



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

# MEDIDAS ACÚSTICAS EN CENTROS ESCOLARES CON ALUMNOS NORMOYENTES Y CON DISCAPACIDADES AUDITIVAS

Autor

Luis Alfonso Turón

Director

Eduardo Lleida Solano

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Año 2017



DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. Luis Alfonso Turón,

con nº de DNI 76971877P en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Grado \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

Medidas acústicas en centros escolares con alumnos normoyentes y con

discapacidades auditivas

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 de Abril de 2017

Fdo:

# AGRADECIMIENTOS

*A mi familia por siempre confiar en mi y apoyarme en todo momento, sin importar las circunstancias.*

*A mi novia Raquel por incentivarme cada día a ser mejor y no darme por vencido.*

*A toda mi familia y amigos que han sido parte de este proceso y han estado acompañándome en las buenas y las malas.*

*A mi tutor Eduardo Lleida, sin su ayuda no habría sido posible la realización de este proyecto.*

*A la Federación Aragonesa de Asociaciones de Padres, Afectados y Amigos de los sordos (FAAPAS), esperamos que este trabajo sirva para eliminar las barreras de comunicación a las que los alumnos con discapacidad auditiva se enfrentan cada día en los centros escolares.*

*Al colegio Eliseo-Godoy de Zaragoza, por permitir realizar este estudio piloto en su centro escolar.*

# *Medidas acústicas en centros escolares con alumnos normooyentes y con discapacidades auditivas.*

## **Resumen**

---

El presente trabajo consiste en la realización de un estudio acústico de dos aulas pertenecientes al centro escolar Eliseo-Godoy de Zaragoza en el que conviven alumnos normooyentes con alumnos que presentan diferentes grados de discapacidad auditiva.

La razón de la existencia de problemas acústicos en las aulas, no es una falta de conocimiento sobre cómo solucionar el problema, sino principalmente una falta de sensibilidad de los profesionales involucrados, tanto en el campo de la enseñanza como en el diseño de aulas, para resolver el problema.

Unas condiciones inadecuadas de las aulas pueden tener graves consecuencias para alumnos y profesores. Agotamiento, estrés, patologías de la voz etc. De la misma forma, en los alumnos, la contaminación acústica perjudica su rendimiento escolar ya que dificulta los procesos de atención y aprendizaje.

Presentaremos esta problemática caracterizando por medio de mediciones acústicas las variables más relevantes dentro de salas destinadas al habla: ruido de fondo y tiempo de reverberación. Para posteriormente realizar un análisis de la inteligibilidad de la palabra, el parámetro que determina realmente la calidad acústica de la sala basándonos en distintos métodos matemáticos. El propósito es realizar un pronóstico de la percepción del habla por los alumnos para palabras contextualizadas o no, y con distintos grados de dificultad.

Discutiremos si los resultados respetan la normativa vigente, así como las recomendaciones de diferentes autores. Otro punto a tratar será si dichos resultados, suficientes en ciertos casos para los alumnos normooyentes, también lo son para aquellos alumnos con deficiencias auditivas que utilizan audífonos y/o implantes cocleares y sistemas FM.

# *Room-acoustic study for children with normal hearing and with hearing impairment*

## **Abstract**

---

The present degree work consists in the realization of an acoustic study of two classrooms belonging to the Eliseo-Godoy school in Zaragoza, where students with normal hearing and with hearing impairment live together.

The reason for the existence of acoustic problems in classrooms is not a lack of knowledge about how to solve the problem, but primarily a lack of sensitivity of the professionals involved, both in the field of teaching and that of classroom design, to solve the problem.

Inadequate classroom conditions can have serious consequences for students and teachers. Exhaustion, stress, voice pathologies etc. In the same way, in the students, the acoustic pollution harms their school performance and that it makes difficult the processes of attention and learning.

We introduce this problem by characterizing through acoustic measures the most relevant variants within speech rooms: background noise and reverberation time. To perform an analysis of the intelligibility of the word, the parameter that actually determines the acoustic quality of the room. Based on different mathematical methods. The purpose is to make a forecast of the perception of the word by students for words contextualized or not, and with different degrees of difficulty.

We will discuss the results and make a comparison with current regulations and other acoustic studies of interest.

We will discuss if the results respect the current regulations, as well as the recommendations of different authors. Another point to be discussed will be if those results, sufficient in certain cases for the normal hearing students, are also for those students with hearing impairments who use hearing aids and / or cochlear implants and FM systems.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 CONTEXTO.....	7
1.2 MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES.....	7
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	7
1.4 ORGANIZACIÓN.....	7
1.4.1 Acústica en las aulas.....	7
1.4.2 Métodos y materiales.....	7
1.4.3 Resultados y discusión.....	7
1.4.4 Conclusiones.....	8
2. ACÚSTICA EN LAS AULAS.....	8
2.1 SEÑAL DIRECTA DE VOZ Y DISTANCIA EMISOR-RECEPTOR.....	8
2.2 RUIDO DE FONDO.....	8
2.3 REVERBERACIÓN.....	9
2.3.1 Componentes iniciales de reverberación.....	10
2.3.2 Combinación señal directa de voz y componentes iniciales de reverberación.....	10
2.3.3 Componentes tardíos de reverberación.....	11
2.3.4 Combinación ruido de fondo y componentes tardíos de reverberación.....	11
2.4 RELACIÓN SEÑAL-RUIDO (SNR) .....	12
2.5 INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA.....	12
2.5.1 Métodos para determinar la inteligibilidad del habla.....	13
2.5.1.1 Índice de audibilidad del habla (SAI) .....	13
2.5.1.2 Índice de transmisión del habla (STI) .....	14
2.5.1.3 Pérdida de la articulación de la consonante (%ALCons).....	15
2.6 PREDICCIÓN DE LA PERCEPCIÓN DEL HABLA.....	16
2.6.1 Percepción acústica de la señal.....	16
2.6.2 Reconocimiento de fonemas en palabras de consonante-vocal-consonante.....	17
2.6.3 Reconocimiento de las palabras completas de consonante-vocal-consonante.....	17
2.6.4 Reconocimiento de palabras en oraciones.....	18
3. MÉTODOS Y MATERIALES.....	19
3.1 MEDICIONES.....	19
3.1.1 Ruido de fondo.....	20
3.1.2 Tiempo de reverberación.....	21
3.1.3 Inteligibilidad de la palabra y predicción de la percepción del habla.....	22
3.2 MATERIALES.....	22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
4.1 VALORES DE REFERENCIA.....	23
4.2 RUIDO DE FONDO.....	24
4.3 TIEMPO DE REVERBERACIÓN.....	26
4.4 INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA.....	27
4.5 PREDICCIÓN DE LA PERCEPCIÓN DEL HABLA.....	29
5. CONCLUSIONES.....	33
6. BIBLIOGRAFÍA.....	35
ANEXO A.....	36
ANEXO B.....	51

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Contexto

Este trabajo se enmarca dentro de un estudio que la Federación Aragonesa de Asociaciones de Padres, Afectados y Amigos de los sordos (FAAPAS) quiere iniciar sobre la supresión de barreras de comunicación en aulas escolares. En la actualidad no existen unas pautas específicas de acústica arquitectónica para este tipo de espacios. En este TFG nos vamos a centrar en el colegio Eliseo-Godoy de Zaragoza y estudiar si las condiciones acústicas de las aulas con estudiantes con discapacidad auditiva son las idóneas.

## 1.2 Motivación y antecedentes

La propuesta presentada por FAAPAS llega tras la buena aceptación del estudio realizado por Franz Zenker, en representación de la Fundación Canaria Dr. Barajas para la prevención e investigación de la sordera. El cual obtuvo el premio de investigación en deficiencias auditivas FIAPAS 2013.

Para la valoración acústica utilizaremos el protocolo definido en la recomendación ANSI/ASA S12.60-2002 y otros estudios relacionados. Se analizarán los resultados y presentarán conclusiones.

## 1.3 Objetivos del trabajo

El objetivo de este TFG es realizar un primer estudio de campo de las condiciones acústicas en el centro escolar Eliseo-Godoy. El cual servirá como estudio piloto para otros centros de la comunidad autónoma de Aragón donde conviven estudiantes normoyentes y estudiantes con discapacidad auditiva.

Dicho estudio incluirá mediciones de ruido de fondo y reverberación. Así como la comparativa de distintos modelos matemáticos para cuantificar la inteligibilidad de la palabra a partir de los parámetros acústicos medidos.

Con la ayuda de estos modelos se realizarán predicciones de la percepción del habla para visualizar mejor los resultados obtenidos.

## 1.4 Organización

### 1.4.1 Acústica en las aulas

Se presenta un marco teórico de los conceptos fundamentales que abarca el TFG.

Así como los diferentes modelos matemáticos que se utilizarán para extraer conclusiones de las mediciones en las aulas.

### 1.4.2 Métodos y materiales

Describiremos la metodología utilizada para la obtención de los parámetros acústicos y prestaremos el conjunto de materiales necesarios para la realización de las medidas.

### 1.4.3 Resultados y discusión

Analizaremos en esta sección los valores obtenidos para distintas condiciones de entorno habituales en las aulas del colegio. Compararemos estos con otros estudios y normativas para extraer a posteriori conclusiones.

#### 1.4.4 Conclusiones

Después de comprobar si estamos dentro de los márgenes que plantea la normativa actual reflexionaremos sobre si esos valores son adecuados para aulas donde conviven estudiantes normoyentes y con discapacidades auditivas.

## 2. ACÚSTICA EN LAS AULAS

---

Gran parte de la actividad docente en el aula se apoya en la expresión oral por lo que la acústica del aula debe ser óptima en orden a facilitar el aprendizaje. Condiciones acústicas aceptables para alumnos normoyentes pueden ser inapropiadas para alumnos con discapacidad auditiva. Diversos factores tanto acústicos como lingüísticos determinan la plena accesibilidad al lenguaje verbal. En primer lugar, las condiciones acústicas del recinto pueden degradar el habla del profesor u otros hablantes. En segundo lugar, una distancia inapropiada entre el oyente y el profesor puede determinar una intensidad insuficiente para percibir el mensaje hablado de forma inteligible. Tercero, el Ruido de Fondo (RF) que se origina en el exterior o en el interior del aula puede disminuir significativamente la relación señal-ruido (SNR) disminuyendo la inteligibilidad. Cuarto, una reverberación excesiva puede ejercer un efecto enmascarador no deseado sobre el mensaje oral (Crandell C. and Smaldino J., 2000).

Todas las medidas de presión sonora están dadas en dB SPL (ref 20microPascales).

### 2.1 Señal directa de voz y distancia Emisor-Receptor

Un factor decisivo que influye en la percepción del habla en el aula es la distancia entre el profesor y el estudiante.

La presión de sonido directo sigue el principio de la ley del cuadrado inverso, que establece que el nivel de sonido disminuye 6 dB por cada duplicación de la distancia desde la fuente de sonido. La ecuación que relaciona el nivel de voz directo recibido con la distancia de la fuente es: (Boothroyd A., 2003).

$$d = s - 20 \log (f) \quad \text{Ec.1}$$

donde,

d: nivel de señal directa de voz (dB)

s: nivel de la señal origina a 1 m de distancia (dB)

f: distancia desde el emisor expresado en metros

En esta misma sección introduciremos el concepto de reverberación y cómo afecta a la distancia óptima emisor-receptor, distancia crítica.

### 2.2 Ruido de fondo

Consideramos ruido de fondo a cualquier sonido que no está relacionado con el habla del locutor. Puede ser generado en la habitación, por otros ocupantes o por equipamiento (aire acondicionado, radiadores...). También se puede generar fuera de la sala debido a condiciones ambientales, tráfico... Los altos niveles de ruido de fondo tienen una serie de consecuencias en la señal de voz y se manifiestan de tres maneras: alteración de espectro, enmascaramiento y

confusión de patrones temporales (González C.A., 2010).

La evaluación objetiva del grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca en un oyente se realiza por comparación de los niveles de ruido existentes en un recinto, en cada banda de octava comprendida entre 63 Hz y 8 kHz. Medidas en una escala de ponderación A (dBA) y utilizando un conjunto de curvas de referencia denominadas NC (Noise Criteria).

Se trata de un índice proporcionado por L.L. Beranek, con el que se relaciona el espectro de un ruido con la alteración que produce en la comunicación verbal, teniendo en cuenta los niveles de interferencia de la palabra y los niveles de sonoridad. Así, las curvas NC siguen de forma aproximada la evolución de la sensibilidad del oído en función de la frecuencia.

En el Anexo A.I, tenemos la asociación de las curvas NC a una determinada  $Leq$ , definida como el nivel de sonido continuo equivalente (media energética del nivel de ruido medio en el intervalo de tiempo de medición)

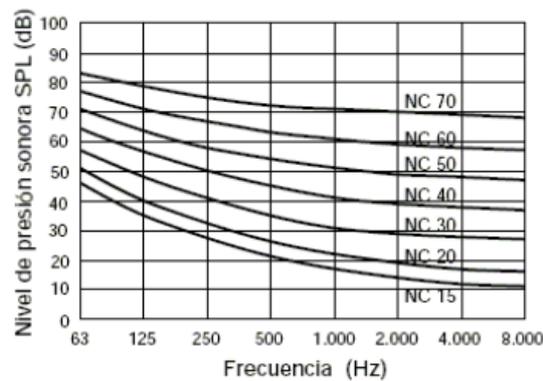


Figura 1.- Curvas Nc (Noise Criteria).

## 2.3 Reverberación

Se define la reverberación como la mayor o menor persistencia del sonido en un espacio cerrado después de haber apagado súbitamente la fuente sonora y que es resultado de consecutivas reflexiones (Knudsen V.O., 1950).

En la práctica, es importante disponer de un único número que pueda caracterizar el decaimiento del sonido de la señal. A finales del siglo XIX, Sabine definió el tiempo de reverberación ( $Tr$ ) como el tiempo necesario para que, una vez silenciada la fuente, la energía sonora descienda a su millonésima parte, es decir, que su nivel de presión descienda 60 dB a partir de su nivel inicial (Recuero M., 1999).

La ecuación general definida por Sabine para determinar el tiempo de reverberación es la siguiente:

$$Tr = 0.161 \times \frac{V}{S \times \alpha} \quad \text{Ec.2}$$

donde,

$\alpha$ : Coeficiente de absorción media

V: Volumen de la sala ( $m^3$ )

S: Superficie total de la sala ( $m^2$ )

Considerando la velocidad del sonido  $c = 344$  m/s.

### 2.3.1 Componentes iniciales de reverberación

Estos componentes han sufrido pocas reflexiones en el camino al oído del oyente. Por consiguiente llegan a la oreja lo suficientemente pronto como para que el cerebro del oyente pueda ignorar el retraso y utilizarlos para mejorar la percepción.

