



FACULTAD DE INGENERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

ANÁLISIS COMPARATIVO DE UMBRALES AUDITIVOS EN NIÑOS Y ADULTOS.

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

Profesor Guía
PhD. Carlos Jurado

Autor
William Daniel Bejarano Bustamante

Año
2015

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”.

Carlos Jurado MSc. PhD.
C.I. 542886-6

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi 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”.

William Daniel Bejarano Bustamante
C.I. 172367326-3

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por todo lo que me ha dado. A mis padres y hermana por su apoyo incondicional. A mi tutor, Carlos Jurado por su guía en el desarrollo de este trabajo. Y a todas las personas que de alguna forma colaboraron en este trabajo.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a Jesús. A mis padres, William y Mónica, y a mi hermana. A cada una de las personas que han sido de motivación en mi vida. A Carlos Jurado por guiarme tan profesionalmente.

RESUMEN

Los umbrales auditivos (mínimo nivel audible) son importantes ya que por medio de estos se puede conocer si existe una pérdida auditiva leve o severa. En los niños es muy común realizar audiometrías que muestren si existe pérdida o no. La detección temprana del elevamiento del umbral auditivo (sea leve o severo) puede ayudar a que se preste ayuda médica oportuna para que el niño pueda desarrollarse en la comunicación con la sociedad.

En el presente trabajo se realizó la medición de umbrales auditivos en las frecuencias: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 12500 y 16000 Hz. Estas mediciones se efectuaron en veinticuatro personas, de las cuales doce eran niños de 7 a 14 años y doce adultos jóvenes de 18 a 30 años.

Para elegir el procedimiento óptimo para medición de umbrales auditivos, se realizó una revisión bibliográfica que incluyó libros relacionados con la psicoacústica, además de publicaciones de revistas relacionadas a la audiolgía, psicoacústica y psicofísica. Para ejecutar las mediciones se usó el programa *Psychoacoustics*.

En el análisis comparativo entre umbrales auditivos de niños y adultos se usaron herramientas estadísticas conocidas (por medio del software SPSS) con el fin de establecer si las diferencias entre los umbrales de los dos grupos son significativas.

En los resultados se observó una diferencia estadística significativa en las frecuencias de 500 y 1000 Hz entre niños y adultos. En las demás frecuencias medidas las diferencias son mínimas.

ABSTRACT

Hearing thresholds (minimum audible level) are important because these can be used to determine if there is mild to severe hearing loss. In children it is very common to perform hearing tests that show whether or not there is hearing loss. Early detection of rise in the hearing (whether mild or severe) can help to provide timely medical assistance for the child, in order to help developing communication with society.

In the present work auditory thresholds were measured at frequencies: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 12500 and 16000 Hz. These measurements were performed in twenty four people, twelve of which were children of 7-14 years and twelve young adults of 18-30 years.

To choose the optimal procedure for measuring hearing thresholds, a review of indexed papers and books related with audiology, psychoacoustics and psychophysics was done. To run the experiments the MATLAB's *Psychoacoustics* toolbox was used.

A comparative analysis between hearing thresholds of children and adults was performed. Statistical tools were used (SPSS software) in order to establish if the differences between the thresholds of the two groups were significant.

Results showed a significant difference in 500 and 1000 Hz between children and adults. For the other frequencies, results showed minimal difference between the two groups.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: Proyecto de tesis.....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Alcance.....	3
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Hipótesis.....	5
CAPÍTULO II: Fundamentos teóricos generales.....	6
2.1 Acústica	6
2.2 Sonido	7
2.2.1 Onda sinusoidal	7
2.2.1.1 Frecuencia de una onda	8
2.2.1.2 Periodo de una onda.....	9
2.2.1.3 Amplitud de onda	9
2.2.1.4 Longitud de onda	10
2.2.1.5 Fase de la onda	10
2.2.2 Velocidad del sonido	10
2.2.3 Presión sonora	11
2.2.4 Potencia sonora	12
2.2.5 Intensidad sonora.....	12
2.2.6 Escala logarítmica.....	13
2.2.7 Decibel	14
2.2.8 Niveles sonoros.....	14
2.2.8.1 Nivel de presión sonora	14
2.2.8.2 Nivel de intensidad sonora.....	16
2.2.8.3 Nivel de potencia sonora.....	16

2.2.9 Análisis de Fourier	16
CAPÍTULO III: Fundamentos teóricos relacionados con la psicoacústica.....	18
3.1 Definición	18
3.2 Fisiología del sistema auditivo	18
3.2.1 Oído externo	19
3.2.2 Oído medio.....	20
3.2.3 Oído interno	21
3.3 Presentación de los sonidos	25
3.4 Umbral auditivo	26
3.5 Pérdida auditiva	31
3.5.1 Presbiacusia.....	33
3.6 Percepción de la sonoridad.....	34
3.6.1 Introducción.....	34
3.6.2 Nivel de sonoridad y curvas de igual sonoridad (<i>Equal-loudness contours</i>).....	35
3.6.4 Integración temporal de la sonoridad	40
3.6.5 Detección de los cambios de intensidad sonora	40
3.6.5.1 Discriminación de intensidad (<i>Intensity discrimination</i>)	41
3.6.6 Fatiga de sonoridad	43
3.6.6.1 Fatiga auditiva post-estímulo	44
3.6.6.2 Adaptación auditiva.....	45
3.7 Audición en niños.....	46
3.7.1 Introducción.....	46
3.7.2 Desarrollo de la percepción auditiva en los niños	46
3.7.3 Psicoacústica de desarrollo.....	47
3.7.4 Pérdida de audición en niños.....	48
3.7.4.1 Conductiva	48
3.7.4.2 Neurosensorial.....	48
3.7.4.3 Factores de riesgo	49

3.7.5 Pruebas de audición en niños	50
3.7.6 Investigaciones relacionadas con umbrales auditivos en niños	51
3.7.6.1 Niveles de umbrales auditivos en niños de escuela.....	52
3.7.6.2 Niveles de umbrales auditivos en niños de 7 años	53
3.7.6.3 Desarrollo de umbrales auditivos con tonos puros en niños de escuela	54
3.7.6.4 Comparación de umbrales auditivos con tonos puros en infantes y adultos.....	54
3.7.6.5 Comparación de umbrales auditivos entre niños y adultos	56
3.7.6.6 Sensibilidad de tonos puros en infantes.....	56
3.8 Procedimientos adaptativos para la medición de umbrales auditivos	58
3.8.1 Introducción.....	58
3.8.2 Función psicométrica	59
3.8.3 Procedimientos tradicionales	60
3.8.3.1 Método de las constantes	60
3.8.3.2 Método de los límites	61
3.8.4 Procedimientos <i>up-down</i> (arriba-abajo)	61
3.8.4.1 Simple <i>up-down</i>	61
3.8.4.2 <i>Transformed up-down</i> (Transformado arriba-abajo).....	63
3.8.5 Procedimiento <i>Alternative Forced Choice</i> (de elección alternativa forzada)	67
3.8.6 Aplicaciones de los métodos.....	68
CAPÍTULO IV: Metodología	69
4.1 Características de la investigación.....	69
4.1.1 Documentación de bibliografía.....	69
4.1.2 Equipos e instrumentos.....	69
4.1.3 Trabajo de campo	74
4.1.3.1 Calibración	75
4.1.3.2 Calibración con voltaje	76
4.1.3.3 Procedimiento para mediciones de umbrales	77

4.2 Muestra.....	80
4.3 Variables.....	80
4.4 Tabulación de datos.....	82
4.5 Análisis de datos.....	82
CAPÍTULO V: Análisis e interpretación de resultados	83
5.1 Resultados generales	83
5.1.1 Respuesta sonora de los audífonos usados	83
5.1.2 Ejecución del procedimiento <i>two down-one up</i> (dos arriba-uno abajo) ...	85
5.2 Resultados de umbrales auditivos en niños y adultos	86
5.2.1 Umbrales auditivos en niños con audición normal	86
5.2.2 Umbrales auditivos en jóvenes adultos con audición normal	87
5.2.3 Comparación de umbrales auditivos de niños y adultos	88
5.2.4 Comparación con datos de la bibliografía	90
5.3 Formulación de hipótesis	91
5.4 Análisis estadístico de resultados	91
5.4.1 Análisis por frecuencias	93
5.4.2 Análisis de desviación estándar de los niveles de cada frecuencia ..	98
5.5 Discusión	99
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS ECONÓMICO	103
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y	
RECOMENDACIONES	104
7.1 Conclusiones	104
7.2 Recomendaciones	106
REFERENCIAS.....	107
ANEXOS	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Forma de onda sinusoidal	8
Figura 2.2 Formas de ondas de alta frecuencia y baja frecuencia	9
Figura 2.3 Amplitud, pico, valle y nodo de una onda de un ciclo	10
Figura 2.4 Relación entre presión sonora y nivel de presión sonora con ilustraciones del diario vivir.....	15
Figura 2.5 Espectro de una señal que posee dos componentes	17
Figura 3.1 Estructura fisiológica del sistema periférico auditivo de un ser humano	19
Figura 3.2 Desvió de la membrana timpánica ante cambios de presión atmosférica.....	21
Figura 3.3 Estructura de la cóclea	22
Figura 3.4 Estructura del órgano de Corti.....	23
Figura 3.5 Estructura de la cóclea	23
Figura 3.6 Ondas con diferentes frecuencias que viajan a través de la membrana basilar.....	24
Figura 3.7 Tipos de audífonos	25
Figura 3.8 Estimado de la curva MAP según Asociación de Estándares Británicos.....	27
Figura 3.9 Estimado de la curva MAP según Killion	28
Figura 3.10 Umbral auditivo, MAF y MAP.....	29
Figura 3.11 Umbral auditivo y audición humana.....	30
Figura 3.12 Umbral auditivo en función de la edad	30
Figura 3.13 Gráfica usada en psicoacústica (arriba) y audiograma (abajo)	32
Figura 3.14 Curvas de igual-sonoridad o Equal-loudness contours	35
Figura 3.15 Curvas de igual-sonoridad de 40 fonos para tonos puros	37
Figura 3.16 Curvas de igual-sonoridad según Suzuki y Takeshima	38
Figura 3.17 Presentación de intervalos de diferente intensidad	42
Figura 3.18 Umbrales absolutos para experimento	43
Figura 3.19 Umbral de audición de referencia para tonos puros en campo libre (línea continua) y campo difuso (línea entrecortada).....	51

Figura 3.20 Niveles de umbral auditivo (dB HL / audiograma) en niños de primer grado (pupils 1st) y cuando avanzaron al cuarto grado (pupils 4th)	54
Figura 3.21 Promedio de umbrales auditivos en infantes y adultos con tonos de 1 segundo (arriba) y 0,5 segundos (abajo).....	56
Figura 3.22 Umbrales auditivos de niños y adultos	56
Figura 3.23 Audiograma de niños y adultos	56
Figura 3.24 Umbrales auditivos con tonos puros de infantes de 3, 6, 12 meses y adultos	57
Figura 3.25 Umbrales auditivos de infantes de 2 a 4 semanas de nacidos hasta el umbral de un adulto	58
Figura 3.26 Función psicométrica.....	59
Figura 3.27 Desarrollo del método up-down.....	62
Figura 3.28 Desarrollo del método transformed up-down.....	65
Figura 3.29 Desarrollo del método up-down.....	66
Figura 3.30 Procedimientos AFC.....	67
Figura 4.1 Medición de nivel de presión sonora en audífonos con sonómetro	69
Figura 4.2 Vista frontal de soporte con agujero para el ingreso del micrófono del sonómetro.....	70
Figura 4.3 Medidas de soporte de audífonos. Vista lateral.....	70
Figura 4.4 Medidas del sonómetro CESVA SC310	71
Figura 4.5 Interfaz gráfica de la herramienta Psychoacoustics	73
Figura 4.6 Plug, conector hembra y macho TRS.....	74
Figura 4.7 Colocación de audífonos en soporte	75
Figura 4.8 Calibración con multímetro.....	77
Figura 4.9 Relación entre variables independientes y dependientes.....	81
Figura 5.1 Curvas de respuesta sonora de los dos audífonos en el rango de frecuencias medido	84
Figura 5.2 Procedimiento two down-one up en adulto 4 y en niño 4 en 250 Hz.....	85
Figura 5.3 Curvas de doce niños evaluados con curvas MAP (monoaural) anteriores	86

