



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD ACÚSTICA EN LAS AULAS DE LAS  
UNIDADES EDUCATIVAS DEL MILENIO EN LA CIUDAD DE QUITO



AUTORES

NICOLÁS ALEJANDRO CAJAS BECERRA

EDISON ANDRÉS GALLEGOS TERÁN

AÑO

2017



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD ACÚSTICA EN LAS AULAS DE LAS  
UNIDADES EDUCATIVAS DEL MILENIO EN LA CIUDAD DE QUITO

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingenieros de Sonido y Acústica

Profesor guía

MSc. Jorge Páez Rodríguez

Autores

Nicolás Alejandro Cajas Becerra

Edison Andrés Gallegos Terán

Año

2017

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA**

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

---

Jorge Páez Rodríguez

Máster en Gestión y Evaluación de la Contaminación Acústica

C.I 1756773154

## **DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR**

“Declaro haber revisado este trabajo, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Miguel Ángel Chávez Avilés

MSc. Sustainable Building Engineering

C.I 1710724848



## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LOS ESTUDIANTES**

“Declaramos que este trabajo es original, de nuestra autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

---

Nicolás Alejandro Cajas Becerra  
C.I. 1718162108

---

Edison Andrés Gallegos Terán  
C.I. 1002820270

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero agradecemos a Dios por darnos la fuerza, la sabiduría y la paciencia para culminar esta etapa de nuestras vidas. A nuestros familiares y amigos quienes nos brindaron su apoyo y su ayuda en los momentos más difíciles para poder cumplir con este sueño. A todos los docentes, sobre todo a Jorge y María ya que, más que profesores han sido guías y amigos dentro de este trayecto final y en nuestra etapa universitaria.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo es dedicado a mis padres: Edwin y Mercedes, ustedes supieron darme el ejemplo de superación y humildad para seguir luchando hasta el final. A mis hermanos, hermanas y sobrinos, quienes me brindaron su apoyo incondicional en todo momento. A Lucía, su presencia me motivó hasta el último para finalizar esta gran etapa y a mis dos ángeles, que desde el cielo y con su amor están presentes en los buenos y malos momentos. Esto, es de ustedes.

***Nicolás C.***

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres, que han sido apoyo incondicional en mi desarrollo humano y profesional, a mis hermanos Daniela y Carlitos que son mi motivación para seguir superándome, a mis tíos y primos que siempre han estado apoyándome con sus consejos, a mis abuelos, por brindarme su sabiduría y a ti, por ser la mejor compañía en mis desvelos.

***Edison G.***

## RESUMEN

El presente trabajo evalúa la calidad acústica que existe en las aulas de las diferentes Unidades Educativas del Milenio ubicadas dentro del Distrito Metropolitano de Quito. Esta evaluación consiste en validar el método propuesto por Jan Radosz en su investigación titulada *Global Index of the Acoustic Quality of Classrooms* publicada en 2013, donde se explica que, a partir de la medición de seis parámetros fundamentales: tiempo de reverberación, inteligibilidad, relación señal – ruido, ruido de fondo, esfuerzo de habla y difusividad; se obtiene un índice global de calidad acústica, permitiendo calificar la calidad acústica en salas de clase. De esta forma, cada sala fue medida siguiendo el procedimiento descrito tanto en normativas como en recientes investigaciones que son requeridas para cada parámetro. Adicional a eso, se realizó un análisis de diferentes variables: ubicación geográfica, materiales de construcción, fuentes de ruido, etc., necesarios para poder identificar los diferentes problemas que pueden influir en cada uno de los parámetros, alterando la inteligibilidad de la palabra. Finalmente se presentan todos los resultados con su respectivo análisis específico y global, el cual, ofrece determinar los parámetros que alteran la calidad acústica de las Unidades Educativas evaluadas.

## **ABSTRACT**

The current paper evaluates the existent acoustic quality of several Millennium Educational Units classrooms located across the Metropolitan District of Quito. This evaluation is based on a validation of the Jan Radosz's method, which refers his research called Global Index of the Acoustic Quality of Classrooms, published on 2013, and where it is explained that, from measures of six fundamental parameters: reverberation time, speech intelligibility, signal to noise ratio, background noise, speech effort and sound strength distribution; the obtaining of these parameters allows the capability of evaluate the classroom's acoustic quality. By this method, every single classroom was measured by following the described procedure in standards and recent researches, which are required for every parameter. In addition, an analysis of different necessary variables was made (geographic position, construction materials, noise sources, etc.) to identify the influence of different problems in every single parameter described above, distorting speech intelligibility. Finally, all the results accomplished are presented with their respective analysis, global and specific, offering to determinate the responsible parameters of the distort of Educational Units' acoustic quality evaluated.

# ÍNDICE

1.	INTRODUCCION .....	1
1.1	Antecedentes .....	1
1.1.1	Alcance .....	3
1.1.2	Descripción del problema.....	4
1.1.3	Justificación.....	5
1.2	Objetivo General .....	6
1.3	Objetivos Específicos .....	6
2.	MARCO TEÓRICO.....	6
2.1	Conceptos generales .....	6
2.1.1	Modos propios de vibración .....	7
2.1.1.1	Modos Axiales .....	7
2.1.1.2	Modos Tangenciales .....	8
2.1.1.3	Modos Oblicuos.....	8
2.2	Diagrama de Bolt, Beranek y Newman.....	9
2.3	Conceptos fundamentales .....	9
2.3.1	Método “Índice global de calidad acústica en aulas”.....	9
2.3.2	Tiempo de Reverberación .....	11
2.3.2.1	Campo sonoro directo y reverberante .....	12
2.3.2.2	Valores recomendados.....	14
2.3.3	Inteligibilidad .....	14
2.3.3.1	Claridad .....	15
2.3.3.2	Relación del TR con la inteligibilidad de la palabra. ....	15
2.3.4	Ruido de Fondo .....	16
2.3.5	Relación Señal - Ruido .....	18
2.3.6	Esfuerzo del Habla .....	19
2.3.7	Difusividad .....	20

3. METODOLOGÍA .....	21
3.1 Análisis característico de los recintos .....	21
3.1.1 Colegio “Réplica Montúfar” .....	22
3.1.2 Colegio “Réplica 24 de Mayo” .....	25
3.1.3 Colegio Nacional Experimental “María Angélica Idrobo” .....	27
3.1.4 Unidad Educativa Municipal del Milenio “Bicentenario” .....	30
3.1.5 Materiales de construcción y mueblería al interior de las aulas ..	32
3.1.6 Dimensiones y cantidad de aulas .....	34
3.2 Muestreo .....	35
3.2.1 Fundamentos de muestreo .....	35
3.2.1.1 Población .....	35
3.2.1.2 Muestra .....	35
3.2.1.3 Cálculo del tamaño de la muestra .....	35
3.2.2 Cantidad de aulas .....	36
3.3 Mediciones .....	38
3.3.1 Tiempo de Reverberación .....	38
3.3.2 Inteligibilidad .....	39
3.3.3 Ruido de Fondo .....	40
3.3.4 Relación Señal - Ruido .....	40
3.3.5 Esfuerzo del Habla .....	41
3.3.6 Difusividad .....	42
3.4 Cálculos de índices .....	42
3.4.1 Tiempo de Reverberación .....	42
3.4.2 Inteligibilidad de la palabra .....	43
3.4.3 Ruido de Fondo .....	45
3.4.4 Relación Señal – Ruido .....	46
3.4.5 Esfuerzo de Habla .....	47
3.4.6 Difusividad .....	48
3.4.7 Índice Global de Calidad Acústica .....	49
4. Resultados .....	49
4.1 Tiempo de Reverberación .....	50



4.1.1	Relación entre el tiempo de reverberación, dimensiones de la sala y modos propios.....	56
4.2	Inteligibilidad .....	57
4.3	Ruido de Fondo.....	62
4.4	Relación Señal - Ruido .....	64
4.5	Esfuerzo del Habla.....	66
4.6	Difusividad.....	68
4.7	Valor de índice global de calidad acústica .....	72
4.8	Análisis General .....	74
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	77
5.1	Conclusiones.....	77
5.2	Recomendaciones .....	78
	REFERENCIAS .....	80
	ANEXOS .....	83

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 Antecedentes

La calidad acústica es particularmente importante en las salas de las escuelas. Donde los estudiantes, debido a su edad, deben recibir las mejores condiciones posibles para la transmisión del contenido verbal (Sato, Bradley, 2008).

Desde el año 2005 el gobierno de la República del Ecuador, en conjunto con 147 países suscribió la Declaración del Milenio, donde se establecen las Metas de Desarrollo del Milenio (MDG). En esta, uno de los aspectos a considerar es la educación, donde los niños y niñas del mundo finalicen la primaria de forma igualitaria eliminando la discriminación. Para que posteriormente tengan un fácil acceso a la secundaria (Ministerio de Educación de la República del Ecuador, 2005).

A partir de ese año, se han desarrollado diferentes proyectos a nivel nacional. Uno de los principales ha sido construir las Unidades Educativas del Milenio (UEM), en estas se podrán inscribir de manera igualitaria y así poder cumplir con uno de los principales pasos dentro de la vida académica.

La construcción de las diferentes UEM ha permitido la inclusión tanto de niños como de adolescentes. Sin embargo, estas construcciones no se han expuesto a pruebas donde se pueda verificar, analizar, evaluar y controlar los niveles de ruido que pueden existir en cada una de las aulas. Siendo uno de los problemas que más afecta para obtener la atención de los estudiantes al momento de recibir clases.

Uno de los principales problemas que afectan a los estudiantes es la ya mencionada pérdida de atención. Esto genera diferentes consecuencias tanto para profesores como alumnos, ya que, no permiten dar clases por la distracción de forma individual como grupal (Roy, 2016). Dicha consecuencia se da por varios factores; uno de ellos es de aspecto acústico. Debido a que, el tiempo de reverberación en las aulas es elevado lo cual la voz de profesor

pierde inteligibilidad impidiendo a los alumnos escuchar a partir de ciertas distancias con claridad. Estos factores también afectan a la salud del docente ya que necesita elevar su voz, afectando a sus cuerdas vocales (Hunter, Leishman, Bottalico, Graetzer, 2016).

Estos factores surgen a partir de la calidad de construcción de las aulas de cada uno de los establecimientos. En la mayoría de casos, los materiales de construcción no poseen características acústicas, ya sean absorbentes o difusivas. Lo cual imposibilita la comunicación generando problemas mencionados anteriormente.

Ciertas investigaciones, han permitido verificar los valores estándar de los parámetros acústicos que permiten generar un buen ambiente auditivo a nivel escolar. Con el fin de garantizar el aprendizaje del estudiante (Wróblewska, 2010).

Una de estas investigaciones, propone el uso del método del “índice global de calidad acústica en aulas” (Radosz, 2013). Dicho método permite evaluar la calidad acústica de las aulas basándose en índices parciales y sus valores. El método del índice se utilizó para evaluar la calidad acústica de los edificios eclesiásticos y todavía está siendo desarrollado (Engel, 2007; Kosala, 2011).

Por tal razón, se desarrolla una aplicación adicional dentro de las aulas de clase. Esta evaluación debe abarcar una serie de factores importantes: parámetros acústicos de la sala, ruido interno y externo, así como inteligibilidad y claridad del habla.

Estos parámetros han sido evaluados en otras investigaciones que han permitido identificar una metodología al momento de realizar en aulas escolares (Mikulski, Radosz, 2011). Sin embargo, no incluyen todos los parámetros acústicos relevantes, y la mayoría de ellos sólo proporcionan los valores de aislamiento requeridos de las particiones. El nivel de ruido de fondo (en salas vacías) y el tiempo de reverberación. Por tal razón se las incluye para la obtención de un valor global que permita evaluar la calidad por medio de una escala (Radosz, 2013).

### 1.1.1 Alcance

Dentro de los establecimientos educativos, es fundamental que las salas de clase cuenten con excelentes características acústicas. Puesto que, se requiere brindar un confort a nivel auditivo, evitando distintos problemas que afecten a la atención del alumno, ya que esto influye en su nivel académico. Es por esto que la investigación ofrece obtener resultados ante diferentes evaluaciones de parámetros. Los cuales podrán ser tomados como referencia para las UEM que están en construcción, evitando así, problemas a nivel constructivo como funcional.

El Distrito Metropolitano de Quito, posee cinco UEM, de las cuales se van a evaluar cuatro, bajo la respectiva metodología, estas son:

- Colegio “Réplica Montúfar”.
- Colegio “Réplica 24 de Mayo”.
- Colegio “Réplica Mejía”.
- Unidad Educativa Municipal del Milenio “Bicentenario”.
- Colegio Nacional Experimental “María Angélica Idrobo”.

El Colegio “Réplica Mejía” fue descartado debido al poco interés por parte de las autoridades de la institución para participar en este estudio. Esto se dio por la poca apertura de las autoridades al momento de explicar que la evaluación tenía fines académicos.

Además, esta evaluación ayuda a que las UEM que se encuentran en funcionamiento dentro del DMQ consideren someterse a estudios que permitan obtener los valores de calidad acústica. Si estos establecimientos por medio de dicho estudio, no consiguen los mejores resultados, sean partícipes a realizar adecuaciones, apoyando así la educación de calidad para los estudiantes de bajos recursos económicos. Así como proteger la salud de los mismos.

Para la evaluación de la calidad acústica de dichos establecimientos educativos, se considerarán los siguientes parámetros:

- Tiempo de Reverberación.

- Inteligibilidad.
- Ruido de fondo.
- Relación señal - ruido.
- Esfuerzo del habla.
- Fuerza del sonido en la distribución o difusividad.

Estos factores permitirán evaluar el “índice global de calidad acústica”. El cual, proporcionará el valor para determinar la calidad de las aulas de cada una de las UEM.

### **1.1.2 Descripción del problema**

En la actualidad, la educación ha revolucionado en el ámbito constructivo, brindando a los estudiantes una mejor infraestructura. Lo que permite que el estudiante se sienta cómodo teniendo un ambiente de trabajo propicio. Pero ¿cómo afectan estos materiales utilizados en la comunicación al momento de recibir clases?

Ecuador no tiene una legislación propia que se dedique al control de niveles de ruido en establecimientos educativos. Es por tal razón que la mayoría de estos se ven expuestos a diferentes problemas de ruido, lo cual puede generar en los estudiantes posibles problemas a nivel psicológico como pérdida de atención y físicos, que se puede presentar como pérdida auditiva.

Hoy en día existen investigaciones que explican los riesgos a la salud en los profesores que imparten clases en aulas con un deficiente tratamiento acústico tales como, pérdida de voz, problemas con las cuerdas vocales, etc. (Hunter, Leishman, Bottalico, Graetzer, 2016). De igual manera, si no se tiene una buena difusividad del sonido, los estudiantes no enfocan su atención en las clases que se están impartiendo (Radosz, 2013). Es por esto que tomamos como referencia a las Unidades Educativas del Milenio, ubicadas en el Distrito Metropolitano de Quito. Donde los procesos constructivos realizados en las mismas, son de última generación y por tal razón, estos deberían garantizar la comodidad para un eficiente aprendizaje del estudiante.

Conforme han pasado los años, se encuentran en funcionamiento 64 Unidades

Educativas y en proceso de construcción 57 establecimientos, con un total de 121 Unidades Educativas del Milenio. Ubicadas en cada una de las 24 provincias que conforman la República del Ecuador (Ministerio de Educación de la República del Ecuador, 2005).

El DMQ, cuenta con cinco UEM en funcionamiento, ubicadas en distintas parroquias. En ellas, se cuenta con estudiantes que, con bajos recursos económicos acuden para completar tanto la primaria como la secundaria. Con un total de 5700 estudiantes (1140 por UEM) es la segunda ciudad con mayor cantidad de establecimientos a nivel nacional.

### **1.1.3 Justificación**

La calidad acústica de las aulas indica si una sala cumple con los requisitos aplicables, tales como:

- Inteligibilidad del habla adecuada.
- Bajo nivel de ruido de fondo.
- Poca necesidad de hablar en voz alta.
- Comodidad de enseñanza y aprendizaje.

La importancia de la evaluación de la calidad acústica en las aulas de las escuelas de nuestro país, sobre todo las Unidades Educativas del Milenio, es completamente relevante ya que, dichas escuelas están revolucionando la educación en el Ecuador.

Nuestro fin es poder tener resultados tangibles acerca de las características acústicas de las UEM. Con ello se puede realizar una evaluación de la calidad acústica en aulas y que, al cumplirse con los más altos niveles, se puede tomar en cuenta para futuras construcciones o modificaciones en establecimientos académicos. Caso contrario se puede analizar posibles soluciones las cuales permitan tanto a los estudiantes como a los docentes, una educación de calidad.

## 1.2 Objetivo General

Evaluar la calidad acústica de las aulas pertenecientes a las Unidades Educativas del Milenio del Distrito Metropolitano de Quito, mediante la utilización de un “índice global”.

## 1.3 Objetivos Específicos

- Realizar a partir de una revisión bibliográfica, un análisis crítico de los factores que influyen en la calidad acústica dentro de las aulas de clase.
- Calcular el “índice global de calidad acústica” por medio de mediciones *in situ* de los factores: tiempo de reverberación, STI, ruido de fondo, esfuerzo en el habla, relación señal - ruido y difusividad.
- Analizar los resultados de manera general por medio de la escala de evaluación del “índice global de calidad acústica en aulas”, para cada uno de los recintos, con el fin de poder determinar cuales ofrecen mejor calidad acústica.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Conceptos generales

Dentro del estudio de la acústica se deben tomar en cuenta parámetros de propagación oscilatorios. Mismos que no pueden ser detectados o cuantificados mediante el uso de un criterio geométrico o estadístico; y que representan un riesgo en cuanto a alteraciones y defectos en el diseño acústico de un recinto. La presencia de ondas estacionarias, así como su distribución dentro de un recinto dado, supondrá una disminución considerable de la calidad acústica de la misma.

Es conocido, gracias al estudio de las vibraciones. Que cualquier elemento próximo a vibrar, al ser separado de su posición de reposo o equilibrio, y es soltado. Éste vibrará de formas determinadas y que corresponden con los modos propios de vibración, tal y como sucede al golpear un extremo de un diapasón. En salas o recintos que hacen la función de canal de transmisión de vibraciones acústicos, se producen estos modos naturales de vibración, propios y dependientes de la geometría; materiales utilizados para la construcción y

elementos presentes distribuidos dentro de la misma.

### 2.1.1 Modos propios de vibración

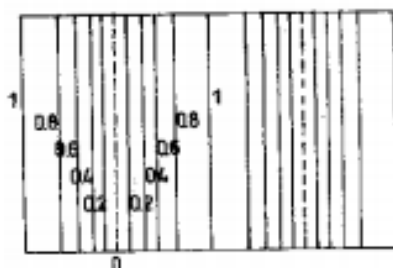
Todo recinto, independientemente de su forma, posee frecuencias propias de vibración únicas y que responden a la presencia de ondas estacionarias dentro de los mismos. Dichas frecuencias tienen su explicación en que una onda de carácter acústico, después de haber realizado un recorrido complejo a través de una sala, vuelve a su punto de partida. Este es el concepto fundamental de onda estacionaria, debido a que nunca progresa, sino que se retroalimenta y, por consiguiente, no existe propagación de energía por fuera del recorrido dentro del recinto.