Depende de 4 factores: El nivel de salida de voz y la direccionalidad del locutor, el volumen y tiempo de reverberación de la sala (Crandell, C. and Smaldino J.,2000).

La ecuación que relaciona los componentes iniciales de la reverberación con las cuatro variables clave es (Boothroyd A., 2003), modificada para el sistema internacional de medidas:

$$e = s - 10\log\left(\frac{V \times Q}{r \times 304.8}\right) \quad \text{Ec.3}$$

donde,

e: nivel de las componentes tempranas de reverberación (dB)

s: nivel de la señal original a 1m (dB)

Q: factor de directividad de la fuente sonora (4 para señal de voz)

V: Volumen de la sala ( $\text{m}^3$ )

r: Tiempo de reverberación (s)

### 2.3.2 Combinación señal directa de voz y componentes iniciales de reverberación

Para combinar la señal de voz directa con los primeros componentes de reverberación, primero debemos convertir los niveles de decibelios en unidades de energía y añadir. Entonces podemos convertir de nuevo a niveles de decibelios. Cuando los dos niveles son iguales, la adición produce una duplicación de energía, o un aumento de 3 dB. Si los niveles difieren en 10 dB o más, el nivel de la combinación es, esencialmente, el nivel del componente más fuerte.

La combinación para la ecuación medida en dB se presenta como (Boothroyd A., 2003):

$$TS = 10\log\left(10^{\frac{d}{10}} + 10^{\frac{e}{10}}\right) \quad \text{Ec.4}$$

donde,

TS: nivel de voz total (dB)

d: nivel señal directa medido en Ec.1

e: nivel de la señal de reverberación medido en Ec.3

A distancias relativamente cercanas al alumno, el campo sonoro directo predomina en el ambiente de escucha. A medida que éste se aleja del profesor, el campo indirecto o reverberante comienza a dominar el ambiente de escucha. El campo de sonido indirecto se origina a la "distancia crítica" de la habitación. La distancia crítica de la sala se refiere al punto en la sala donde el nivel del sonido directo y el nivel del sonido reverberante son esencialmente iguales.

Operacionalmente, la distancia crítica (Dc) se define por la siguiente fórmula (Carrión A., 1998):

$$Dc = 0.14\sqrt{QR} \quad \text{Ec.5}$$

donde,

Dc: distancia crítica

Q: factor de directividad de la fuente sonora (4 para la voz)

R: constante de la sala =  $\frac{S \times \alpha}{1 - \alpha}$  (m<sup>2</sup>)

$\alpha$ : Coeficiente de absorción media

S: Superficie total de la sala (m<sup>2</sup>)

En el capítulo 4 se muestra las distancias críticas obtenidas para las aulas analizadas en el presente estudio, Figuras 8 y 9.

### 2.3.3 Componentes tardíos de reverberación

Los componentes tardíos de la reverberación, sin embargo, son destructivos. Llegan a la oreja del oyente demasiado tarde para ser útil para la percepción de los sonidos del habla que representan. Si son suficientemente fuertes, también pueden interferir con la percepción de los sonidos posteriores del habla (Boothroyd, A., 2003).

El nivel medio de este ruido está ligado al nivel de los componentes iniciales de la reverberación, que está directamente asociado al nivel de la señal de voz original.

Si, por ejemplo, el hablante eleva su voz en 10 dB, tanto los componentes tempranos como los finales de la reverberación aumentarán en 10 dB. La diferencia entre los niveles de los componentes temprano y tardío, sin embargo, depende del tiempo de reverberación de la habitación. Cuanto menor es el tiempo de reverberación, mayor es la diferencia entre los componentes temprano y tardío (Boothroyd A., 2003).

La ecuación que relaciona el nivel de ruido efectivo con la reverberación temprana y el tiempo de reverberación es (Boothroyd A., 2003):

$$I = e - 16.5(4 - \log(9r \times 100)) \quad \text{Ec.6}$$

donde,

I: nivel de ruido efectivo de la reverberación tardía (dB)

e: nivel de la reverberación temprana tal como se define en Ec.3

r: tiempo de reverberación (s)

### 2.3.4 Combinación ruido de fondo y componentes tardíos de reverberación

Al igual que con la señal total de voz, sección 2.3.2, calculamos el nivel de ruido total convirtiendo los niveles de decibelios del ruido de fondo real, y el ruido efectivo creado por la reverberación tardía, a unidades de energía, añadiendo y convirtiendo de nuevo a dB.

La ecuación para combinar el ruido de fondo real con los componentes finales de la reverberación es (Boothroyd A., 2003):

$$TN = 10 \log \left( 10^{\frac{n}{10}} + 10^{\frac{I}{10}} \right) \quad \text{Ec.7}$$

donde,

TN: nivel de ruido total (dB)

n: nivel del ruido real en (dB)

I: ruido efectivo creado por la reverberación tardía, Ec. 6

Podremos apreciar en la Figura 10 del capítulo 4 la real contribución de los componentes tardíos de reverberación en el ruido de fondo para las aulas de estudio.

## 2.4 Relación Señal-Ruido (SNR)

Hablamos de la relación entre la intensidad de la señal y la intensidad del ruido de fondo en el oído del alumno. Para ilustrar, si una señal de voz se presenta a 75 dB, y un ruido es de 65 dB, la SNR sería de +10 dB. Debido a los niveles excesivos de ruido que se encuentran en muchos entornos de aprendizaje, no debe sorprender que nos encontremos con SNR desfavorables en las aulas.

Se ha informado que el rango de SNR para estos recintos debe ser aproximadamente +5 dB a -7 dB (Crandell C. and Smaldino J., 1995).

$$SNR = d - n \quad \text{Ec.8}$$

donde,

SNR: relación señal-ruido (dB)

d: nivel de señal directa de voz a una distancia dada (dB), Ec.1

n: nivel de ruido a una distancia dada (dB)

## 2.5 Inteligibilidad de la palabra

Sin lugar a duda, este es el criterio más importante para determinar si una sala destinada a la palabra posee o no buena acústica. Depende de los parámetros anteriores (ruido, reverberación) y permite cuantificar, en términos porcentuales, la cantidad del mensaje oral que es correctamente recibido por el receptor. Una buena caracterización del mensaje oral se presenta entonces como un hecho fundamental.

Al emitir un mensaje oral, la duración de las vocales y su correspondiente nivel de presión sonora es mayor que el de las consonantes (del orden de 90 ms en las vocales frente a 20 ms en las consonantes). Esto hace que el nivel de presión sonora sea unos 12 dB superior en las vocales. Además, el contenido frecuencial de las vocales es más rico en frecuencias bajas, mientras que el de las consonantes presenta un mayor contenido de frecuencias altas (Carrión A., 1998). En una sala de tiempo de reverberación alto, el decaimiento energético de una vocal emitida en dicha sala es apreciablemente más lento que su propio decaimiento en campo libre. Este hecho, junto con una mayor duración y nivel, en relación a la consonante, provoca un solapamiento temporal entre ambas. En consecuencia, son las consonantes las que determinan la comprensión del mensaje oral siendo redundante la información contenida en las vocales (Carrión A., 1998).

En la Figura 2, se muestra la contribución frecuencial, en bandas de octava, al nivel de la voz y a la inteligibilidad de la palabra.

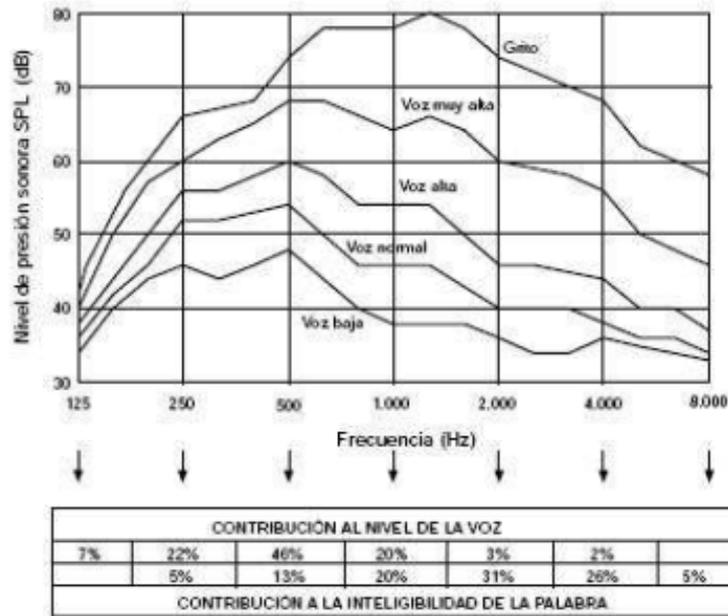


Figura 2.- Contribución frecuencial al nivel de la voz y a la inteligibilidad de la palabra.

Por otro lado, con elevados niveles de ruido de fondo, en el interior de la sala se produce un enmascaramiento parcial que afecta a los sonidos más débiles. En este caso se ve afectada la información que se encuentra contenida en las consonantes que son las que presentan el mayor aporte a la inteligibilidad de la palabra (González C.A., 2010).

### 2.5.1 Métodos para determinar la inteligibilidad de la palabra

Existen variados métodos para determinar la inteligibilidad de la palabra en un recinto, a continuación se presentan 3 de ellos:

- El índice de audibilidad del habla, SAI, se obtiene utilizando los principios básicos de la teoría del Índice de Articulación.
- El índice de transmisión del habla, STI, puede considerarse intercambiable con el SAI cuando se aplica a la acústica de la sala.
- El método %ALCons que asocia un porcentaje de pérdida de las consonantes.

Es importante recordar que son estimaciones de la recepción del habla, no estimaciones de la percepción del habla. La medida en que las estimaciones de la recepción del habla se pueden convertir en estimaciones de la percepción del habla se explora en la siguiente sección.

#### 2.5.1.1 Índice de audibilidad del habla (SAI)

Definido como el porcentaje de señal acústica útil en la voz directa combinada y la reverberación temprana cuyo nivel excede el del ruido de fondo combinado y la reverberación tardía (Boothroyd A., 2003).

No puede ser inferior al 0% o superior al 100%. Entre estos límites su valor aumenta uniformemente de 0% a 100% cuando la relación señal-ruido efectiva aumenta de -15 dB a +15 dB.

Necesitamos definir antes la relación señal-ruido efectiva, ESN (Boothroyd A., 2003):

$$ESN = TS - TN \quad \text{Ec.9}$$

donde,

- ESN: relación señal/ruido efectiva (dB)
- TS: nivel de voz total definido en Ec.4 (dB)
- TN: nivel de ruido total definido en Ec.7 (dB)

La ecuación que relaciona el índice de audibilidad del habla con la relación señal-ruido es (Boothroyd A., 2003):

$$SAI = \left( \frac{ESN+15}{30} \right) \times 100 \quad \text{Ec.10}$$

donde,

- SAI: índice de audibilidad del habla (0 % - 100 %)
- ESN: relación SNR efectiva definida en Ec.9

### 2.5.1.2 Índice de transmisión del habla (STI)

El STI se calcula a partir de la reducción de los diferentes índices de modulación “m” de la voz debido a la existencia de reverberación y ruido de fondo en una sala.

El índice de modulación es una relación sin unidad que describe la profundidad de la modulación lograda para una señal modulada en amplitud y frecuencia dada. Es decir, el porcentaje en que la señal moduladora cambia la portadora senoidal.

Este permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra entre los valores 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima).

Las 14 frecuencias de modulación  $F_m$  consideradas son las siguientes:

<b><math>F_m</math>(Hz)</b>	0,63	0,8	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0	6,3	8,0	10	12,5
-----------------------------	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	----	------

**Tabla 1.- Frecuencias de modulación**

Cada una de estas frecuencias produce un efecto de modulación sobre las 7 bandas de octava más representativas de la voz, cuyas frecuencias centrales son las detalladas a continuación:

<b><math>F_0</math>(Hz)</b>	125	250	500	1000	2000	4000	8000
-----------------------------	-----	-----	-----	------	------	------	------

**Tabla 2.- Frecuencias centrales**

Proceso de cálculo del STI a una determinada distancia creado por Houtgast y Steeneken (Carrión A., 1998):

- 1) Se calcula la reducción de los índices de modulación  $m$  para cada combinación de frecuencias  $F_0, F_m$ , la cual se conoce como función de transferencia de modulación MTF (“Modulation Transfer Function”), su expresión es:

$$m(F_0, F_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{2\pi \cdot F_m \cdot f(F_0)}{13,8} \right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-S/N(F_0)}{10}}} \quad \text{Ec.11}$$

donde,

- $f(F_0)$ : función genérica asociada al grado de reverberación del recinto. Valores de tiempo de reverberación o de tiempo de decaimiento de la reverberación (seg)
- S/N ó SNR: relación señal/ruido correspondiente a la banda centrada en la frecuencia  $F_0$  (dB) a la distancia requerida

Debido a que existen 14 valores de  $F_m$  y 7 valores de  $F_0$ , el número total de valores de  $m(F_0, F_m)$  es de:  $14 \times 7 = 98$ . Tal como se muestra en el Anexo A.II.

- 2) Se realiza la conversión de los índices  $m(F_0, F_m)$  a relaciones señal/ruido según la expresión:

$$(S/N)_{ap}(F_0, F_m) = 10 \log \frac{m(F_0, F_m)}{1 - m(F_0, F_m)} \quad \text{Ec.12}$$

Los 98 valores obtenidos se truncan de manera que todos ellos estén comprendidos entre 15 dB y -15 dB

- 3) Para cada banda de octava, se calcula el valor medio de las 14 relaciones señal/ruido aparentes, según la siguiente expresión:

$$\overline{(S/N)}_{ap}(F_0) = \frac{\sum_{F_m} (S/N)_{ap}(F_0, F_m)}{14} \quad \text{Ec.13}$$

- 4) Se realiza el cálculo de la relación señal-ruido, SNR ó S/N aparente media global  $(S/N)_{ap}$ , teniendo en cuenta los factores de ponderación para cada banda de octava, en función de su grado de contribución a la inteligibilidad:

$$\begin{aligned} \overline{(S/N)}_{ap} = & 0,010 \cdot \overline{(S/N)}_{ap}(125\text{Hz}) + 0,042 \cdot \overline{(S/N)}_{ap}(250\text{Hz}) \\ & + 0,0129 \cdot \overline{(S/N)}_{ap}(500\text{Hz}) + 0,200 \cdot \overline{(S/N)}_{ap}(1\text{kHz}) \\ & + 0,312 \cdot \overline{(S/N)}_{ap}(2\text{kHz}) + 0,250 \cdot \overline{(S/N)}_{ap}(4\text{kHz}) \\ & + 0,057 \cdot \overline{(S/N)}_{ap}(8\text{kHz}) \end{aligned} \quad \text{Ec.14}$$

- 5) Se realiza el cálculo del índice STI a partir de la siguiente expresión:

$$\text{STI} = \frac{\overline{(S/N)}_{ap} + 15}{30} \quad \text{Ec.15}$$

### 2.5.1.3 Pérdida de la articulación de la consonante (%ALCons)

Método creado por el investigador Holandés V. M. A. Peutz (González C.A., 2010).