Figura 5.4 Curvas de doce adultos jóvenes evaluados con curva MAP monoaural	87
Figura 5.5 Curvas de nivel promedio de umbral auditivo con errorbar de los doce adultos jóvenes y doce niños evaluados, con curva MAP monoaural	88
Figura 5.6 Nivel promedio del umbral en niños (este estudio) comparada con curvas de umbrales en niños de 7 años, niños de escuela y MAP monoaural (datos de bibliografía).....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de pérdida auditiva y niveles auditivos.....	50
Tabla 2. Comparación de niveles de umbral auditivo (dB HL) en niños de 7 años.....	52
Tabla 3. Comparación de niveles de umbral auditivo (dB HL) entre niños de 7 años (Blandy y Lutman; Haapaniemi) y adultos jóvenes (18 a 25 años; Smith).....	53
Tabla 4. Grupo de respuestas y sus probabilidades de los métodos transformed up-down.....	64
Tabla 5. Grupos de frecuencias aleatorias para cada sujeto.....	78
Tabla 6. Valor inicial para cada frecuencia	79
Tabla 7. Tabulación de datos en cada individuo.....	82
Tabla 8. Valores de la respuesta sonora de cada audífono.....	83
Tabla 9. Promedio de umbral auditivo en niños y adultos con su respectiva desviación estándar.....	89
Tabla 10. Estadísticas de los grupos (niños y adultos) en todas las frecuencias.....	93
Tabla 11. Prueba de Shapiro-Wilk para cada frecuencia en niños y adultos....	94
Tabla 12. Prueba no paramétrica mediana de Mood.....	95
Tabla 13. Prueba de Levene para igualdad de varianzas en todas las frecuencias.....	95
Tabla 14. Prueba de t de student para igualdad de medias en todas las frecuencias.....	97
Tabla 15. Prueba Shapiro-Wilk para normalidad.....	98
Tabla 16. Prueba no paramétrica, mediana de Mood.....	98
Tabla 17. Prueba de Levene para las desviaciones	98
Tabla 18. Prueba t de student para análisis de desviaciones	99

Tabla 19. Valor individual de cada equipo usado en esta tesis.....	103
---	-----

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se realizó un análisis comparativo entre umbrales auditivos de niños y adultos. Cabe recalcar que en general los umbrales auditivos pueden variar entre un individuo y otro por distintos motivos. Uno de los motivos más importantes es la exposición a altos niveles sonoros ya que esto puede provocar pérdida auditiva conforme pasan los años. Esto se ve normalmente en edades avanzadas.

Entre las ramas de la física se encuentra la acústica. Ésta estudia y analiza el efecto que generan las ondas mecánicas en el medio en el que se transmiten, ya sea líquido, gaseoso o sólido. La acústica se relaciona con varias disciplinas de la ingeniería, arte, ciencias de la vida y ciencias de la tierra. Uno de los campos en los que la acústica interactúa con disciplinas, tales como la psicofísica y psicología es la psicoacústica. La psicoacústica es la ciencia en la cual la psicofísica y la física interactúan para dar lugar a la percepción auditiva. Las interpretaciones que hace el cerebro al estímulo proporcionado son de gran importancia y la base de la psicoacústica. En esta área se realizan experimentos que son usados para conocer más a fondo el comportamiento perceptual y psicológico que tiene un ser humano ante un determinado estímulo sonoro.

Existen varios parámetros psicoacústicos que pueden ser cuantificados mediante métodos convencionales que han sido usados para este fin. Entre ellos están las curvas de enmascaramiento, curvas isofónicas (o *Equal-loudness contours*), umbrales auditivos, bandas críticas, filtros auditivos, sonoridad, timbre, etc. Entre los métodos se encuentran el método *simple up down*, *transformed up down*, de ajuste, adaptivo, comparación de pares de estímulos, etc. El objetivo de estos métodos es que el sujeto no sepa que está pasando además de eliminar la subjetividad (manera de juzgar u opinar sobre algo en específico, en base a los intereses de cada persona). También tienen aspectos positivos y negativos por lo que es fundamental escoger el indicado para cada experimento.

CAPÍTULO I

1. PROYECTO DE TESIS

1.1 Antecedentes

La psicofísica es una de las tantas ramas de la psicología. Ésta trata la relación entre el estímulo físico, en este caso uno sonoro, y la percepción del sujeto ante este estímulo. Desde que la teoría y muchas técnicas de la psicofísica fueran formuladas por el científico alemán Gustav Fechner con su libro *Elemente der Psychophysik* (Elementos de Psicofísica, 1860), daría lugar al comienzo de la psicología de la audición como una rama científica.

La psicoacústica es una rama de la psicofísica que relaciona el campo físico, la psicología y la percepción del ser humano. Esta relación involucra la emisión de sonido, su transmisión y la recepción del sistema auditivo. Además de lo mencionado antes, la fisiología (procesos físicos y químicos de un organismo) del oído ocupa un lugar muy importante en dicha rama. A través de la psicoacústica se puede entender como el cerebro del ser humano reacciona ante un impulso acústico emitido. Algunos de sus objetivos generales son el determinar el umbral de la sensación, el umbral diferencial de determinado parámetro del estímulo, interpretación de señales acústicas, etc.

Los usos de la psicoacústica son vastos. Esto ha permitido su vinculación con ramas científicas. Entre estas una relación simbiótica con ciencias y redes computacionales, ingeniería informática, etc. El desarrollo de software relacionado con la psicoacústica también ha estado en auge en los últimos años. Por ejemplo, para el procesamiento digital de señales, percepción aural, compresión de datos (como el formato MP3), sonido en tres dimensiones (realidad virtual, 3D) y demás.

La investigación en el área psicoacústica puede ser muy útil en varios campos prácticos. Por ejemplo cuando hablamos de la pérdida de la audición podemos utilizar la investigación en esta área, y diseñar una ayuda para este problema

en oídos dañados. Aquí la psicoacústica es útil para interpretar el tipo de anomalías perceptuales que tiene el individuo y con eso tener un punto de partida para decidir la compensación que se necesita. Con esto se puede realizar un diseño óptimo para las necesidades de cada sujeto que tiene pérdida auditiva.

Los implantes cocleares son otra forma práctica en la que la psicoacústica toma lugar. Estos sistemas devuelven algo de audición a personas que han sufrido de una sordera total o bastante alta. Dicha estructura logra su objetivo mediante estímulos eléctricos en el nervio auditivo.

También se conoce que la psicoacústica está presente en equipos de reproducción sonora como *CD players*, radios, amplificadores y altavoces. La intención aquí es brindar una alta fidelidad sonora (*hi-fi*), es decir, que la reproducción del sonido se lo mas parecida posible a la intención del productor musical o músico.

Grabaciones hechas con una *dummy head* (cabeza humana-maniquí) se han hecho para comparar las propiedades acústicas de diferentes salas, las cuales dan resultados que pueden ser útiles en el ámbito de la producción musical.

En el Ecuador no se han realizado investigaciones psicoacústicas, que sean relevantes para el desarrollo en ámbitos prácticos. Tampoco se han hecho estudios psicoacústicos comparativos de la audición entre niños y adultos.

1.2 Alcance

El alcance para este trabajo de titulación es analizar la diferencia entre los umbrales auditivos absolutos medidos en doce niños y doce adultos escogidos en base a criterios de selección (edades, sin historial de desórdenes auditivos). Algunas de las pruebas se realizaron en la sala CR2 y EG1 que están ubicadas en el subsuelo de la sede Granados. Otras (especialmente las de los niños) se llevaron a cabo en casa del autor de la tesis.

Para lograr lo mencionado anteriormente, se aplicaron métodos psicoacústicos seleccionados por su robustez, que entreguen los mejores resultados posibles.

El sistema se calibró adecuadamente con el fin de controlar, lo mejor posible, los niveles de presión sonora emitidos por el audífono en el oído de cada paciente.

1.3 Justificación

Lo que ha incentivado a realizar este trabajo de titulación es resaltar la importancia de la psicoacústica en el quehacer humano, y como actúa el cerebro cuando existe un estímulo sonoro. Resaltar el cuidado (desde edades tempranas) que se debe tener ante estímulos con niveles muy altos, ya que a largo plazo pueden ocasionar pérdida auditiva. Los beneficios que la psicoacústica puede brindar son vastos, pueden tener resultados muy gratificantes y aplicables en diferentes ámbitos científicos.

Con esto se espera que la psicoacústica pase a ser una disciplina más importante en el Ecuador y sea un objeto de análisis en carreras que estén relacionadas con la acústica, la psicofísica y psicología. Se espera que este trabajo sea de utilidad y sirva como un comienzo para futuras investigaciones en el campo psicoacústico. También que estudiantes de Ingeniería en Sonido y Acústica de la Universidad de las Américas puedan colaborar con estudiantes de otras carreras y así poder fomentar investigaciones en psicoacústica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar un análisis comparativo de umbrales auditivos monoaurales en niños y adultos, seleccionando el método más adecuado para medir los umbrales absolutos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Recopilar información de los diferentes métodos usados para la determinación de umbrales auditivos.
- Establecer un rango de frecuencias óptimo para la comparación entre niños y adultos.
- Efectuar mediciones de los umbrales auditivos en niños y adultos.

- Realizar un análisis estadístico de los umbrales auditivos obtenidos.

1.5 Hipótesis

Al realizar la medición de umbrales auditivos en niños y adultos con un método psicoacústico confiable y robusto se estima a priori, en base a los resultados de mediciones anteriores en niños, que los umbrales auditivos de los niños con audición normal tienden a ser más altos que los umbrales auditivos de los jóvenes adultos al menos en parte del rango de frecuencias estudiadas.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS GENERALES

Para poder comprender este trabajo de mejor manera es necesario tener conocimiento pleno de los conceptos fundamentales relacionados con la acústica y el sonido de la forma más sistemática posible.

2.1 Acústica

Los primeros experimentos relacionados con la acústica se realizaron en el siglo sexto A.C. por el filósofo griego Pitágoras. Desde esa época hasta la actualidad la teoría y aplicaciones de la acústica han sido muy útiles en el campo científico. Entre algunas de las personas que han ayudado con investigaciones acerca de la acústica, están el físico y psicólogo experimental *Gustav Fechner* con su libro *Elementos de la Psicofísica* (1860), el físico y médico alemán *Hermann von Helmholtz* quien fue de gran influencia en la escuela americana de psicoacústicos además de su publicación *La sensación del tono como base fisiológica para la teoría musical* (1862), el físico americano *Clement Sabine* que es conocido por ser el padre de la acústica arquitectónica moderna y el biofísico húngaro *Georg von Békésy* que por primera vez combinó los principios de la física en experimentos relacionados con la audición, por nombrar algunos.

La acústica en sí, es una de las subcategorías de la física, la cual se dedica a estudiar el comportamiento de las ondas mecánicas en el medio en que se transmitan sea sólido, líquido o gaseoso. El estudio de esta comienza desde la generación de las ondas, su transmisión, propagación y el efecto que causa.

Está presente en nuestra vida diaria, por ejemplo mediante ondas sonoras que llegan a nuestro sistema auditivo, las cuales podemos escuchar, o simplemente sentir vibraciones que no podemos escuchar.

Las subdisciplinas de la acústica son muchas entre las que están la acústica musical, acústica arquitectónica, control ruido, vibraciones, electroacústica, psicoacústica, etc. En este trabajo el enfoque estará sobre la psicoacústica. Al igual que las subdisciplinas, sus aplicaciones son abundantes. Por ejemplo, en

el control de ruido perjudicial para la salud, investigación para la audición y el habla, control ambiental del ruido, diseño electroacústico, diseño de salas de conciertos, etc.