Este fenómeno origina una distribución uniforme de la presión acústica en la trayectoria de la onda estacionaria, puesto que en él existirán puntos con presión sonora casi nula y en todo instante de tiempo, mientras que en otros será todo lo contrario.

Cada una de las frecuencias de las potenciales ondas estacionarias formadas dentro de un recinto le corresponde una frecuencia característica de un modo propio de vibración de la sala.

#### 2.1.1.1 Modos Axiales

Este tipo de modos se produce cuando la dirección de propagación se da de manera paralela al eje, esto quiere decir que la onda estacionaria se encuentra o produce en dos planos que se encuentran de manera paralela.



*Figura 1.* Isobarras formadas por el modo axial.

Tomado de Llinares, J., 1991, p. 163.



### 2.1.1.2 Modos Tangenciales

Dentro de estos modos tenemos a dos componentes que forma al vector siendo el tercero igual a 0. Esto se debe a que la dirección de propagación que forman las ondas, permanece de una manera paralela a uno de los cerramientos del recinto.

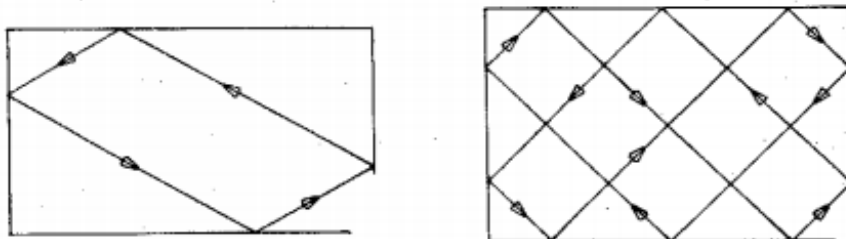


Figura 2. Ondas estacionarias formadas en un recinto rectangular  
Tomado de Llinares, J., 1991, p. 163.

### 2.1.1.3 Modos Oblicuos

Este tipo de modos no es paralelo a ninguno de los cerramientos, hablando en términos de la propagación de la onda. De esta manera obtenemos valores no nulos dentro de los ejes X, Y, Z.

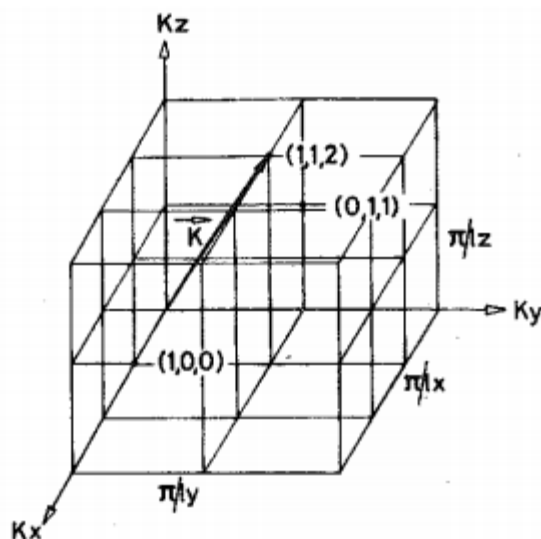
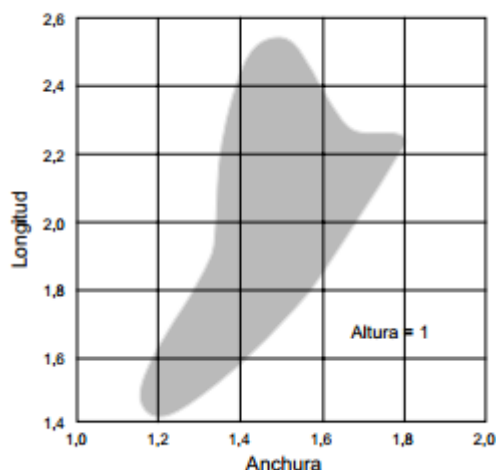


Figura 3. Frecuencias propias de un vector de onda K  
Tomado de Llinares, J., 1991, p. 164.

## 2.2 Diagrama de Bolt, Beranek y Newman

Basándonos en la teoría de los modos propios, sabemos que existirán puntos en la sala, donde tendremos valores máximos y mínimos de presión sonora. Lo cual, dependerá de los modos en sí. Pero, existe un punto o, mejor dicho, una frecuencia a partir de la cual los modos propios se dejan de percibir. Esto se debe a que existe una gran cantidad de densidad de modos, lo que hace que tengamos concentraciones más discretas de energía.

Para esto; Bolt, Beranek & Newman, plantearon un gráfico que ayuda a relacionar bajo un factor, en este caso la altura, las diferentes dimensiones recomendadas en las cuales la sala puede tener una buena respuesta modal, indicándonos la zona sombreada los valores más óptimos.



*Figura 4.* Diagrama de Bolt, Beranek & Newman

Tomado de Carrión, A., 1998, p. 58.

## 2.3 Conceptos fundamentales

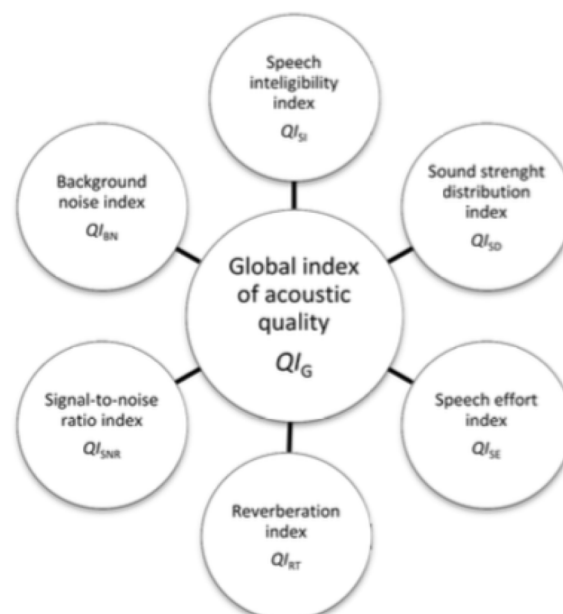
### 2.3.1 Método “Índice global de calidad acústica en aulas”.

La calidad acústica de un aula es un término que se propone para describir las propiedades acústicas que contribuyen a una impresión subjetiva recibida por un ser humano. Como la inteligibilidad del habla, el ruido externo o el esfuerzo vocal.

El índice global de calidad acústica es determinado por el conjunto de parámetros que influyen en la percepción auditiva de las personas y que a nivel académico contribuyen a la concentración del estudiante como al esfuerzo del docente. En salas de clase, la calidad acústica es un indicador que se debe cumplir con ciertos requisitos como son: la correcta inteligibilidad de la palabra, bajos niveles de ruido de fondo, el bajo esfuerzo vocal y el confort tanto para enseñar como para aprender (Radosz, 2013).

Este índice, se obtiene a partir del cálculo de seis parámetros que, por medio de cada uno de sus índices, permiten analizar las diferentes características acústicas de las salas. Estos son:

- Índice de Tiempo de Reverberación.
- Índice de la Inteligibilidad de la Palabra.
- Índice de Ruido de Fondo.
- Índice de Nivel Señal-Ruido.
- Índice de Esfuerzo del Habla.
- Índice de la Distribución de la Fuerza Sonora o Difusividad.



*Figura 5.* Índices acústicos que en conjunto conforman el Índice de calidad acústica.

Tomado de Radosz, J., 2013, p. 2.

Debido a que algunos de los parámetros no son tan influyentes sobre otros, el autor de este método Jan Radosz, pondera por medio de valores tomados de pruebas experimentales estos índices que permiten la obtención de un solo valor. Dichos valores de ponderación se asignan de tal forma que se mantenga la importancia para una sala de clases.

Tabla 1.

*Valores de ponderación para cada índice parcial.*

$\eta_{RT}$ - the reverberation index weight	0.8
$\eta_{SI}$ - the speech intelligibility index weight	1
$\eta_{SE}$ - the speech effort index weight	0.3
$\eta_{SD}$ - the sound strength distribution index weight	0.5
$\eta_{BN}$ - the background noise index weight	1
$\eta_{SNR}$ - the signal-to-noise ratio weight	0.5

Tomado de Radosz, J., 2013, p. 3.

### 2.3.2 Tiempo de Reverberación

Técnicamente el tiempo de reverberación está definido como el tiempo que el sonido demora en bajar 60 dB por debajo de su nivel inicial. Se ha elegido 60 dB porque con esa caída se produce la sensación de que el sonido se ha extinguido por completo (Miyara, 2003).

El tiempo de reverberación depende de la absorción de las superficies que posee la sala. De esta manera, si las superficies son muy reflectantes se obtendrá un  $T_{60}$  elevado, ya que se requerirán más reflexiones para que el sonido se atenúe. A diferencia de las superficies absorbentes donde el  $T_{60}$  será menor porque en cada reflexión se absorberá una porción del sonido emitido.

Para el cálculo del tiempo de reverberación, se procede a utilizar generalmente la ecuación de Sabine:

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{S_T \alpha} \quad [s] \quad \text{(Ecuación 1)}$$

De los cuales:

- V: Corresponde al Volumen en  $m^3$  del recinto.
- $S_T$ : Superficie total del interior del recinto en  $m^2$ .
- $\alpha$ : Definido como el coeficiente medio de absorción del recinto.

Cabe recalcar que la ecuación de Sabine, no toma en cuenta diferentes factores que influyen en el valor de la absorción como lo son:

- Geometría de la sala.
- Posición del escucha.
- Temperatura.
- Humedad.

Pero es una de las fórmulas de referencia con las cuales podemos obtener una estimación del tiempo de reverberación. Miyara (2003) afirma:

“La palabra requiere menos tiempos de reverberación que la música, debido a que la parte más significativa de la palabra son las consonantes, que son a la vez débiles y más cortas que las vocales. En consecuencia, con el tiempo de reverberación alto de las vocales se prologan demasiado, enmascarando a las consonantes que les siguen, lo que reduce la inteligibilidad de la palabra. La música, por el contrario, se beneficia con un tiempo de reverberación considerable, ya que éste permite empalmar mejor los sonidos y disimular pequeñas imperfecciones de ejecución, a la vez que aporta una espacialidad que es deseable en la música” (p.49).

Por lo tanto, la dicción de las palabras, toma un papel importante en lo que se refiere a la relación entre el tiempo de reverberación y la inteligibilidad.

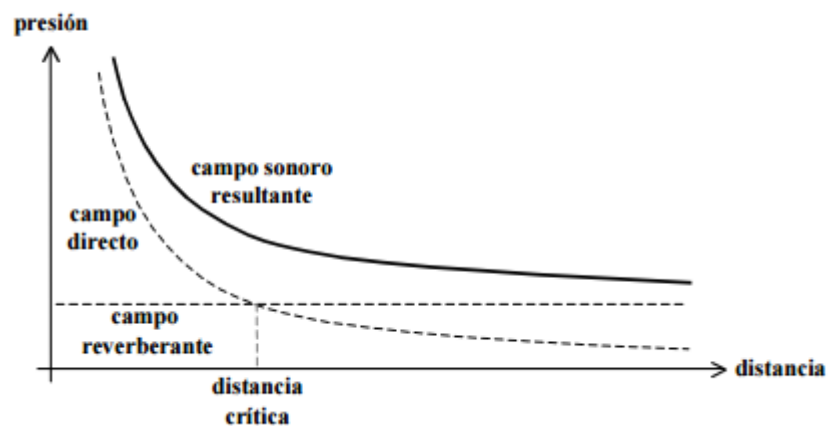
### **2.3.2.1 Campo sonoro directo y reverberante**

Un elemento influyente dentro de la acústica de la sala es el campo sonoro. Miyara (2003) afirma: “Por campo sonoro se entiende el valor que adquiere la presión sonora en cada punto del espacio” (p.50). Este denominado campo sonoro procede a dividirse en dos componentes que son el campo directo y el

campo reverberante.

El campo directo es la zona alrededor de la fuente donde el sonido no ha experimentado ninguna reflexión sino, disminuye a medida que se aumenta la distancia. Para ser exactos, cuando la distancia se duplica, el nivel decae a razón de 6 dB. Como ejemplo tenemos una fuente que a 1 metro nos entrega un NPS de 80 dB, si duplicamos la distancia, tendremos 74 dB (a 2 metros), y si la volvemos a duplicar, nos brindara un valor de 68 dB (a 4 metros).

Por otro lado, el campo reverberante, incluye la zona donde el sonido ya ha interactuado con las superficies, esto vendría a darse luego de la primera reflexión. Esta zona es constante, con esto nos referimos a que la distribución del sonido es prácticamente uniforme, esto se debe a que la gran cantidad de reflexiones que experimenta el sonido, se superponen entre ellas.



*Figura 6.* Campo directo, distancia crítica, campo reverberante.

Tomado de Miyara, F., 2003, p. 51.

Podemos observar en la figura N° 6, el comportamiento del nivel de presión sonora dentro de las componentes del campo sonoro. También tenemos otro elemento que es la distancia crítica. Esta se define como el punto o límite donde el campo directo y reverberante son iguales. Si la distancia es menor a la distancia crítica, se encuentra en el campo directo y, si es mayor, corresponde al campo reverberante.

### 2.3.2.2 Valores recomendados

Cuando se desea obtener un valor de tiempo de reverberación, uno de los criterios utilizados para una sala o recinto, es determinar un valor medio entre los valores obtenidos para las frecuencias de 500 Hz y 1000 Hz. Un valor adecuado de para el tiempo de reverberación depende de la actividad que se va a realizar en dicho recinto y del volumen del mismo. Carrión en su libro “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” (1998), nos brinda la siguiente tabla como referencia de valores de tiempo de reverberación dependiendo el uso, considerando la sala ocupada.

Tabla 2.

*Valores de TR dependiendo el uso.*

TIPO DE SALA	RT <sub>mid</sub> , SALA OCUPADA (EN S)
Sala de conferencias	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 sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Tomado de Carrión, A., 1998, p. 64.

### 2.3.3 Inteligibilidad

La inteligibilidad de la palabra es definida como la proporción del diálogo o mensaje que es comprendida por un escucha. A su vez, la inteligibilidad verbal se cuantifica, por lo general, como el tanto por ciento del mensaje que se entiende de manera correcta (UNE EN-ISO 9921, 2003).

La voz humana se encuentra en la capacidad de producir sonidos dentro del rango de 100 Hz a 10 kHz, pero dentro del rango de 200 Hz a 6 kHz se encuentra la información verbal. En el caso de la fonética, el contenido frecuencial de las vocales es mayor en bajas frecuencias. Al contrario de lo que

sucede con las consonantes, donde el contenido frecuencial de estas, es más rico en altas frecuencias.

Tomando en cuenta estas acotaciones y, sabiendo que la inteligibilidad tiene una gran relación con la apreciación de las altas frecuencias, podemos decir que las consonantes determinarán la correcta comprensión del mensaje.

### 2.3.3.1 Claridad

La claridad de la palabra ( $C_{50}$ ) está definida como la relación o cociente entre la energía sonora que llega de manera temprana al oído, dentro de los primeros 50 ms, y la energía que llega pasados los 50 ms. Su cálculo se maneja por bandas de frecuencias y corresponde desde los 125 Hz hasta los 4 kHz (Carrión, 1998).

El valor que más representa dentro de la claridad de la palabra se denomina *speech average* y corresponde a una media ponderada entre los valores de  $C_{50}$  obtenidos en las bandas de 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz. Donde respectivamente sus factores de ponderación son del 15, 25, 35 y 25 por ciento.

$$\textit{Speech average} (C_{50}) = 0.15C_{50}(500 \text{ Hz}) + 0.25C_{50}(1 \text{ kHz}) + 0.35C_{50}(2 \text{ kHz}) + 0.25C_{50}(4 \text{ kHz}) \quad (\text{Ecuación 2})$$

El valor que se recomienda para *speech average* ( $C_{50}$ ) que corresponde a cada uno de los puntos dentro de una sala ocupada debe cumplir con la siguiente condición:

$$\textit{Speech average} (C_{50}) > 2 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Mientras el valor sea mayor a la condición, la inteligibilidad dentro del recinto, al igual que la sonoridad, serán mejores dentro de los puntos considerados.

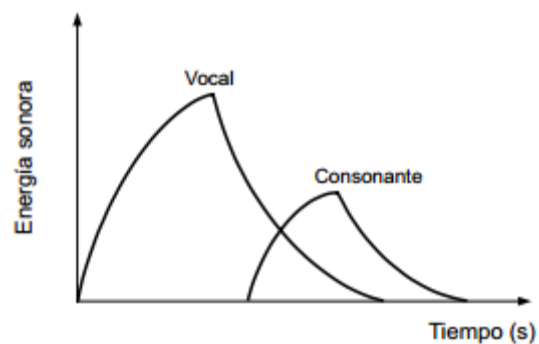
### 2.3.3.2 Relación del TR con la inteligibilidad de la palabra.

Como habíamos observado anteriormente, las vocales poseen un nivel de presión sonora y una duración mayor que las consonantes. También como se explicaba con anterioridad, las vocales poseen mayor contenido frecuencial en



bajas frecuencias a diferencia de las consonantes que presentan un contenido frecuencial más rico en altas frecuencias.

La simultaneidad temporal de la vocal y de la consonante con sus correspondientes niveles, así como las características espectrales de ambos sonidos, son las causantes del enmascaramiento parcial o total de la consonante, producido por la vocal. Un tono de baja frecuencia y nivel elevado enmascara otro tono de frecuencia más elevada y nivel inferior (Carrión, 1998).



*Figura 7.* Energía sonora que corresponde a la emisión de una vocal y a continuación una consonante y su comportamiento temporal.

Tomado de Carrión, A., 1998, p. 70.

#### **2.3.4 Ruido de Fondo**

Este parámetro es considerado como uno de los principales al momento de evaluar las condiciones acústicas de una sala de clase. Esto se debe a que, de no ser controlado, puede ocasionar una notable pérdida de comprensión del mensaje dentro del aula, disminuyendo el confort acústico.

Se puede definir como la señal acústica (representada en dB) procedente del exterior al recinto a ser evaluado: conversaciones, tráfico vehicular o aéreo, construcciones cercanas, etc. Además, pueden ser ruidos internos que interfieran en la comunicación, evitando la comprensión del mensaje dentro de dicho recinto. Dentro de una sala de clase puede darse por medio de la ventilación a través de sistemas de aire acondicionado, tuberías o dispositivos electrónicos que generen ruido excesivo como proyectores o computadoras.