Mediante una serie de pruebas de audiencia en la emisión de un conjunto preestablecido de "logatomos" (palabras sin significado formadas por: consonante-vocal-consonante), procesó la información recogida y estableció una estadística de los resultados obtenidos. Denominó a la cantidad de información perdida (o reconocida erróneamente) por los receptores como % de Pérdida de Articulación de Consonantes, o lo que es lo mismo, %ALCons ("Articulation Loss of Consonants").

Posteriormente estableció una ley matemática que permitiera a partir de una serie de parámetros acústicos de un recinto (reverberación  $T_r$  y de la diferencia entre los niveles de presión sonora de campo directo  $L_D$  y de campo reverberante  $L_R$  en dicho punto) pudiese hallar el valor %ALCons sin necesidad de repetir dichas pruebas tan laboriosas (Carrion A., 1998).

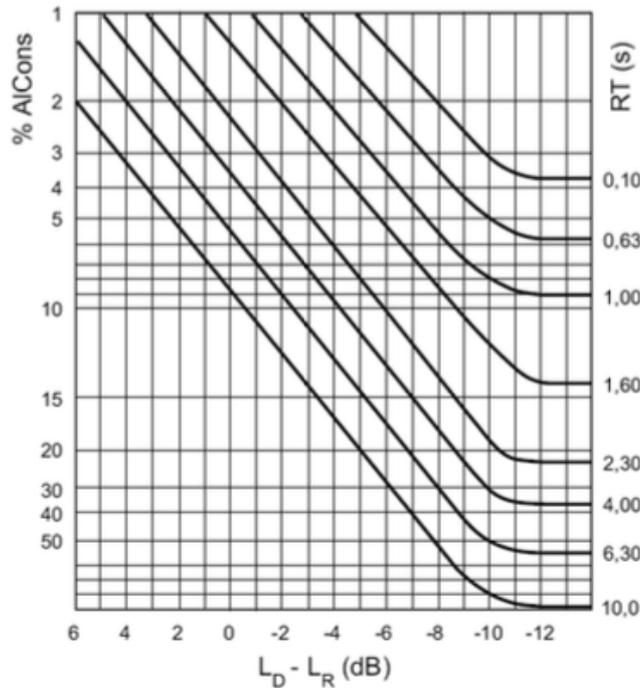


Figura 3.- Curvas para la obtención de la %ALCons a partir de Tr y  $L_D - L_R$

Para el cálculo de  $L_D - L_R$ , la fórmula a emplear es la siguiente:

$$L_D - L_R = 10 \log \left( \frac{QR}{r^2} \right) - 17(\text{dB}) \quad \text{Ec.16}$$

donde,

Q: factor de directividad de la fuente sonora (4 en la voz humana)

R: constante de la sala definida en pie de Ec.5 ( $\text{m}^2$ )

r: distancia del punto considerado a la fuente sonora (m)

## 2.6 Predicción de la percepción del habla

En esta sección mostraremos como realizar predicciones de la percepción del habla a partir del STI o SAI. El estudio incluye la percepción de la señal acústica, el reconocimiento del fonema en las sílabas sin sentido, el reconocimiento del fonema en palabras significativas, la identificación de palabra cerrada, el reconocimiento de palabra abierta y el reconocimiento de palabras en el contexto de la oración. Las predicciones de fonema y reconocimiento de palabras se desarrollan a continuación utilizando dos tipos de relación que han sido validados en trabajos anteriores (Boothroyd A., 2003).

### 2.6.1 Percepción acústica de la señal

La probabilidad de reconocimiento del habla y el STI no son iguales debido a la redundancia en la señal de voz. Cuando sólo la mitad de la información útil está disponible para el oyente, la probabilidad de percibir correctamente las señales acústicas del habla es cercana al 90%. Nunca llega al 100%, incluso cuando la señal de voz es totalmente audible.

Siempre hay una probabilidad finita de error. En los adultos con audición normal, esta probabilidad parece estar alrededor del 0.7 por ciento (Boothroyd A., 2003).

En los niños pequeños, los oyentes con déficit de audición, lenguaje, atención o procesamiento, y los oyentes a un idioma no nativo, este error residual probablemente será mayor.

La ecuación que predice la percepción acústica de la señal del índice de audibilidad del habla es (Boothroyd A., 2003):

$$ac = 100 \times (1 - (re/100)^{(STI/100)}) \quad \text{Ec.17}$$

donde,

ac = probabilidad de reconocimiento para señales acústicas en %

STI = Índice de audibilidad del habla en%

re = error residual, en %, cuando STI = 100% (= 0,7% para adultos con audición)

### 2.6.2 Reconocimiento de fonemas en palabras de consonante-vocal-consonante

El reconocimiento de fonemas normalmente requiere la percepción exacta de más de una señal acústica. Se ha demostrado que la colocación de fonemas en palabras de consonante-vocal-consonante significativas aumenta el número efectivo de canales de información independiente en adultos jóvenes con audición en un factor de 1.3 (Boothroyd A., 2003). Obsérvese que, en los niños pequeños, los oyentes con déficit de audición, lenguaje, atención o procesamiento, y los oyentes a un lenguaje no nativo, el número de señales acústicas independientes por fonema será muy probablemente mayor.

La ecuación que predice el reconocimiento fonético de la percepción acústica de la señal es (Boothroyd A., 2003):

$$ph = 100 \times (1 - (1 - (ac/100)^{j1})^{k1}) \quad \text{Ec.18}$$

donde,

ac: Probabilidad de percepción acústica tal como se define en Ec.17

j1: número medio de señales acústicas independientes por fonema (alrededor de 2.0 para los adultos jóvenes con audición)

k1 = refleja la influencia del contexto de la palabra en fonema (alrededor de 1.3 para los adultos jóvenes con audición)

### 2.6.3 Reconocimiento de las palabras completas de consonante-vocal-consonante

Cuando se mide la percepción del habla usando palabras de consonante-vocal-consonante, el investigador tiene dos opciones de puntuación. Puede medir el porcentaje de palabras enteras correctas o el porcentaje de los fonemas constitutivos correcto. Las dos medidas de rendimiento no son idénticas, sino que están relacionadas por un factor j, que es una medida del número efectivo de fonemas independientes que necesitan ser reconocidos, en promedio, para que una palabra entera sea reconocida (Boothroyd A., 2003). En sílabas sin sentido, o palabras desconocidas, j es igual al número de fonemas reales por palabra (3 en el caso de palabras de consonante-vocal-consonante). En palabras con consonante-vocal-consonante significativas, j para adultos jóvenes es típicamente de 2.5. Sin embargo, el valor de j será más cercano a 3.0 en los niños pequeños, los oyentes con déficit de audición, lenguaje, atención o procesamiento, y los oyentes a un lenguaje no nativo.

La ecuación que predice el reconocimiento de consonante-vocal-consonante (CVC) del reconocimiento de fonema es (Boothroyd A., 2003):

$$w = 100 \times (ph/100)^{j2} \quad \text{Ec.19}$$

donde,

w: probabilidad de reconocimiento de palabras en%

ph: probabilidad de reconocimiento del fonema en%, Ec.18

j2: número promedio de fonemas independientes por palabra CVC

(alrededor de 2.5 para adultos jóvenes Y 3 con discapacidad auditiva)

#### 2.6.4 Reconocimiento de palabras en oraciones

La colocación de las palabras en el contexto de la oración aumenta su probabilidad de reconocimiento (Boothroyd A., 2003). La presencia del contexto de la oración es equivalente a multiplicar, por un factor k, el número de canales independientes de información disponibles para la percepción de las palabras individuales. En las sentencias sin sentido, donde el contexto es de ninguna ayuda, el factor k es igual a 1.0. En frases complejas con baja predictibilidad, el factor k podría ser alrededor de 2.0. En oraciones simples, con alta predictibilidad, sin embargo, el factor k puede ser 10 o más.

Como hemos señalado en los anteriores apartados el factor k será menor en niños pequeños, oyentes con déficit de audición, lenguaje, atención o procesamiento, y oyentes a un idioma no nativo, que para adultos con audición normal e idioma.

La ecuación que predice el reconocimiento de palabras en el contexto de oraciones a partir del reconocimiento de palabras en forma aislada es (Boothroyd A., 2003):

$$ws = 100 \times (1 - (1 - (wi/100))^{k2}) \quad \text{Ec.20}$$

donde,

ws = porcentaje de probabilidad de reconocimiento de palabras en oraciones

wi = probabilidad de reconocimiento porcentual de palabras aisladamente, tal como se define en Ec.19

k2 = el aumento proporcional efectivo del número de canales independiente de información proporcionados por el contexto de la oración.

### 3. MÉTODOS Y MATERIALES

A modo resumen, la metodología utilizada se dividió en tres etapas.

La primera de toma de datos donde se realizaron mediciones con el equipo pertinente en el colegio Eliseo-Godoy durante aproximadamente un periodo de un mes. Una segunda parte que consistió en categorizar los datos obtenidos con el fin de facilitar el posterior análisis y diagnóstico. Mediante Matlab se programaron los métodos matemáticos vistos en el capítulo 2 para realizar los cálculos que fueron comparados con los requerimientos mínimos de los parámetros acústicos descritos por distintos autores. La tercera y última etapa se corresponde a la discusión de los resultados obtenidos para las aulas analizadas.

En este capítulo se hará una descripción de metodologías específicas utilizadas en las distintas mediciones realizadas, así como de los materiales y equipos utilizados.

En el ANEXO B hemos creado una hoja de ruta basada en el trabajo (Crandell C. and Smaldino J., 2010) para futuras tomas de mediciones acústicas en aulas de centros escolares. El propósito de ella es facilitar otros trabajos de la misma índole e incluso realizar una primera predicción antes de las mediciones.

#### 3.1 MEDICIONES

	Superficie suelo (m <sup>2</sup> )	Superficie total (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
AULA INFANTIL	50.4	183.16	146.16
AULA PRIMARIA	55.8	193.68	150.66

**Tabla 3.- Superficie y volumen de las aulas de infantil y primaria**



**Figura 4.- Aula de infantil objeto de estudio**



**Figura 5.- Aula de primaria objeto de estudio**

Se le pidió al profesor que leyera unos textos para poder medir el nivel de voz (dB) utilizado durante las lecciones, obteniendo a 1m de distancia:

Frecuencia(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Leq
Señal de voz (dB)	55	65	71	65	63	58	47	69

**Tabla 4.- Nivel de señal de voz utilizada expresada en dB**

### 3.1.1 Ruido de fondo

Las mediciones de ruido de fondo se realizaron conforme el estudio de la British Association of Educational Audiologist (BAEA) de Tolland, R. y siguiendo la normativa (ANSI S12.60-2002).

Para su obtención, se midió el nivel de presión sonora continuo equivalente con ponderación A en 6 posiciones diferentes dentro del aula (A-F), utilizando un sonómetro. En este caso, Brüel & Kjaer BK 2260 con la aplicación "Sound Level Meter Software BZ-7222" para medir en toda la banda frecuencial de interés en octavas. Las mediciones se tomaron en los escritorios de los estudiantes en las cuatro esquinas del área de instrucción, la parte central y la ubicación A para marcar la posición del alumno con problemas de audición, Figura 6. El ANSI/ASA indica que debemos realizar medidas de Leq(A) de promedios de una hora. Al no ser posibles se optó por mediciones consecutivas de 3 minutos de duración durante las horas lectivas.

Para la comparación con otros estudios y normativas se utilizará el Leq(A) de la sala obtenido en la posición del alumno no normoyente.

Establecimos 3 situaciones como referentes para realizar una estimación del nivel de ruido ambiente durante un período de instrucción:

- Aula desocupada sin alumnos en el patio de recreo
- Aula desocupada con alumnos en el patio de recreo
- Aula ocupada con alumnos realizando trabajo personal (profesor máx. silencio posible)

Estas mediciones proporcionarán una estimación del nivel de ruido ambiente durante un período de instrucción.

Es importante mencionar que la toma de medidas para esta última situación se realizó sin alterar el correcto funcionamiento de las clases. Por lo que hubo que descartar muchas muestras por no cumplir con los requisitos de trabajo personal preestablecidos.

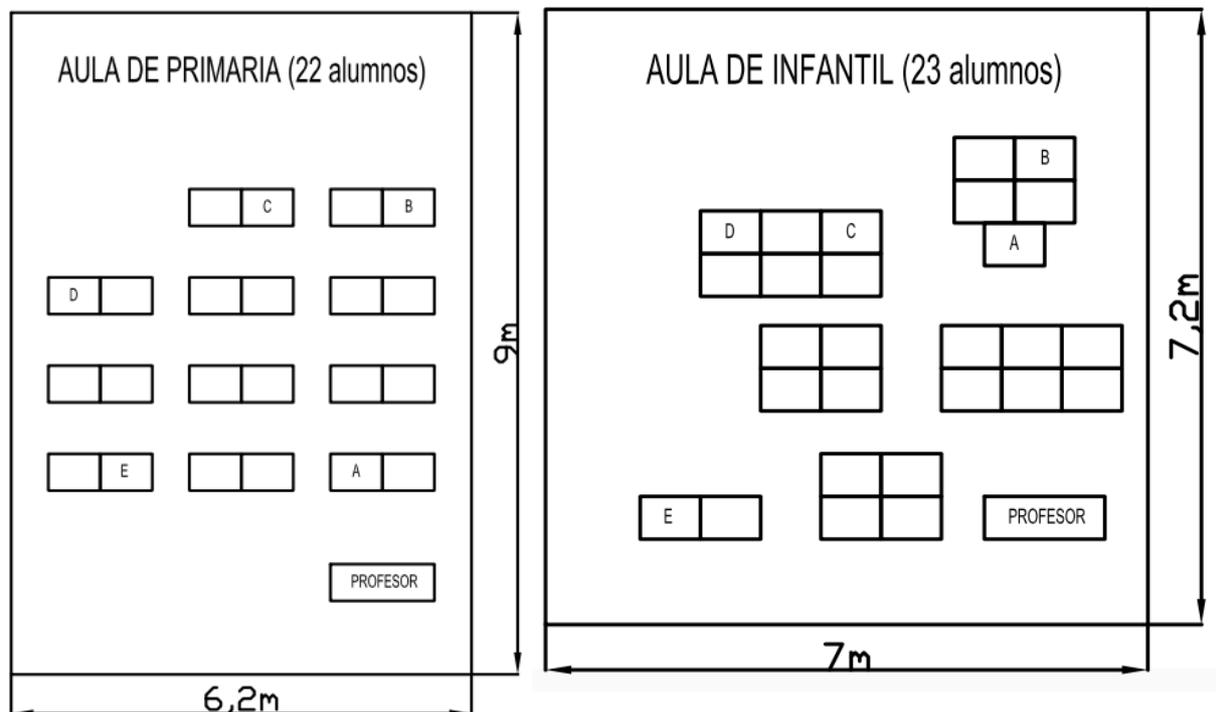


Figura 6.- Planos de las aulas de infantil, primaria y asientos donde se realizaron las medidas

### 3.1.2 Tiempo de reverberación

Para la evaluación del tiempo de reverberación se utilizó el método de ruido interrumpido. Consiste en excitar la sala con un ruido rosa pseudoaleatorio y calcular la RT a partir de la respuesta de la sala a esta excitación. La configuración utilizada para medir la RT con este método constó de: 1) una fuente de sonido omnidireccional, 2) un generador de ruido, 3) un micrófono omnidireccional, y 4) un registrador y analizador de decaimiento de sonido.