2.2 Sonido

El sonido ocurre cuando varias partículas que se encuentran en equilibrio dinámico, (...) “es decir que las partículas se mueven en todas las direcciones caóticamente por la agitación térmica” (Miyara, 2004, p. 2), son excitadas debido a las variaciones de presión aplicadas por el movimiento de vibración de un determinado cuerpo. Este movimiento de ondas sonoras se transmite a través de un medio elástico, en este caso el aire. El sonido no se transmite en el vacío.

Otra definición para sonido como explica Moore (2013, p. 2) es “El sonido se origina de la vibración de un objeto. Esta vibración es impresa en el aire como cambios de presión. Las partículas se acercan más de lo normal (condensación) y luego se separan más de lo normal (rarefacción)”.

Debemos tener claro que mientras la onda sonora se va alejando, del cuerpo u objeto que produjo que se originara, esta se va haciendo más débil.

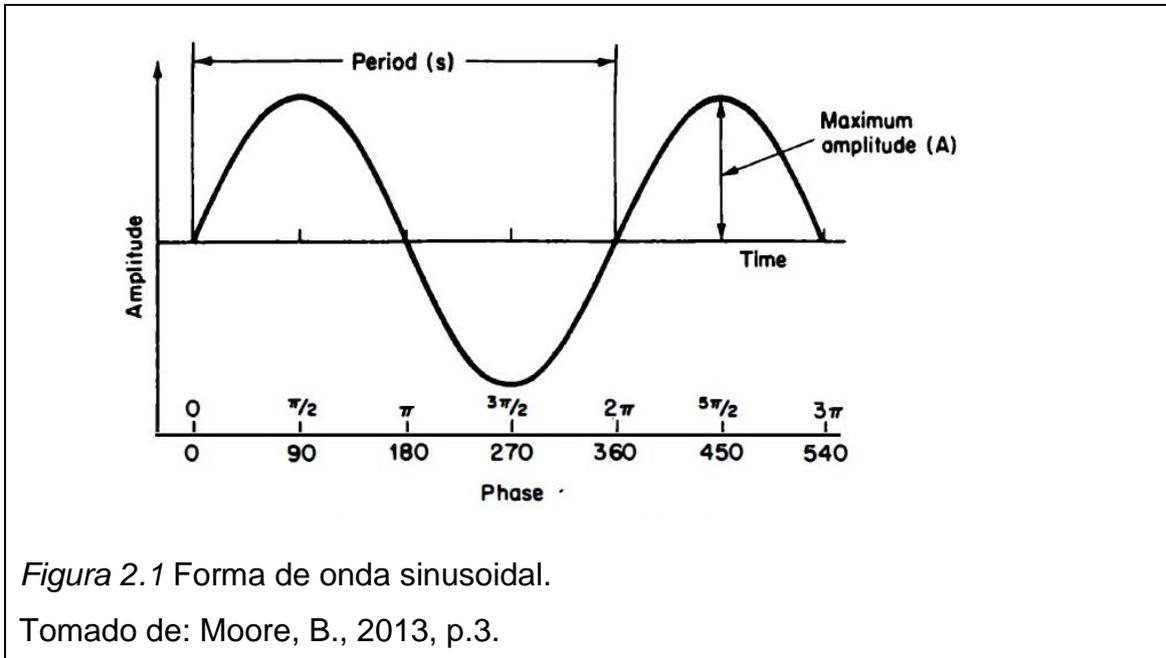
El sonido hace que el sistema auditivo sea excitado por medio de todos sus componentes (que se trataran más adelante). Dicha excitación da como resultado la percepción sonora que realiza nuestro cerebro.

2.2.1 Onda sinusoidal

La onda sinusoidal es también conocida simplemente como función seno. Esta onda se conforma de una sola componente frecuencial la cual determina las características de la misma.

Este tipo de ondas es usado en varios campos de la investigación, ingeniería, procesamiento de señales digitales, etc.

En la mayoría de experimentos de la psicoacústica se prefiere trabajar con este tipo de onda ya que su simplicidad, desde el punto de vista matemático y de percepción del sistema auditivo, es de gran ayuda.



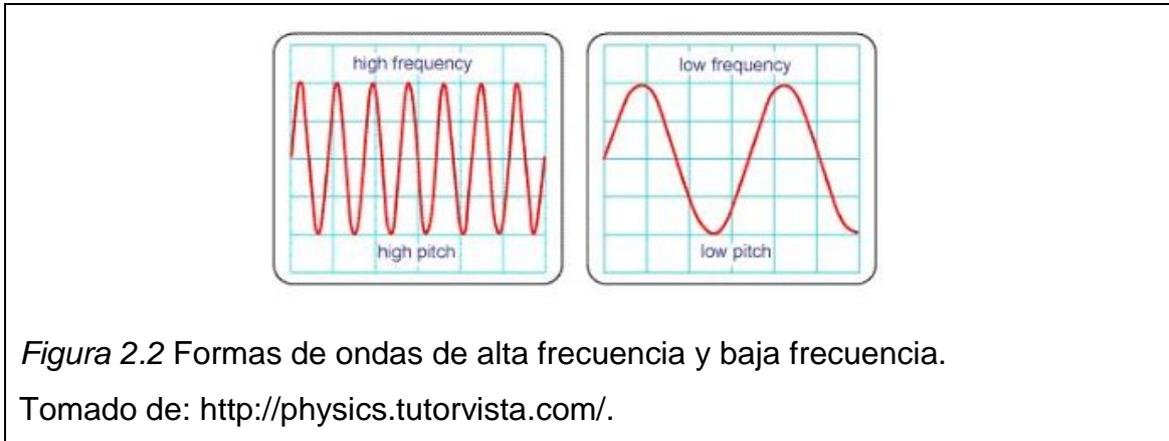
2.2.1.1 Frecuencia de una onda

Este concepto es fundamental cuando hablamos de sonido. La frecuencia de una onda, básicamente, es el número de oscilaciones (ciclos) que ocurren en la unidad de tiempo (un segundo) en un sonido.

La unidad con la que se cuantifica la frecuencia son los Hercios. Usualmente es abreviada como Hz. Un Hercio equivale a un ciclo por segundo (1 Hz=1 ciclo/segundo). Se le fue dado este nombre en honor al físico alemán Heinrich R. Hertz.

El rango frecuencia (considerado como normal) en el que el ser humano puede escuchar 20 a 20000 [Hz]. Las frecuencias inferiores a 20 [Hz] se las conoce como infrasonido y las superiores a 20000 [Hz] como ultrasonido. A pesar de que existe el rango frecuencia considerado como normal, los infrasonidos también pueden ser escuchados.

El número de oscilaciones en la unidad de tiempo en las altas frecuencias es mayor que en el de las bajas como se muestra en la siguiente figura.



2.2.1.2 Periodo de una onda

El periodo es simplemente la cantidad tiempo que toma un ciclo para llevarse a cabo. Se lo representa con la letra T. La mayoría de las veces se lo mide en segundos. Su ecuación es la siguiente, siendo su recíproco la frecuencia.

$$T = \frac{1}{f} \quad [s] \quad (\text{Ecuación 1})$$

2.2.1.3 Amplitud de onda

La amplitud hace referencia a la cantidad de energía acústica (intensidad) que un cuerpo determinado ejerce sobre el medio elástico que en este caso es el aire. En una onda la amplitud representa el máximo valor que alcanza ésta en los valores positivos (pico) y negativos (valle) siendo estos los puntos de mayor presión sonora, mientras que en los valores donde la amplitud es cero se los conoce como nodos.



Figura 2.3 Amplitud, pico, valle y nodo de una onda de un ciclo.

Tomado de: <http://www.asifunciona.com/electrotecnia>.

2.2.1.4 Longitud de onda

En simples palabras, la longitud de onda es la distancia que se toma para completar un ciclo. Su representación está dada por la letra griega *lambda* (λ). Comúnmente se la mide en metros (m), aunque a veces también es denotada en centímetros (cm).

Las distancias aproximadas en el rango de frecuencial, considerado como normal aunque los infrasonidos también pueden ser escuchados, son de 17.2 cm para los 20 Hz y 1.72 m para los 20000 Hz.

2.2.1.5 Fase de la onda

Se conoce a la fase de onda como una diferencia que existe entre dos o más ondas con respecto de la una a la otra en grados. Esta característica de una onda puede tener efectos importantes si no se le da el debido cuidado, porque puede quitar componentes frecuenciales de un sonido o inclusive cancelar el sonido.

2.2.2 Velocidad del sonido

Por lo general se asume un valor de 343 m/seg., esto se da cuando la temperatura es de 20 grados centígrados y una atmosfera siendo el aire el medio elástico. La velocidad del sonido depende del medio en el que se esté propagando, la humedad, la temperatura y la densidad molecular. Por ejemplo, la velocidad del sonido en el acero es 5790 m/s. La razón de esto es que la

densidad molecular es mayor comparada con los líquidos y los gases. Como explican Pohlmann y Everest (2009, p. 6) “En una estructura con más densidad molecular, es más fácil la transferencia de energía sonora para las moléculas” (...).

En aire se conoce que mientras la temperatura incrementa, la velocidad del sonido se hace más rápida. También es conocido que si la humedad aumenta más de lo normal la velocidad del sonido se hace más rápida.

La letra para denotar la velocidad del sonido es c . Una fórmula empírica para determinar esta es:

$$c = 331.4 + 0.6T_C \quad [\text{m/seg.}] \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde, T_C = Temperatura en grados Centígrados [$^{\circ}\text{C}$].

La relación entre frecuencia (f), longitud de onda (λ) y velocidad del sonido (c) es:

$$c = f \times \lambda \quad [\text{m/seg.}] \quad (\text{Ecuación 3})$$

2.2.3 Presión sonora

La unidad adaptada a nivel internacional para la presión es el pascal representado como Pa. La presión sonora se da cuando en la presión atmosférica aparece una variación provocada por la onda sonora.

A la presión acústica, también llamada así, se la puede definir como una relación entre la presión instantánea y la presión atmosférica estática.

En términos de presión, el umbral auditivo en 1 kHz (es decir la presión más baja que el oído puede percibir) es de aproximadamente 20 μPa y el umbral de dolor auditivo está alrededor de los 20 Pa.

2.2.4 Potencia sonora

Se puede definir a la potencia sonora o acústica como la cantidad de energía sonora que emite una fuente determinada por la unidad de tiempo. Por lo general su medida es en vatios [Watts]. Esta propiedad sonora es única y exclusivamente propiedad de la fuente, por lo tanto, no depende del recinto o local en el que se encuentre.

2.2.5 Intensidad sonora

La intensidad sonora es un parámetro muy importante en la acústica. Se puede decir que es la circulación de energía emitida por alguna fuente por unidad de área en una determinada dirección. Conociendo la definición de potencia acústica se sabe que:

$$I = \frac{W}{A} \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde, W = Potencia sonora en vatios,

A = Área en metros cuadrados.

Una relación importante de la intensidad con la presión y la velocidad del sonido es la siguiente:

$$I = \frac{p_{\text{rms}}^2}{\rho c} \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde, p_{rms}^2 = Presión cuadrática rms (root mean square) en pascales,

c = velocidad del sonido en [m/seg.],

ρ = densidad superficial del aire en [kg/m³].

Cabe recalcar que esto es válido solo para onda plana y esférica. La ecuación de la intensidad sonora en general es la siguiente:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)u(t)dt \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde, T = Periodo de una onda en segundo,

p = presión sonora en [Pa],

u = velocidad del sonido [m/seg.].