Para el ser humano, existen tres maneras en las que el ruido puede afectar la

percepción de la palabra hablada: por alteración de espectro; por enmascaramiento; y por confusión de patrones temporales (Miyara, 2003).

Dentro de una sala de clase, tanto el alumno como el profesor, pueden presentar dificultades para comunicarse por el enmascaramiento en el mensaje, siendo este total o parcial. El enmascaramiento total, se presenta cuando la señal hablada se pierde por completo debido a que la señal acústica externa posee un mayor nivel. Como ejemplo, dentro de una sala de clase, la lluvia enmascara por completo la voz del profesor al momento de dar alguna explicación.

Por otro lado, el enmascaramiento parcial, se da cuando la señal externa no es mayor, pero altera el mensaje, dificultando la inteligibilidad. En muchos casos, enmascara los sonidos más débiles como son las consonantes. Por ejemplo, si se confunde la “s” por la “j” en la palabra “casa”, se puede entender la palabra “caja”, cambiando el sentido del mensaje (Miyara, 2003).

Para el correcto análisis del nivel de ruido de fondo, se recurre a las curvas NC (*Noise Criteria*). Estas, establecen el valor máximo recomendado para distintos recintos que, dependiendo de la sensibilidad auditiva del oído humano, presenta variaciones de nivel en distintas frecuencias.

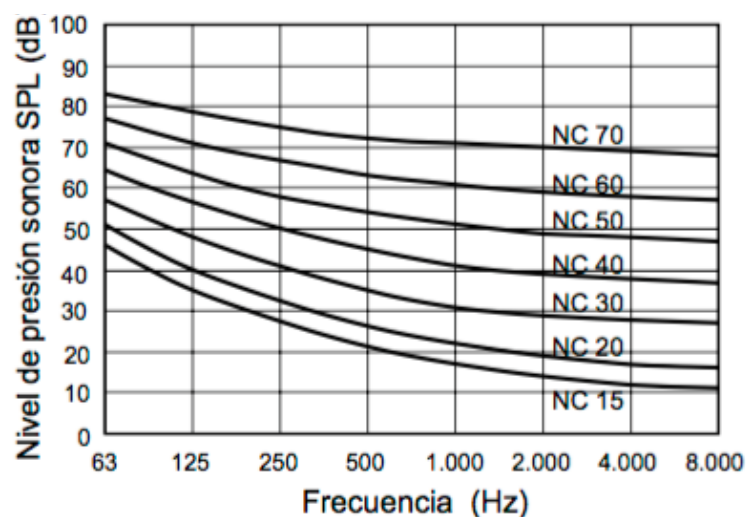


Figura 8. Curvas NC considerando el NPS dentro del espectro de frecuencias.

Tomado de Carrión, A., 1998, p. 42.

Para los diferentes recintos, existe una curva NC de referencia, la cual representa un rango de nivel en dBA para el nivel de ruido de fondo apropiado.

Tabla 3.

*Valores recomendados para recintos en dBA considerando su curva NC.*

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

Tomado de Carrión, A., 1998, p. 43.

### 2.3.5 Relación Señal - Ruido

La relación señal - ruido (SNR o S/N) se define como la proporción que existe entre una señal de referencia y el ruido de fondo. Siendo representado en dB pero que en diferentes aplicaciones puede ser medido en voltios y convertido en dB para determinar las características de componentes acústicos.

Para una sala de clase, la relación señal - ruido, se considera como la diferencia existente entre el ruido de fondo y la señal emitida por la voz del profesor. Esto permite comprender si existe un amplio rango donde la señal del docente, en los momentos de enseñanza (durante clases), no puede llegar a ser enmascarada por ruidos externos. (Radosz, 2013).

El valor SNR óptimo para garantizar la recepción adecuada del contenido dentro de clase no debe ser inferior a 15 dB (Sato, Bradley, 2008). Este parámetro tiene un impacto significativo al momento de transmitir el mensaje y comprensión del mismo, ya que, para valores bajos, evita prácticamente la

comunicación. Sin embargo, el valor SNR, también dependerá del profesor, es decir, su tono de voz (nivel de referencia) (Radosz, 2013).

### 2.3.6 Esfuerzo del Habla

El nivel de la señal verbal depende del esfuerzo vocal del hablante. En el caso de sala de clase, se estudia el esfuerzo vocal del profesor, que es quien transmite el contenido hacia los estudiantes.

Dicho parámetro se expresa mediante el nivel de presión sonora ponderado A equivalente, medido a 1 m, frente a la boca. Este valor, puede variar por el nivel de ruido ambiental, la posición que ocupa el oyente incluso si existe el uso de protectores auditivos (UNE EN-ISO 9921, 2003). Sin embargo, al hablar del esfuerzo vocal en aulas, este valor depende de las condiciones acústicas tanto del recinto como el control que exista dentro de clase por parte del docente.

Para el correcto análisis del nivel de dicho valor, se toma en cuenta la referencia dada por la norma UNE EN-ISO 9921, 2003, anexo A: Características del hablante y del oyente. En dicha tabla se califica un rango de niveles de presión sonora con ponderación A, determinando si el esfuerzo vocal es muy alto o puede ir bajando a un nivel relajado.

Tabla 4.

*Relación entre el esfuerzo vocal y el nivel de presión sonora con ponderación A ( $L_{Aeq}$ ) a 1m.*

<b>Esfuerzo vocal</b>	$L_{S,A, 1 m}$ dB
Muy alto	78
Alto	72
Elevado	66
Normal	60
Relajado	54

Tomado de UNE EN-ISO 9921, anexo A, 2003.

Dentro de las características que influyen para el aumento o disminución de esfuerzo, está claro que las malas condiciones acústicas en las aulas influyen negativamente en la calidad de la comunicación del habla y aumenta el esfuerzo vocal de los profesores. Estudios demuestran que la calidad del ambiente interior afecta el uso de la voz y posiblemente conduce a problemas de salud con pliegues vocales (Chmelík, Rychtáriková, 2016). En casos generales, estudios se refieren a que los profesores son el segundo grupo social más grande que sufren de fatiga laríngea crónica (Ratala, 2015).

Las aulas con malas propiedades acústicas reducen el rendimiento de los estudiantes y hacen que el maestro sufra de fatiga. Investigaciones muestran que el porcentaje de tiempo durante el día de trabajo para el que los profesores hablan es en promedio 21% (13% - 31%). Este valor se compara con los trabajadores de oficina que hablan el 7% de su día de trabajo (Durup, Shield, Dance, Sullivan, Gomez-Augustina, 2015).

Por otro lado, los niveles de esfuerzo vocal no están directamente relacionados con los niveles de ruido de fondo, sino con la percepción individual (en este caso estudiante) que puede tener sobre el ruido. Esta percepción es la que determina qué tan alto o bajo es el tono de voz emitido (Lindstrorn, 2011).

### **2.3.7 Difusividad**

Al hablar de difusividad, nos referimos al campo sonoro difuso presente en una sala o recinto. Carrillo (2011) afirma: “Un campo sonoro difuso es la suma infinita de todas las ondas que vienen de direcciones uniformemente distribuidas del campo acústico (energía acústica)” (p.21).

A su vez el campo difuso, se distribuye por diversos puntos dentro del recinto o sala dentro de la zona del campo lejano o campo reverberante. Para la obtención de la difusividad se toman en cuenta varios factores que favorecen una gran cantidad de modos normales, entre los cuales se encuentran:

- Tamaño.
- Geometría del recinto.

- Propiedades de las superficies.
- Posición de fuente.
- Frecuencia a utilizar.
- Elementos difusores presentes.

Dentro del campo difuso nos encontramos con la frecuencia de Schroeder, que será la cual limita el punto donde la región modal pasa a convertirse en campo sonoro difuso.

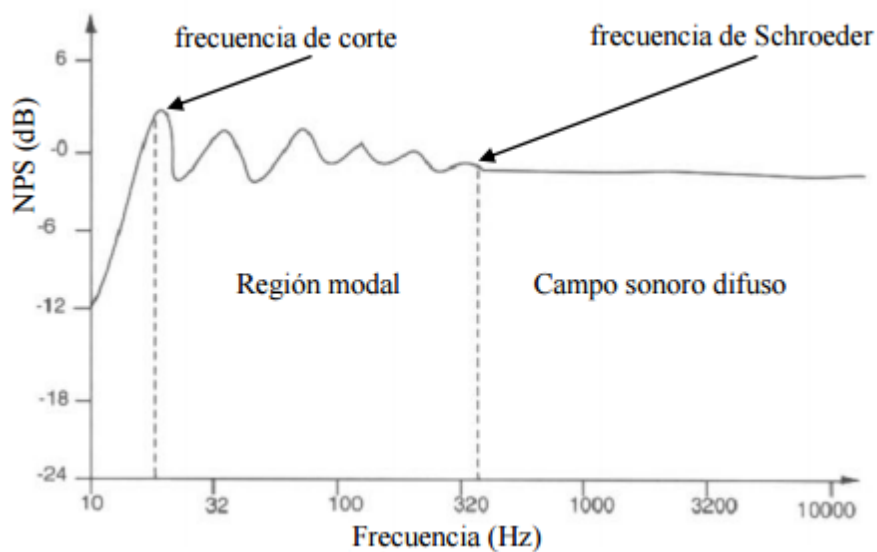


Figura 9. Respuesta en frecuencia de un recinto.

Tomado de Carrión, A., 1998, p. 63.

El campo sonoro difuso está conformado por una cantidad de modos propios que han sido traslapados, dando como resultado una respuesta en frecuencia plana. Para poder conocer el comportamiento de la onda en el campo difuso, se puede hacer uso de la teoría estadística.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Análisis característico de los recintos

Previo a realizar la evaluación en las diferentes Unidades Educativas, es necesario, hacer un análisis identificando diferentes variables como:

- Ubicación geográfica.
- Tiempo de funcionamiento.
- Número de aulas (por escuela).
- Cantidad de estudiantes.
- Dimensiones de las aulas.
- Cercanía con vías de alto congestionamiento vehicular o actividades constructivas.
- Materiales de las diferentes aulas a evaluar.

Para ello, se conversó con las distintas autoridades que nos permitieron el acceso a las instituciones.

### 3.1.1 Colegio “Réplica Montúfar”.



*Figura 10.* Entrada principal del Colegio “Réplica Montúfar”.

Ubicada al noroccidente del Distrito Metropolitano de Quito, en el barrio Bicentenario, es una de las últimas UEM en construir dentro de la ciudad, como a nivel nacional. Aunque la obra no está entregada, esta ya se encuentra en funcionamiento cerca de 3 años, cuenta con un total de 24 aulas de clases, las cuales se distribuye para educación inicial, primaria y bachillerato.



*Figura 11.* Ubicación geográfica del Colegio “Réplica Montúfar”.

Adaptado de Google Maps (s.f.)

Esta institución se maneja en horario matutino; de 7:30 a 12:50, y en vespertino; de 13:00 a 18:00, con un aproximado de 30 a 40 estudiantes por aula siendo un total de 1500 estudiantes en todos los horarios.

Esa institución cuenta con dos bloques principales de dos pisos en los que se encuentran las 24 aulas, una biblioteca, dos bloques de un piso para laboratorios y oficinas; un comedor y canchas para los sectores de recreación.

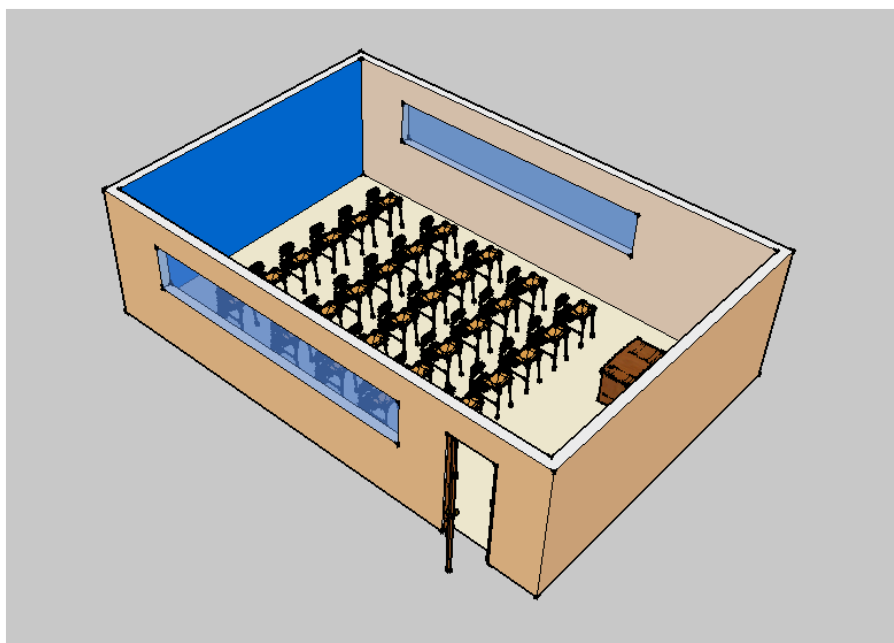
En general, los materiales que conforman la estructura de cada una son los mismos. De igual forma, las dimensiones de todas las aulas de la institución también son las mismas, siendo las siguientes:



Tabla 5.

*Dimensiones de las aulas pertenecientes al Colegio "Réplica Montúfar".*

Alto	3 m
Largo	10 m
Ancho	6,6 m
Superficie total	231,6 m <sup>2</sup>
Volúmen	198 m <sup>3</sup>



*Figura 12. Imagen en 3D de una sala de clase de la UEM "Réplica Montúfar".*

Este establecimiento se encuentra dentro de una nueva zona urbana, en la que se realizan construcciones para zonas residenciales, lo cual, está expuesta a ruido tráfico vehicular pesado (camiones, volquetas, excavadoras, etc.). Sin embargo, al encontrarse en un lugar alejado de la ciudad, no está expuesto a otros ruidos que pueden afectar a largo plazo en el confort acústico de la misma.

### 3.1.2 Colegio “Réplica 24 de Mayo”.



Figura 13. Entrada principal del Colegio “Réplica 24 de Mayo”.

Situada al suroccidente de la ciudad, en el barrio Biloxi, esta Unidad Educativa es una de las primeras UEM en inaugurarse dentro de la ciudad. Funcionando desde el 2014, este establecimiento, forma parte de las tres réplicas de los colegios más populares de la ciudad de Quito, los cuales fueron creados con el fin de evitar la afluencia de estudiantes de distintas zonas de la ciudad que deseaban inscribirse dentro de estos colegios.

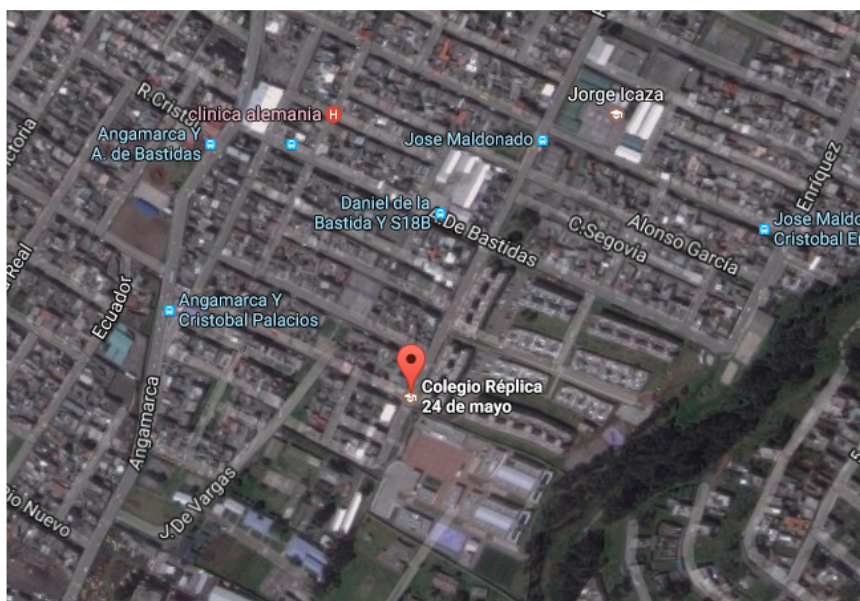


Figura 14. Ubicación geográfica del Colegio “Réplica 24 de Mayo”.

Adaptado de Google Maps (s.f.)

Esta Unidad Educativa cuenta con dos bloques principales de dos pisos en los que se encuentran las 24 aulas, similar al Colegio “Réplica Montúfar”; una biblioteca; un sector con 6 aulas hechas con materiales prefabricados, dos

bloques de un piso para laboratorios y oficinas; un comedor, y canchas para los sectores de recreación.

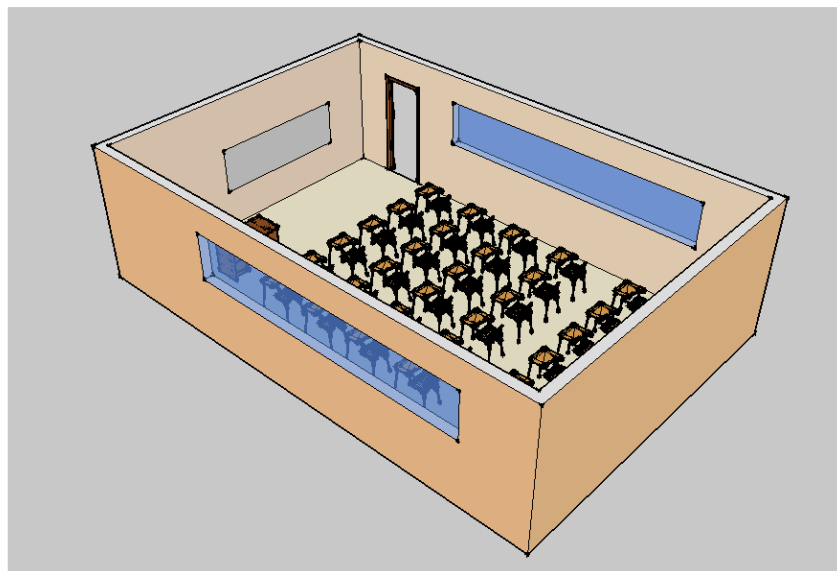
Esta institución se maneja en horario matutino de 7:30 a 12:50, y en vespertino de 13:00 a 18:00, con un aproximado de 30 a 40 estudiantes por aula siendo un total de 2100 estudiantes en todos los horarios.

Tanto el Colegio “Réplica 24 de Mayo” como “Réplica Montúfar” y “Réplica Mejía”, son construcciones nuevas realizadas por contrataciones del estado. Todas sus aulas poseen las mismas dimensiones. En general, los materiales son los mismos en cada una, pero hablando de características arquitectónicas las aulas, este colegio tienen:

Tabla 6.

*Dimensiones de las aulas pertenecientes al Colegio “Réplica 24 de Mayo”.*

Alto	3 m
Largo	10 m
Ancho	6,6 m
Superficie total	231,6 m <sup>2</sup>
Volúmen	198 m <sup>3</sup>



*Figura 15.* Imagen en 3D de una sala de clase de la UEM “Réplica 24 de Mayo”.