Se midió el Tr con un analizador de sonido de dos canales Brüel & Kjaer BK 2260 en tiempo real en las aulas desocupadas. El sonido generado, ruido rosa, fue capturado por un micrófono conectado al analizador BK 2260, que calculó el tiempo de reverberación para cada frecuencia del espectro de interés en bandas de 1/3 de octava.

Posteriormente, con las medidas de reverberación en aula desocupada mediante la fórmula de Sabine, Ec.3, se calculó un valor aproximado para el aula ocupada.

El procedimiento consistió en obtener el coeficiente de absorción medio,  $\alpha$ , del aula desocupada y añadirle el coeficiente de absorción de los alumnos sentados en pupitres de madera. Entonces aplicando Ec.3 de nuevo, conseguimos tiempo de reverberación aproximado para el aula ocupada.

En el Anexo A.III, se presenta una tabla de coeficientes de absorción.

### 3.1.3 Inteligibilidad de la palabra y predicción de la percepción del habla

Aunque se utilizaron en un principio los tres métodos vistos en el capítulo 2.5. Se optó finalmente por el método del STI por ser el más completo.

Como hemos mencionado en la introducción de esta sección nos servimos de Matlab para el desarrollo del modelo y la predicción de la percepción del habla para las 3 situaciones descritas de ruido de fondo para las reverberaciones de aula ocupada y desocupada siguiendo el procedimiento descrito en la sección 2.6.

Así se podrán ofrecer los resultados de un modo más visual y comprender mejor cómo diferentes situaciones dentro de un aula pueden afectar a la comprensión verbal del alumnado.

## 3.2 MATERIALES

A continuación se detallan los materiales utilizados en las mediciones de tiempo de reverberación, ruido de fondo e inteligibilidad de la palabra:

- Sonómetro, Brüel & Kjaer BK 2260
  - Sound Level Meter Software BZ-7222
  - Reverberation Time Software BZ-7227
- Fuente de sonido omnidireccional, Brüel & Kjaer OmniPower 4296
- Amplificador, Brüel & Kjaer Power Amplifier Type 2716



**Figura 7.-** Izquierda, Sonómetro Brüel & Kjaer BK 2260. Derecha, fuente de sonido omnidireccional Brüel & Kjaer OmniPower 4296. Abajo, amplificador, Brüel & Kjaer Power Amplifier Type 2716

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección analizaremos los parámetros acústicos de las 2 aulas y los compararemos con los valores de referencia de distintos autores.

### 4.1 VALORES DE REFERENCIA

En lo referido al ruido de fondo, podemos apreciar como distintos autores y recomendaciones presentan bastante uniformidad de criterios, aunque establezcan diferentes parámetros de referencia.

De todos los valores presentados utilizaremos como modelo óptimo de comparación (ANSI S12.60-2002). Con un ruido de fondo máximo de 35 dBA para un aula desocupada.

	Carrion	Crandell & Smaldino	Bess, Sinclair & rIGGS	ANSI S12.60-2002
Ruido de Fondo	sala desocupada NC 20 – NC 30	sala desocupada Leq < 41 dBA	sala desocupada Leq < 41 dBA sala ocupada Leq < 56 dBA	sala desocupada Leq < 35 dBA

**Tabla 5.- Valores óptimos de ruido de fondo de referencia**

Los valores de tiempo de reverberación presentan mayor diversidad en los criterios de regulación siendo algunos de ellos mucho más restrictivos. Al igual que hicimos con el ruido de fondo seguiremos la normativa (ANSI S12.60-2002) por uniformidad de criterios. Establece para aulas con un volumen menor de 283 metros cúbicos un tiempo de reverberación menor de 0.6 segundos.

	Carrión	Knudsen	Manuel Recuero	ANSI S12.60-2002
Tiempo de Reverberación	sala ocupada 0.7 seg – 1 seg	sala ocupada < 0.75 seg	sala desocupada 0.8 seg – 1.5 seg	sala desocupada < 0.6 seg

**Tabla 6.- Valores óptimos de reverberación de referencia**

Como ya hemos mencionado en el capítulo 3.1 el parámetro que define la calidad acústica de las aulas es la inteligibilidad de la palabra. Los valores óptimos para este parámetro dependen del indicador que se esté utilizando. En este caso seguimos el criterio de Carrión que propone valores de %ALCons menores a un 5% para salas destinadas a la palabra. Valor que puede ser asociado a un STI mayor a 0.7 aproximadamente.

%ALCons	STI/RASTI	Inteligibilidad
0% - 1.4%	0.88 – 1	Excelente
1.6% - 4.8%	0.66 – 0.86	Buena
5.3% - 11.4%	0.5 – 0.64	Aceptable
12% - 24.2%	0.36 – 0.49	Pobre
27% - 46,5%	0.24 – 0.34	Mala

**Tabla 7.- Valores óptimos de %ALCons y STI según Carrión**

## 4.2 RUIDO DE FONDO

Las mediciones se realizaron en bandas de octava de acuerdo a lo descrito en el apartado 3.1.1. Debido a la igualdad de las muestras consideramos uniformemente distribuido el ruido en toda el aula, por lo que utilizaremos las mediciones de la posición A del alumno. Además se registró el nivel equivalente de todo el espectro y se obtuvo su correspondiente valor NC. El resto de mediciones se encuentran en el Anexo A.V.

Recordaremos las 3 situaciones de análisis descritas con anterioridad:

- *Situación 1:* Aula desocupada sin alumnos en el patio de recreo
- *Situación 2:* Aula desocupada con alumnos en el patio de recreo
- *Situación 3:* Aula ocupada con alumnos realizando trabajo personal (profesor máx. silencio posible)

### Aula de infantil

En la Tabla 8 se muestran los valores obtenidos en la medición de ruido de fondo para el aula de infantiles correspondientes a las tres situaciones:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Leq (A)	NC
Situación 1	25	27	31	33	34	28	23	35,4	30
Situación 2	29	36	46	57	53	40	26	53,7	50
Situación 3	42	59	68	70	66	61	53	68,6	60

**Tabla 8.-** Resumen mediciones de ruido de fondo para las distintas situaciones de análisis en el aula de infantil

Solamente en la primera situación con el aula vacía en horario lectivo nos acercamos a los máximos recomendados. Para las otras dos condiciones de análisis el ruido excede con claridad los parámetros de calidad siendo la banda de 2 kHz la que presenta el mayor aporte energético, frecuencia central más importante para la inteligibilidad de la palabra.

### Aula de primaria

En la Tabla 9 se muestran los valores obtenidos en la medición de ruido de fondo para el aula de primaria para las tres situaciones:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Leq (A)	NC
Situación 1	27	29	33	35	30	30	26	37,6	35
Situación 2	29	36	46	57	53	40	26	55,4	50
Situación 3	44	58	65	67	62	57	46	67,4	60

**Tabla 9.-** Resumen mediciones de ruido de fondo para las distintas situaciones de análisis en el aula de primaria

Obtenemos unos resultados muy parecidos al aula de infantiles siendo un poco mayor el ruido de fondo para aulas desocupadas en horario lectivo pero también cerca de la recomendación.

La Figura 8, muestra los niveles de habla pronosticados para las 2 aulas. Obsérvese que, cerca del locutor, predomina el habla directa pero, lejos, prevalece la de reverberación temprana. Alrededor de 1.5m, los dos son iguales, llevando a un aumento de 3 dB en el nivel total de la voz (distancia crítica obtenida de forma experimental), Figura 9.

Podemos comparar la distancia crítica obtenida con la teórica (Sabine), Ec.5, considerando la constante de sala, R y Q de la región de frecuencias alrededor de 2kHz, Tabla 10.

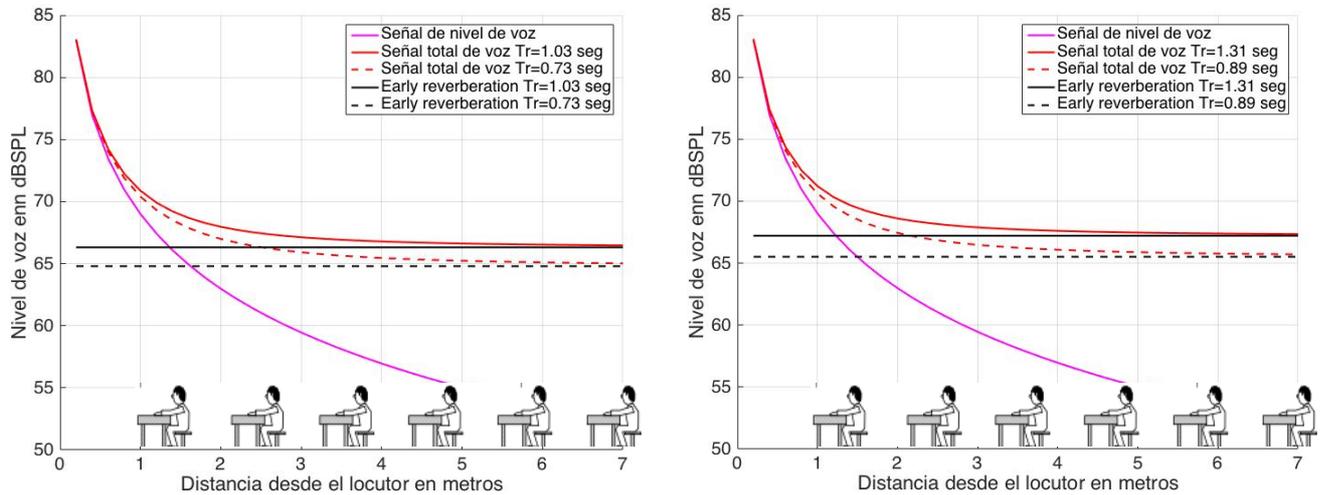


Figura 8.- De izquierda a derecha, niveles de voz y reverberación del aula de infantil y primaria. Se supone el nivel de voz inicial a 1m de 69dB y Q(directividad)=4.

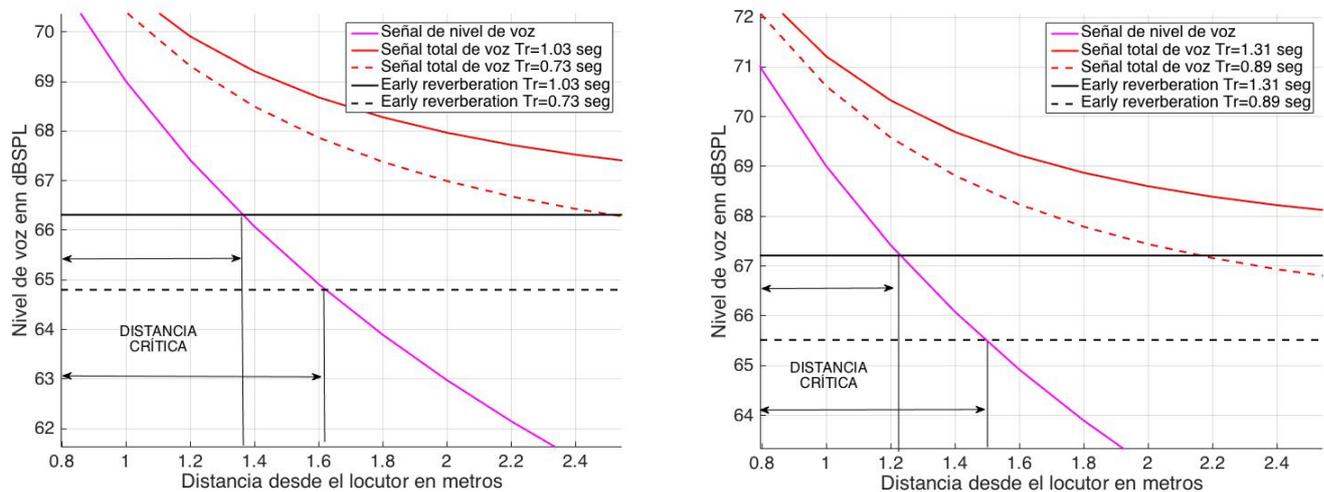
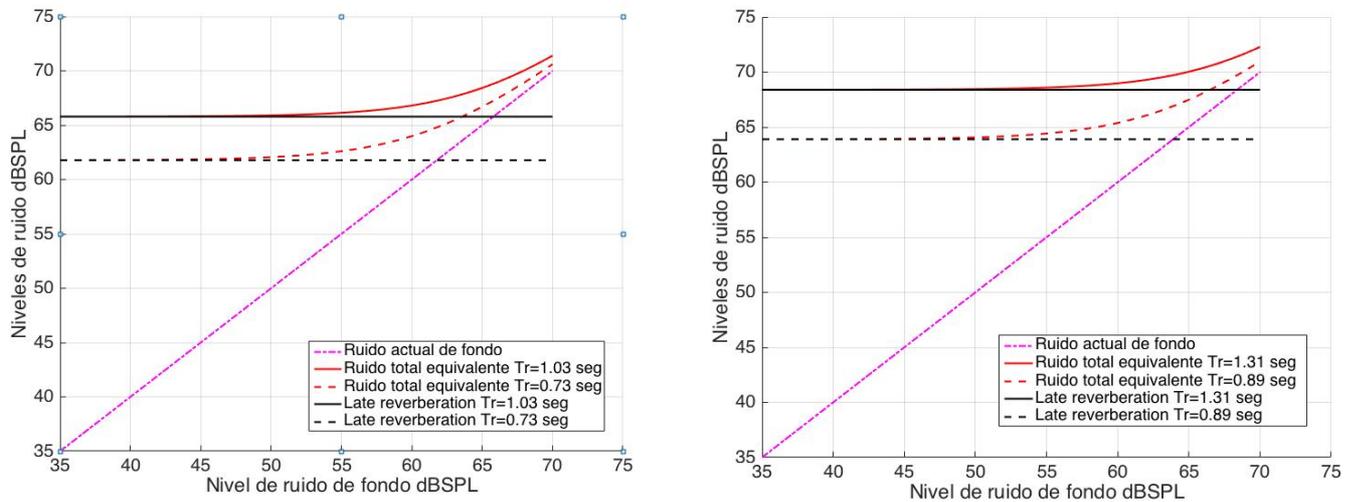


Figura 9.- Zoom de la Figura 8 para visualizar la distancia crítica experimental

	Aula INFANTIL		Aula PRIMARIA	
Distancia crítica TEÓRICA	1.45 (Tr=1.03)	1.69 (Tr=0.73)	1.27 (Tr=1.31)	1.53 (Tr=0.89)
Distancia crítica EXPERIMENTAL	1.36 (Tr=1.03)	1.62 (Tr=0.73)	1.22 (Tr=1.31)	1.5 (Tr=0.89)

Tabla 10.- Comparativa de la distancia crítica teórica y experimental del aula de infantil y primaria correspondientes a la Figura 9

En la Figura 10, se muestra la combinación del ruido de fondo y las componentes tardía de reverberación para ambas aulas. Podemos observar que altos tiempo de reverberación implican un rápido aumento del ruido de fondo efectivo.



