente mayor de absorción sonora.

A continuación se detalla todas las características del material.



## Tableado

Fonoabsorbente  
acústico  
encastrable



### Descripción del producto:

La utilización de materiales ecológicos como la madera y revestimientos melamínicos para la producción del Tableado Fonac, dan como resultado una placa fonoabsorbente de excelente absorción acústica y atractiva estética superficial. La innovación tecnológica utilizada en los procesos productivos, hacen del Tableado Fonac un producto confiable para la captura de ondas sonoras, con el valor agregado de su versatilidad estética que permite una gran variedad de aplicaciones.

### Campo de aplicación:

El Tableado Fonac es un panel fonoabsorbente tanto para techos como para revestimientos en pared. Puede ser utilizado como revestimiento acústico en áreas de circulación, salas de reuniones, puestos de trabajo, comedores de personal, viviendas, espacios públicos, teatros, auditorios, oficinas, hoteles, restaurantes y salas de conferencias.

### Sugerencias para su instalación:

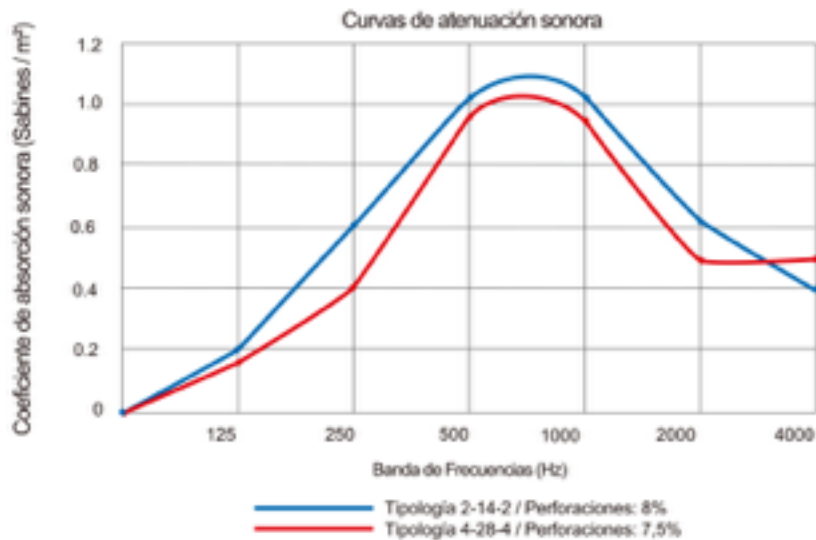
Se instala aplicando perfiles metálicos a paredes, tabiques o cielorrasos, fijando luego las tablas encastrables mediante grampas especiales. Tanto los perfiles como las grampas forman parte del sistema y se proveen incluidas con el tableado. Para aumentar la performance acústica se sugiere agregar sustrato acústico por detrás del Tableado Fonac.

### Ventajas y beneficios:

Tiene absoluta precisión en el encastre entre tablas. Estabilidad de sus propiedades físicas y acústicas. Aplicable contra superficies curvadas. Disponible en dos tipologías acústicas. Ofrece cuatro colores inalterables codificados. Fue diseñado para la estética de ambientes sobrios, ya que tiene una agradable terminación vista de madera de gran aceptación entre los diseñadores y profesionales del mercado de la construcción.



**Prestación acústica**



**Coefficiente de absorción sonora en sabines/m²**

Tipología	Bandas de Frecuencias (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
2-14-2	0,20	0,60	1,10	1,10	0,63	0,40
4-28-4	0,18	0,40	0,96	0,90	0,50	0,50

**Características Técnicas**

Espesor	15 mm
Largo de tablas	2440 mm
Ancho de tablas	132 mm
Peso aproximado	15 kg

**Presentación**

Tipología 2-14-2	Perforaciones 8%		
Tipología 4-28-4	Perforaciones 7,5%		
Colores disponibles y combinables	Blanco WYD 001	Arce WYM 059	
	Haya WYM 057	Negro WYD 003	

**Importante:**

- Los datos en el presente documento son indicativos y se refieren a ensayos de laboratorio bajo condiciones de norma.
- Debido a los componentes y proceso de fabricación, podrían observarse variaciones de tonalidad aún en materiales de una misma partida.
- Por cualquier aclaración o ampliación consulte a nuestro departamento de atención al cliente.
- Fácil instalación.
- Precisión absoluta del encastre entre tablas.