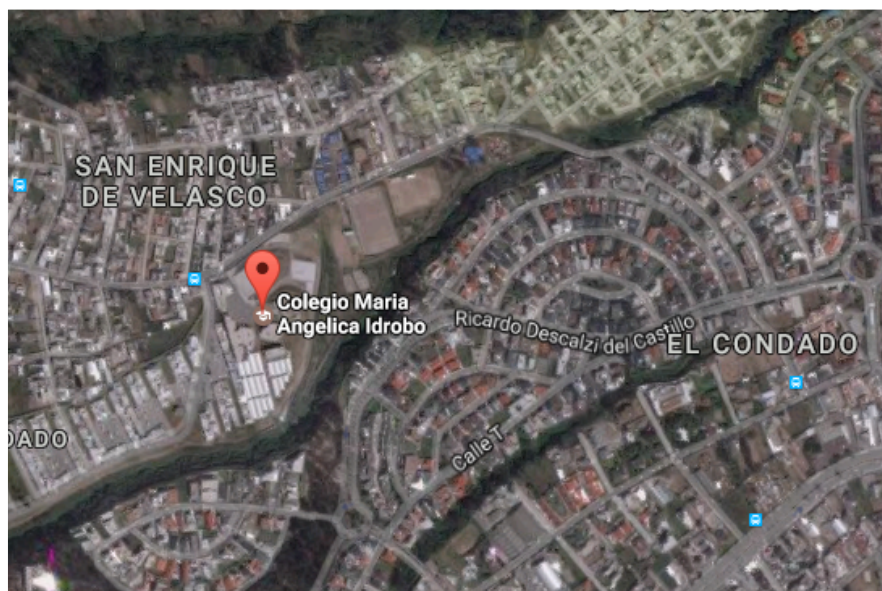
### **3.1.3 Unidad Educativa Experimental “María Angélica Idrobo”.**



*Figura 16.* Entrada principal de la Unidad Educativa Experimental “María Angélica Idrobo”.

Esta Unidad Educativa, se sitúa al noroccidente del DMQ, en el barrio San Enrique de Velasco, en la calle Yanacona, una de las principales vías que conecta este barrio con la avenida Antonio José de Sucre. Este establecimiento fue inaugurado hace aproximadamente 7 años, aunque la UEM es una de las populares de la urbe, esta no contaba con una infraestructura propia. Pero,

desde el 2008 se restableció la construcción en este sector por medio de recursos gubernamentales, siendo parte de las UEM.



*Figura 17.* Ubicación geográfica de la Unidad Educativa Experimental “María Angélica Idrobo”.

Adaptado de Google Maps (s.f.)

Cuenta con dos bloques principales de dos pisos en los que se encuentran las 50 aulas, una biblioteca, un sector con 12 aulas hechas con materiales prefabricados, dos bloques secundarios de dos pisos para laboratorios y oficinas; un comedor y canchas para los sectores de recreación.

Se maneja en horario matutino de 7:30 a 12:50, y en vespertino de 13:00 a 18:00, con un aproximado de 20 a 30 estudiantes por aula siendo un total de 3100 estudiantes en todos los horarios.

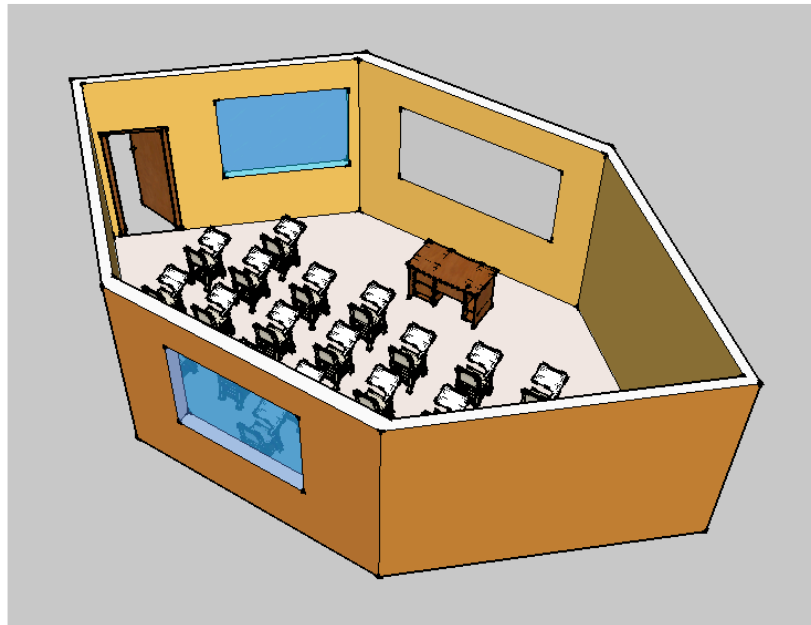
En general, los materiales que conforman la estructura de cada una son los mismos. Pero lo que es importante destacar, es que tiene forma hexagonal, con ventanas en dos paredes y ya que mantienen las mismas características en todos los bloques, sus dimensiones son:



Tabla 7.

*Dimensiones de las aulas pertenecientes a la UEE “María Angélica Idrobo”.*

Alto	3 m
Largo	10 m
Ancho	4 m
Superficie total	192 m <sup>2</sup>
Volúmen	180 m <sup>3</sup>



*Figura 18.* Imagen en 3D de una sala de clase de la UEE “María Angélica Idrobo”.

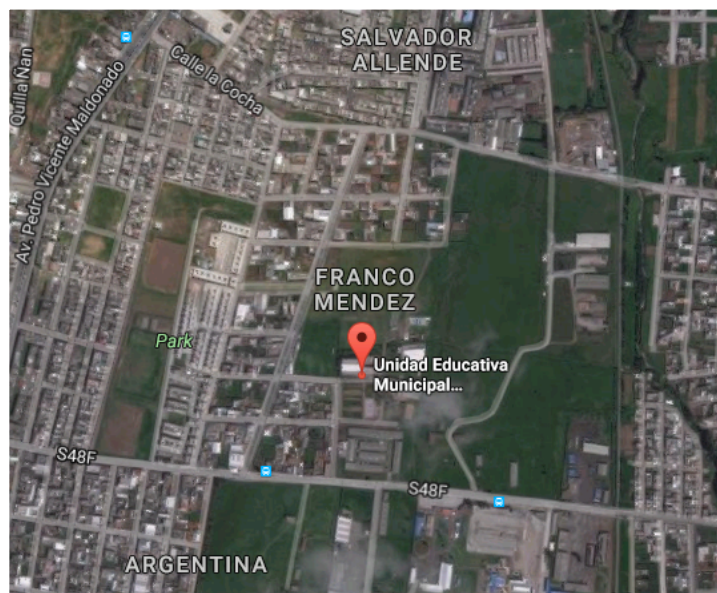
Este establecimiento se encuentra dentro de la zona urbana y al estar ubicada en una calle principal que conecta con una avenida. Es expuesta por todo tipo de ruido vehicular (buses, volquetas, camiones, vehículos livianos, etc.). Además, este establecimiento se encuentra en una zona mixta (comercial y residencial) lo cual afecta seriamente el ruido de fondo a las salas de clases.

### 3.1.4 Unidad Educativa Municipal del Milenio “Bicentenario”.



*Figura 19.* Entrada principal de la Unidad Educativa Municipal del Milenio “Bicentenario”.

Esta Unidad Educativa se ubica al extremo suroriental de la ciudad, en el barrio Franco Méndez. Este establecimiento forma parte del plan de educación del Distrito Metropolitano de Quito. Pero fue construido con ayuda del gobierno ecuatoriano, siendo una de las primeras UEM en inaugurarse a nivel nacional. Inició sus labores en noviembre del 2008.



*Figura 20.* Ubicación geográfica de la Unidad Educativa Municipal del Milenio “Bicentenario”.

Adaptado de Google Maps (s.f.)

Dicho establecimiento cuenta con dos bloques principales de tres pisos en los que se encuentran las 52 aulas, una biblioteca, un bloque de dos pisos para laboratorios y oficinas; un comedor y canchas para los sectores de recreación.

Esta institución mantiene sus labores en horario matutino de 7:30 a 12:50, y vespertino de 13:00 a 18:00, con un aproximado de 30 a 40 estudiantes por aula siendo un total de 2100 estudiantes en todos los horarios.

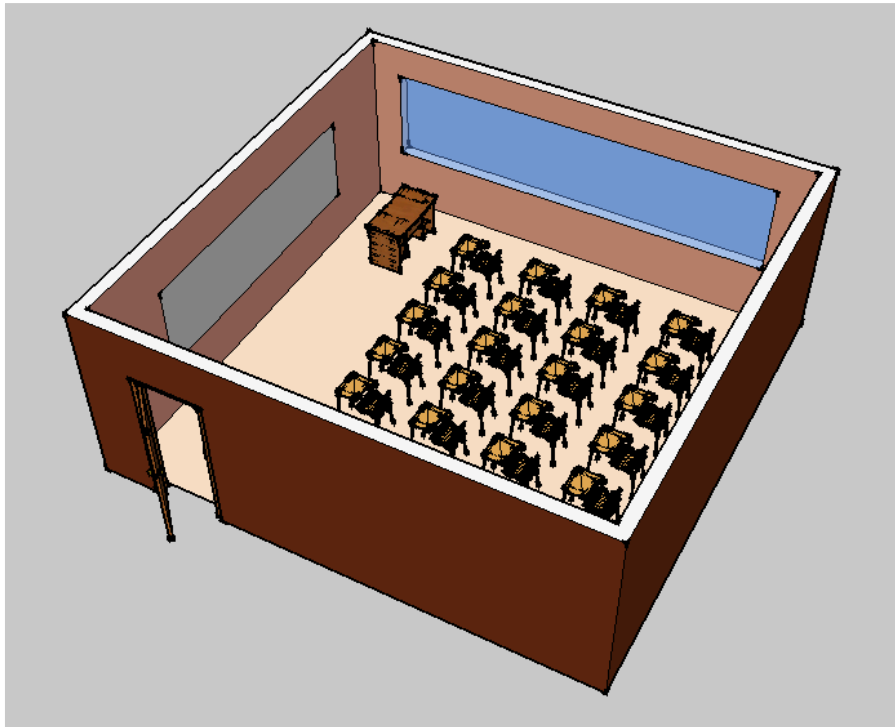
Dentro de su geometría, se mantiene de forma rectangular (casi cuadrada), con las mismas dimensiones en cada una de sus aulas, aunque los materiales pueden variar, las salas de clases de este establecimiento poseen las siguientes dimensiones:

Tabla 8.

*Dimensiones de las aulas pertenecientes a la Unidad Educativa Municipal del Milenio "Bicentenario".*

Alto	3 m
Largo	7,5 m
Ancho	7,3 m
Superficie total	198,3 m <sup>2</sup>
Volumen	164,25 m <sup>3</sup>





*Figura 21.* Imagen en 3D de una sala de clase de la UEMM “Bicentenario”.-

### **3.1.5 Materiales de construcción y mueblería al interior de las aulas**

Dentro de las aulas para los diferentes niveles académicos (inicial, primaria y secundaria), se encontraron los siguientes materiales para las diferentes superficies:

Tabla 9.

Matriz de materiales en las diferentes aulas evaluadas de las UEM.

I = Inicial  
 P = Primaria  
 S = Secundaria  
 \* = Una Pared Lateral

MATERIALES	UNIDADES EDUCATIVAS DEL MILENIO																							
	IDROBO						MONTÚFAR						24 DE MAYO						BICENTENARIO					
	I	P	S	I	P	S	I	P	S	I	P	S	I	P	S	I	P	S						
TECHO	CIELO RASO	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HORMIGÓN (TECHO)	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-
	ZINC	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PISO	BALDOSA (PISO)	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	HORMIGÓN (PISO)	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
PAREDES	BALDOSA (PAREDES)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	HORMIGÓN (PAREDES)	-	X	X	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	VENTANAS (PEQUEÑAS)	X	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	VENTANAS (GRANDES)	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X*	X*	X*	
	CORTINAS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MUEBLES	GYPSUM	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	SILLAS PLÁSTICAS	-	-	X	-	-	-	X	X	-	-	-	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	
	SILLAS METÁLICAS	X	X	-	-	-	X	X	-	-	-	X	X	-	X	X	-	X	X	-	X	X	-	
	PUERTA MADERA	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	PUERTA METÁLICA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	
CASILLERO MADERA	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-	-		
CASILLERO METÁLICO	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	X	X	-	X	X	-	X	X	-	-	-		

## 3.1.6 Dimensiones y cantidad de aulas

Tabla 10.

*Matriz de dimensiones y cantidad de aulas en las diferentes aulas evaluadas de las UEM.*

DIMENSIONES	UNIDADES EDUCATIVAS DEL MILENIO			
	IDROBO	MONTÚFAR	24 DE MAYO	BICENTENARIO
ALTO	3 m	3 m	3 m	3 m
LARGO	10 m	10 m	10 m	7,5 m
ANCHO	6,6 m	4 m	6,6 m	7,3 m
SUPERFICIE	231,6 m <sup>2</sup>	192 m <sup>2</sup>	231,6 m <sup>2</sup>	198,3 m <sup>2</sup>
VOLUMEN	198 m <sup>3</sup>	180 m <sup>3</sup>	198 m <sup>3</sup>	164,25 m <sup>3</sup>
CANTIDAD DE AULAS	62	24	30	52

## 3.2 Muestreo

### 3.2.1 Fundamentos de muestreo

Para un proceso de investigación donde existe una gran cantidad de elementos a estudiar, se procede a aplicar el estudio por muestras, donde se procederá a analizarlas. Este método se lo realiza con el fin de obtener información respecto a los elementos generales de estudio.

#### 3.2.1.1 Población

Definimos a la población como el conjunto total de elementos por el cual está constituido el estudio o investigación, sean estos, personas, animales o cosas, con semejantes características. De estos elementos se recogerá la suficiente información para completar el estudio.

#### 3.2.1.2 Muestra

Se define como muestra a una pequeña cantidad de elementos tomados del conjunto total o de la población. La muestra debe ser de un tamaño o cantidad considerable que logre representar a la población y brinde los datos suficientes para representarla.

#### 3.2.1.3 Cálculo del tamaño de la muestra

Para el cálculo de la muestra se procede a utilizar el método de estimación proporcional de la población la cual consiste en utilizar la siguiente fórmula:

$$n = \frac{(Z_{\alpha/2})^2 N p q}{N E p^2 + (Z_{\alpha/2})^2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

- N: Es el valor total de la población
- p: Se define como la proporción de elementos pertenecientes a la población que poseen la característica del estudio.

- $q$ : Definida como la proporción de elementos que no tienen la característica de estudio.
- $Z_{\alpha/2}$ : Coeficiente normal estándar.
- $E_p$ : Se define como error prefijado.

“Como muchas veces se desconoce la estimación  $p$ , se toma el tamaño máximo de la muestra, que se obtiene haciendo  $p = q = 0.5$ ” (Galindo, 2010)

### 3.2.2 Cantidad de aulas

Ya definidos los términos a utilizar para el cálculo, procedemos a reemplazar los valores en la fórmula, los cuales serán los siguientes:

- $N = 196$
- $p: 0.5$
- $q: 0.5$
- $Z_{\alpha/2}: 2.58$
- $E_p: 0.1$

El valor total de aulas entre las 4 escuelas toma el valor de 196. Al no conocer los valores de la proporción de elementos ( $p$  y  $q$ ), se toma el valor de 0.5. El valor del coeficiente normal estándar se lo obtiene basándose en los niveles de confianza, al tener un nivel de 99%, el coeficiente toma un valor de 2.58. El error prefijado lo tomamos con un valor del 10%, equivalente a un valor de 0.1. Reemplazando en la fórmula, la cantidad de aulas que tendremos que realizar el estudio es el siguiente:

$$n = \frac{(2.58)^2 * 196 * 0.5 * 0.5}{(196 * (0.1)^2) + (2.58)^2} = 37.85 \approx 38 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Para esto, al tener 4 escuelas, tomaremos 10 aulas por escuela, llegando al valor de 40 aulas, siendo un valor cercano a los 38 que nos brindó el cálculo matemático.

Una vez que se obtuvo la cantidad de 10 aulas por escuela se realizó una consulta a las autoridades con el fin de saber cuál es la cantidad de alumnos por niveles académicos, Siendo (en la mayoría de instituciones) el nivel secundario con mayor cantidad de alumnos, luego seguía primaria y por último los niños de educación inicial.

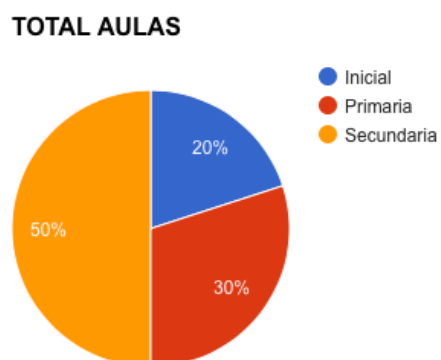
Ante esta información, se definió una cantidad de aulas que se va a medir por niveles de educación, en los cuales resultó:

Tabla 11.

*Cantidad de aulas totales evaluadas.*

TOTAL AULAS EN GENERAL	Inicial	Primaria	Secundaria
	8	12	20
	20%	30%	50%

Haciendo un balance de la cantidad de aulas a evaluar se obtuvo la siguiente gráfica:



*Figura 22. Balance de aulas evaluadas por nivel académico.*

### **3.3 Mediciones**

El objetivo de este trabajo fue evaluar de la calidad acústica utilizando el método de “Índice global de calidad acústica” desarrollado por Jan Radosz (2013). En el cual, utiliza supuestos y normativas para la obtención de resultados fiables. Para ello, antes realizar las mediciones se consideró que todas las evaluaciones se realizaron con las salas vacías, a excepción de Esfuerzo Vocal (apartado 3.3.3), como Relación Señal - Ruido (apartado 3.3.4). Únicamente se contó con los materiales y muebles que contenía cada sala. En cada apartado se detalla el proceso, la normativa o supuesto basado en otras investigaciones. Con el fin de utilizar el procedimiento indicado.

#### **3.3.1 Tiempo de Reverberación**

Para la medición del tiempo de reverberación se tomó como referencia la norma UNE EN ISO 3382-1. La normativa tiene ciertas especificaciones y procedimientos a cumplir.

En esta medición se utilizó el Método de Ingeniería de Ruido Interrumpido. La normativa indica que el recinto debe encontrarse desocupado y amoblado de manera normal. Se deben seleccionar 6 posiciones de micrófono, las cuales deben contar con una separación mínima de media longitud de onda, lo que equivale a 2 metros tomando como referencia el rango frecuencial habitual de 125 Hz a 4000 Hz. La distancia mínima que debe existir entre una superficie reflectante y el micrófono debe ser por lo menos un cuarto de longitud de onda, lo cual corresponde a un valor de 1 metro. La distancia entre la fuente y el micrófono debe corresponder a un valor igual o mayor a 1,2 metros.