**Figura 10.-** Muestra el resultado de combinar el ruido de fondo real y el ruido efectivo producido por los componentes tardíos de la reverberación

### 4.3 TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Después de realizar las mediciones se procedió a transformar los valores resultantes de bandas de 1/3 de octava a bandas de octava, Anexo A.IV. Esto permitió tener una mayor coherencia entre la información entregada por dichas mediciones y la información utilizada para los análisis.

Para efectos de comparación con las recomendaciones utilizaremos el promedio (Tr medio), de las bandas centradas en 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz. Como ya hemos mencionado anteriormente en ellas se concentra la mayor parte del espectro de la señal hablada.

#### Aula de infantil

La Tabla 11 muestra los resultados de las mediciones del tiempo de reverberación para el aula de infantil. Superan los criterios vistos con holgura. Siguiendo la recomendación ANSI S12.60-2002, excedemos para el aula desocupada la normativa en 0.43 segundos.

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Tr medio
Tr aula desocupada (seg)	1.42	0.57	0.98	1.11	1.01	0.9	0.69	1.03
Tr aula ocupada (seg)	1.03	0.48	0.73	0.75	0.7	0.64	0.53	0.73

**Tabla 11.-** Resumen mediciones de reverberación en el aula de infantil

## Aula de primaria

Peores resultados encontramos en el aula de primaria, Tabla 12. Con un Tr medio de 1.31 segundos que excede en 0.71 segundos la normativa, prácticamente doblando el tiempo de reverberación recomendado. Este Tr medio tan alto es consecuencia de que en las bandas de octava centrales encontramos los tiempos más altos.

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Tr medio
Tr aula desocupada (seg)	0.88	1.26	1.43	1.24	1.28	1.14	0.84	1.31
Tr aula ocupada (seg)	0.73	0.93	0.98	0.83	0.84	0.78	0.63	0.89

**Tabla 12.- Resumen mediciones de reverberación en el aula de primaria**

## 4.4 INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA

Como hemos mencionado con anterioridad se escogió para presentar los resultados de inteligibilidad el método del STI.

Calculamos entonces el índice de transmisión del habla para cada aula considerando distintas distancias entre profesor-alumno.

El análisis de la inteligibilidad mediante el método %ALCons se encuentra en el Anexo A.VI. El índice de audibilidad del habla (SAI), intercambiable con el STI, visto en el apartado 2.5.1.1, queda descrito en el Anexo A.VII. Finalmente se realizó una comparación de ambos para determinar su semejanza, Anexo A.VIII.

A continuación se presentan los resultados para las reverberaciones de aulas ocupadas y desocupadas diferenciándose para cada una las 3 situaciones de entorno ya mencionadas.

### Aula de infantil

#### a) STI utilizando la reverberación de aula desocupada

Distancia (m) desde locutor	1	2	3	4	5	6	7
Leq(A) = 35,4	0.59	0.59	0.59	0.58	0.58	0.57	0.56
Leq(A) = 53,7	0.56	0.50	0.45	0.41	0.37	0.33	0.29
Leq(A) = 68,6	0.29	0.13	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01

**Tabla 13.- Resumen mediciones STI en el aula de infantil para una Tr=1.03 seg**

Como podemos observar en la Tabla 13 solamente para la primera situación estamos en unas condiciones aceptables de STI (0.5-0.64) para cualquier distancia profesor-alumno. En la segunda condición nos acercamos. Sin embargo cuando se está impartiendo clase, tercera situación, tenemos un STI muy malo (0.24-0.34).

Esto es debido en gran parte a la mala SNR obtenida y a la alta reverberación. En la tabla 14 y 15 se evidencia este hecho con la SNR obtenida mediante el uso de la Ec.8 para las distancias de 2 y 4 metros en las 3 condiciones expresadas según sus respectivas Leq(A).

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	SNR medio
Leq(A) = 35,4	23.98	31.98	33.98	25.98	22.98	23.98	17.98	35.84
Leq(A) = 53,7	19.98	22.98	18.98	1.98	3.98	11.98	14.98	13.55
Leq(A) = 68,6	6.98	-0.02	-3.02	-11.02	-9.02	-9.02	-12.02	-5.31

**Tabla 14.-** Resumen mediciones de la SNR en el aula de infantil a una distancia profesor-alumno de 2 metros

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	SNR medio
Leq(A) = 35,4	17.96	25.96	27.96	19.96	16.96	17.96	11.96	19.82
Leq(A) = 53,7	13.96	16.96	12.96	-4.04	-2.04	5.96	8.96	7.53
Leq(A) = 68,6	0.96	-6.04	-9.04	-17.04	-15.04	-15.04	-15.04	-11.33

**Tabla 15.-** Resumen mediciones de la SNR en el aula de infantil a una distancia profesor-alumno de 4 metros

Necesitaríamos aumentar la señal de voz en 15 dB en la segunda situación y 35 dB en la tercera para poder compensar el ruido de fondo y cumplir las recomendaciones de STI (Aceptable=0.5) a 2 y 4 metros de distancia.

Para resumir el profesor debería aumentar su volumen de voz pasando de 69 dB a 90.3 dB a 1m en la tercera situación, el peor de los casos. Posteriormente hablaremos de las consecuencias que esto puede acarrear al profesor y alumnos.

#### b) STI utilizando la reverberación de aula ocupada

Distancia (m) desde locutor	1	2	3	4	5	6	7
Leq(A) = 35,4	0.66	0.66	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62
Leq(A) = 53,7	0.61	0.54	0.48	0.43	0.39	0.35	0.32
Leq(A) = 68,6	0.32	0.15	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01

**Tabla 16.-** Resumen mediciones STI en el aula de infantil para una  $Tr=0.73$  seg

Seguimos en una escala de aceptabilidad del STI para la primera condición, tabla 16.

Para poder apreciar la importancia de la reverberación realizaremos los mismos ajustes del caso anterior con el propósito de cumplir los criterios de inteligibilidad.

Ahora deberíamos aumentar 18 dB en la tercera condición. Quedando el volumen del profesor en 87.3 dB a 1m.

### Aula de primaria

#### a) STI utilizando la reverberación de aula desocupada

Distancia (m) desde locutor	1	2	3	4	5	6	7
Leq(A) = 37,6	0.54	0.54	0.54	0.53	0.53	0.52	0.51
Leq(A) = 55.4	0.53	0.49	0.45	0.42	0.39	0.35	0.32
Leq(A) = 67.4	0.36	0.21	0.12	0.06	0.03	0.02	0.02

**Tabla 17.-** Resumen mediciones STI en el aula de primaria para una  $Tr=1.31$  seg

Análogamente al aula de infantil podemos observar en la Tabla 17 que en ninguna situación estamos en unas condiciones aceptables de STI (0.5-0.64) para casi cualquier distancia profesor-alumno. A pesar de tener unas SNR como se muestran en la Tablas 18 y 19 más óptimas, la alta reverberación de esta aula 0.3 segundos por encima del aula de infantiles y 0.7 segundos de la normativa hacen que obtengamos una peor STI.

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	SNR medio
Leq(A) = 37.6	21.98	29.98	31.98	23.98	26.98	21.98	14.98	24.55
Leq(A) = 55.4	13.98	21.98	19.98	5.98	6.98	12.98	15.98	13.98
Leq(A) = 67.4	4.98	0.98	-0.02	-8.02	-5.02	-5.02	-5.02	-2.45

**Tabla 18.-** Resumen mediciones de la SNR en el aula de primaria a una distancia profesor-alumno de 2 metros

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	SNR medio
Leq(A) = 37.6	15.96	23.96	25.96	17.96	20.96	15.96	8.96	18.53
Leq(A) = 55.4	7.96	15.96	13.96	-0.04	0.96	6.96	9.96	7.96
Leq(A) = 67.4	-1.04	-5.04	-6.04	-14.04	-11.04	-11.04	-11.04	-8.47

**Tabla 19.-** Resumen mediciones de la SNR en el aula de primaria a una distancia profesor-alumno de 4 metros

En este caso deberíamos aumentar la señal de voz en 25 dB para cumplir las especificaciones recomendadas cuando los alumnos realizan trabajo personal en el aula.

#### a) STI utilizando la reverberación de aula ocupada

Distancia (m) desde locutor	1	2	3	4	5	6	7
Leq(A) = 37,6	0.62	0.62	0.61	0.60	0.59	0.59	0.58
Leq(A) = 55.4	0.59	0.55	0.50	0.46	0.43	0.39	0.36
Leq(A) = 67.4	0.40	0.24	0.14	0.08	0.04	0.02	0.01

**Tabla 20.-** Resumen mediciones STI en el aula de primaria para una  $T_r=0.886$  seg

Al disminuir en este último caso, Tabla 20, la reverberación del aula obtenemos unos resultados parecidos al del aula de infantiles.

Deberemos aumentar la señal de voz en la tercera condición subiendo 21 dB. Siendo la señal de voz final del profesor alrededor de 90 dB.

## 4.5 PREDICCIÓN DE LA PERCEPCIÓN DEL HABLA

Ahora estamos en condiciones de realizar una predicción de la percepción de la señal de voz en las diferentes aulas. Utilizando las ecuaciones del modelo visto en el capítulo 2.6. Las Figuras 11 y 12 muestran los valores del índice de transmisión del habla calculados en la sección anterior, el reconocimiento de palabras en aislamiento ( $k=1$ ), el reconocimiento de palabras en frases difíciles ( $k=2$ ) y fáciles ( $k=8$ ) para las 2 aulas. Los cálculos de reconocimiento están realizados pensando en un aula con todos los alumnos normoyentes. Aquellos con discapacidad auditiva reducirían un poco el % de reconocimiento como ya hemos mencionado en el capítulo 2.6.

Se verá que las condiciones de audición son muy deficientes en la mayoría de los casos en ambas aulas. Siendo mínimamente aceptables para la situación de ruido de fondo encontrándose el

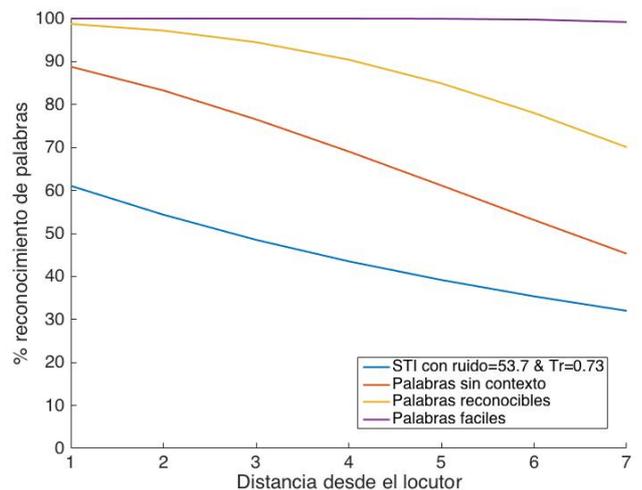
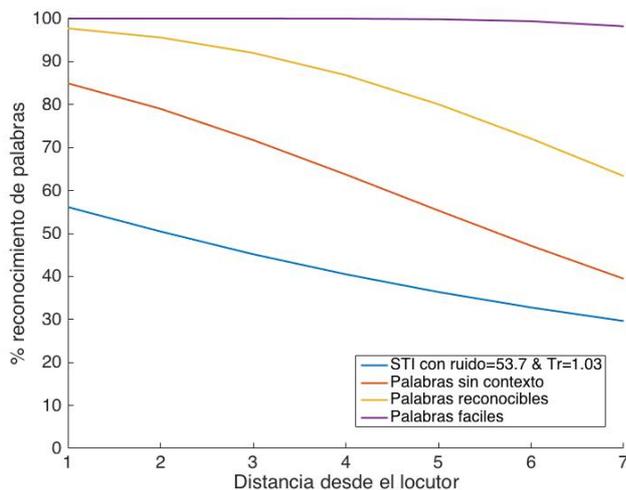
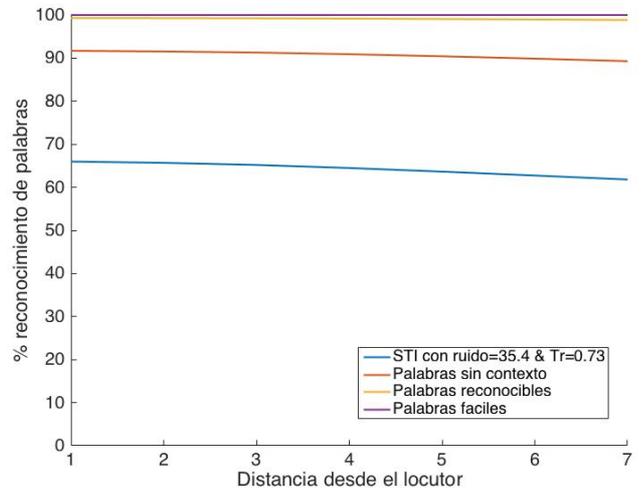
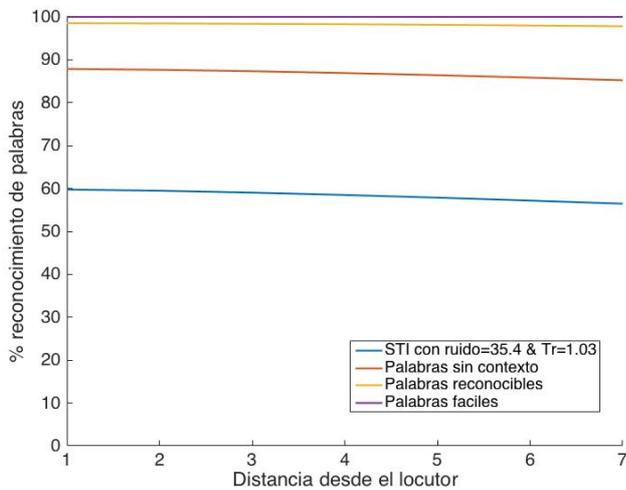
aula desocupada y en horario lectivo. Con una cierta posibilidad de algunos errores de reconocimiento de palabras aisladas para los individuos que están más alejados del locutor.