2.2.6 Escala logarítmica

Sabemos que los parámetros presión, potencia e intensidad acústica manejan valores linealmente. Estos valores pueden tener cambios relativamente grandes comparados a la percepción sonora. Por ese motivo, es más conveniente usar una escala logarítmica ya que estos valores son reducidos a una escala más cómoda ya que los valores están en un rango menor. También cabe destacar que el oído percibe de manera no lineal los sonidos, pero esto se tratará más adelante.

La forma más sencilla de expresar grandes cantidades es por medio de los logaritmos. Por ejemplo, si tenemos un millón a este podemos expresarlo como 10^6 (sabemos que 10 es la base y 6 el índice). Generalizando este ejemplo se tiene consciente que cualquier número real se lo puede expresar así $y = x^n$ (por ejemplo, $1000000 = 10^6$). Mediante procedimientos matemáticos, se obtiene:

$$n = \log_x y \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde, n = valor del logaritmo,

x = base del logaritmo,

y = número del cual se entrega el logaritmo.

De la anterior formula se obtiene la siguiente en la cual la base es 10:

$$y = 10^n ; n = \log_{10} y \quad (\text{Ecuación 8})$$

La escala logarítmica entrega una relación entre las ondas sonoras y la percepción sonora más adecuada que una escala lineal, como sugiere la Ley Psicofísica de Fechner.

2.2.7 Decibel

El decibel es la medida con la cual se cuantifica el sonido. Es la décima parte de un Bel y se lo identifica como dB. También es usado en otras áreas como la electrónica, procesamiento de señales, etc. Esta unidad fue nombrada así en honor al científico Alexander Graham Bell. Podemos definir al decibel como una relación logarítmica entre dos cantidades en la que una es el nivel de referencia. Estas pueden ser de intensidad, potencia o presión acústica.

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{y}{y_{\text{ref}}} \right) \quad (\text{Ecuación 9})$$

2.2.8 Niveles sonoros

2.2.8.1 Nivel de presión sonora

Como vimos en la definición de presión sonora un ser humano puede escuchar un rango de presión amplio que va aproximadamente desde los 20 μPa hasta los 20 Pa. Estos valores se los relaciona en una escala logarítmica en la que el menor nivel de presión sonora audible, por un humano de audición normal, es 0 dB y el umbral de dolor se encuentra en los 120 dB.

En español usualmente se lo representa como NPS (Nivel de Presión Sonora), y en inglés como L_p (*Pressure Level*) o SPL (*Sound pressure level*).

La fórmula para el cálculo del nivel de presión sonora es:

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p}{p_{\text{ref}}} \right)^2 \quad [\text{dB}] \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde, p = Presión acústica medida en pascales,

p_{ref} = Presión de referencia (20 μPa).

A continuación se puede apreciar una figura en la que se visualiza de mejor manera y con ejemplos la relación entre presión acústica y nivel de presión sonora:

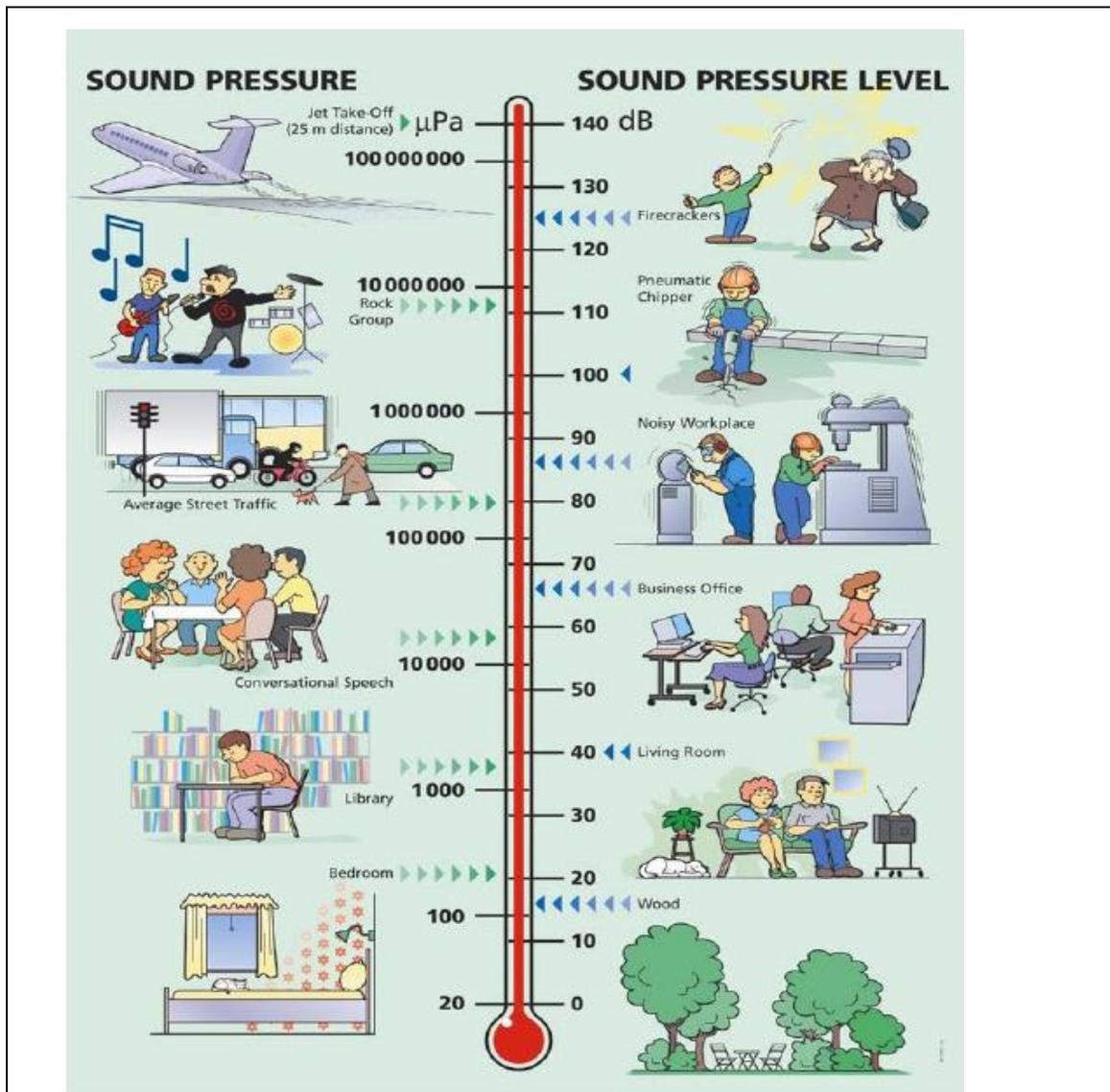


Figura 2.4 Relación entre presión sonora y nivel de presión sonora con ilustraciones del diario vivir.

Tomado de: Paper de Brüel and Kjær, *Sound, Vibration, Education, Audiology and Psychoacoustics*, p. 5.

2.2.8.2 Nivel de intensidad sonora

Es la razón intensidad sonora de alguna fuente determinada y la intensidad de referencia expresada logarítmicamente en decibeles. Su fórmula es la siguiente:

$$L_i = 10 \log \left(\frac{I}{I_{\text{ref}}} \right) \text{ [dB]} \quad \text{(Ecuación 11)}$$

Donde, I = Intensidad sonora medida en W/m^2 ,

I_{ref} = Intensidad sonora de referencia = $10^{-12} \text{ [W/m}^2\text{]}$.

2.2.8.3 Nivel de potencia sonora

Es la razón potencia sonora de alguna fuente determinada y la potencia de referencia expresada logarítmicamente en decibeles. Su fórmula es la siguiente:

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_{\text{ref}}} \right) \text{ [dB]} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Donde, W = Potencia sonora medida en watts,

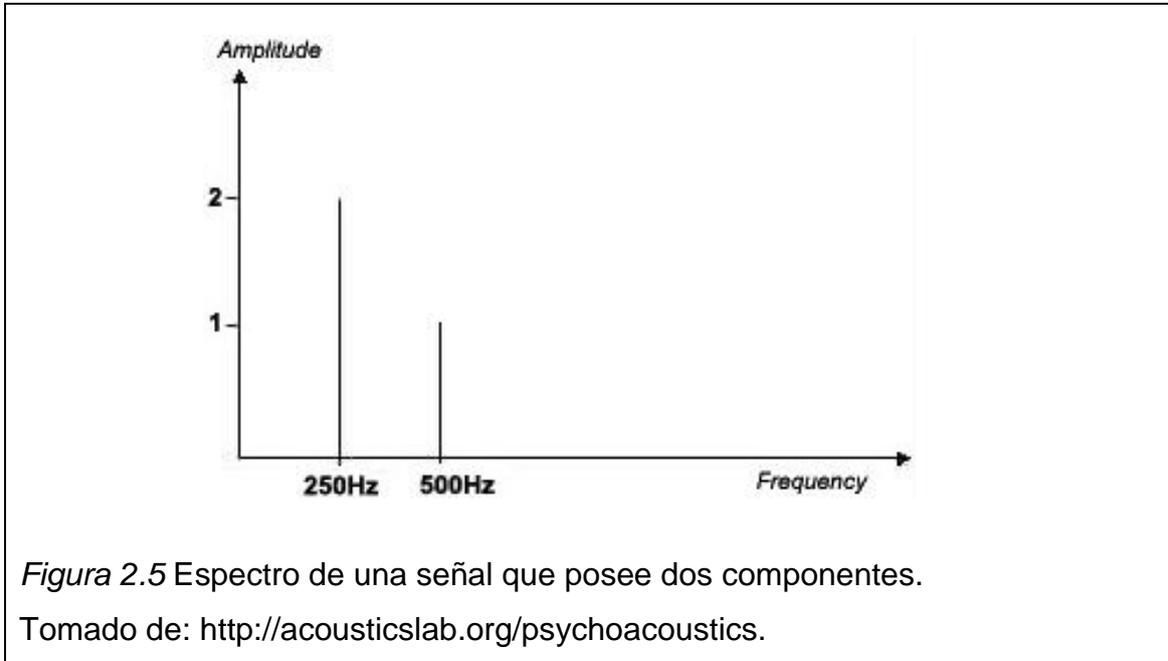
W_{ref} = Potencia sonora de referencia = 10^{-12} [Watts] .

2.2.9 Análisis de Fourier

Cuando se está trabajando con sonidos que no solo poseen una componente frecuencial (senoide) sino que son más complejos se utiliza el análisis de Fourier. Esta nos permite manejar ondas sonoras complejas transformándolas en una sumatoria de componentes sinusoidales, lo cual facilita el trabajo.

Existen dos tipos de señales denominadas periódicas y no periódicas. Las periódicas tienen como frecuencia más baja a la llamada fundamental, es decir, que si f es la fundamental esta tendrá múltiplos de la principal llamados armónicos ($2f$, $3f$, $4f$, etc.). Las señales no periódicas poseen frecuencias impares se las conocen como inarmónicos.

Para transportar señales que se encuentran en el dominio del tiempo, es decir un gráfico de amplitud versus tiempo, al dominio de la frecuencia (una gráfica de amplitud versus frecuencia) se usa la transformada de Fourier. A esta nueva grafica resultante de la transformación se la denomina espectro.



CAPÍTULO III

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS RELACIONADOS CON LA PSICOACÚSTICA

3.1 Definición

El origen de la psicoacústica se ha dado a través de la psicofísica. Para entender más fácilmente podemos decir que, la psicofísica es la ciencia que trata de relacionar el mundo físico con la mente. Los fundamentos de la psicofísica fueron dados por el filósofo alemán *Gustav Fechner* en su libro *Elementos de Psicofísica* (1860).

El mundo de la psicofísica puede estar relacionado con cualquiera de los sentidos del cuerpo humano, en estos se puede realizar varios experimentos para determinar parámetros. Pueden ser, los límites de sensación o umbrales, discriminación de la intensidad, etc.