La instrumentación para la medición de este parámetro es:

- Sonómetro clase 2 CESVA SC310.
- Calibrador Acústico CESVA CB006.
- Fuente Omnidireccional CESVA BP012.
- Generador de ruido amplificado CESVA AP602.

- Se procedió a colocar 2 posiciones de fuente, en cada una de ellas se ubicarán 3 posiciones de micrófono, lo cual equivaldría a 6 posiciones de micrófono que nos indica la normativa. Se debe evitar que las posiciones sean simétricas.

### 3.3.2 Inteligibilidad

Para esta medición se hizo uso del índice STI-PA que significa *Speech Transmission Index for Public Address*, ya que los valores se aproximan a los cálculos de STI. Este índice es una versión simplificada del parámetro STI, en donde, en vez de 7 bandas de frecuencias, se utilizan solo 6, de manera que se combinan las bandas de frecuencias de 125 y 250 Hz.

El método STI-PA es un procedimiento igual de preciso que el STI, en el caso de que el ruido de fondo no sea muy influyente, no existan distorsiones no-lineales ni ruidos impulsivos en la medición, por ello ha sido aplicado para ser utilizado dentro de esta investigación. (NTI, 2006)

La instrumentación utilizada en esta medición fue:

- Sonómetro clase 2 NTi XL2
- *Talkbox* NTi.

El procedimiento que se llevó a cabo consiste en ubicar el *talkbox* en la posición habitual desde donde imparte clases el maestro, con una altura mayor a 1.2 metros respecto al suelo, tanto para fuente como para sonómetro.

Las posiciones del sonómetro corresponderán a los lugares que ocupan los estudiantes de manera normal durante el transcurso de clases. Al tener aproximadamente más de 30 alumnos por aula, se procura realizar las mediciones saltándose 2 pupitres, de esta manera se procura cubrir toda la superficie en donde se encuentran ubicados los estudiantes.

La cantidad de mediciones dependió del número de estudiantes o pupitres que existan dentro del aula de clases, en este caso existían 50 pupitres por aula, para lo cual se tomó un total de 16 a 17 mediciones saltando cada 3 pupitres.



Este procedimiento nos permitió tener una desviación que se ajusta más a la necesidad de la clase, a su vez la habitación debe estar desalojada y con el amoblado en posición habitual.

### **3.3.3 Ruido de Fondo**

Se considera que el ruido percibido en cada una de las salas de clases sea constante y no posea fluctuaciones que varíen entre 5 dB, con el objetivo de realizar mediciones que no superen los 2 minutos. Como se mencionó anteriormente, las mediciones se realizaron sin la presencia de estudiantes.

Para la instrumentación dentro de este parámetro, se utilizaron los siguientes equipos:

- Sonómetro clase 2 CESVA SC310.
- Calibrador Acústico CESVA CB006.

En la sala de clase, se ubicaron cuatro puntos para realizar estas mediciones, puesto que, nuestro fin era encontrar un balance en todos los sectores del aula.

El sonómetro se ubicó a 1,20 m de altura y en los diferentes puntos de evaluación evitando que estén cerca de las paredes. Las mediciones duraron entre uno y dos minutos, en bandas de octava. Sin embargo, para el análisis del índice de este parámetro, se utilizó el  $L_{eq}$  en ponderación A.

### **3.3.4 Relación Señal - Ruido**

Los equipos que se utilizaron en la evaluación, fueron los siguientes:

- Grabadora portátil Zoom H4n.
- Micrófono Beyer Dynamic MM1.

En este parámetro, el procedimiento dentro de la sala consiste en grabar durante una hora de clase, al docente impartiendo clases, lo cual permitirá tener la señal de referencia. De igual forma, se registra una sesión de clase cuando los alumnos están estudiando en silencio, de tal forma que se obtiene el registro de ruido de fondo (Hodgson, 1999).

Una vez registradas estas señales en cada aula, se procedió por medio de un software de audio digital a analizar la forma de onda de la señal de referencia con el ruido de fondo. La diferencia que existe entre los valores RMS de la señal de referencia y el ruido de fondo, se convirtió a nivel de presión sonora para realizar el cálculo del índice de dicho parámetro en cada aula.

Para algunas aulas de clases, el procedimiento a realizar fue tener una charla con los alumnos, manteniendo el nivel de voz uniforme similar a la de un docente dando clases.

### **3.3.5 Esfuerzo del Habla**

Para la evaluación de este parámetro, se aplicó lo indicado en la norma UNE EN-ISO 9921. Dicha norma indica que, para realizar la medición, se debe colocar el sonómetro a una distancia de un metro frente al docente que esté impartiendo clase. De esta forma, se colocó el sonómetro durante la hora de clase con el fin de poder tener un  $L_{eq}$  con ponderación A y así poder realizar el cálculo del índice para esta variable.

Como instrumentación para el ensayo, se utilizaron los siguientes equipos:

- Sonómetro clase 2 CESVA SC310.
- Calibrador Acústico CESVA CB006.

En el marco teórico de este parámetro (apartado 2.3.6), se encuentra detallado el rango de valores en dBA para los distintos tipos de esfuerzo. Se pudo observar que muchos de los docentes tenían que elevar el tono de voz. Esto se presume que pudo haber sido a causas de distintos factores, entre los principales se encontraron:

- Falta de control dentro de clase.
- Acondicionamiento acústico de baja calidad. La mayoría de aulas poseen superficies reflectantes.
- Bajo nivel vocal por parte de los docentes.

Es por esta razón que en algunos casos se tuvo que pedir elevar el tono de voz

o controlar el ruido de los niños, puesto que muchas veces los niveles que captaba el sonómetro no demostraban el nivel directo del profesor, sino que se hallaba algo de enmascaramiento.

### **3.3.6 Difusividad**

La medición de este parámetro se la realizó basándose en la metodología descrita en la investigación de Radosz (2013), ya que por el momento no se cuenta con una normativa que regule este tipo de medición.

La instrumentación que se utilizó para este proceso fue la siguiente:

- Sonómetro clase 2 CESVA SC310.
- Calibrador Acústico CESVA CB006.
- Fuente Omnidireccional CESVA BP012.
- Generador de ruido amplificado CESVA AP602.

Ya definido el equipamiento a utilizar, se procedió a ubicar 6 posiciones de micrófono dentro de la sala donde se va a realizar la medición, con una posición de fuente, la cual estuvo ubicada en el lugar desde donde el profesor imparte clases estando de pie. La distancia entre micrófono, se tomó como referencia media longitud de onda como lo establece en la medición de tiempo de reverberación, y se procuró que el radio de cercanía respecto a la fuente con la posición de micrófono más cercana sea de 0.7 metros. La altura de micrófono se varió en cada posición de medición, y se verificó que sea mayor a 1.2 metros de alto, cabe recalcar que ninguna posición de micrófono poseía la misma altura.

## **3.4 Cálculos de índices**

### **3.4.1 Tiempo de Reverberación**

El tiempo de reverberación (TR) es uno de los más importantes parámetros para la medición de la calidad acústica en un recinto. Un estudio realizado en el año 2008 (Sato et al) indica que la dificultad para entender un determinado diálogo se encuentra dentro del contenido frecuencial de 1000 Hz a 4000 Hz. A

su vez Mikulski (2012) indica que la banda de frecuencia que se encuentra ubicada en los 2 kHz, posee gran relación con pruebas que se realizaron de manera subjetiva respecto a la inteligibilidad de la palabra.

Según Radosz (2013), es posible obtener el índice correspondiente al tiempo de reverberación, tomando como referencia valores obtenidos de TR en la banda de 2 kHz, de acuerdo a la Figura 23 y la ecuación 6.

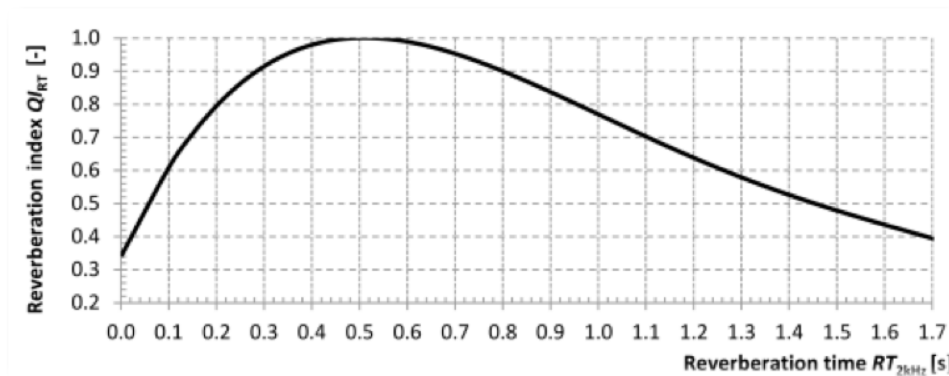


Figura 23. Relación entre el TR a 2 kHz y el coeficiente QI.

Tomado de Radosz, J., 2013, p. 4.

Para determinar esta curva se procedió a utilizar la siguiente ecuación:

$$QI_{Tr} = (-0.48) \cdot (Tr \text{ 2 kHz})^4 + (2.55) \cdot (Tr \text{ 2 kHz})^3 - (4.77) \cdot (Tr \text{ 2 kHz})^2 + (3.13) \cdot (Tr \text{ 2 kHz}) + 0.34 \quad \text{Ecuación (6)}$$

Con esta ecuación se puede determinar cada valor QI correspondiente al tiempo de reverberación.

Cabe indicar que la ecuación 6 puede dar valores negativos, en el caso de que el tiempo de reverberación sobrepase el valor correspondiente a 2.235. Por lo cual en la hoja de cálculo se procede a limitar este valor. En caso de que, si sobrepase el mismo, la operación matemática nos de él valor de 0.

### 3.4.2 Inteligibilidad de la palabra

La inteligibilidad de la palabra posee una fuerte relación con la calidad acústica, por el hecho de que corresponde a qué tanta claridad o entendimiento va a

poseer el mensaje que se está transmitiendo de manera oral. La norma UNE EN ISO 9921 indica la inteligibilidad se expresa dentro del intervalo de 0 a 1, siendo el valor correspondiente a 1 como el grado más alto de inteligibilidad.

Un factor importante para el cálculo del índice de inteligibilidad es la claridad  $C_{50}$ , la cual indica cómo el oyente percibe la señal o los sonidos dentro del intervalo de los primeros 50 ms, basándose en la constante de tiempo del oído. Bradley (1986) indica que la banda de frecuencia de 1 kHz, posee una gran relación con la subjetividad que va a poseer la inteligibilidad. Para ello se procede a obtener el valor de claridad  $C_{50}$  mediante el tiempo de reverberación en esta banda, mediante la siguiente ecuación:

$$C_{50} = -1 + e^{\frac{13.8 \cdot T_i}{Tr_{1kHz}}} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde,  $T_i$  corresponde al valor de 50ms (0.05) y el tiempo de reverberación utilizado será a 1 kHz.

Ya con el valor de  $C_{50}$  obtenido, procedemos a calcular el índice de claridad con la siguiente fórmula.

$$CI = -0.00616 \cdot (C_{50}(1 \text{ kHz}))^2 + 0.0615 \cdot (C_{50}(1 \text{ kHz})) + 0.85 \quad \text{Ecuación (8)}$$

Esta ecuación nos permite obtener la curva que relaciona a la claridad en la banda de 1 kHz y el índice de claridad, obteniendo así la siguiente curva:

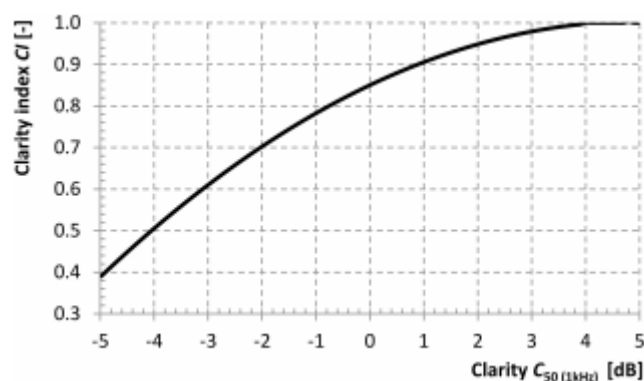


Figura 24. Relación entre el  $C_{50}$  y el CI

Tomado de Radosz, J., 2013, p. 4.

Entonces la fórmula propuesta por Radosz (2013) propone que el Índice de Inteligibilidad dependerá de manera directa con el STI y la claridad, como se expresa en la ecuación 9

$$QI_{SI} = 0.55 \cdot STI + 0.44 \cdot CI \quad \text{Ecuación (9)}$$

### 3.4.3 Ruido de Fondo

Para el cálculo de Ruido de Fondo, es necesario obtener el valor  $L_{Aeq}$ , en otras palabras, el nivel equivalente por bandas con ponderación A. Este parámetro es, al igual que la Inteligibilidad, muy importantes para la evaluación de calidad acústico, esto es porque si uno de los parámetros no es el indicado para una sala de clase, el alumno pierde concentración y ese no es el fin.

El valor  $L_{Aeq}$  para Jan Radosz (2013), permite verificar si el nivel de ruido de fondo es el adecuado para de aulas, por esta razón se ubican límites, los cuales, van a dar pie a este valor sea el más apto. De esta manera se aplica una condición, en la cual, para un  $L_{Aeq} = 40$  dB, el índice de ruido de fondo será  $QI_{BN} = 1$ , siendo el valor de ruido de fondo ideal para cualquier sala de clases, y para un  $L_{Aeq} = 60$  dB o mayor, el valor  $QI_{BN} = 0$ , ya que se puede dar un posible enmascaramiento.

Sin embargo, para los obtenidos valores medidos dentro de salas vacías, se procede a realizar el cálculo, aplicando las condiciones mencionadas y la siguiente fórmula:

$$QI_{BN} = 0.002(L_{Aeq})^2 - 0.246(L_{Aeq}) + 7.64 \quad \text{Ecuación (10)}$$

Las ponderaciones aplicadas dentro de la fórmula, son dadas por medio de pruebas experimentales llevadas a cabo por Jan Radosz (2013). Además, como se había mencionado, este parámetro al ser uno de los más importantes, la relación que se da conforme a los valores obtenidos sería la siguiente:

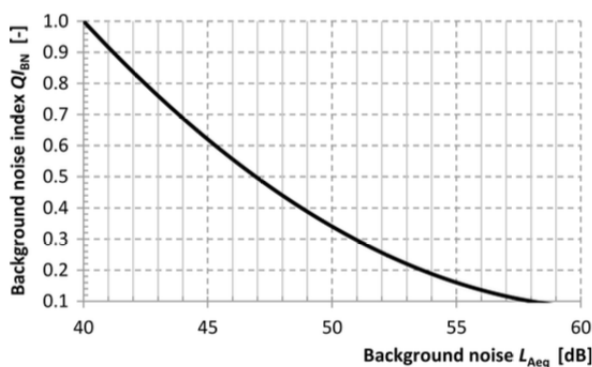


Figura 25. Relación entre el valor de ruido de fondo  $L_{Aeq}$  respecto al valor  $QI_{BN}$   
Tomado de Radosz, J., 2013, p. 6.

Ahora, para el valor  $L_{Aeq}$ , se tomó el equivalente de los diferentes puntos en los que se midió cada aula, de tal forma que se pudo obtener el índice de este parámetro.

### 3.4.4 Relación Señal – Ruido

La Relación Señal – Ruido (SNR) es un parámetro que se obtiene a partir de la diferencia de dos señales, logrando un valor en dB. De las mediciones realizadas en cada una de las aulas de las diferentes UEM, se toma los valores  $L_{eq}$ , del docente hablando durante la hora de clase y el ruido de fondo, obtenido como un parámetro ya medido en la sala vacía.

Para que este parámetro sea apropiado para salas de clases, es necesario que el valor  $SNR = 15$  dB (Sato, Bradley, 2008), esto permite que el ruido de fondo no produzca enmascaramiento en la señal emitida por el docente.

El cálculo del índice para el valor SNR, es denominado como  $QI_{SNR}$ , el cual, se lo realiza de la siguiente manera:

$$QI_{SNR} = 0.058e^{0.18(SNR)+0.14} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Esta fórmula es para valores de SNR menores a 15 dB. Esto es porque, como se mencionó anteriormente, para un valor óptimo este valor SNR debe superar los 15 dB. Por lo tanto,  $QI_{SNR} = 1$ , ya que teniendo valores que superen el valor ideal, indicará que él hay una buena diferencia entre la señal emitida por el

docente y el ruido de fondo.

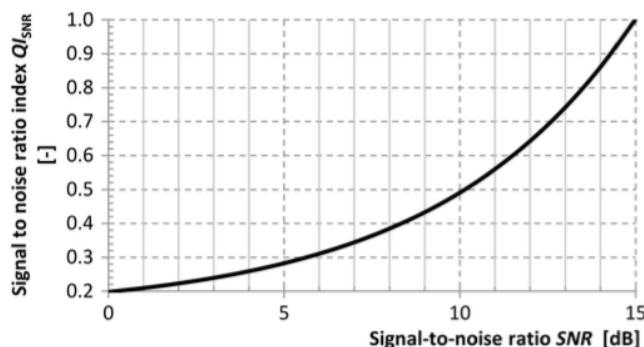


Figura 26. Relación entre el valor SNR respecto al valor  $QI_{SNR}$ .

Tomado de Radosz, J., 2013, p. 7.

Como cada índice viene acompañado de un valor de ponderación. En el caso del valor SNR, su valor  $\eta_{SNR} = 0.5$ . Esto se establece en vista de que, para que exista una buena emisión y recepción del mensaje dentro de la sala, el docente es quien debe impartir disciplina y control (Radosz, 2013). Por tanto, se da un valor medio que permita dar equilibrio a lo que implica el aprendizaje.

### 3.4.5 Esfuerzo de Habla

El esfuerzo que realiza un docente al momento de dar clases, puede resultar un problema a corto y largo plazo debido al aumento en su voz que debe aplicar en ciertas circunstancias. Este parámetro es algo subjetivo ya que, por cuestiones ya mencionadas, este valor puede variar en la mayoría de salas, aun así, es importante considerar ya que es necesario ver por el bienestar del docente.

Según la norma UNE EN-ISO 9921, este valor será un equivalente a los niveles obtenidos en toda la banda de frecuencias llegando a tener un valor  $L_{Aeq,1m}$ . Este valor, estará en un rango (Tabla 4), indicará si el esfuerzo es normal o elevado.