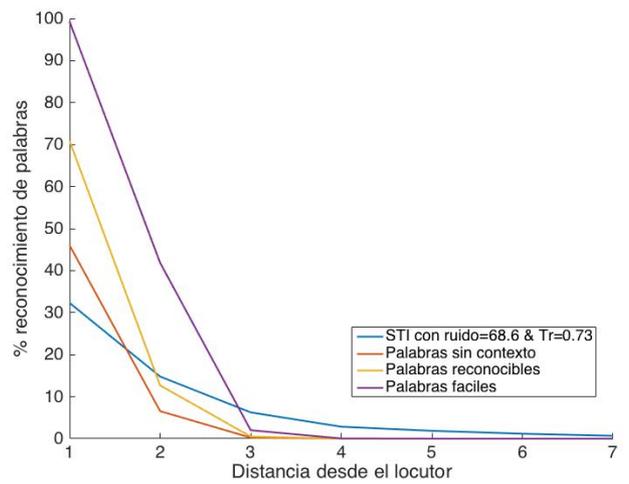
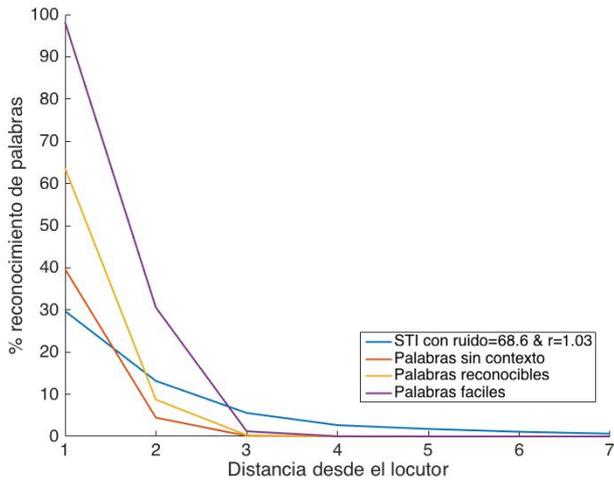
Para el caso de ruido de fondo en aulas desocupadas y alumnos en el patio de recreo, para distancias cercanas (1-2 metros) y palabras fáciles o muy contextualizadas el alumno podría seguir con normalidad las lecciones impartidas. Sin embargo aquellos alumnos más alejados del profesor y aquellos con discapacidad auditiva ( $j=3$  en Ec.18) apenas podrán continuar con el ritmo normal de clase.

La tercera situación es insostenible. Con un reconocimiento de palabras inferior al 50%.

En el lado positivo, cabe señalar que el modelo desarrollado aquí no tiene en cuenta los beneficios potenciales de la audición binaural y la integración de la audición y la lectura del habla, que pueden mejorar la percepción en condiciones de escucha difíciles (Boothroyd A.,2003).

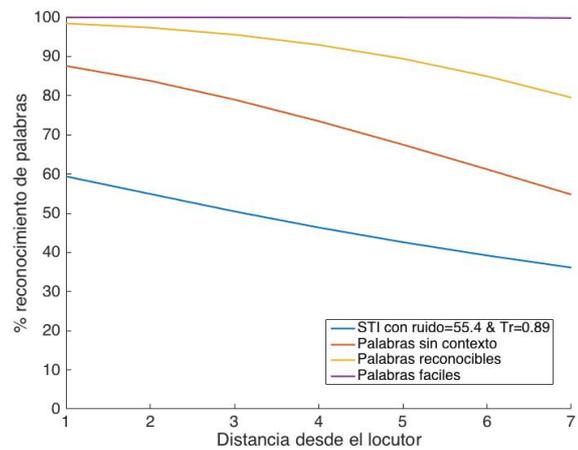
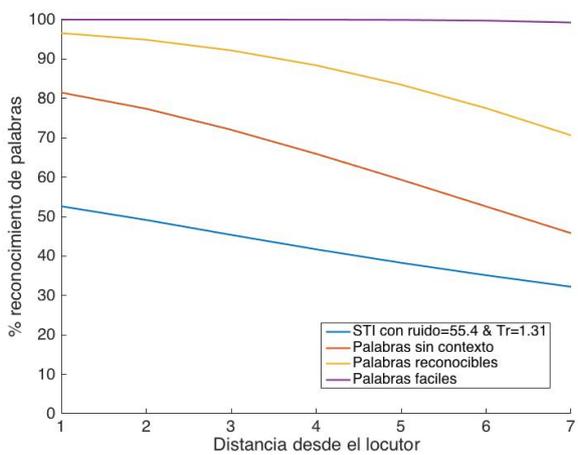
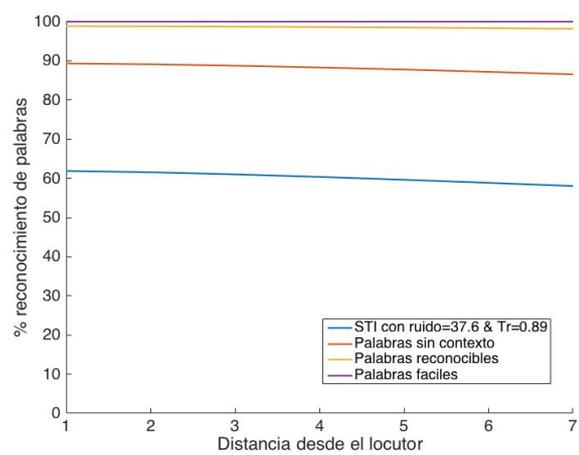
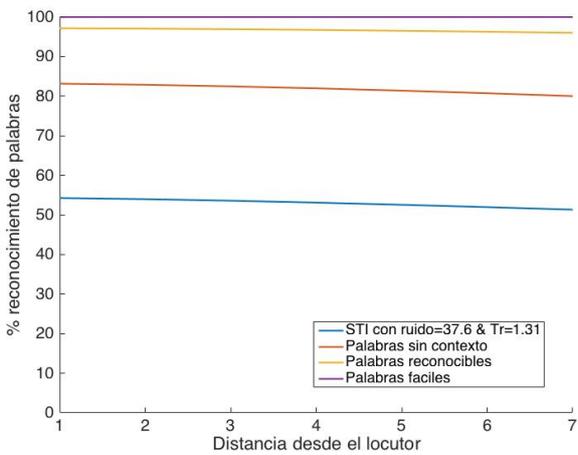
### Aula de infantil

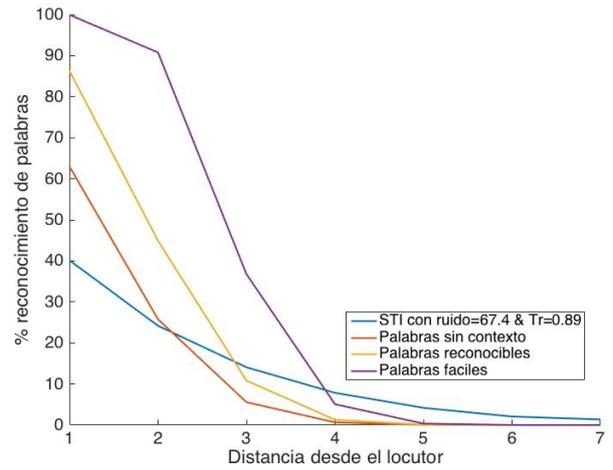
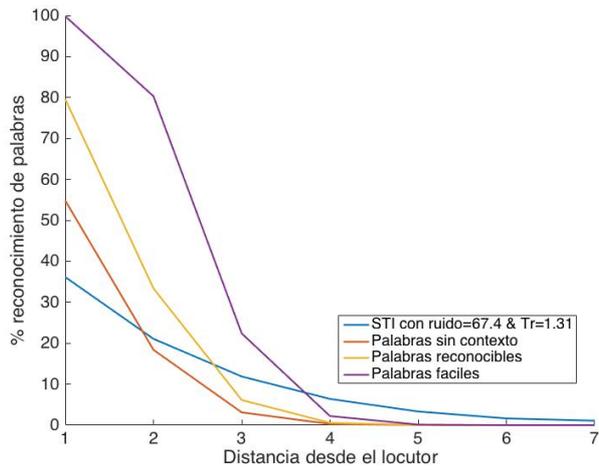




**Figura 11.-** Aplicación de los modelos desarrollados en este capítulo a la predicción de la recepción de la voz (Índice de audibilidad del habla) y la percepción del habla (reconocimiento de palabras), en función de la distancia profesor-alumno, para el aula de infantil ilustrada en la Figura 8, alta reverberación, y ambos se ilustran en los otros tres paneles. Los parámetros del modelo utilizados aquí se basan en datos de jóvenes con audición normal.

### Aula de primaria





**Figura 12.-** Aplicación de los modelos desarrollados en este capítulo a la predicción de la recepción de la voz (Índice de audibilidad del habla) y la percepción del habla (reconocimiento de palabras), en función de la distancia profesor-alumno, para el aula de primaria ilustrada en la Figura 8, alta reverberación, y ambos se ilustran en los otros tres paneles. Los parámetros del modelo utilizados aquí se basan en datos de jóvenes con audición normal.

## 5. CONCLUSIONES

---

Se realizaron tres etapas de mediciones durante el desarrollo de este trabajo. La primera consistió en obtener los parámetros acústicos que permitieran caracterizar a salas orientadas al habla, reverberación (Tr) y ruido de fondo. Para ello se obtuvieron mediciones en dos aulas del colegio Eliseo-Godoy, primaria y secundaria. Previamente se establecieron tres posibles situaciones de ruido en las aulas: cuando el aula se encuentra desocupada sin alumnos en el patio de recreo, cuando el aula se encuentra desocupada con alumnos en el patio de recreo y finalmente cuando el aula se encuentra ocupada y los alumnos están realizando un trabajo personal con el profesor en el máximo silencio posible.

La segunda tuvo como objetivo determinar la inteligibilidad del habla. Realizamos una comparativa de los distintos modelos matemáticos que suelen emplearse: %ALCons (pérdida de articulación de la consonante), SAI (índice de audibilidad del habla), STI (índice de transmisión del habla). Todos ellos válidos para una aproximada caracterización de la inteligibilidad del habla, sin embargo el método más extendido y que mejor se ajusta a la señal de voz es el STI, finalmente el utilizado para presentar los resultados.

Finalmente en una tercera etapa, se procedió a realizar una predicción de la percepción acústica de la señal, reconocimiento de palabras en oraciones, con el fin de ofrecer mediante gráficas una estimación de las consecuencias que los STI obtenidos podrían tener en el reconocimiento de palabras de diferente dificultad.

La caracterización acústica inicial de ambas aulas arrojó como resultado escasos niveles de inteligibilidad de la palabra. Siendo buenos para el caso de aula desocupada sin presencia de alumnos en tiempo de recreo. Y mínimamente aceptables en presencia de alumnos en el patio de recreo durante periodo lectivo.

De los factores de los cuales depende la inteligibilidad, se comprobó que tanto el tiempo de reverberación como el ruido de fondo exceden los valores recomendados por distintos autores. Manteniendo el tiempo de reverberación y ruido, se presentaron en los resultados el volumen de voz que debería alcanzar el profesor durante sus lecciones para cumplir una aceptable índice de audibilidad. Siendo del orden de 90 dB, se presenta imposible mantener ese nivel de expresión dentro de un aula. Provocando consecuencias para el profesorado como afonías que pueden desembocar en enfermedades crónicas de la voz como laringitis.

Se propone entonces la reducción del ruido de fondo en las situaciones de ocupación del aula, obligando a los alumnos a mantener niveles de ruido durante su trabajo personal aceptables. Para ello nos podemos servir de técnicas modernas como el uso de semáforos en las aulas para educar al alumnado desde pequeños sobre la contaminación acústica. Es una herramienta barata y fácil de utilizar que ya ha arrojado buenos resultados en países como Finlandia. Además se recomienda limitar las clases durante los periodos en los que se encuentren otros alumnos en el patio del colegio debido al deficiente aislamiento que presentan las aulas.

Al tratarse de un centro escolar más o menos antiguo y con pocas reformas, las aulas presentan tiempos de reverberación muy elevados. Derivados de una construcción con materiales, actualmente en desuso en arquitecturas acústicas en aulas como: ladrillo lavado de yeso, techos de hormigón etc.

Entre las soluciones factibles que podemos ofrecer encontramos: bajar la altura del techo para reducir el volumen del aula utilizando paneles suspendidos mediante una guía a cierta distancia y rellenar la cavidad de material absorbente. Estamos atacando así tanto el volumen como la absorción del aula, los dos factores más importantes en el tiempo de reverberación.

El objetivo del trabajo era determinar si las condiciones acústicas presentes en el aula permiten integrar a alumnos con discapacidades auditivas.

Tenemos que concluir con una duda razonable ante las condiciones actuales. Aunque se utilicen audífonos, implantes cocleares incluso sistemas de FM, los alumnos no normoyentes necesitan unas condiciones más favorables en el aula. En definitiva los niños con pérdidas auditivas precisan de una relación señal-ruido alrededor de +15 dB frente a los +6 dB de un alumno normoyente en el rango frecuencial de 63-4000 Hz.

A pesar de los avances continuos en las estrategias de procesamiento de la señal y la tecnología multimicrófonos, ni los audífonos ni los implantes pueden satisfacer todas las necesidades auditivas. Su mayor limitación se encuentra en la imposibilidad de enviar una señal clara y nítida del habla cuando existe un alto ruido de fondo. Con los sistemas de FM si conseguimos el envío de una señal directa sea cual sea la situación del alumno en el aula y por consiguiente mejorar la audibilidad del habla de la persona que utiliza el micrófono del sistema FM (profesor o incluso otro alumno).