El trasfondo de la psicofísica nos permite comprender que la psicoacústica es una subdisciplina de ésta, la cual se enfoca en el sistema sensorial auditivo, o simplemente de la audición. La psicoacústica estudia la percepción auditiva humana de sonidos. Se puede decir que esta materia relaciona la percepción auditiva que tenemos ante un estímulo físico sonoro y la manera psicológica de evaluar el sonido.

Para comprender mejor todo el procedimiento que realiza el sistema auditivo conviene revisar la fisiología de este.

3.2 Fisiología del sistema auditivo

En esta sección se pondrá el enfoque en la estructura básica del sistema auditivo humano. También se verá que función tienen los principales componentes de este órgano tan importante del ser humano.

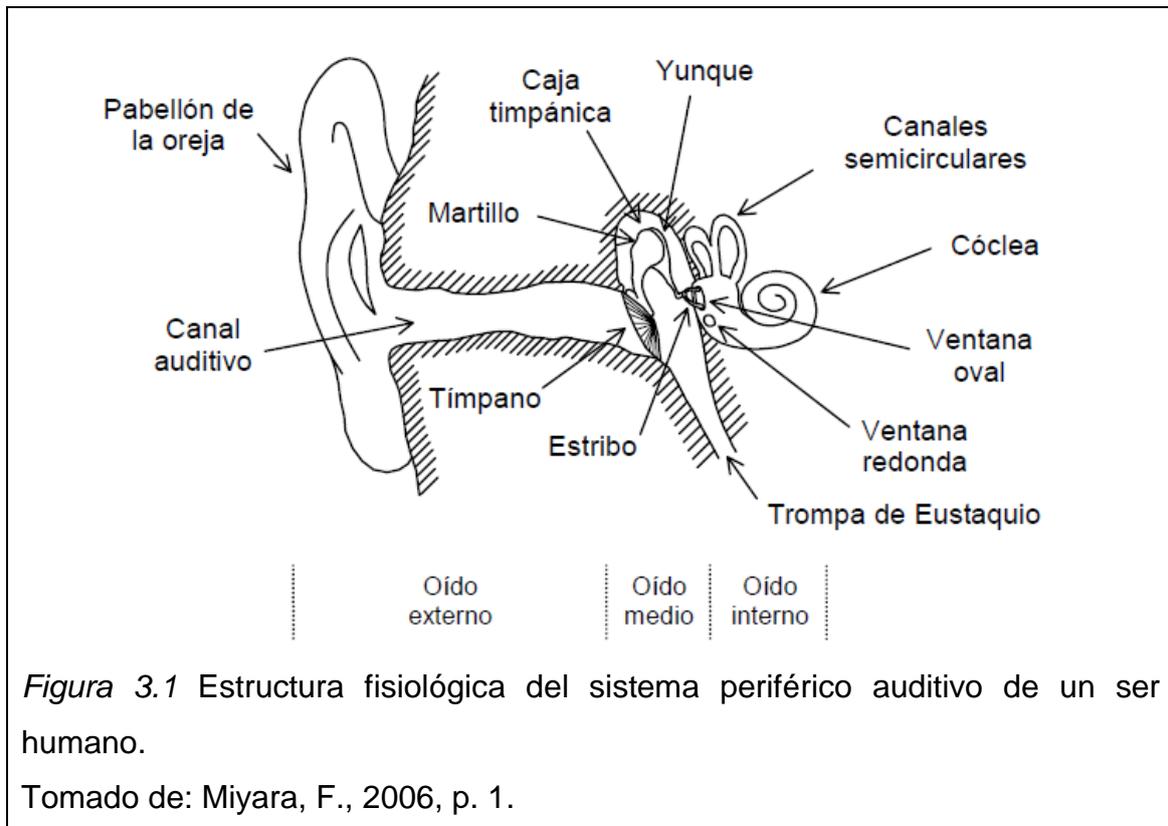


Figura 3.1 Estructura fisiológica del sistema periférico auditivo de un ser humano.

Tomado de: Miyara, F., 2006, p. 1.

La transducción auditiva comienza cuando las variaciones de presión aplicadas al aire generan el sonido. Las ondas sonoras que viajan en el aire alcanzan nuestro sistema auditivo, las cuales son convertidas en impulsos eléctricos por el oído. Dichos impulsos son transmitidos al cerebro el cual los interpreta.

3.2.1 Oído externo

El oído externo está compuesto por el pabellón auditivo u oreja y el canal auditivo. Al final del canal se encuentra el tímpano, que pertenece al oído medio.

Los sonidos provenientes de alguna fuente sonora, y que ingresan por al sistema auditivo son altamente influenciados por los hombros, la cabeza, el pabellón y el canal auditivo. Los dos primeros influyen de una manera particular como explica Fastl y Zwicker (2007, p. 23) “Los hombros y la cabeza influyen en el nivel de presión sonora más efectivamente en las frecuencias

inferiores a 1.500 Hz a través de la sombra y reflexión sonora”. Debemos dejar en claro que esto depende de la anatomía de cada persona.

El pabellón auditivo tiene como función principal la recolección de la energía sonora producida por una fuente o un cuerpo. Las irregularidades que tiene el pabellón son las causantes de la direccionalidad y modificación significativa principalmente en altas frecuencias.

La longitud aproximada del canal auditivo es de 25 milímetros. La energía sonora es llevada hacia el tímpano a través del canal auditivo. Dos ventajas de este son (...) “primeramente, protege el tímpano y el oído medio de daños; y permite que el oído interno este posicionado muy cerca del cerebro, reduciendo así la longitud de los nervios” (...) (Fastl & Zwicker, 2007, p.24).

3.2.2 Oído medio

El oído medio, también conocido como caja timpánica, está formado por la membrana timpánica o simplemente tímpano, los huesecillos y la trompa de Eustaquio.

Una característica muy importante de esta sección del oído es la adaptación de impedancias. Miyara (2006, p. 2) explica claramente en que consiste esto “La finalidad de esta cadena (oído medio) es convertir vibraciones de gran amplitud y poca presión, como las hay en el tímpano, en vibraciones de pequeña amplitud y mayor presión, requeridas en el líquido que llena el oído interno”.

Las vibraciones son conducidas a través del canal auditivo que hacen que la membrana timpánica comience a vibrar. Sonidos que poseen bajas frecuencias producen que vibre lentamente, a diferencia que con sonidos de altas frecuencias este vibra mucho más rápido.

El tímpano posee una forma de cono o cónica que está conectada a uno de los tres huesecillos llamado martillo.

A los tres huesecillos se los conoce como martillo, yunque y estribo. Estos son los responsables de transmitir las vibraciones hacia el oído interno. El último de ellos (estribo) está conectado a la ventana oval (perteneciente a la parte interna

del oído). Se conoce también que son los huesos más pequeños del cuerpo humano.

Los huesecillos son sostenidos por ligamentos pertenecientes a la caja timpánica. También poseen músculos los cuales se contraen (*reflex*) cuando un sonido de alta intensidad (o impulsivo) ocurre previniendo así daños que podrían darse en la estructura de la cóclea.

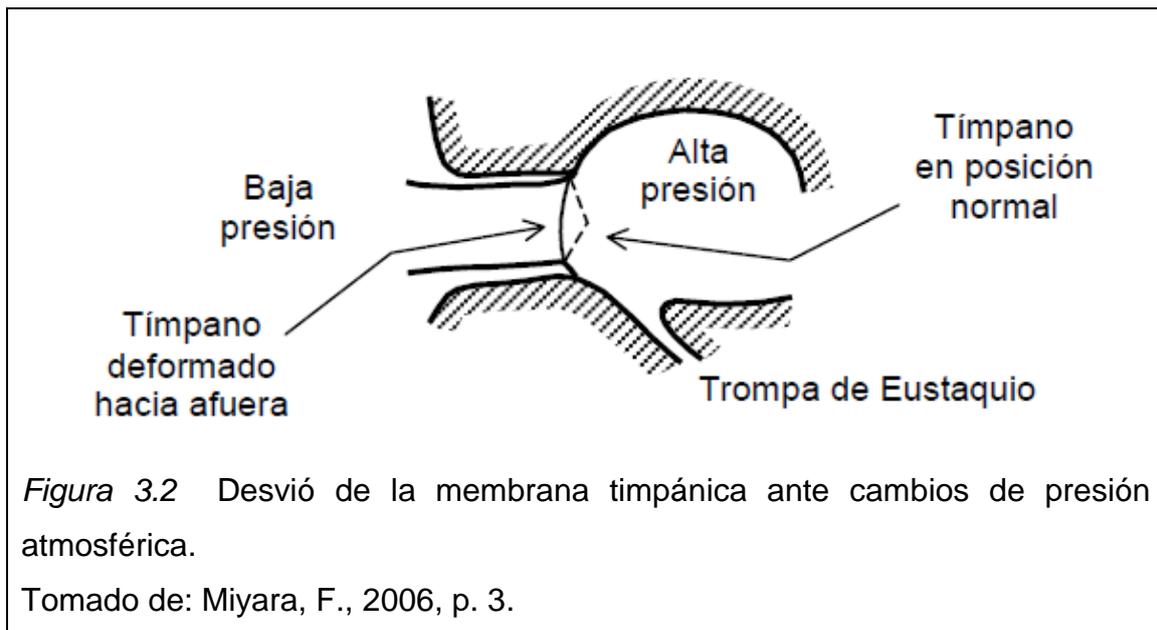


Figura 3.2 Desvió de la membrana timpánica ante cambios de presión atmosférica.

Tomado de: Miyara, F., 2006, p. 3.

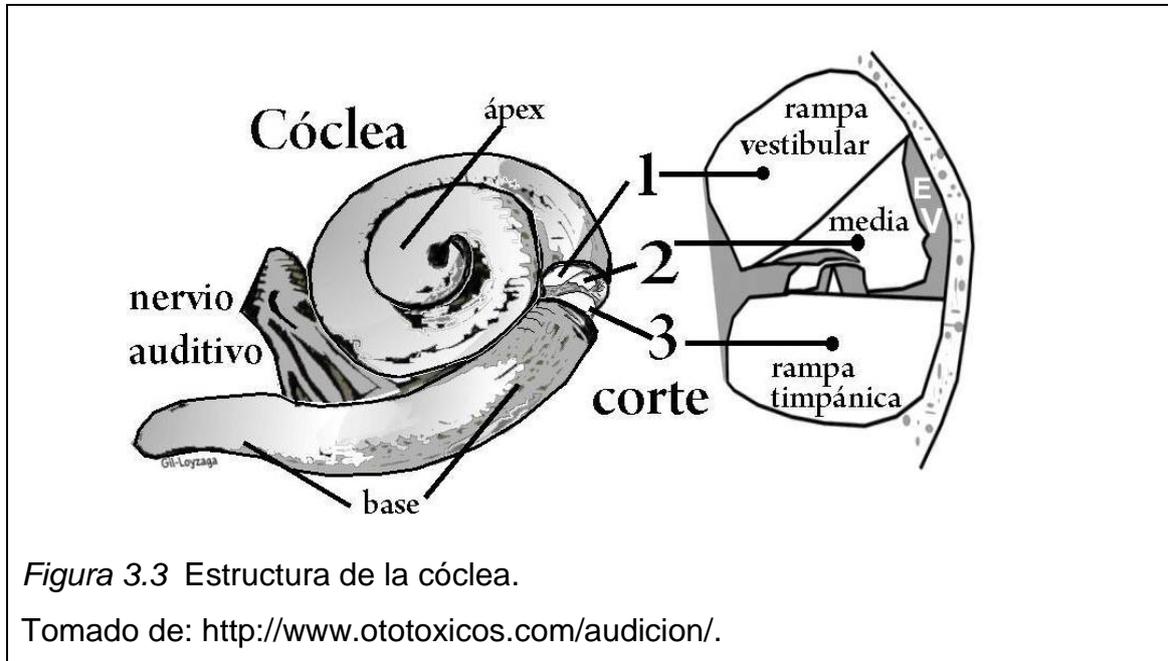
Por último la trompa de Eustaquio está conectada a la parte superior de la garganta. Su principal función es (...) “la de igualar la presión de oído medio con la presión atmosférica.” (Miyara, 2006, p. 3). Generalmente la trompa se abre y se cierra cuando tragamos o bostezamos.