El valor de índice de esfuerzo de habla ( $QI_{SE}$ ) ideal para un profesor debe ser igual a 60 dB, siendo su  $QI_{SE} = 1$ , ya que menor a ese valor, el esfuerzo será menor y por tanto no causará problemas físicos en el docente. Sin embargo,



para los valores que superen los 60 dB, la fórmula que se aplica es:

$$QI_{SE} = -0.041(L_{Aeq,1m}) + 3.46 \quad \text{Ecuación (12)}$$

De igual forma, cada parámetro tiene un valor de ponderación que permite adaptarse a las condiciones de una sala de clase. Para el esfuerzo de habla, el valor  $\eta_{SNR} = 0.3$ , siendo un valor bajo, debido a que, este parámetro al ser muy variable porque depende de la voz y esfuerzo del docente, no influye dentro de las características de la sala.

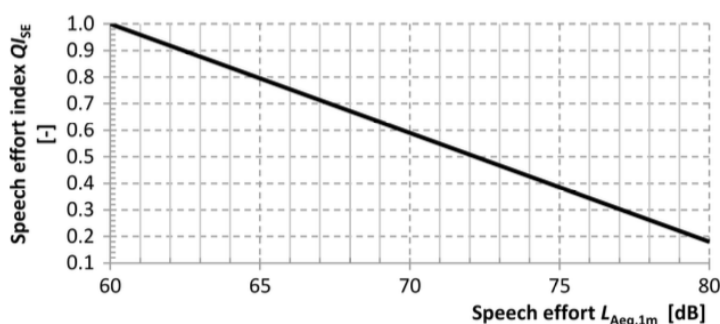


Figura 27. Relación entre el valor de esfuerzo de habla ( $L_{Aeq,1m}$ ) respecto al valor  $QI_{SE}$ .

Tomado de Radosz, J., 2013, p. 5.

### 3.4.6 Difusividad

Un parámetro importante corresponde a la difusividad de la sala, el cual, su cálculo, ha sido realizado empíricamente. El proceso conlleva en realizar la diferencia entre los valores extremos medidos en la sala, lo cual se realizará en las octavas descritas anteriormente como fundamentales para el entendimiento del diálogo, las cuales son 1000, 2000 y 4000 Hz.

Para el cálculo por banda del índice QI se ha propuesto la siguiente fórmula:

$$QI_{SD,f} = -0.08 \cdot (\Delta G_{rel,f}) + 1 \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde  $G_{rel,f}$  es la diferencia entre los valores extremos medidos en la sala, así mediante esta fórmula podemos obtener la siguiente figura:

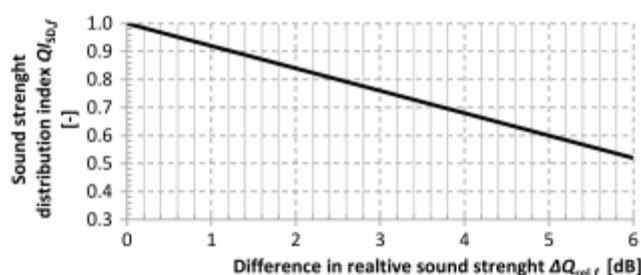


Figura 28. Relación entre la diferencia relativa del sonido y el QI para cada frecuencia.

Tomado de Radosz, J., 2013, p. 5.

Ya determinado el valor del índice de difusividad por frecuencia pasaremos a calcular un único valor correspondiente a la difusividad tomando en cuenta las 3 bandas de frecuencia descritas anteriormente, teniendo la siguiente fórmula:

$$QI_{SD} = 0.296 \cdot QI_{SD-1kHz} + 0.37 \cdot QI_{SD-2kHz} + 0.333 \cdot QI_{SD-4kHz} \quad \text{Ecuación (14)}$$

### 3.4.7 Índice Global de Calidad Acústica

Ya con todos los índices correspondientes a los 6 parámetros medidos en el recinto, procedemos a calcular el valor de “Índice global de calidad acústica” ( $QI_G$ ), mediante la siguiente fórmula

$$QI_G = \frac{QI_{Tr} \cdot \eta_{Tr} + QI_{SI} \cdot \eta_{SI} + QI_{SE} \cdot \eta_{SE} + QI_{SD} \cdot \eta_{SD} + QI_{BN} \cdot \eta_{BN} + QI_{SNR} \cdot \eta_{SNR}}{\eta_{Tr} + \eta_{SI} + \eta_{SE} + \eta_{SD} + \eta_{BN} + \eta_{SNR}}$$

Ecuación (15)

Siendo los valores  $\eta_{Tr}, \eta_{SI}, \eta_{SE}, \eta_{SD}, \eta_{BN}, \eta_{SNR}$ , los coeficientes parciales de cada uno de los índices de los parámetros medidos.

## 4. Resultados

Como se observó en la fórmula a utilizar para el cálculo del índice global de calidad acústica (apartado 3.4.7), los valores de los parámetros, están acompañados por valores de ponderación. Estos valores fueron tomados de la investigación realizada por Jan Radosz (Tabla 1) ya que su objetivo era aplicar

estas variables específicas para salas de clase. Los cuales fueron adoptados en base al análisis de cada uno de los parámetros acústicos por medio de una prueba experimental con una muestra significativa de aulas con características similares (Radosz, 2013).

Además, como se realizaron mediciones a un total de 40 aulas, a continuación, se detallará los valores obtenidos por parámetros en cada aula de las cuatro Unidades Educativas del Milenio.

#### 4.1 Tiempo de Reverberación

Basándonos en el procedimiento descrito anteriormente para la medición del tiempo de reverberación. Podemos obtener un valor promediado (en 2 kHz) en segundos, por cada una de las aulas que formaron parte del estudio. Los cuales nos brindan los siguientes valores:

Tabla 12.

*Valores totales de Tiempo de Reverberación obtenidos durante las mediciones en las diferentes aulas de cada UEM.*

UEM	Montúfar	24 de Mayo	M. A. Idrobo	Bicentenario
AULA	TR. 2 kHz [s]	TR. 2 kHz [s]	TR. 2 kHz [s]	TR. 2 kHz [s]
1	0,56	1,12	1,96	1,88
2	0,60	0,67	1,21	1,70
3	0,66	0,59	2,45	1,73
4	0,74	0,69	1,85	1,98
5	0,56	0,58	1,73	1,79
6	0,59	0,63	0,67	1,52
7	0,74	0,61	0,68	1,16
8	0,54	0,56	0,68	1,72
9	0,56	0,58	1,30	1,81
10	0,66	1,14	2,20	1,40

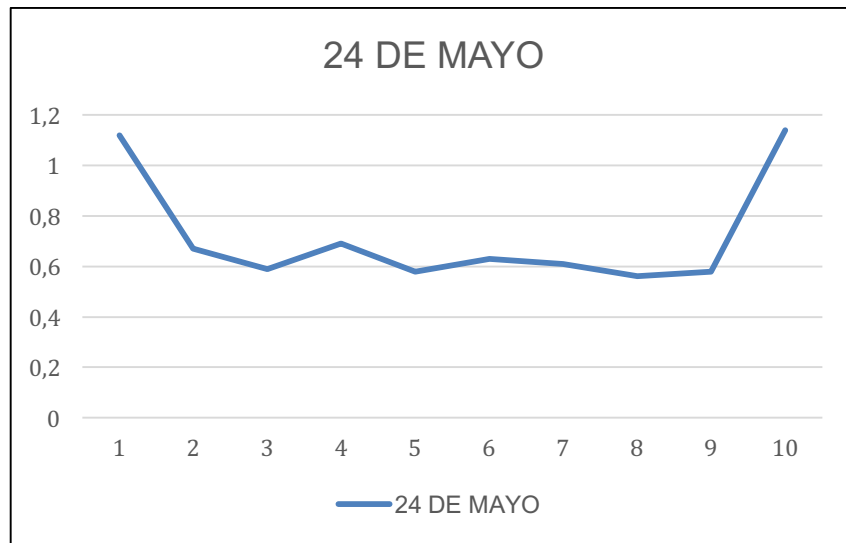


Figura 29. Gráfica de Tiempo de Reverberación del Colegio “Réplica 24 de Mayo”.

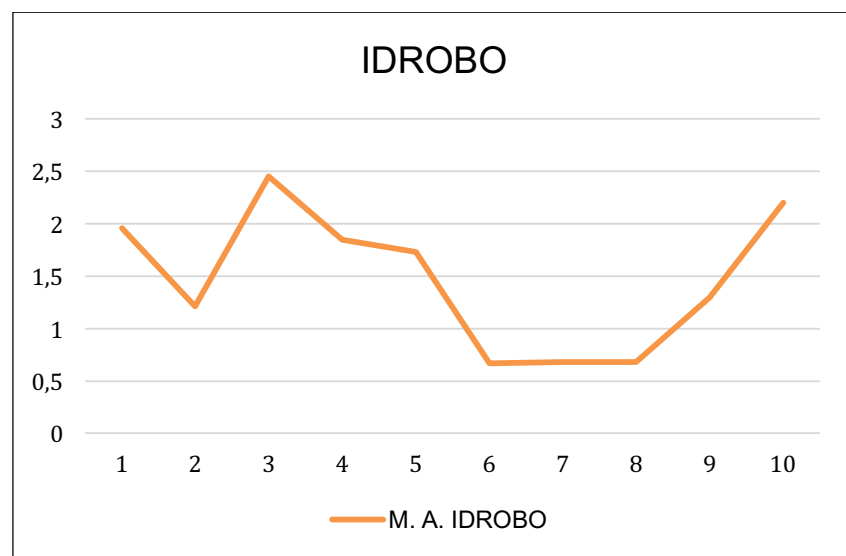


Figura 30. Gráfica de Tiempo de Reverberación de la UEE “María Angélica Idrobo”.

Como nos indica la Tabla 12, los valores obtenidos de tiempo de reverberación en las aulas son demasiado elevados, ya que, para un recinto dedicado a palabra, los valores deben oscilar entre 0.45 a 0.55 segundos según no explica Radosz (2013) en su investigación. Los valores elevados se deben a la

geometría de la sala en sí, donde la relación de distancias ancho-largo-alto, no es proporcional, además en los casos de las UEM con excepción de la UEM Montúfar, las aulas se encontraban casi vacías ya que solo contaban con los pupitres.

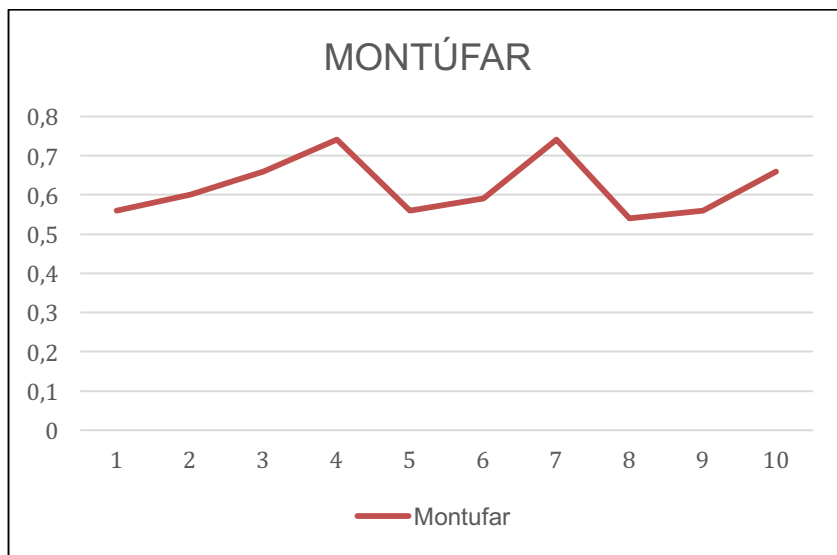


Figura 31. Gráfica de Tiempo de Reverberación de la del Colegio "Réplica Montúfar".

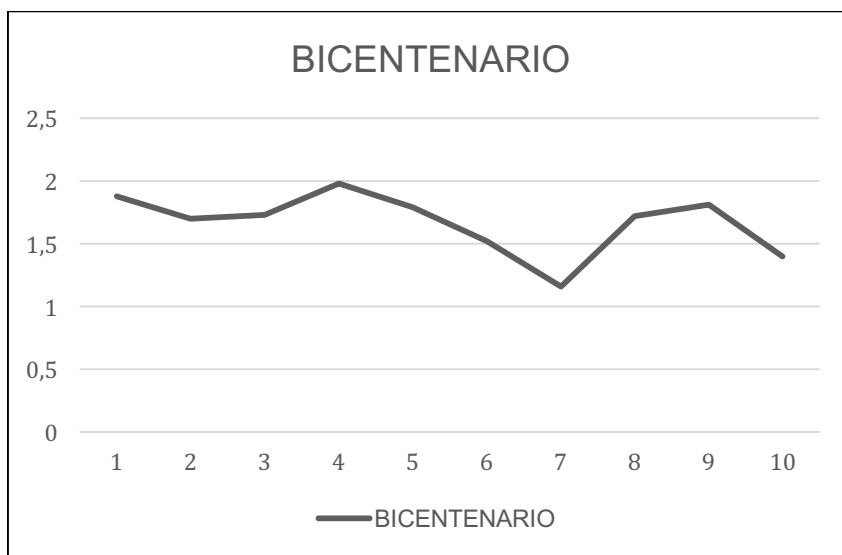


Figura 32. Gráfica de Tiempo de Reverberación de la UEMM "Bicentenario".

Tabla 13.

*Valores de los coeficientes totales de Tiempo de Reverberación obtenidos, mediante los diferentes cálculos, de las aulas de cada UEM.*

UEM	Montúfar	24 de Mayo	M. A. Idrobo	Bicentenario
AULA	QI TR	QI TR	QI TR	QI TR
1	1,00	0,69	0,27	0,31
2	0,99	0,97	0,63	0,40
3	0,97	0,99	0,00	0,38
4	0,93	0,96	0,33	0,26
5	1,00	0,99	0,38	0,36
6	0,99	0,98	0,97	0,47
7	0,94	0,99	0,96	0,66
8	1,00	1,00	0,96	0,39
9	1,00	0,99	0,58	0,35
10	0,97	0,67	0,05	0,53

Cuando más cercano es el valor al rango de 0.45-0.55 segundos establecido por Radosz, el valor de los coeficientes correspondientes al Tiempo de Reverberación tiende a acercarse a 1. A medida que el valor sobrepasa este rango el coeficiente adquiere un valor cada vez menor, aproximándose al 0.

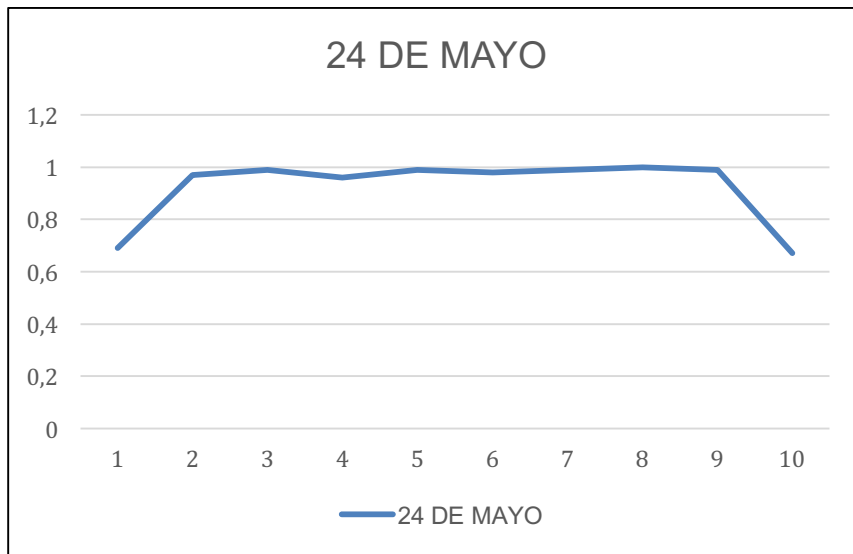


Figura 33. Gráfica del índice de Tiempo de Reverberación del Colegio "Réplica 24 de Mayo".

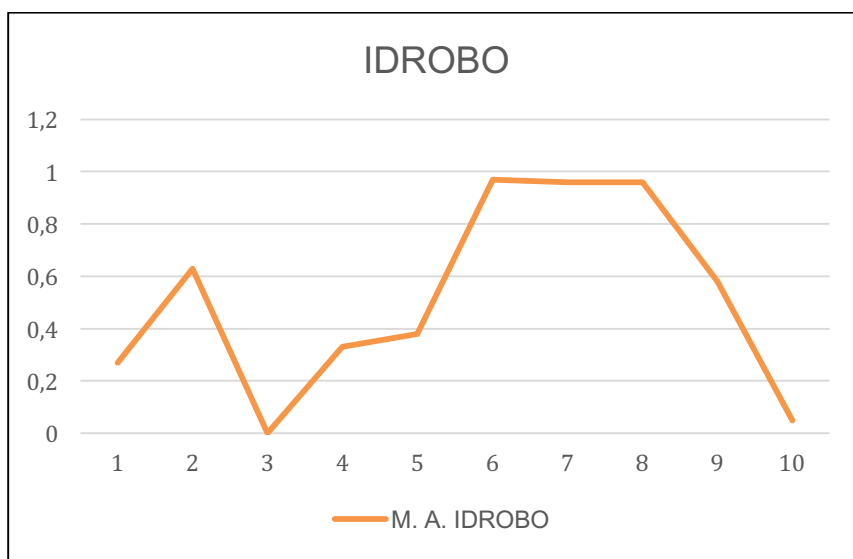


Figura 34. Gráfica del índice de Tiempo de Reverberación de la UEE "María Angélica Idrobo".

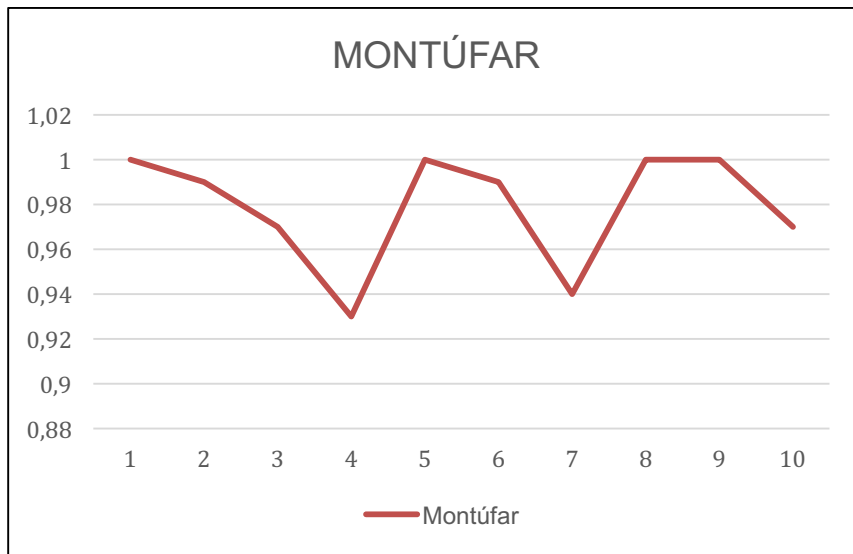


Figura 35. Gráfica del índice de Tiempo de Reverberación del Colegio "Réplica Montúfar".