**Condiciones de almacenamiento:**

- Los materiales FONAC deben almacenarse en lugar seco, protegidos de la humedad y de la acción directa o indirecta del sol.
- Preservar el material en su envase hasta su uso.

**Para mayor información:**  
soporte@sonoflex.com



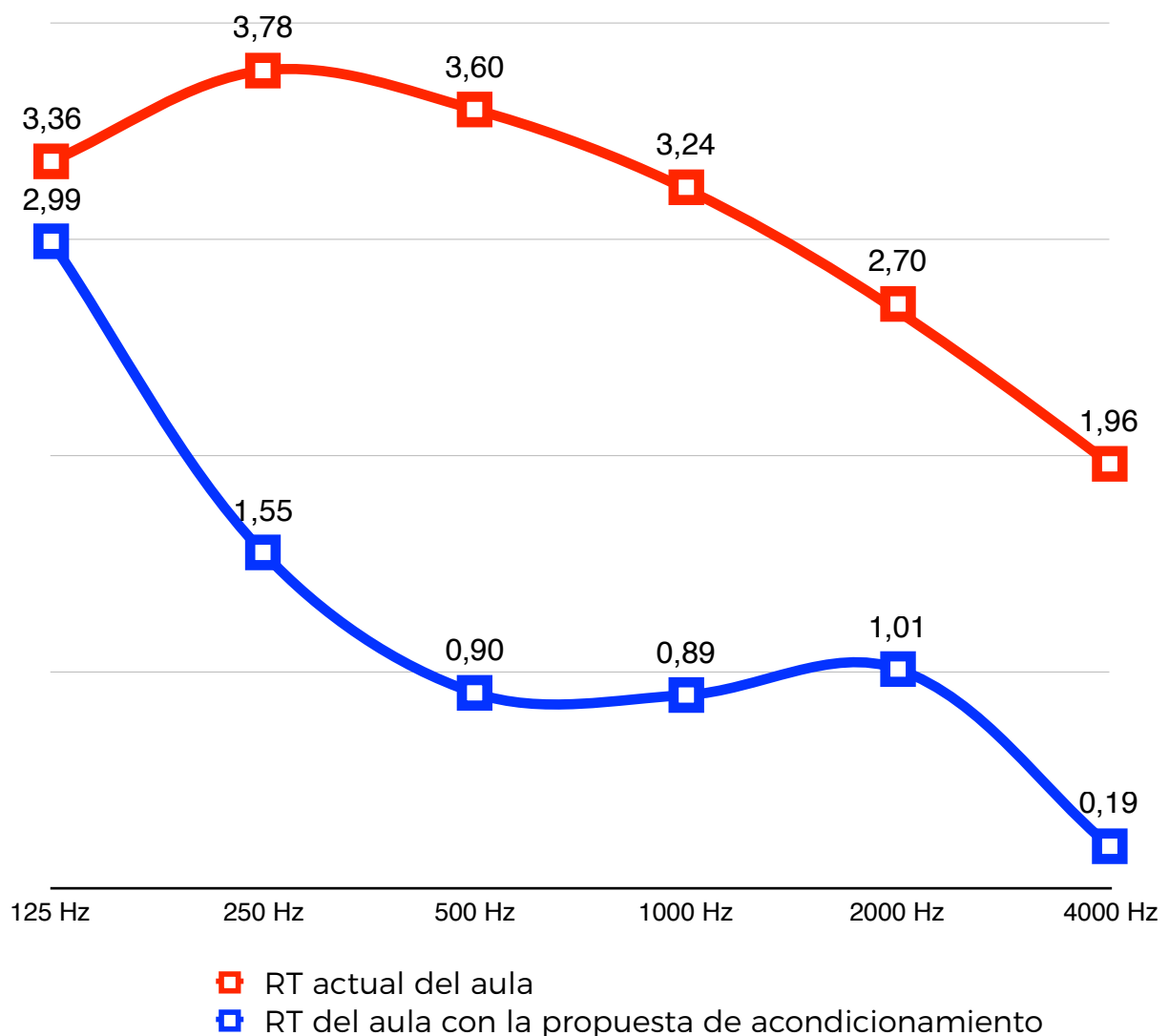
En Argentina [www.sonoflex.com](http://www.sonoflex.com) En Chile [www.sonoflex.cl](http://www.sonoflex.cl)