Sin embargo si no conseguimos ofrecer condiciones adecuadas al alumno normoyente resultará difícil optimizar los beneficios que los sistemas de FM ofrecen. Llegando a resultar muy molestos para los alumnos con discapacidades auditivas en los ambientes estudiantiles muy ruidosos.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

---

1. ANSI S12.60-2002, American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools. 5-11.
2. Boothroyd, A. (2003). Modeling the effects of room-acoustics on speech reception and perception. National Institute of Disability Rehabilitation and Research (NIDRR) to the Rehabilitation Engineering Research Center at Gallaudet University.
3. Carrion, A. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC, 2, 74-85.
4. Crandell, C. and Smaldino, J. (2000). Classroom acoustics for children with normal hearing and with hearing impairment. Lang. Speech Hear. Services in Schools (LSHSS), 31, 362-370.
5. González, CA. (2010). Acondicionamiento acústico salas de clases colegio emprendor Osorno. Tesis de Licenciado en acústica. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil Acústica.
6. Hopkins, C. and Hall, R. (1993). Acoustic Design of schools, a design guide. Building Bulletin. 77-90.
7. ISO 354/1985. Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room. University of Salford Greater Manchester 2003. 3-12.
8. Knudsen, V.O. (1950). Acoustical designing in architecture. John Wiley & Sons Inc; 1st Edition edition. 436-456.
9. Recuero, M. (1999). Acústica arquitectónica aplicada. Paraninfo. 446-485.
10. Tolland, R. A study of classroom acoustic, hearing and learning difficulties as experienced in four classes in a Middle School. British Association of Educational Audiologist (BAEA). 15.
11. Trombetta, P.H, Zanardo, D.P. and Marcon, C.R. Assessment of Acoustic Quality in Classrooms Base don Measurements, Perception and Noise Control. Federal University of Panamá. 202-232
12. Wolfram, E. (2003).The classroom acoustical environment is critical to student learning and academic performance. Educational Leadership Magazine.
13. Zenker, F. (2013). Supresión de barreras de comunicación en las aulas escolares mediante frecuencia modulada. Separata. 149, 2-15.

# **ANEXO A**

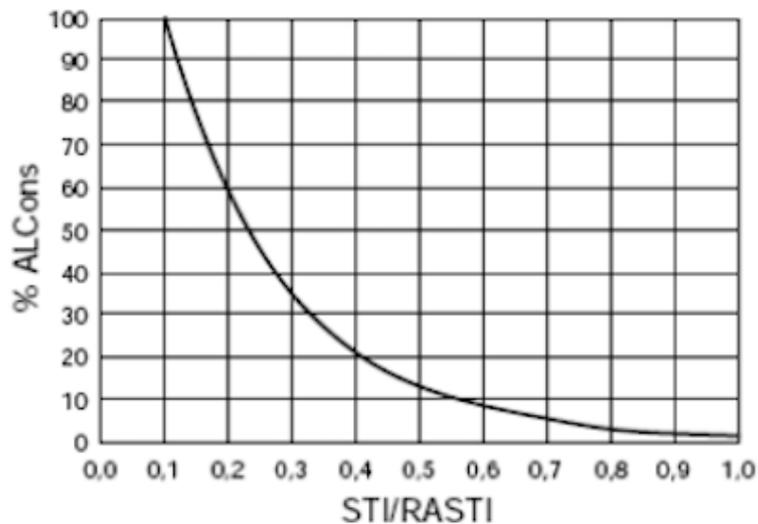
A.I

**Tabla 1.-** Recomendación para diversos recintos según curva NC y equivalencia en dBA

TIPOS DE RECINTOS	CURVA NC RECOMENDADA	EQUIVALENCIA EN dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias/Aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas/ Bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestíbulos y pasillos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Fuente: Acondicionamiento Acústico en salas de clase, Claudio Alejandro González Rivera Valdivia

**Figura 1.-** Relación entre %ALCons y STI



Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Antoni Carrión

A.II

Tabla 2.- Matriz de 98 valores de  $m(F_o, F_m)$  para el cálculo STI

<b>Banda de octavas Hz</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1k</b>	<b>2k</b>	<b>4k</b>	<b>8k</b>
$f_1 = 0,63 \text{ Hz}$	m						
$f_2 = 0,8 \text{ Hz}$							
$f_3 = 1,0 \text{ Hz}$							
$f_4 = 1,25 \text{ Hz}$							
$f_5 = 1,6 \text{ Hz}$							
$f_6 = 2 \text{ Hz}$							
$f_7 = 2,5 \text{ Hz}$							
$f_8 = 3,15 \text{ Hz}$							
$f_9 = 4 \text{ Hz}$							
$f_{10} = 5 \text{ Hz}$							
$f_{11} = 6,3 \text{ Hz}$							
$f_{12} = 8 \text{ Hz}$							
$f_{13} = 10 \text{ Hz}$							
$f_{14} = 12,5 \text{ Hz}$							

Fuente: Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Antoni Carrión

### A.III

**Tabla 3.-** Coeficientes de absorción de diversos materiales en función de la frecuencia

Material	Coeficiente de absorción $\alpha$ a la frecuencia					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hormigón sin pintar	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Hormigón pintado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Ladrillo visto sin pintar	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Ladrillo visto pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Revoque de cal y arena	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Placa de yeso (Durlock) 12 mm a 10 cm	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Yeso sobre metal desplegado	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03
Mármol o azulejo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Madera en paneles (a 5 cm de la pared)	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Madera aglomerada en panel	0,47	0,52	0,50	0,55	0,58	0,63
Parquet	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Parquet sobre asfalto	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22
Parquet sobre listones	0,20	0,15	0,12	0,10	0,10	0,07
Alfombra de goma 0,5 cm	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Alfombra de lana 1,2 kg/m <sup>2</sup>	0,10	0,16	0,11	0,30	0,50	0,47
Alfombra de lana 2,3 kg/m <sup>2</sup>	0,17	0,18	0,21	0,50	0,63	0,83
Cortina 338 g/m <sup>2</sup>	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina 475 g/m <sup>2</sup> fruncida al 50 %	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Espuma de poliuretano (Fonac) 35 mm	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97
Espuma de poliuretano (Fonac) 50 mm	0,15	0,25	0,50	0,94	0,92	0,99
Espuma de poliuretano (Fonac) 75 mm	0,17	0,44	0,99	1,03	1,00	1,03
Espuma de poliuretano (Sonex) 35 mm	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89
Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01
Espuma de poliuretano (Sonex) 75 mm	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m <sup>3</sup> ) 25 mm	0,15	0,25	0,40	0,50	0,65	0,70
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m <sup>3</sup> ) 50 mm	0,25	0,45	0,70	0,80	0,85	0,85
Lana de vidrio (panel 35 kg/m <sup>3</sup> ) 25 mm	0,20	0,40	0,80	0,90	1,00	1,00
Lana de vidrio (panel 35 kg/m <sup>3</sup> ) 50 mm	0,30	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00
Ventana abierta	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04
Panel cielorraso Spanacustic (Manville) 19 mm	-	0,80	0,71	0,86	0,68	-
Panel cielorraso Acustidom (Manville) 4 mm	-	0,72	0,61	0,68	0,79	-
Panel cielorraso Prismatic (Manville) 4 mm	-	0,70	0,61	0,70	0,78	-
Panel cielorraso Profil (Manville) 4 mm	-	0,72	0,62	0,69	0,78	-
Panel cielorraso fisurado Auratone (USG) 5/8"	0,34	0,36	0,71	0,85	0,68	0,64
Panel cielorraso fisurado Cortega (AWI) 5/8"	0,31	0,32	0,51	0,72	0,74	0,77
Asiento de madera (0,8 m <sup>2</sup> /asiento)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08
Asiento tapizado grueso (0,8 m <sup>2</sup> /asiento)	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Personas en asiento de madera (0,8 m <sup>2</sup> /persona)	0,34	0,39	0,44	0,54	0,56	0,56
Personas en asiento tapizado (0,8 m <sup>2</sup> /persona)	0,53	0,51	0,51	0,56	0,56	0,59
Personas de pie (0,8 m <sup>2</sup> /persona)	0,25	0,44	0,59	0,56	0,62	0,50

Fuente: Acústica Arquitectónica, Escuela Universitaria de Música (EUMUS)

## A.IV

**Tabla 4.-** Mediciones de tiempo de reverberación, aula infantil, desocupada (T20) medida en tercios de octava

Frecuencia (Hz)	Promedio (seg)
50	---
63	---
80	1.15
100	0.83
125	1.42
160	1.39
200	1.27
250	0.57
315	0.94
400	0.96
500	0.98
630	1.17
800	1.09
1k	1.11
1.25k	1
1.6k	1.03
2k	1.01
2.5k	0.87
3.15k	0.97
4k	0.9
5k	0.83
6.3k	0.74
8k	0.69
10k	0.55

**Tabla 5.-** Mediciones de tiempo de reverberación, aula primaria, desocupada (T20) medida en tercios de octava

Frecuencia (Hz)	Promedio (seg)
50	---
63	---
80	---
100	1.47
125	0.88
160	1.08
200	1.44
250	1.26
315	1.16
400	1.21
500	1.43
630	1.33
800	1.27
1k	1.24
1.25k	1.29
1.6k	1.31
2k	1.28
2.5k	1.24
3.15k	1.11
4k	1.14
5k	1.1
6.3k	0.95
8k	0.84
10k	0.69

A.V

**Tabla 6.-** Mediciones de ruido de fondo, aula de infantil, en bandas de octava  
(Aula desocupada con alumnos en el patio de recreo)

Frecuencia (Hz)	Posición A (dBA)	Posición B (dBA)	Posición C (dBA)	Posición D (dBA)	Posición E (dBA)
16	---	---	---	---	---
31.5	---	26	---	21	23
63	22	31	31	26	28
125	29	36	35	30	34
250	36	36	37	35	38
500	46	48	45	45	47
1k	57	57	53	57	55
2k	53	53	50	52	52
4k	40	42	39	39	41
8k	26	26	25	26	26
16k	---	---	---	---	---
<b>Leq</b>	<b>53.7</b>	<b>54.8</b>	<b>52</b>	<b>53.3</b>	<b>53.9</b>

**Tabla 7.-** Mediciones de ruido de fondo, aula de infantil, en bandas de octava  
(Aula ocupada con alumnos realizando trabajo personal, profesor máx. silencio posible)

Frecuencia (Hz)	Posición A (dBA)	Posición B (dBA)	Posición C (dBA)	Posición D (dBA)	Posición E (dBA)
16	---	---	---	---	---
31.5	24	---	23	21	24
63	35	34	34	31	35
125	42	44	48	43	45
250	59	58	61	61	60
500	68	65	68	68	69
1k	70	67	71	72	74
2k	66	62	67	69	72
4k	61	57	62	64	64
8k	53	46	48	50	49
16k	41	31	37	35	35
<b>Leq</b>	<b>68.6</b>	<b>64.7</b>	<b>68.5</b>	<b>69.3</b>	<b>70.7</b>

**Tabla 8.-** Mediciones de ruido de fondo, aula de primaria, en bandas de octava  
(Aula desocupada con alumnos en el patio de recreo)

Frecuencia (Hz)	Posición A (dBA)	Posición B (dBA)	Posición C (dBA)	Posición D (dBA)	Posición E (dBA)
16	---	---	---	---	---
31.5	---	26	---	21	23
63	25	35	33	26	28
125	29	37	36	29	33
250	36	34	38	34	36
500	46	45	47	44	48
1k	57	58	56	58	58
2k	53	55	50	51	53
4k	40	40	37	38	42
8k	26	25	26	25	24
16k	---	---	---	---	---
<b>Leq</b>	<b>55.4</b>	<b>56.8</b>	<b>54.6</b>	<b>52.3</b>	<b>56.9</b>

**Tabla 9.-** Mediciones de ruido de fondo aula de primaria en bandas de octava  
(Aula ocupada con alumnos realizando trabajo personal, profesor máx. silencio posible)

Frecuencia (Hz)	Posición A (dBA)	Posición B (dBA)	Posición C (dBA)	Posición D (dBA)	Posición E (dBA)
16	---	---	---	---	---
31.5	---	23	21	24	---
63	34	34	31	35	30
125	44	48	43	45	42
250	58	61	61	60	59
500	65	68	68	69	67
1k	67	71	72	74	73
2k	62	67	69	72	69
4k	57	62	64	64	63
8k	46	48	50	49	48
16k	31	37	35	35	35
<b>Leq</b>	<b>67.4</b>	<b>68,5</b>	<b>69,3</b>	<b>70,7</b>	<b>69,2</b>

A.VI

**Tabla 10.-** Análisis de %ALCons, aula infantil, Aula desocupada, Reverberación (Tr=1.01 en banda de 2kHz)

	Frecuencia (Hz)	2 k
Dist (mts)	R (constante de sala)	26.7
1	Ld-Lr	-0,57
	%ALCons	1,00%
	Valoración Subjetiva	EXCELENTE
2	Ld-Lr	-6,59
	%ALCons	1,00%
	Valoración Subjetiva	EXCELENTE
3	Ld-Lr	-10,12
	%ALCons	5,50%
	Valoración Subjetiva	ACEPTABLE
4	Ld-Lr	-12,61
	%ALCons	9,00%
	Valoración Subjetiva	ACEPTABLE
5	Ld-Lr	-14,55
	%ALCons	9,00%
	Valoración Subjetiva	ACEPTABLE
6	Ld-Lr	-16,14
	%ALCons	9,00%
	Valoración Subjetiva	ACEPTABLE
7	Ld-Lr	-17,48
	%ALCons	9,00%
	Valoración Subjetiva	ACEPTABLE

**Tabla 11.-** Análisis de %ALCons, aula infantil, Aula ocupada, Reverberación ( $T_r=0.787$  en banda de 2kHz)

	Frecuencia (Hz)	2 k
Dist (mts)	R (constante de sala)	36.6
1	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	1,05 0,00% <b>EXCELENTE</b>
2	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-4,97 3,50% <b>BUENA</b>
3	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-8,50 4,50% <b>BUENA</b>
4	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-11,00 5,50% <b>ACEPTABLE</b>
5	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-12,93 7,00% <b>ACEPTABLE</b>
6	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-14,51 7,00% <b>ACEPTABLE</b>
7	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-15,85 7,00% <b>ACEPTABLE</b>

**Tabla 12.-** Análisis de %ALCons, aula primaria, Aula desocupada,  
Reverberación (Tr=1.28 en banda de 2kHz)

	Frecuencia (Hz)	2 k
Dist (mts)	R (constante de sala)	20.47
1	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-0,57 1,20% <b>EXCELENTE</b>
2	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-5,96 6,00% <b>ACEPTABLE</b>
3	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-9,48 8,50% <b>ACEPTABLE</b>
4	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-11,48 10,00% <b>ACEPTABLE</b>
5	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-13,92 11,00% <b>ACEPTABLE</b>
6	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-15,95 11,00% <b>ACEPTABLE</b>
7	Ld-Lr %ALCons Valoración Subjetiva	-16,84 11,00% <b>ACEPTABLE</b>