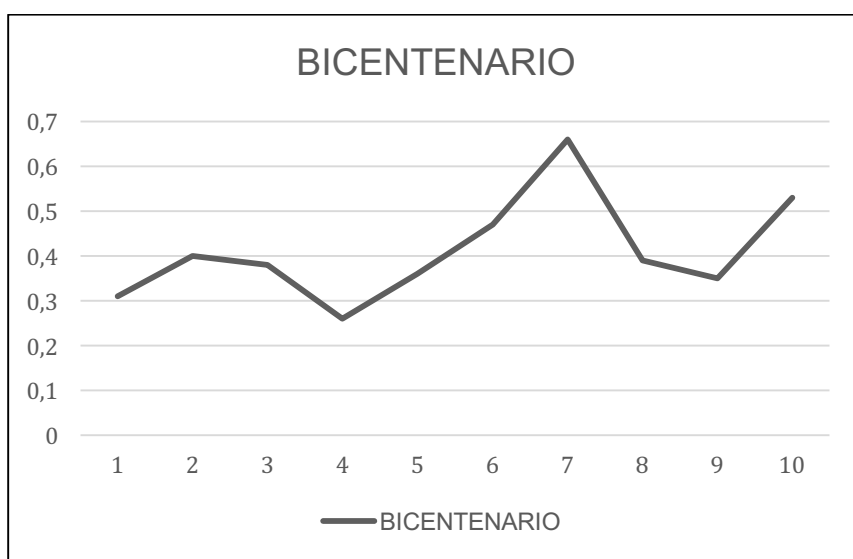


Figura 36. Gráfica del índice de Tiempo de Reverberación de la UEMM "Bicentenario".

El máximo valor permitido para el cálculo del coeficiente de TR corresponde a 2.235 segundos, en el caso de sobrepasar este valor, el cálculo nos brinda resultados negativos. En este caso es necesario el uso de condicionales en la fórmula que, al sobrepasar este valor, el resultado del coeficiente sea igual a 0.



#### 4.1.1 Relación entre el tiempo de reverberación, dimensiones de la sala y modos propios

Tomando como referencia la altura de las salas de las UEM y basándonos en la Figura 4, podemos observar que no existe una buena relación de dimensiones respecto a la altura, ya que no concuerdan con los valores dados por el diagrama.

Altura ( $h$ ): 3 m

$$\text{Factor de anchura} = \frac{\text{ancho } (a)}{\text{alto } (h)} = \frac{6.6}{3} = 2.2 \text{ m} \quad \text{Ecuación (16)}$$

$$\text{Factor de longitud} = \frac{\text{longitud } (a)}{\text{alto } (h)} = \frac{10}{3} = 3.3 \text{ m} \quad \text{Ecuación (17)}$$

Aplicando estos valores al diagrama de Bolt, Beranek & Newman observamos que el punto descrito no se localiza dentro del área sombreada, lo cual nos indica que las dimensiones no son las más adecuadas en cuanto al diseño.

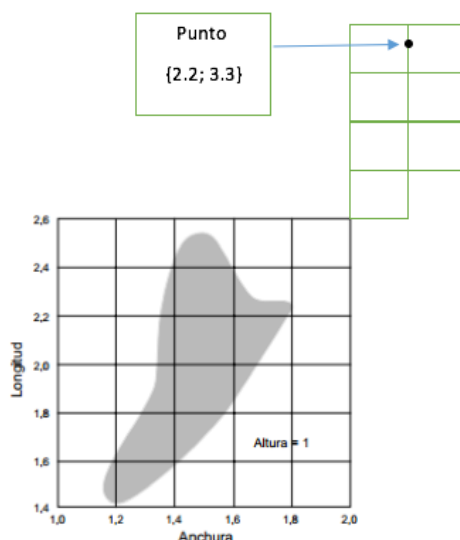


Figura 37. Diagrama de Bolt a partir de las medidas de las aulas.

Respecto al tiempo de reverberación, como se explicaba antes la densidad de modos al aumentar hace inexistente la aparición de los mismos, por ellos la sala pierde la coloración que brindan los modos en sí. Esto tiene relación con el tiempo de reverberación medio entre las frecuencias de 500 y 1000 Hz, lo cual

nos permitirá mediante la siguiente fórmula, determinar la frecuencia límite de influencia de los modos en el recinto.

$$f_{max} = 1849 \sqrt{\frac{Tr_{mid}}{V}} \quad \text{Ecuación (18)}$$

Siendo:

- V: volumen de la sala en  $m^3$ .
- Tr: tiempo de reverberación medio descrito anteriormente.

Tomando como referencia las mediciones obtenidas podemos deducir que el tiempo de reverberación está muy ligado a los modos. Con la expresión anterior podemos darnos cuenta que a mayor dimensión de la sala, con alto tiempo de reverberación y sobre todo si la forma del recinto es un paralelepípedo, mayores serán los efectos de los modos en la misma.

#### **4.2 Inteligibilidad**

Como se explica anteriormente, se tomó tres factores los cuales influyen en el cálculo del coeficiente. Que mediante las mediciones y cálculos matemáticos se obtuvieron los siguientes valores por escuela.

Tabla 14.

Valores totales obtenidos durante las mediciones del Colegio “Réplica Montúfar”.

UEM	Montúfar		
AULA	STI	C50. 1 kHz [dB]	Índice de Claridad
1	0,70	3,59	0,99
2	0,70	2,20	0,96
3	0,67	2,55	0,97
4	0,68	2,14	0,95
5	0,69	2,79	0,97
6	0,73	2,25	0,96
7	0,74	2,07	0,95
8	0,73	3,41	0,99
9	0,73	2,77	0,97
10	0,73	2,55	0,97

Basándonos en la Tabla 14, podemos observar que los valores de  $C_{50}$  y STI se encuentran dentro de rangos aceptables, ya que como decíamos anteriormente, los valores de  $C_{50}$  deben ser mayores a 2. Por su parte los valores dados de STI están en un rango “Bueno” basándonos en la norma UNE EN ISO 9921.

Tabla 15.

*Valores totales obtenidos durante las mediciones del Colegio “Réplica 24 de Mayo”.*

<b>UEM</b>	<b>24 de Mayo</b>		
<b>AULA</b>	<b>STI</b>	<b>C50. 1 kHz [dB]</b>	<b>Índice de Claridad</b>
1	0,60	1,24	0,92
2	0,61	2,11	0,95
3	0,70	2,76	0,97
4	0,70	2,71	0,97
5	0,74	3,18	0,98
6	0,67	2,15	0,95
7	0,69	2,32	0,96
8	0,70	3,11	0,98
9	0,68	2,54	0,97
10	0,70	0,92	0,90

En la Tabla 15, los valores de STI se encuentran en un rango “Bueno” pero existen valores donde el  $C_{50}$  posee valores menores a 2. Como sabemos la claridad depende del tiempo de reverberación, lo cual perjudica a la misma y lo ha hecho en estos 2 casos,

Tabla 16.

Valores totales obtenidos durante las mediciones en la UEE “María Angélica Idrobo”.

UEM	María Angélica Idrobo		
AULA	STI	C50. 1 kHz [dB]	Índice de Claridad
1	0,57	0,36	0,87
2	0,57	0,72	0,89
3	0,45	0,32	0,87
4	0,61	0,35	0,87
5	0,64	0,46	0,88
6	0,52	1,74	0,94
7	0,54	1,70	0,94
8	0,63	1,75	0,94
9	0,64	0,67	0,89
10	0,46	0,32	0,87

La Tabla 16, nos indica que los valores de STI poseen un rango “Regular” el cual corresponde a un 50% del entendimiento del mensaje. A su vez el  $C_{50}$  en las aulas de esta UEM no cumple con la condición de que los niveles deben ser mayores a 2 dB.

Tabla 17.

*Valores totales obtenidos durante las mediciones en la UEMM "Bicentenario".*

<b>UEM</b>	<b>Bicentenario</b>		
<b>AULA</b>	<b>STI</b>	<b>C50. 1 kHz [dB]</b>	<b>Índice de Claridad</b>
1	0,51	0,38	0,87
2	0,70	0,46	0,88
3	0,70	0,42	0,87
4	0,44	0,37	0,87
5	0,48	0,44	0,88
6	0,55	0,55	0,88
7	0,59	0,78	0,89
8	0,50	0,46	0,88
9	0,67	0,44	0,88
10	0,61	0,58	0,88

Para el caso de esta UEM, la Tabla 17 nos demuestra que los valores de  $C_{50}$  se encuentran muy debajo de la condición establecida, y que, de igual manera, el rango de valores de STI se maneja con una característica "Regular".

Tabla 18.

*Valores de los coeficientes totales de STI obtenidos, mediante los diferentes cálculos, de las aulas de cada UEM.*

UEM	Montúfar	24 de Mayo	M. A. Idrobo	Bicentenario
AULA	QI STI	QI STI	QI STI	QI STI
1	0,82	0,73	0,70	0,67
2	0,80	0,75	0,71	0,77
3	0,79	0,81	0,63	0,77
4	0,80	0,81	0,72	0,63
5	0,81	0,84	0,74	0,65
6	0,82	0,79	0,70	0,69
7	0,82	0,80	0,71	0,72
8	0,83	0,82	0,76	0,66
9	0,83	0,80	0,74	0,75
10	0,83	0,78	0,64	0,73

El colegio “Réplica Montúfar” vuelve a presentar mejores valores de los coeficientes, ya que sus tiempos de reverberación por aula y los valores obtenidos de STI se encuentran cercanos a valores óptimos. Como habíamos explicado anteriormente, la inteligibilidad y el tiempo de reverberación van estrechamente relacionados, por ello es que las demás UEM no presentan coeficientes parciales muy buenos.

#### 4.3 Ruido de Fondo

Los valores obtenidos en las mediciones, dentro de las cuatro posiciones que se había señalado dentro de la metodología (apartado 3.3.3), permiten sacar un valor promedio  $L_{eq}$  con ponderación A. De tal forma se obtiene un solo valor de ruido de fondo por aula, en cada una de las escuelas.

Tabla 19.

*Valores totales de Ruido de Fondo obtenidos durante las mediciones en las diferentes aulas de cada UEM.*

UEM	Montúfar	24 de Mayo	M. A. Idrobo	Bicentenario
AULA	LAeq - RF [dB]	LAeq - RF [dB]	LAeq - RF [dB]	LAeq - RF [dB]
1	49,32	53,21	50,41	54,13
2	44,14	57,21	51,47	44,14
3	49,52	53,39	59,63	49,52
4	43,91	54,96	48,93	43,91
5	44,43	50,90	48,78	44,43
6	49,00	53,37	61,74	45,60
7	48,49	56,03	62,16	49,80
8	50,17	50,88	56,14	43,53
9	48,28	53,82	60,93	44,54
10	49,33	52,91	58,86	43,18

Como se puede observar en la Tabla 19, los valores de ruido de fondo  $L_{Aeq}$ , varían en cada una de las escuelas. Los valores más altos se encuentran dentro de UEE “María Angélica Idrobo”, esto se da a raíz de la baja calidad de aislamiento en el establecimiento. Al encontrarse en una zona mixta (comercial - residencial), esta institución está en constante riesgo de percibir el ruido externo, especialmente vehicular pesado como son buses, camiones, volquetas, etc.



Tabla 20.

*Valores de los coeficientes totales de Ruido de Fondo obtenidos, mediante los diferentes cálculos, de las aulas de cada UEM.*

UEM	Montúfar	24 de Mayo	M. A. Idrobo	Bicentenario
AULA	QI BN	QI BN	QI BN	QI BN
1	0,37	0,21	0,32	0,18
2	0,68	0,11	0,28	0,68
3	0,36	0,21	0,08	0,36
4	0,69	0,16	0,39	0,69
5	0,66	0,30	0,40	0,66
6	0,39	0,21	0,00	0,58
7	0,41	0,14	0,00	0,35
8	0,33	0,30	0,13	0,72
9	0,43	0,19	0,00	0,65
10	0,37	0,22	0,09	0,75

En la Tabla 20, se observa que, los índices parciales para ruido de fondo están dentro del rango establecido en el cálculo del mismo. Aun así, hay tres aulas dentro de la UEE “María Angélica Idrobo” en la que sobrepasan los 60 dB de ruido de fondo, lo cual es un valor muy peligroso ya que puede ocasionar enmascaramiento. Es por tal razón que se le aplica el valor de 0 para que este índice no altere al resto de variables al momento de calcular el índice global.

#### **4.4 Relación Señal - Ruido**

Entre los valores obtenidos durante la hora de clase del profesor impartiendo clase, como en la hora en la que los alumnos estudiaban. Se pudo analizar que los valores de SNR en la mayoría de aulas de clase, este valor supera los 15 dB. En investigaciones similares (Hodgson, 1998) indican que, con superar los 11 dB, se obtiene un valor de SNR totalmente aceptable, sin embargo, como se está validando el procedimiento utilizado por Jan Radosz (2013) se tomó como referencia tener un valor superior a los 15 dB.

Tabla 21.

*Valores totales de Relación Señal – Ruido, obtenidos durante las mediciones en las diferentes aulas de cada UEM.*

UEM	Montúfar	24 de Mayo	M. A. Idrobo	Bicentenario
AULA	SNR [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]	SNR [dB]
1	19,10	21,10	26,13	23,93
2	26,80	17,30	22,90	32,23
3	24,63	18,48	13,55	30,90
4	26,18	19,38	26,78	31,63
5	26,28	21,15	26,23	30,18
6	19,01	18,03	7,73	29,73
7	19,90	15,20	5,33	30,88
8	16,52	20,77	7,95	28,34
9	21,06	14,85	5,90	27,64
10	25,28	19,61	10,71	26,93

En la mayoría de aulas en las distintas escuelas dentro de la Tabla 21, se aprecia un valor de SNR totalmente aceptable, ya que se encuentra en un rango de 15 dB a 30 dB, lo cual beneficia al proceso de aprendizaje.

Tabla 22.

*Valores de los coeficientes totales de Relación Señal – Ruido obtenidos, mediante los diferentes cálculos, de las aulas de cada UEM.*

UEM	Montúfar	24 de Mayo	M. A. Idrobo	Bicentenario
AULA	QI SNR	QI SNR	QI SNR	QI SNR
1	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	0,77	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	0,27	1,00
7	1,00	1,00	0,17	1,00
8	1,00	1,00	0,28	1,00
9	1,00	0,97	0,19	1,00
10	1,00	1,00	0,46	1,00

Se puede observar en la Tabla 22, como los valores de índice para este parámetro acústico llega a tener un valor de 1 ya que presenta valores óptimos de SNR (mayores a 15 dB). Aun así, se puede ver la poca eficiencia dentro de este parámetro en la UEE “María Angélica Idrobo”, esto puede ocasionar problemas como enmascaramiento, lo cual ocasiona pérdida de atención en el estudiante (Roy, 2016), así como aumento exagerado de voz por parte del docente. (Chmelík, Rychtáriková, 2016).

#### **4.5 Esfuerzo del Habla**

Durante la medición se pudo observar el esfuerzo que el docente realiza durante la hora de clase. Además, por otros factores como el acondicionamiento de la sala, las reflexiones ante un mayor esfuerzo, se percibía una notable pérdida de inteligibilidad.

Tabla 23.

*Valores totales de Esfuerzo de Habla obtenidos durante las mediciones en las diferentes aulas de cada UEM.*

UEM	Montúfar	24 de Mayo	M. A. Idrobo	Bicentenario
AULA	LAeq. 1 m [dB]	LAeq. 1 m [dB]	LAeq. 1 m [dB]	LAeq. 1 m [dB]
1	73,70	75,80	74,10	77,00
2	72,40	74,60	75,50	76,20
3	71,20	75,60	64,13	77,70
4	73,90	72,40	76,40	78,00
5	74,10	72,90	75,70	76,90
6	72,74	71,34	66,80	76,80
7	72,31	70,91	66,20	76,30
8	73,06	73,88	63,70	73,16
9	73,49	72,03	57,30	72,46
10	74,65	71,54	60,40	70,46

Como se observa en la Tabla 23, los niveles indicados entre cada escuela varían. Principalmente en la UEE “María Angélica Idrobo” donde existen ventanas grandes en dos de las seis paredes, las cuales perjudicaba al docente debido a la filtración de ruido de externo, ocasionando malestar en su condición física.

Tabla 24.

*Valores de los coeficientes totales de Esfuerzo de Habla obtenidos, mediante los diferentes cálculos, de las aulas de cada UEM.*

UEM	Montúfar	24 de Mayo	M. A. Idrobo	Bicentenario
AULA	QI SE	QI SE	QI SE	QI SE
1	0,44	0,35	0,42	0,30
2	0,49	0,40	0,36	0,34
3	0,54	0,36	0,83	0,27
4	0,43	0,49	0,33	0,26
5	0,42	0,47	0,36	0,31
6	0,48	0,54	0,72	0,31
7	0,50	0,55	0,75	0,33
8	0,46	0,43	0,85	0,46
9	0,45	0,51	1,00	0,49
10	0,40	0,53	0,98	0,57

Por último, dentro de los índices calculados se puede analizar que solo en un curso, el valor de Esfuerzo de Habla está por debajo del límite inferior establecido. El resto de valores, están dentro de lo estipulado en la norma, siendo valores que permiten un esfuerzo al momento de hablar, moderado.

#### **4.6 Difusividad**

Aplicando los procesos descritos anteriormente en metodología, se obtuvo los siguientes valores por escuela con respecto a la difusividad.

Tabla 25.

Valores totales obtenidos durante las mediciones del Colegio "Réplica Montúfar".

UEM	Montúfar		
AULA	$\Delta$ Grel.1 kHz [dB]	$\Delta$ Grel.2 kHz [dB]	$\Delta$ Grel.4 kHz [dB]
1	0,31	0,35	0,24
2	0,68	0,58	0,71
3	0,50	0,71	0,72
4	0,56	0,43	0,41
5	0,50	0,20	0,28
6	0,26	0,38	0,64
7	0,45	0,31	0,41
8	0,07	0,24	0,22
9	0,28	0,28	0,05
10	0,40	0,38	0,48

Tabla 26.

Valores totales obtenidos durante las mediciones del Colegio "Réplica 24 de Mayo".

UEM	24 de Mayo		
AULA	$\Delta$ Grel.1 kHz [dB]	$\Delta$ Grel.2 kHz [dB]	$\Delta$ Grel.4 kHz [dB]
1	0,47	0,64	0,48
2	0,39	0,31	0,10
3	0,11	0,40	0,02
4	0,58	0,56	0,65
5	0,52	0,40	0,59
6	0,61	0,74	0,77
7	0,56	0,52	0,85
8	0,49	0,32	0,34
9	0,29	0,28	0,37
10	0,75	0,82	0,80

Tabla 27.