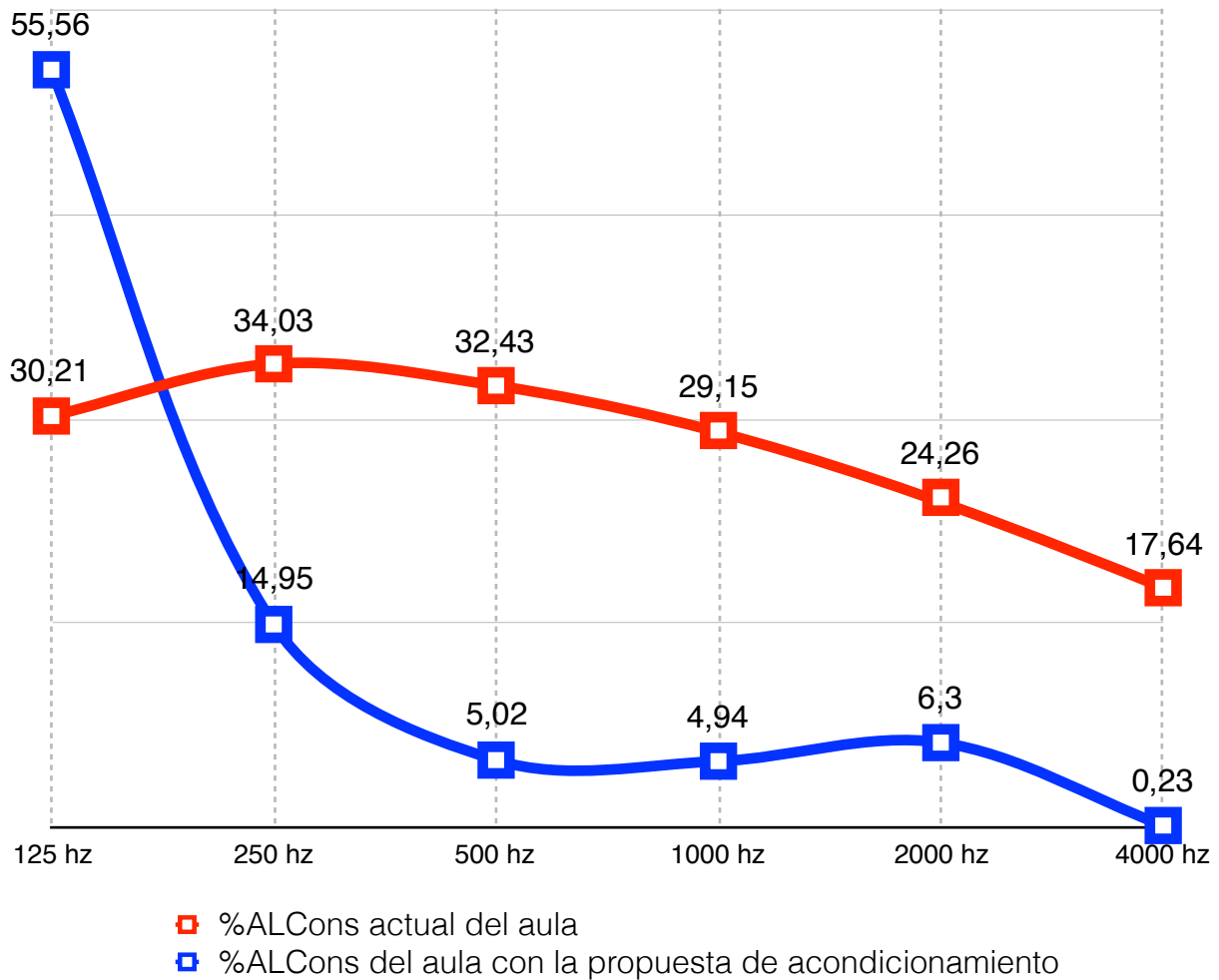
### 6.3 Resultado

El material acústico sería instalado en la pared del fondo del aula, como también en las paredes laterales. Utilizando 201 paneles, se cubriría una superficie total de 64,62 metros cuadrados.

Mediante calculo podemos determinar como se comportaría el sonido en el aula.

En los siguientes gráficos se puede observar el cambio de los valores de los indicadores estudiados posteriormente a la implementación del acondicionamiento.