3.2.3 Oído interno

El proceso que ocurre en el oído interno se da cuando las vibraciones llegan a la ventana oval a través del estribo. Dichas vibraciones recaen en el laberinto óseo o cóclea.

La cóclea está dividida en dos secciones llamadas escala vestibular y escala timpánica. Las vibraciones que llegan a la ventana oval son transmitidas por la escala vestibular y regresan por la escala timpánica a encontrarse en la ventana redonda. La ventana redonda tiene el movimiento contrario a la

ventana oval, es decir, que si la oval se mueve hacia dentro la redonda se moverá hacia afuera y viceversa. El precursor en estudios de la cóclea es *Georg von Békésy*, quien recibió el premio nobel de medicina en 1961.

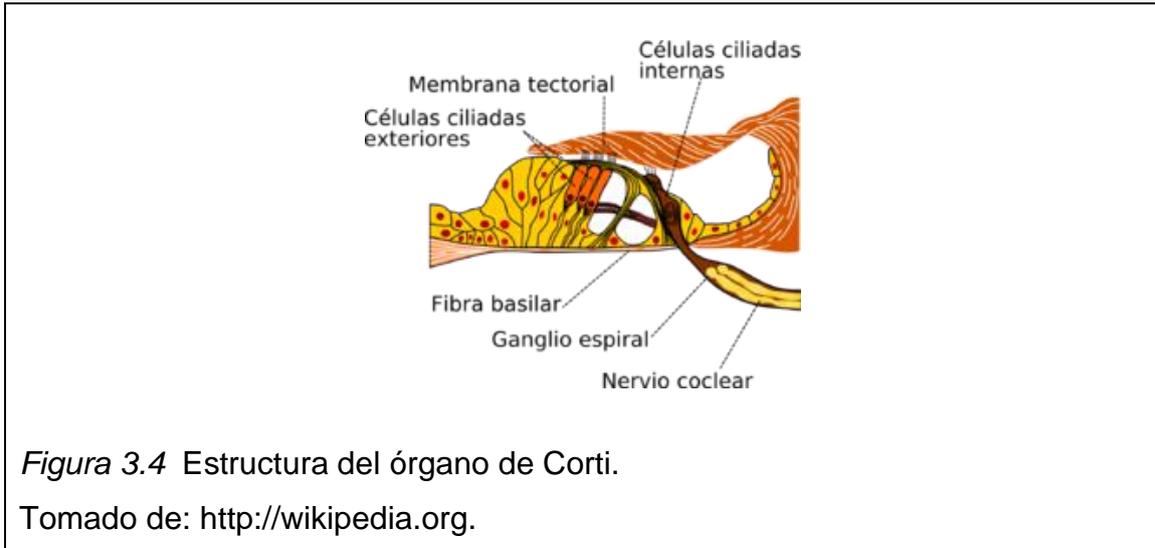


Entre la escala vestibular y timpánica se encuentra un canal denominado conducto coclear o escala media el cual está lleno de un líquido denominado endolinfa. Dentro de las dos escalas existe un líquido llamado perilinfa.

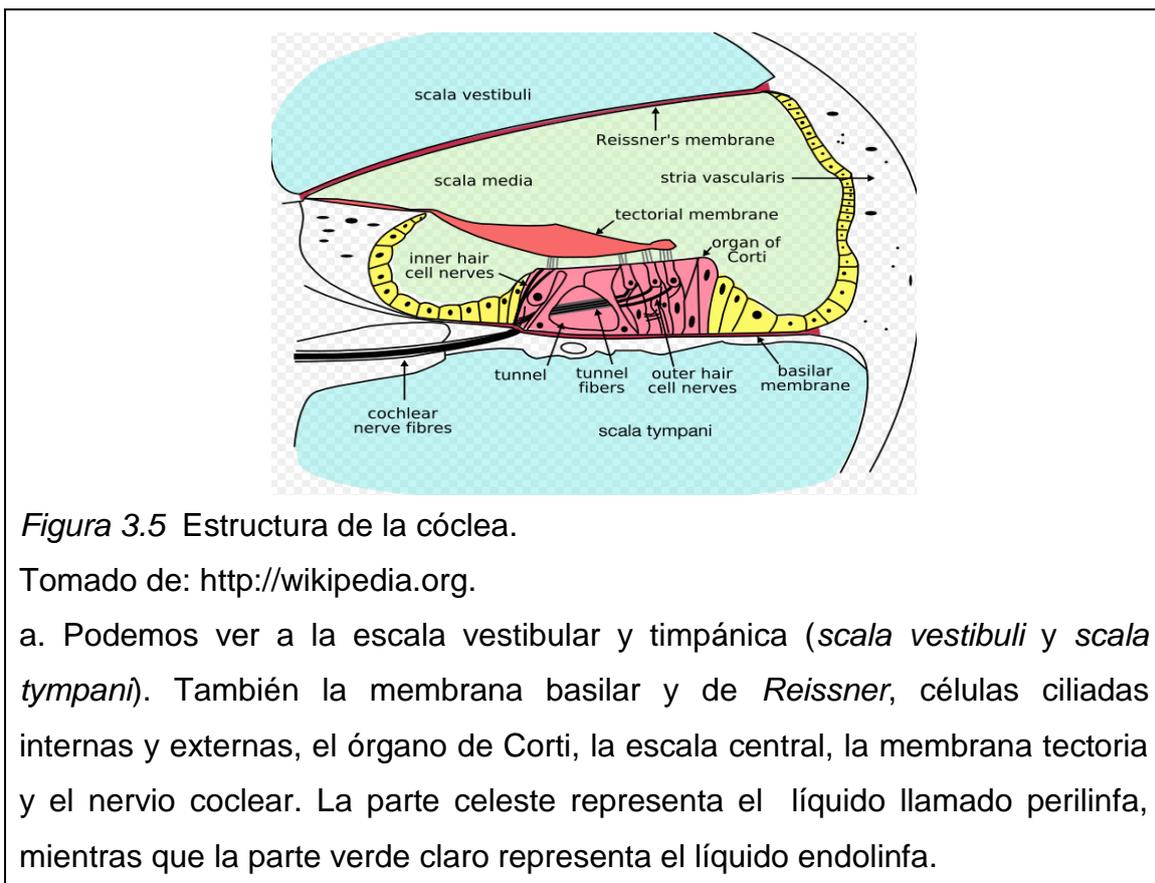
Las membranas basilar y de *Reissner*, que separan las dos escalas, se mueven en respuesta a las vibraciones.

Dentro de la membrana basilar está situado el órgano de Corti. Impulsos nerviosos son enviados al cerebro a través del nervio auditivo cuando el órgano de Corti vibra.

En el órgano de Corti se encuentran las células ciliadas que están sujetas a la membrana tectoria. Conforme la membrana basilar vibra el órgano de Corti, a través de las células ciliadas, hacen que la membrana tectoria se mueva y se produzcan los impulsos nerviosos que son transportados al cerebro. Existen dos tipos de células ciliadas que son las externas e internas. Se conoce que las células ciliadas internas son las responsables de transportar la mayoría de la información al nervio auditivo y posteriormente al cerebro.



A continuación se puede apreciar un gráfico en el que se encuentran todas las partes que se encuentran situadas en la parte interna de la cóclea.



La membrana basilar mide aproximadamente unos 35 milímetros. Una diferencia de presión es aplicada a la membrana cuando la ventana oval se mueve (por el movimiento del estribo). Esta presión ejercida hace que la membrana se comience a mover.

Sonidos de altas frecuencias producen que el movimiento máximo de la membrana basilar se de cerca de la base de la cóclea, mientras que el máximo desplazamiento basilar en bajas frecuencias está ubicado en el ápice o vértice.

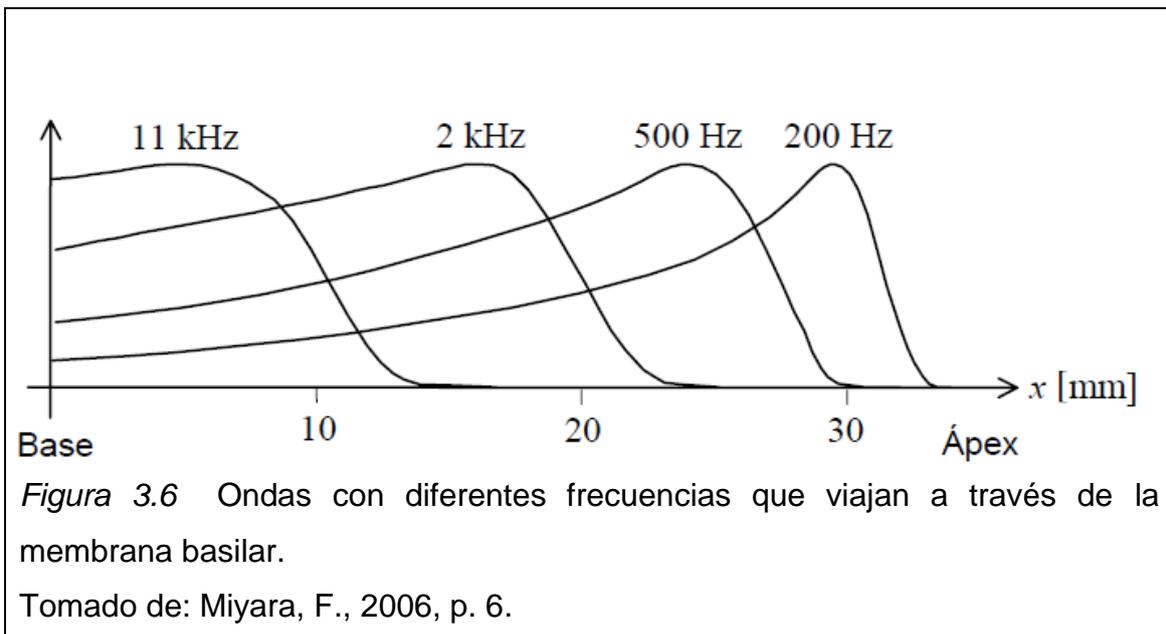


Figura 3.6 Ondas con diferentes frecuencias que viajan a través de la membrana basilar.

Tomado de: Miyara, F., 2006, p. 6.

Podemos ver que la membrana basilar se comporta como un analizador de Fourier. Aquí es conveniente nombrar a un nuevo término que es la frecuencia característica, la cual determina la frecuencia en donde la respuesta es máxima en algún punto específico en a lo largo de la membrana basilar.

Cuando hablamos de la membrana basilar, conviene verla como varios filtros frecuenciales los cuales están activos dentro de un rango de frecuencias, con una determinada frecuencia característica y pendientes específicas.

Al revisar cada una de las secciones del oído humano podemos apreciar la complejidad de este. El oído externo puede ser modelado como un sistema mecánico lineal. La mayoría de las veces al oído medio también se lo trata como lineal. En el caso del oído interno la situación es más complicada ya que

la respuesta de las células ciliadas es no lineal al igual de los impulsos nerviosos enviados al cerebro.

Entretanto que la captación auditiva es idéntica en todos los seres humanos, salvo que exista alguna patología, la interpretación psicológica de los sonidos puede variar entre individuos, es decir, es subjetiva. Esto depende de, por ejemplo, el estado de ánimo, educación, etc.

3.3 Presentación de los sonidos

Cuando hablamos de experimentos psicoacústicos, una parte muy importante es cómo se va a presentar los sonidos para la realización de la investigación. Esto se lleva a cabo por medio de transductores de audio (representación eléctrica del sonido) a ondas sonoras. Los transductores pueden ser altavoces o audífonos.

Existen tres tipos de audífonos que son comúnmente usados en la investigación psicoacústica. Los circumaurales, que envuelven toda la oreja. Los supra aurales, que recaen en el pabellón auditivo. Y por último los intraaurales, que ingresan al canal auditivo.