Valores totales obtenidos durante las mediciones en la UEE "María Angélica Idrobo".

UEM	María Angélica Idrobo		
AULA	$\Delta$ Grel.1 kHz [dB]	$\Delta$ Grel.2 kHz [dB]	$\Delta$ Grel.4 kHz [dB]
1	0,93	0,97	0,93
2	0,85	0,71	0,73
3	0,82	0,85	0,76
4	0,85	0,87	0,84
5	0,92	0,86	0,89
6	0,38	0,48	0,59
7	0,72	0,92	0,65
8	0,44	0,25	0,25
9	0,91	0,92	0,92
10	0,94	0,87	0,80

Tabla 28.

Valores totales obtenidos durante las mediciones en la UEMM "Bicentenario".

UEM	Bicentenario		
AULA	$\Delta$ Grel.1 kHz [dB]	$\Delta$ Grel.2 kHz [dB]	$\Delta$ Grel.4 kHz [dB]
1	0,79	0,83	0,71
2	0,83	0,78	0,74
3	0,73	0,55	0,57
4	0,71	0,63	0,75
5	0,75	0,64	0,60
6	0,72	0,58	0,57
7	0,71	0,51	0,51
8	0,72	0,82	0,93
9	0,92	0,92	0,95
10	0,88	0,97	0,93

Dentro de lo que respecta al cálculo de difusividad, los valores dados no sobrepasan de 1 lo cual es un buen indicio de que no existe mucha variación de nivel en diferentes puntos de la sala, de esta manera obtenemos una buena variación de nivel dentro del recinto. Las ganancias obtenidas en las frecuencias que consideramos anteriormente como fundamentales en el entendimiento de un mensaje, son relativamente aceptables.

Tabla 29.

*Valores totales de coeficientes respecto a Difusividad obtenidos durante las mediciones en las diferentes aulas de cada UEM.*

<b>UEM</b>	<b>Montúfar</b>	<b>24 de Mayo</b>	<b>M. A. Idrobo</b>	<b>Bicentenario</b>
<b>AULA</b>	<b>QI SD</b>	<b>QI SD</b>	<b>QI SD</b>	<b>QI SD</b>
1	0,30	0,54	0,94	0,78
2	0,65	0,26	0,76	0,78
3	0,65	0,19	0,81	0,61
4	0,46	0,59	0,85	0,69
5	0,32	0,50	0,89	0,66
6	0,43	0,71	0,48	0,61
7	0,39	0,64	0,77	0,57
8	0,18	0,38	0,31	0,83
9	0,17	0,32	0,92	0,93
10	0,42	0,79	0,87	0,93

Para valores por debajo de 0.5, en el resultado del coeficiente de difusividad, se considera que el aula de clase responde de buena manera en este parámetro. En el caso de las UEM “Réplica Montúfar” y “Réplica 24 de Mayo”, presentan mejores resultados que en las dos escuelas restantes, donde sus valores se aproximan a 1.

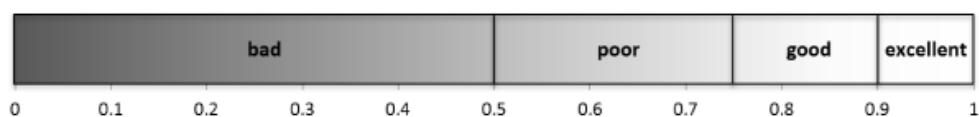
Como sabemos en las dos UEM que presentan valores elevados de difusividad, el tiempo de reverberación es muy alto, por ello presentan un



campo difuso más elevado. En este caso necesitamos que el coeficiente sea bajo, ya que deseamos que predomine la claridad del mensaje y el campo directo.

#### 4.7 Valor de índice global de calidad acústica

Para poder calificar la calidad acústica de las diferentes aulas, es importante considerar el rango de evaluación dado por Jan Radosz (2013), para la calidad acústica en aulas de clase.



*Figura 38.* Rango de evaluación de calidad acústica en aulas.

Tomado de Radosz, J., 2013, p. 5.

Donde, los valores que se tuvieron mediante el cálculo del índice global serán:

- Malo: 0 a 0.5
- Pobre: 0.5 a 0.75
- Bueno: 0.75 a 0.9
- Excelente: 0.9 a 1

Determinado los valores para cada rango, se puede observar en las siguientes tablas los valores obtenidos por aula en cada una de las instituciones académicas.

Tabla 30.

Valores de índice global de calidad acústica de las Unidades Educativas del Milenio del DMQ.

UNIDADES EDUCATIVAS DEL MILENIO									
AULA	Montúfar		24 de Mayo		Idrobo		Bicentenario		
	QI G	Calidad	QI G	Calidad	QI G	Calidad	QI G	Calidad	
1	0,68	Pobre	0,58	Pobre	0,57	Pobre	0,51	Pobre	
2	0,79	Bueno	0,58	Pobre	0,60	Pobre	0,67	Pobre	
3	0,71	Pobre	0,61	Pobre	0,43	Mala	0,57	Pobre	
4	0,76	Bueno	0,65	Pobre	0,59	Pobre	0,60	Pobre	
5	0,74	Pobre	0,69	Pobre	0,61	Pobre	0,61	Pobre	
6	0,70	Pobre	0,68	Pobre	0,50	Pobre	0,62	Pobre	
7	0,69	Pobre	0,66	Pobre	0,53	Pobre	0,60	Pobre	
8	0,66	Pobre	0,67	Pobre	0,54	Pobre	0,67	Pobre	
9	0,68	Pobre	0,63	Pobre	0,50	Pobre	0,68	Pobre	
10	0,68	Pobre	0,63	Pobre	0,42	Mala	0,74	Pobre	

Los valores del índice global de calidad acústica en su mayoría oscilan entre 0.5 a 0.7, teniendo así un total de 2 aulas con calidad “Buena”, 2 con calidad “Mala” y 36 con calidad “Pobre”, de un total de 40 salones evaluados.

Todas las aulas, no alcanzaron a llegar a un valor excelente de calidad acústica, lo cual pone en cuestionamiento a los procesos arquitectónicos llevados a cabo en la construcción de las UEM.

El bajo rendimiento de las aulas podemos atribuir al tiempo de reverberación, que es el parámetro más influyente dentro de todo el proceso y el cual es base fundamental para el cálculo de otros índices.

#### **4.8 Análisis General**

Aplicando el método de “índice global de calidad acústica” desarrollado por Jan Radosz (2013). Donde se utilizaron tanto los métodos de medición como los cálculos para poder evaluar la calidad acústica de las aulas de las Unidades Educativas del Milenio. Y con los resultados obtenidos se puede observar que, la mayoría de aulas no cumplen con una buena calidad acústica. De las 40 aulas evaluadas, solo dos se encuentran en el rango de “Bueno”. Esto se puede ver desde el punto de vista arquitectónico. Debido que los materiales que componen las salas no son los adecuados para poder ofrecer un confort acústico. Tanto a los estudiantes para recibir clases causando falta de atención, como al docente al momento de impartir la misma.

En las UEM, se pudo dialogar con diferentes autoridades y docentes. En muchos casos, se pudo notar molestias existentes por parte de docentes y alumnos dentro de las aulas, especialmente, en las destinadas a educación inicial. Donde los niños no pueden poner atención, ya que, en épocas de lluvia, el ruido externo enmascara por completo la voz del docente. Al evaluar las aulas, se pudo confirmar que, en las aulas de educación inicial se presentan los mayores problemas en calidad acústica.

Paredes donde, en su totalidad, son reemplazadas por ventanas o cerámica, ocasionan alto riesgo con respecto a las reflexiones que se obtiene al

momento de hablar, creando fenómenos acústicos que imposibilitan el aprendizaje.

Los parámetros que presentan mayor problema son:

- Tiempo de reverberación.
- Inteligibilidad
- Ruido de Fondo

Esos índices no permiten que exista una buena comunicación entre el docente con el estudiante, siendo no solo un problema interno, sino que a la final influye en el aprendizaje de cada alumno. Esto es un problema debido a la baja calidad acústica que existe en la mayoría de aulas.

Por otro lado, al no existir una norma que regule el diseño acústico de escuelas y colegios dentro del país, se perjudica severamente a la educación de estudiantes tanto de inicial, primaria como secundaria.

En parámetros que en cierto aspecto son considerados subjetivos, como: relación señal – ruido, esfuerzo de habla y difusividad. Se pueden obtener resultados que no llegan a ser ideales, pero tampoco llegan a ser muy elevados para las condiciones que deben existir. Estos valores pueden mejorar al disminuir los resultados de los anteriores parámetros (TR, STI, RF).

La baja calidad acústica encontrada dentro de las aulas evaluadas implica un riesgo en distintos puntos como se mencionó anteriormente. Ahora, las causas que se pueden encontrar por medio de una observación de todas las variables son:

**Materiales de construcción:** Al utilizar materiales prefabricados o hacer un levantamiento en una construcción antigua, perjudica severamente a las condiciones acústica que debe existir dentro de una sala de clase. Paredes con poco grosor, techos con láminas de yeso, ventanas amplias o paredes cubiertas con cerámica; permiten que las reflexiones sean mayores y por tanto tener una pérdida de claridad al recibir el mensaje.

Ubicación geográfica: algunas UEM se encuentran en lugares de alto nivel de contaminación acústica y esto, en conjunto con los materiales que componen las salas de clase, crea problemas de ruido excesivo en las aulas. A su vez, son propensas a vibraciones por el constante tráfico de vehículos pesados. La ubicación de escuelas debería ser regulada, ya que la mayoría de instituciones, tienen el mismo riesgo.

Además, a todos los problemas encontrados por los cuales se afecta la calidad acústica en las salas. Se pueden incluir los problemas que tienen los docentes para controlar el orden dentro de clases, afectando especialmente a la inteligibilidad y esfuerzo de habla. Al tener ruido interno, la relación señal – ruido se ve afectada, siendo también un inconveniente para las salas de clase, teniendo factores externos como internos que deben ser manejados especialmente en las aulas que se ubicaron en el rango de “Pobre” y “Malo”.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Una vez llevado a cabo el análisis de las 40 aulas correspondientes a las 4 Unidades Educativas del Milenio ubicadas en el Distrito Metropolitano de Quito, se llegó a la conclusión de que ninguna de ellas, cumplen con los requisitos establecidos. Los resultados obtenidos para el índice global de calidad acústica se ubican en el rango de calidad “Pobre”, es decir no apropiados para la educación.

Los valores de tiempo de reverberación exceden los límites aceptados y sugeridos por Jan Radosz. Con estos valores, la calidad acústica disminuye considerablemente ya que este factor es uno de los más representativos a la hora de impartir un mensaje.

Los parámetros que son considerados como “subjetivos”, obtienen resultados aceptables, ya que, en su mayoría, depende estrictamente del docente. Al mantener un buen orden dentro de su clase, esto le permite no elevar el tono de voz, logrando que la comunicación sea la adecuada. De esta manera, logra evitar los problemas de atención por parte de los alumnos. Sin embargo, por parámetros como Inteligibilidad, que tiene valores regulares, no permite la correcta recepción del mensaje de los estudiantes.

De igual forma, se observó que las construcciones de las aulas no son de excelente calidad. En casos como la UEE “María Angélica Idrobo” donde se realizó un levantamiento a partir de una antigua construcción. Como en el colegio “Réplica Montúfar” donde la obra no está entregada pero que se encuentra en funcionamiento. No garantiza un confort acústico en el estudiante al momento de recibir clases.

Respecto al cálculo de los factores correspondientes se debe tener en cuenta los límites respectivos para cada una de las mediciones. Existen parámetros subjetivos que, según los cálculos, si sobrepasan estos valores extremos, el comportamiento será el mismo independientemente de los resultados de los

cálculos. Esto puede suceder, aunque los valores se encuentren fuera del rango (0-1) requerido, aun sabiendo que la sensación de escucha es diferente.

Tanto la geometría de la sala como los materiales utilizados en la misma son influyentes dentro de la calidad sonora. Tenemos las salas rectangulares que, pese a que no se recomienda paralelepípedos en los diseños, existen aulas que, gracias a los materiales constructivos presentan valores no tan bajos de calidad acústica. Por otro lado, existen salas hexagonales, que pese a ser consideradas buenas dentro de diseño de espacios sonoros, presentan altos problemas de calidad, siendo esto debido a los materiales utilizados en su construcción.

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda el uso de diferentes materiales para la construcción de aulas con fines educativos, así como también se eviten geometrías paralelas. De esta manera, la inteligibilidad prevalecerá dentro del recinto y los tiempos de reverberación no entorpecerán la calidad de la clase, ni la recepción de conceptos por parte de los estudiantes presentes.

La mejora del aislamiento acústico es una opción a considerar dentro de la mayoría de centros educativos. Esto se debe a que la propagación estructural del sonido es también un factor que influye en la inteligibilidad presente dentro de un aula de clase.

En caso de que el aula de clases ya se encuentre en funcionamiento y se decida mejorar el acondicionamiento, uno de los factores a tomar en cuenta es el tiempo de reverberación. Este factor se lo puede disminuir con la adición de amoblado que contribuya a la absorción del sonido siendo estos elementos cortinas, bancas tapizadas, casilleros, etc. Mientras más amoblado el salón, el tiempo de reverberación disminuye su valor.

Si se está empezando una construcción de cero, se recomienda que los salones de clases no posean dimensiones muy elevadas, ya que contribuyen a que el sonido directo no llegue de manera equitativa a todos los puntos de la sala. Una solución sería realizar un sondeo para verificar cuántos alumnos por

aula podrían ingresar y así poder obtener aulas con mejores resultados.

A manera de ampliación a largo plazo, se recomendaría realizar un estudio de como la calidad acústica puede influir en las notas de los alumnos o si una determinada posición de pupitre tiene relación con el progreso o desarrollo del estudiante. Todo esto basándonos en la calidad acústica del recinto medido.

El estudio se lo puede realizar en horas donde la institución no este en funciomaniento, pero es mas factible realizarlo durante la jornada estudiantil, tal y como se lo realizó en esta investigación. De esta manera los valores y resultados obtenidos se asemejarán más al día a día vivido por estudiantes y docentes.

Se recomienda, para estudios futuros, tomar más consideraciones sobre los factores meteorológicos presentes a la hora de la medición. Este estudio se lo realizó cuando las condiciones ambientales eran buenas, mas no se consideró casos de lluvia, viento, entre otros componentes naturales que pueden ser representativos a la hora de realizar la medición.



## REFERENCIAS

- Carrillo, G. (2011). Caracterización y propuesta de mejoramiento de la difusividad acústica en bandas de frecuencias bajas de la cámara reverberante IDIEM. Universidad Austral de Chile.
- Chmelik, V. Rychkova, M. (2016). *Voice and classroom interactions. Recent outcomes. 22nd International Congress on Acoustics.*
- Durup N., Shield B. M., Dance S., Sullivan R., Gomez-Augustina L. (2015). *How classroom acoustics affect the vocal load of teachers. Energy procedia 78.*
- Hunter, E., Leishman, T., Bottalico, P., & Graetzer, S. (2016). *Teaching in a classroom environment: Speech adjustment to real and simulated classroom conditions. 22nd International Congress on Acoustics.* Recuperado el 19 de abril de 2017 de <http://ica2016.org.ar/website/proceedings>
- Isbert, A. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos (Vol. 4). Univ. Politèc. de Catalunya.
- Klatte, M., Hellbrück, J., (Junio, 2010). *Effects of classroom acoustics on performance and well-being in elementary school children: A field study. Inter Noise.*
- F. L., M. W. K., A. M., & S. T. (2011). *Observations of the relationship between noise exposure and preschool teacher voice usage in day-care center environments. J Voice 25 (2).*
- Kristiansen, J., Lund, S., Persson, R., Shibuya, H., Nielsen, P., & Scholz, M. (2014). *A study of classroom acoustics and school teachers' noise exposure, voice load and speaking time during teaching, and the effects on vocal and mental fatigue development. International archives of occupational and environmental health, 87(8).*

- Leśna, P., Skrodzki, E. (2010). *Subjective Evaluation of Classroom Acoustics by Teenagers vs. Reverberation Time. Acta Physica Polonica A*. Vol. 118, No. 1.
- Llinares, J., Llopis, A., & Sancho, J. (1991). *Acústica arquitectónica y urbanística*. Valencia. Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Martínez, A., Castro, E., Prior, J., & Martínez, E. (2016). Evaluación de la calidad acústica de un aula problemática en la Universidad Politécnica de Cartagena.
- Masson, F., Yommi, M., & Crapa, M. (2016). *Intelligibility in a classroom: Coupling effects between outdoor noise and room acoustic response. 22nd International Congress on Acoustics*. Recuperado el 19 de abril de 2017 de <http://ica2016.org.ar/website/proceedings>
- Ministerio de Educación. (2005). *Unidades Educativas del Milenio*. Recuperado el 18 de abril de 2017 de <https://educacion.gob.ec/caracteristicas>
- Mikulski, W., Radosz, J. (2011). *Acoustics of Classrooms in Primary Schools – Results of the Reverberation Time and the Speech Transmission Index Assessments in Selected Buildings. Archives of Acoustics*, 36(4).
- Miyara, F. (2003). *Acústica y sistemas de sonido*. Universidad Nacional de Rosario.
- Headquarters, N. (2006). *Speech Intelligibility*. Recuperado el 24 de abril de 2017 de <http://www.ntinstruments.com>
- Rabelo, A., Santos, J., Oliveira, R., & Magalhães, M. (2014). *Effect of classroom acoustics on the speech intelligibility of students*. In *CoDAS* Vol. 26, No. 5. *Sociedade Brasileira de Fonoaudiologia*.
- Radosz, J. (2013). *Global index of the acoustic quality of classrooms. Archives of Acoustics*, 38(2).

- Rantala L. (2011). Associations between classroom conditions and teacher's voice production. *Energy procedia* 78.
- Roy, K. (2016). *Global case studies of acoustics in classrooms. 22nd International Congress on Acoustics*. Recuperado el 19 de abril de 2017 de <http://ica2016.org.ar/website/proceedings>
- Sato H., Bradley J. (2008). *Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms. Journal of the Acoustical Society of America*. 123, 4.
- UNE EN-ISO 9921. (2003). Ergonomía. Evaluación de la comunicación verbal.
- Wróblewska, D. (2010). *Acoustical Standards Used in Design of School Spaces. Acta Physica Polonica A*. Vol. 118, No. 1.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### FOTOGRAFÍAS DEL COLEGIO “RÉPLICA MONTÚFAR”



## ANEXO 2

### FOTOGRAFÍAS DEL COLEGIO “RÉPLICA 24 DE MAYO”





### ANEXO 3

## FOTOGRAFÍAS DE LA UNIDAD EDUCATIVA EXPERIMENTAL “MARÍA ANGÉLICA IDROBO”



## ANEXO 4

### FOTOGRAFÍAS DE LA UNIDAD EDUCATIVA MUNICIPAL DEL MILENIO “BICENTENARIO”