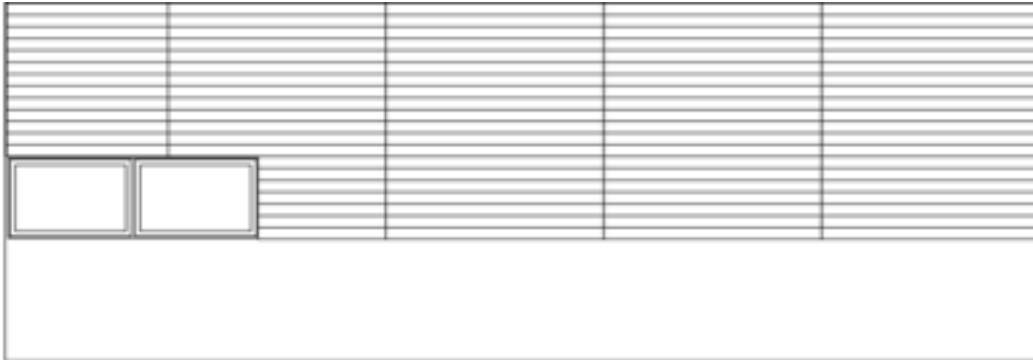




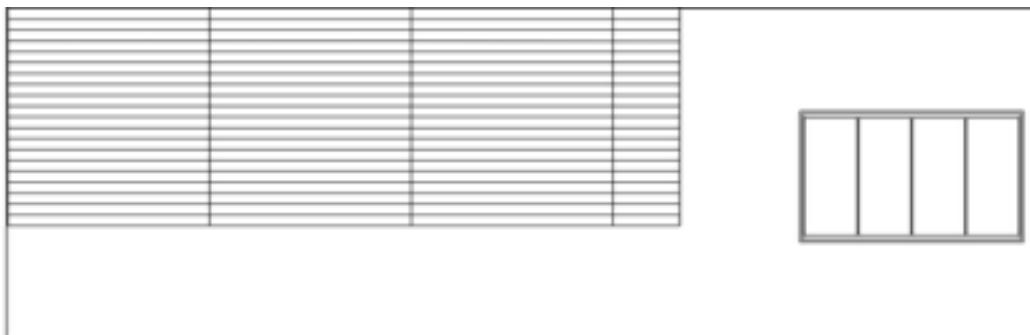
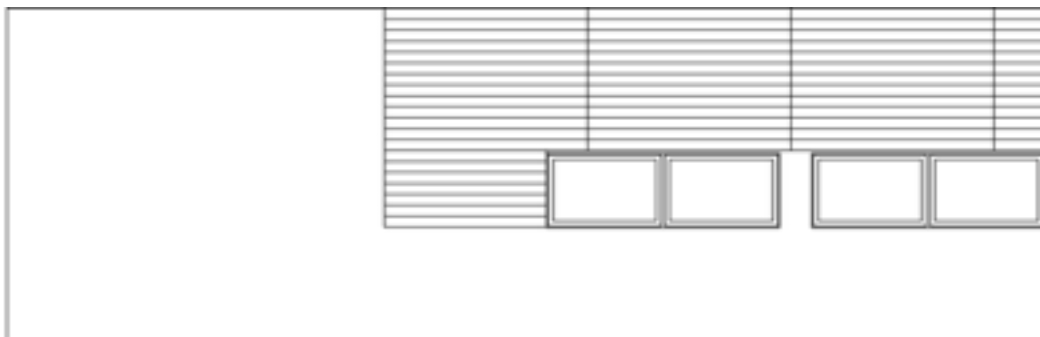
Se puede observar notablemente que al instalar dicha propuesta de acondicionamiento se cumplen los valores establecidos en los objetivos acústicos, obteniendo un  $RT_{mid}$  de 0,90 segundos y un promedio de %ALCons de 9,79%.

## 6.4 Instalación del acondicionamiento acústico

En la pared del fondo se cubriría una superficie de 27,81 m<sup>2</sup>

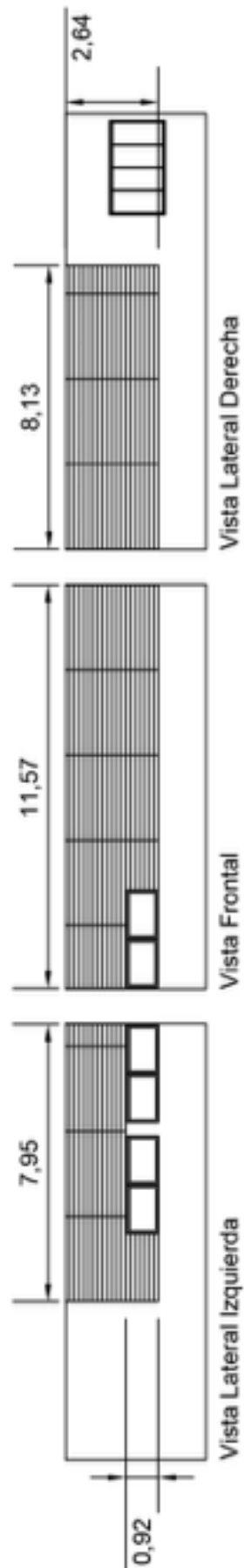


En la pared lateral izquierda se cubriría una superficie de 15,36 m<sup>2</sup>



En la pared lateral derecha se cubriría una superficie de 21,45 m<sup>2</sup>

A continuación se expone el plano completo de la instalación con sus respectivas medidas.



## Conclusión

Una vez finalizada la investigación es necesario volver a la pregunta inicial donde partió este trabajo: **¿Que factores dificultan la inteligibilidad de la palabra en el aula UM-5 del edificio de usos múltiples de la Universidad Católica de Salta?**

A partir del estudio realizado se determinaron los valores de los indicadores planteados en los objetivos de esta investigación, posteriormente se llevo a cabo una comparación de dichos indicadores con los valores óptimos recomendados para un recinto dedicado a la comprensión de la palabra.

Se determino que las variables acústicas mas importantes que caracterizan el funcionamiento de un aula de clases son el ruido de fondo, el tiempo de reverberación y el porcentaje de ALCons. Como se puede ver en los resultados de esta investigación, el estado actual del recinto no cumple con los parámetros recomendados en la teoría citada.