Figura 3.7 Tipos de audífonos.

Tomado de: Wikipedia.org.

a. Circumaural, supra aural e intraaural.

Ya sea que se use audífonos o altavoces es importante tener en cuenta la respuesta de frecuencia y la distorsión (no lineal) que el dispositivo puede generar.

Cuando se trabaja con altavoces pueden aparecer algunos problemas. Uno de ellos es que si se trabaja en una sala común, y no en una anecoica, la respuesta de frecuencia puede ser influida por la resonancia de la sala ya así cambiar los resultados.

Con audífonos algunos problemas pueden disminuirse ya que la mayoría posee baja distorsión (menos de 0.1%) en el rango de frecuencia de utilidad.

También es importante que la respuesta de frecuencia sea plana. Algunos dispositivos no tienen este tipo de respuesta. Otra alternativa ha sido propuesta por las empresas fabricantes como explica Moore (2013, p. 22), (...) “la respuesta en el tímpano debe ser similar a la producida por un altavoz con respuesta plana, cuando la respuesta en el tímpano es promediada en varias direcciones del altavoz relativo a la cabeza. Esto es equivalente a lo llamado respuesta de *campo difuso*”.

Con la respuesta de campo difuso, en frecuencias bajas la respuesta es plana pero existe picos en frecuencias medias altas (2 a 4 kHz).

3.4 Umbral auditivo

El sistema auditivo tiene la habilidad de detectar sonidos débiles. Al nivel mínimo detectable en una frecuencia específica se lo denomina umbral absoluto de la audición. Cabe recalcar que es el mínimo nivel detectable de un sonido solo cuando no está presente otro. Muchas veces el umbral de audibilidad es también definido como la mínima presión acústica necesaria para escuchar un tono puro.

Fletcher y Mumson determinaron las primeras curvas de audibilidad en las cuales el umbral de audición de 1 kHz, con un valor referencial de 20 uPa, estaba situado en 0 dB. Más tarde, Robinson y Dadson demostraron que el valor del umbral de 1 kHz está en 3 dB.

Debido a la no linealidad del oído, los gráficos presentados, en el umbral absoluto, tendrán como característica en el eje de las abscisas la frecuencia que es representada logarítmicamente en Hercios mientras que en las ordenadas el nivel de presión sonora en decibeles tendrá una escala lineal.

La definición de dos términos es importante en este tema. El primero es la presión mínima audible (*MAP-Minimum Audible Pressure*) y el segundo es el campo mínimo audible (*MAF-Minimum Audible Field*).

Cada término está caracterizado por una curva. En el *MAP* la medición es realizada generalmente en un solo oído (monoaural) con un micrófono pequeño dentro del canal auditivo y el sonido presentado vía audífonos. La posición del micrófono es muy importante como explica Moore (2013, p. 58) (...) “es necesario especificar la posición exacta del micrófono, ya que pequeños cambios en su posición pueden afectar marcadamente los resultados en altas frecuencias”.

El termino *MAP* fue usado por primera vez por Sivian y White para describir (...) “el umbral en términos de amplitud de la presión en el tímpano del sujeto” (Killion, 1977, p. 1502). Un estándar para la curva *MAP* es el de la Asociación de Estándares Británicos (*BSA*). Este muestra valores desde 125 a 15000 Hz.

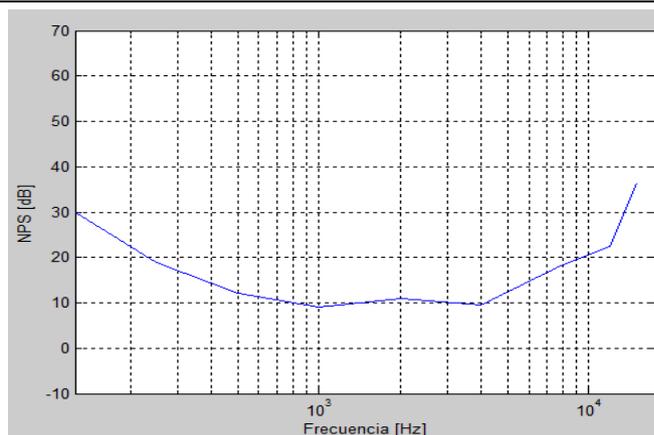


Figura 3.8 Estimado de la curva *MAP* según Asociación de Estándares Británicos.

Valores tomados de: Sokolovski, A., 1974, p. 433.

En 1977, Killion muestra un nuevo estimado de la curva *MAP* el cual se muestra a continuación.

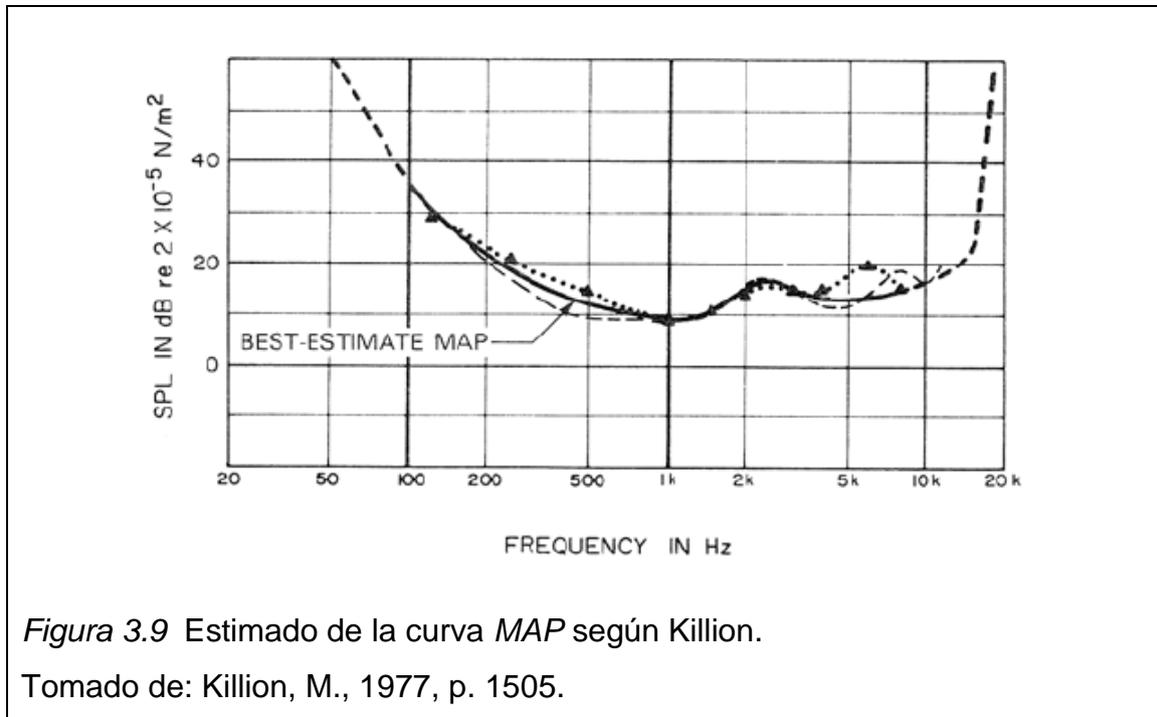
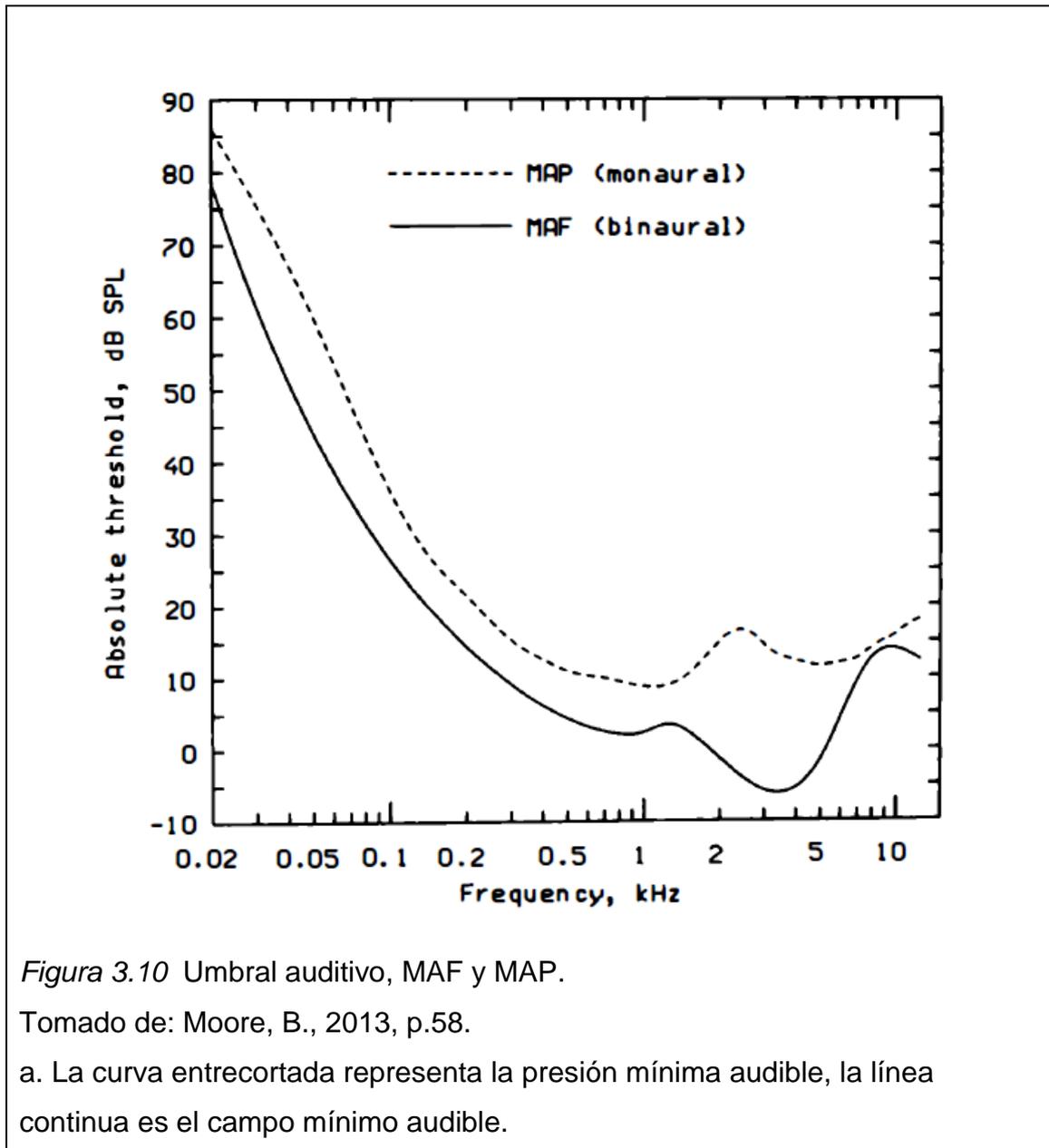


Figura 3.9 Estimado de la curva *MAP* según Killion.

Tomado de: Killion, M., 1977, p. 1505.

En el *MAF*, campo mínimo audible, generalmente el sonido es presentado por un altavoz y a los dos oídos (binaural). Aquí la medida del nivel sonoro es medida justo en el punto medio de la cabeza después de ser retirada. Por eso su nombre de campo libre. Este procedimiento se lo realiza en una cámara anecoica.

A continuación se presenta un gráfico con las curvas de los dos parámetros. Este fue realizado a sujetos con audición normal. La diferencia que podemos ver en bajas frecuencias se debe al ruido fisiológico de origen vascular que se torna audible en las mediciones del *MAP* (producto de bloquear el oído). Este problema se puede mejorar con audífonos circumaurales, los cuales reducen la percepción este ruido. La incidencia del pabellón y canal auditivo también es notable por ejemplo, la resonancia de 1.5 a 6 kHz es causada por el pabellón. Por último es importante señalar, que los umbrales medidos binauralmente son aproximadamente 2 dB más bajo que los umbrales monoaurales.