**Tabla 13.-** Análisis de %ALCons, aula primaria, Aula ocupada, Reverberación (Tr=0.75 en banda de 2kHz)

	Frecuencia (Hz)	2 k
Dist (mts)	R (constante de sala)	30.04
1	Ld-Lr	1,45
	%ALCons	0,00%
	Valoración Subjetiva	<b>EXCELENTE</b>
2	Ld-Lr	-4,57
	%ALCons	3,50%
	Valoración Subjetiva	<b>BUENA</b>
3	Ld-Lr	-8,10
	%ALCons	4,50%
	Valoración Subjetiva	<b>ACEPTABLE</b>
4	Ld-Lr	-10,59
	%ALCons	6,00%
	Valoración Subjetiva	<b>ACEPTABLE</b>
5	Ld-Lr	-12,53
	%ALCons	7,00%
	Valoración Subjetiva	<b>ACEPTABLE</b>
6	Ld-Lr	-14,12
	%ALCons	7,00%
	Valoración Subjetiva	<b>ACEPTABLE</b>
7	Ld-Lr	-15,45
	%ALCons	7,00%
	Valoración Subjetiva	<b>ACEPTABLE</b>

## A.VII

**Tabla 14.-** Análisis de SAI, aula infantil, Aula desocupada,  
Reverberación ( $Tr=1.01$  en banda de 2kHz)  
Comparativa de las 3 situaciones

Frecuencia (Hz)	2k		
Dist (metros)	SAI (situación 1)	SAI (situación 2)	SAI (situación 3)
1	66.92	66.07	51.47
2	57.25	56.39	41.80
3	54.44	53.59	38.99
4	53.32	52.46	37.87
5	52.77	51.91	37.32
6	52.46	51.60	37.01
7	52.27	51.41	36.82

**Tabla 15.-** Análisis de SAI, aula infantil, Aula ocupada,  
Reverberación ( $Tr=0.79$  en banda de 2kHz)  
Comparativa de las 3 situaciones

Frecuencia (Hz)	2k		
Dist (metros)	SAI (situación 1)	SAI (situación 2)	SAI (situación 3)
1	78.70	76.64	53.26
2	67.35	65.29	41.91
3	63.75	61.68	38.30
4	62.24	60.18	36.79
5	61.48	59.42	36.04
6	61.05	58.99	35.61
7	60.79	58.73	35.35

**Tabla 16.-** Análisis de SAI, aula primaria, Aula ocupada,  
Reverberación ( $Tr=1.28$  en banda de 2kHz)  
Comparativa de las 3 situaciones

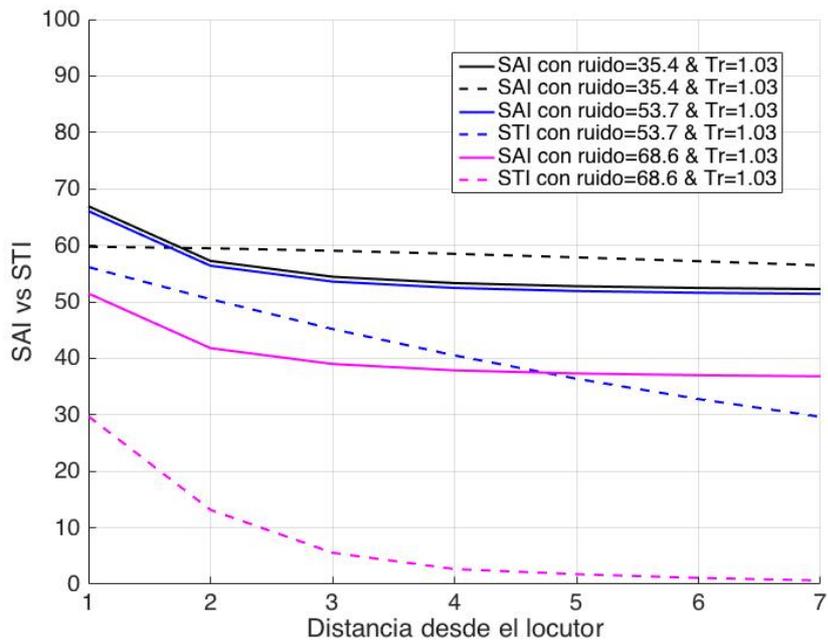
Frecuencia (Hz)	2k		
Dist (metros)	SAI (situación 1)	SAI (situación 2)	SAI (situación 3)
1	59.37	58.67	50.91
2	50.69	49.99	42.23
3	48.29	47.60	39.84
4	47.36	46.66	38.89
5	46.90	46.21	38.44
6	46.65	45.95	38.18
7	46.49	45.79	38.03

**Tabla 17.-** Análisis de SAI, aula primaria, Aula desocupada,  
Reverberación ( $Tr=0.75$  en banda de 2kHz)  
Comparativa de las 3 situaciones

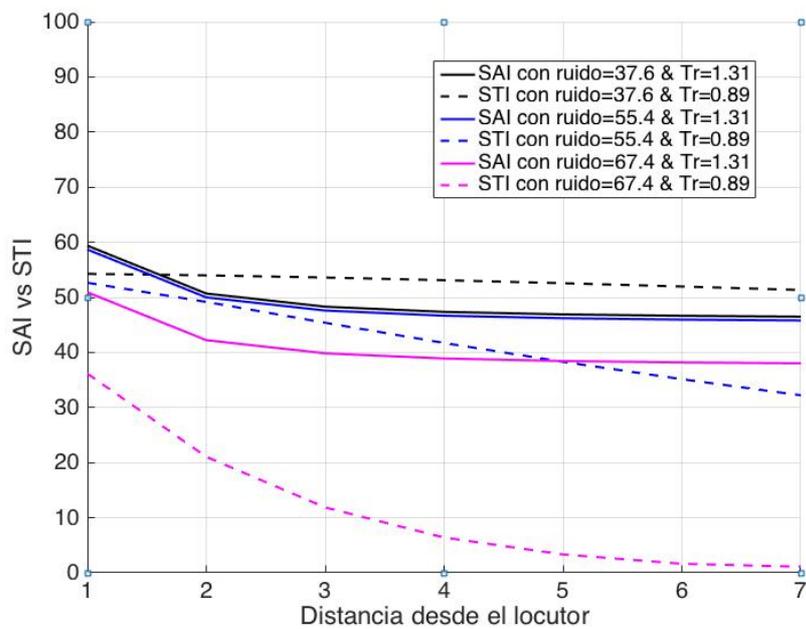
Frecuencia (Hz)	2k		
Dist (metros)	SAI (situación 1)	SAI (situación 2)	SAI (situación 3)
1	72.35	70.47	55.36
2	61.79	59.90	44.79
3	58.58	56.69	41.58
4	57.26	55.38	40.27
5	56.61	54.73	39.61
6	56.24	54.36	39.25
7	56.02	54.14	39.02

## A.VIII

**Figura 2.-** Comparativa SAI vs STI aula infantil



**Figura 3.-** Comparativa SAI vs STI aula primaria



# **ANEXO B**

## ENCUESTA DE DETECCIÓN ACUSTICA EN AULAS

Fecha \_\_\_\_\_ Audiólogo/Supervisor \_\_\_\_\_  
 Escuela/Centro \_\_\_\_\_ Aula \_\_\_\_\_ Profesor \_\_\_\_\_  
 Alumno \_\_\_\_\_ Curso \_\_\_\_\_

El objetivo de esta hoja de trabajo es la detección de los problemas acústicos en las aulas. Cuando los niveles de ruido y/o reverberación sean sospechosos de exceder los parámetros recogidos en el anexo I del BOE-A-2009-11125, los datos de estudio recogidos serán un indicador para una evaluación adicional. Dicha evaluación podrá ser remitida a un especialista para realizar un análisis acústico integral y sugerir soluciones.

### 1. INFORMACIÓN OBSERVADA

La observación de un aula es un paso preparatorio para la toma de mediciones acústicas del aula. Proporciona información sobre los parámetros acústicos del aula así como el estilo de instrucción, disposición de los asientos y el acceso a la comunicación.

#### Ruido de Fondo

Escuche en el aula y compruebe lo siguiente; un “SI” es un indicador de potencial exceso en los niveles de ruido.

Características del aula	SI	NO
Los sistemas de calefacción y ventilación son audibles		
El equipamiento mecánico tiene que ser apagado durante clases importantes		
El ruido procedente de la zona de recreo es audible		
El ruido producido por el tráfico de vehículos es audible		
Apagados los sistemas de calefacción y ventilación, el sonido procedente de otras aulas, salas de lectura o pabellón son audibles		

#### Reverberación

Generalmente, la reverberación es determinada por el volumen del aula y las características de absorción de los materiales utilizados para construir las paredes, suelos o techos de la misma. Compruebe el aula para las siguientes superficies; un “SI” es un indicador de potenciales largos tiempos de reverberación.

Características del aula	SI	NO
Una superficie dura, techo plano sin planos acústicos		
La altura del techo es superior a 11 metros		
Los planos acústicos del techo han sido pintados		
Las paredes están construidas de materiales reflectantes de sonido por ejemplo (placas de yeso, hormigón, paneles de madera)		
El suelo está construido de materiales reflectantes de sonido por ejemplo (hormigón, baldosas, madera)		

Tecnología actual en el aula (Si es usada)

- Sistemas FM individuales [ Número de alumnos \_\_\_\_ ] Tipo \_\_\_\_\_
- ADS: Aula entera Tipo \_\_\_\_\_
- ADS: Área específica Tipo \_\_\_\_\_

Distancia Profesor-Alumno: Más cercana \_\_\_\_ m Más alejada \_\_\_\_ m

Tipo de aula:  Tradicional  Abierta  Portátil

Tipo de instrucción:  Lectura  Grupos grandes  Grupos pequeños  Individual  
Otros \_\_\_\_\_

Disposición de los asientos:  Cluster  Filas  En 'U' o círculo  
Otros \_\_\_\_\_

**2. MEDICIONES DE RUIDO**

Diagrama esquemático del aula: Dibujar como Anexo

Medidor del nivel de ruido: Modelo# \_\_\_\_\_

Método utilizado:  Promedio de una hora  
 Corto plazo: \_\_\_\_ promedio en segundos; # de muestras de tiempo \_\_\_\_

**Niveles de ruido ambiente (dBA,dBC) Aulas ocupadas y Aulas desocupadas**      **Niveles de voz del profesor (dBA): Aulas ocupadas**

Condiciones (redondee el número de condición)	1=desocupado, HVAC off 2=desocupado, HVAC on 3=ocupado, HVAC off 4=ocupado, HVAC on								Aula sin ADS <input type="checkbox"/> Hon <input type="checkbox"/> Hoff		Aula con ADS <input type="checkbox"/> Hon <input type="checkbox"/> Hoff					
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	Nivel	SNR	Nivel	SNR
<b>Ponderación:</b>	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	A	A	A
A*																
B																
C																
D																
E																
F																
<b>Nivel dB, Med</b>																

### 3. TIEMPO DE REVERBERACIÓN

**Medido:** Estimulo sonoro utilizado: \_\_\_\_\_

Frecuencia:		500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Localización de las medidas	A			
	B			
	C			
	D			
	Medio			
RT-60 Media Segundos				

RT-60 Media del aula: \_\_\_\_\_ segundos

**Estimado:**

Nota: Los programas de calculo de RT-60 también pueden ser utilizados para los siguientes medidas (ej., <http://www.sengpielaudio.com/calculator-RT60.htm>, <http://www.mcsquared.com/homerteng.htm>).

Volumen del aula (V)= \_\_\_\_\_ metro cúbico

Área suelo \_\_\_\_\_ x ABS. Coef. \_\_\_\_\_ = A Suelo \_\_\_\_\_  
 Área techo \_\_\_\_\_ x ABS. Coef. \_\_\_\_\_ = A Techo \_\_\_\_\_  
 Área pared lateral 1 \_\_\_\_\_ x ABS. Coef. \_\_\_\_\_ = A Lateral 1 \_\_\_\_\_  
 Área pared lateral 2 \_\_\_\_\_ x ABS. Coef. \_\_\_\_\_ = A Lateral 2 \_\_\_\_\_  
 Área pared fondo 1 \_\_\_\_\_ x ABS. Coef. \_\_\_\_\_ = A Fondo 1 \_\_\_\_\_  
 Área pared fondo 2 \_\_\_\_\_ x ABS. Coef. \_\_\_\_\_ = A Fondo 2 \_\_\_\_\_  
Total A \_\_\_\_\_

RT medio estimado en el aula= 0.161 x \_\_\_\_\_ (V) / \_\_\_\_\_ (A) = \_\_\_\_\_ segundos

Comentarios:

**4. DISTANCIA ESTIMADA CRÍTICA:** \_\_\_\_\_ mts

**Estándares acústicos recomendados para espacios básicos de aprendizaje < 10,000 ft<sup>3</sup> volumen (ANSI/ASA S12.60-2009, 2010):**  
Aulas permanentes: Nivel de ruido ambiente: 35dBA/55dBC; Tiempo de Reverberación: 6 seg  
Aulas portátiles: Nivel de ruido ambiente: 41dBA, [38dBA según 2013, 35dBA según 2017]  
 Tiempo de Reverberación: 5 seg

TABLA DE DISTANCIAS CRÍTICAS ESTIMADAS

Volumen Habitación (m)	Tiempo de reverberación (s)							
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
56.63	1.58	1.37	1.22	1.13	1.036	0.97	0.91	8.53
113.27	2.22	1.92	1.7	1.58	1.46	1.37	1.28	1.22
169.9	2.71	2.34	2.1	1.92	1.79	1.67	1.58	1.49
226.53	3.14	2.71	2.44	2.22	2.07	1.92	1.83	1.74
283.17	3.5	3	2.71	2.5	2.31	2.16	2.04	1.92
339.80	3.84	3.35	2.98	2.71	2.53	2.35	2.22	2.1
396.43	4.17	3.6	3.23	2.95	2.71	2.56	2.4	2.286
453.07	4.45	3.84	3.44	3.13	2.93	2.712	2.56	2.44
509.7	4.72	4.08	3.66	3.35	3.07	2.89	2.71	2.59
566.34	4.97	4.3	3.84	3.5	3.26	3.048	2.86	2.71
Distancia Crítica (m)								

<sup>b</sup>© Arthur Boothroyd