De acuerdo a los datos obtenidos del sonido en el recinto podemos apreciar que el tiempo de reverberación correspondiente a las bandas de frecuencias menores a 2000 hertz se sitúan por encima de los 3 segundos, por lo que se determina que se producirá un efecto de enmascaramiento de las frecuencias mas bajas, provocando así una disminución de la percepción de las bandas de frecuencias de 1000 y 2000 hertz, que contribuyen mayormente a la comprensión del mensaje oral.

Por otro lado, el nivel de ruido de fondo optimo para esta sala es del orden de la curva NC 20 a NC 30, sin embargo el nivel de ruido de fondo medido corresponde a una de curva NC 35, por lo que la sala no cumple este requisito.

De acuerdo a los datos resultantes de este trabajo, fue necesario realizar una propuesta de acondicionamiento acústico orientada a

solucionar los problemas que presenta el recinto. Dicha propuesta sugiere la implementación de elementos acústicos absorbentes que trabajen en determinadas frecuencias específicas.

Esta propuesta consta de la instalación de paneles resonantes del tipo helmholtz cuyo coeficiente de absorción máxima se sitúa en las frecuencias de 500 y 1000 hertz. El elemento absorbente elegido es el Fonac Tableado, un resonador con las características apropiadas elaborado por Sonoflex. La instalación de los elementos absorbentes estaría constituida por 64,62 metros cuadrados del material acústico mencionado anteriormente, para así disminuir el tiempo de reverberación medio de 3,42 segundos a 0,90 segundos y el porcentaje de pérdida de articulación de consonantes de 27,95% a 9,79%.

En este planteamiento de solución del problema no se incluyó un proyecto de aislación acústica, ya que el valor de ruido de fondo medido no está tan alejado de los valores óptimos recomendados para este tipo de recinto, y resultaría inviable debido a las características del edificio.

En conclusión, la implementación de acondicionamiento acústico en los recintos dedicados al aprendizaje debe centrarse en la obtención de un tiempo de reverberación adecuado y de un bajo porcentaje de pérdida de articulación de consonantes. La adecuación con estos parámetros ofrece un alto nivel de confort acústico, que presenta una variedad de beneficios. Entre estos encontramos mejor atención y concentración, que mejoran la experiencia de aprendizaje y por otro lado ayudan a conservar la salud auditiva de los alumnos, y del sistema de fonación del docente que de otra manera se ve obligado a forzar su voz de manera continua; por otra parte la prolongada exposición en una aula sin acondicionamiento acústico puede provocar agotamiento y estrés a los individuos expuestos.

## **Bibliografía**

- AENOR. (2008). UNE-EN ISO 3382-2. Madrid: AENOR.
- Beranek, L. (1954). Acustica. Boston: Bolt Beranek an Newman, Inc.
- Carrión, A. (1998). Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos. Barcelona: UPC.
- Harris, C. M. (1995). Manual de Medidas Acústicas y Control del Ruido. Madrid: McGraw- Hill.
- Hernández Sampieri, R. (2006). Metodología de la Investigación. México D.F.: McGraw- Hill.
- Hueso, A., & Cascant, J. (2012). Metodología y Técnicas Cuantitativas de Investigación. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Recuero López, M. (2001). Acondicionamiento Acústico. Madrid: Parafino.
- Recuero López, M. (2000). Ingeniería Acústica. Madrid: Parafino.

### Ficha de Evaluación

Tema: La inteligibilidad de la palabra en el aula (UM-5) en la Facultad de Usos Múltiples de la Universidad Católica de Salta.

Alumno: Facundo Martinez

DNI: 36.025.527

Firma: .....

Codirector: Jose Saavedra

DNI: 19.000.601

Firma: .....

Director: Mauricio Antonio Orellana

DNI: 26.701.413

Firma: .....

Evaluación

.....  
.....

Observaciones

.....  
.....  
.....

Lugar y Fecha

.....  
.....