Los umbrales de la audición dependen de la duración de los tonos puros de prueba, por eso (...) “se conoce que para sonidos mayores a 500 milisegundos, la intensidad sonora para el umbral es altamente independiente. Mientras que para duraciones menores de 200 milisegundos la intensidad sonora para la detección se incrementa mientras la duración decrece” (Moore, 2013, p. 64).

La detección de sonidos débiles no depende solamente de la sensibilidad del oído sino también del nivel del ruido que se encuentra alrededor de nosotros

(ruido ambiental). Se conoce que el umbral depende de la cantidad total de energía emitida y no de cómo la energía esté distribuida en el tiempo.

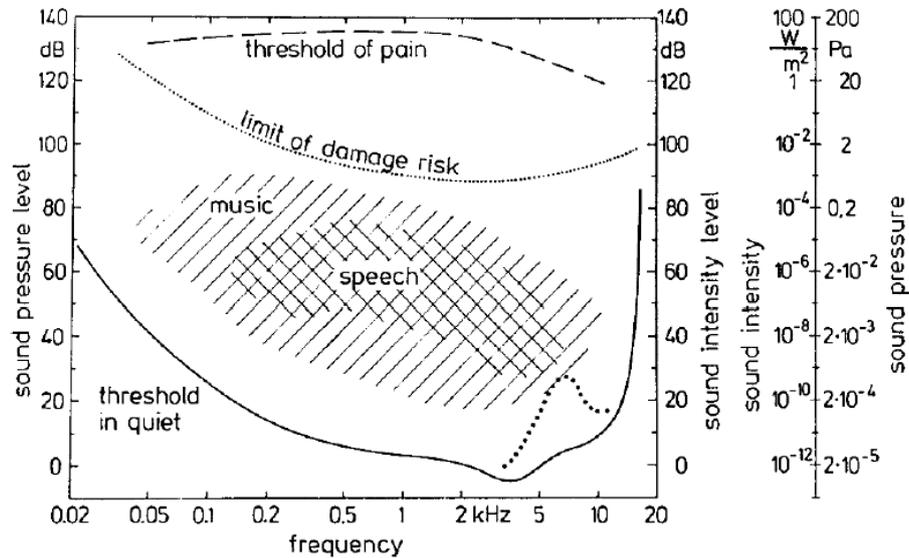


Figura 3.11 Umbral auditivo y audición humana.

Tomado de: Fastl, H. & Zwicker, E., 2007, p. 16.

a. La curva discontinua (de los 4 a 12 kHz aproximadamente) muestra la pérdida en altas frecuencias cuando se escucha música en un nivel alto. Amplitud versus Frecuencia. A la derecha se visualiza el nivel de intensidad sonora, presión e intensidad sonora.

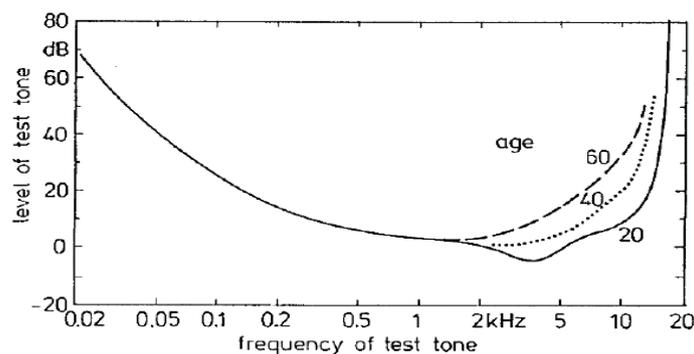


Figura 3.12 Umbral auditivo en función de la edad.

Tomado de: Fastl, H. & Zwicker, E., 2007, p. 21.

Por último, la sensibilidad de la audición va decayendo conforme la edad avanza. Como se aprecia en el gráfico anterior los niveles necesarios, para escuchar ciertas frecuencias altas, suben. Esto se da porque las células ciliadas dejan de funcionar con el tiempo. Un ejemplo en 10 kHz a los 60 años podemos ver que se necesita aproximadamente 40 dB mientras que a los 20 años unos 5 dB son suficientes para percibir dicha frecuencia.

3.5 Pérdida auditiva

Los umbrales auditivos pueden ser medidos con fines clínicos. Esto se realiza, por ejemplo, cuando se sospecha que existe pérdida auditiva. En el caso de los umbrales que muestran la pérdida auditiva, las unidades para cuantificar la pérdida se denominan dB HL (*Hearing Level*).

Cuando se trabaja en el campo de la investigación psicoacústica, los umbrales son comúnmente dibujados en un gráfico de nivel de presión sonora en dB SPL versus frecuencia en Hz. En audiología el gráfico es diferente ya que la pérdida auditiva se dibuja hacia abajo.

Una explicación más sencilla sería que, mientras el umbral aumenta la curva es dibujada más arriba (en el campo psicoacústico), a diferencia que cuando la pérdida auditiva aumenta la línea característica de pérdida es dibujada más abajo la cual es conocida como audiograma.

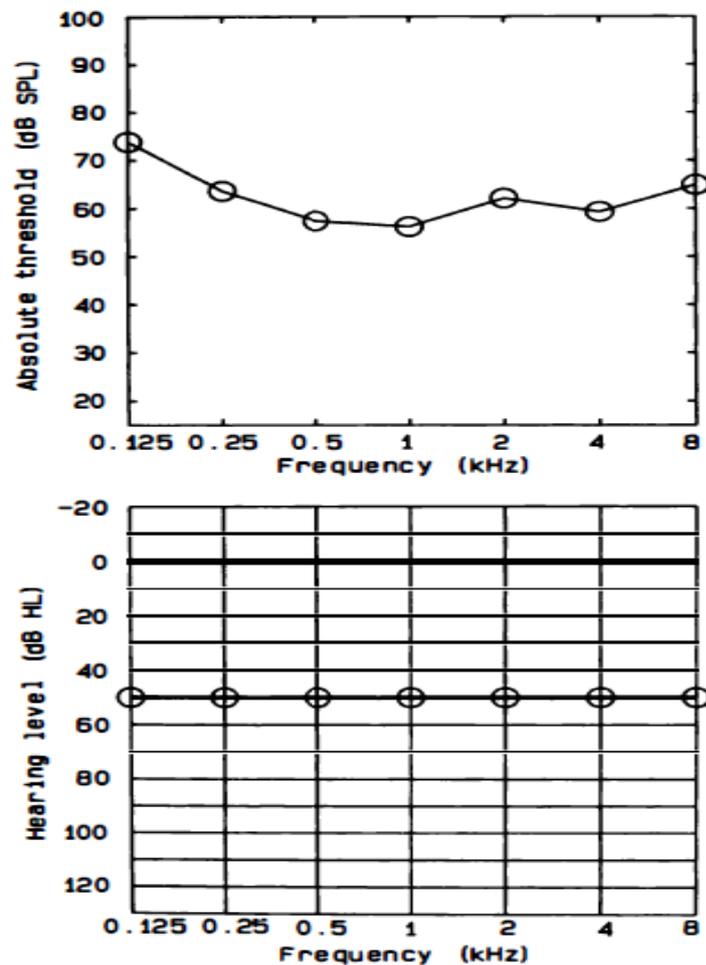


Figura 3.13 Gráfica usada en psicoacústica (arriba) y audiograma (abajo).

Tomado de: Moore, B., 2013, p. 63.

Los dos gráficos anteriores muestran la comparación entre un audiograma y la curva usada en psicoacústica. En cada caso la pérdida es de 50 dB. En el audiograma podemos notar que los valores pueden ser negativos por ejemplo si el individuo tiene -20 dB HL en una frecuencia específica, significa que es más sensible en 20 dB con respecto a la audición promedio.

La pérdida auditiva puede ser dividida en dos tipos. El primero se lo denomina pérdida auditiva conductiva. Este tipo de problema usualmente se registra en el oído medio. Por ejemplo, un fluido viscoso existente en el oído medio como resultado de una infección (otitis media). Aquí también puede considerarse el cerumen que se almacena en el conducto auditivo. El segundo tipo de pérdida

es conocido como neurosensorial. Este problema se da por un daño en la cóclea, aunque también por defectos en el nervio auditivo.

3.5.1 Presbiacusia

El termino Presbiacusia fue introducido por *Zwaardermaker*, quien fue el pionero en detallar la pérdida auditiva en altas frecuencias. Por lo general, la primera señal de esta enfermedad es el descenso en altas frecuencias de la curva audiométrica. En el ámbito psicoacústico la curva característica del umbral auditivo asciende.

En la mayoría de los casos la perdida de sensibilidad comienza en las altas frecuencias del espectro audible. Mientras la edad avanza, dicha perdida aumenta en las frecuencias bajas.

Generalmente la Presbiacusia se da por un daño en el oído interno. Esto se da, porque a diferencia del oído medio que es un dispositivo pasivo que no se ve afectado por la edad, en el oído interno (dispositivo activo) con características no lineales si se ve afectado por el envejecimiento.

Muchas veces el problema no es por el hecho de no escuchar nada sino de no entender bien el habla. Otro problema evidente es la perdida de detección, identificación y localización de una fuente generadora de sonido. Este tipo de enfermedad auditiva también afecta el ámbito psicológico de las personas que la sufren. Problemas de comunicación, aislamiento, baja autoestima, depresión e inclusive la demencia son frecuentes. En la mayoría de los casos la pérdida auditiva es acompañada por la tinitus (percepción de un sonido como pito en los oídos o en la cabeza).

Este problema es detectado mediante una audiometría tonal después de remover el cerumen acumulado en el canal auditivo. Esta prueba es realizada en el rango de frecuencias que va desde los 250 Hz hasta los 8000 Hz. Esta prueba es realizada con audífonos en una cabina sonoaislada. Para que la audición sea considerada como normal la perdida no debe ser mayor a los 25 dB HL (en la curva audiométrica).

En este tipo de casos la familia y los amigos del individuo son más conscientes de la aparición de esta enfermedad.

En un estudio realizado en el Reino Unido, *Davis (1995)* en su libro *Hearing in Adults* detalla varios aspectos relacionados con la audición en adultos mayores. Para frecuencias entre 0.5, 1, 2,4 kHz, en adultos de 61 a 71 años, el 51% tiene una pérdida de más de 20 dB mientras que el 11% tiene una pérdida de más de 40 dB. En adultos de 71 a 80 años el 74% registra pérdidas de más de 20 dB y el 30% de más de 40 dB. Para frecuencias de 4, 6, 8 [kHz], en adultos de 71 a 80 años, el 98% han perdido más de 20 dB y el 81% más de 40 dB.

Para la Presbiacusia no existe un tratamiento definitivo que pueda revertir la enfermedad. Si se trata de un daño coclear se puede optar por un implante que puede mejorar en gran manera la comunicación, habilidad de entender el habla (500 Hz a 3000 Hz) y en general la audición.

Debido a que no hay un tratamiento para la Presbiacusia es importante considerar la prevención. Algunos factores a tener en cuenta son:

- Evitar la exposición al ruido de alto nivel sonoro.
- En ambientes ruidosos usar protección como *Insert plugs* (los cuales proveen de 15 a 25 dB de atenuación).
- Evitar escuchar música a altos niveles.

3.6 Percepción de la sonoridad

3.6.1 Introducción

El sistema auditivo responde a un rango muy amplio de intensidades. La sonoridad, según Moore (2013, p. 133) (...) “se define como el atributo de la sensación auditiva en términos de como los sonidos pueden ser ordenados en una escala que se extiende del más débil al más ruidoso”. El radio de intensidades corresponde a 1000000000000:1.

A diferencia de la presión sonora, nivel de presión sonora, intensidad sonora y potencia sonora que son valores objetivos, la sonoridad es meramente subjetiva por lo que no puede ser medida directamente.

La sonoridad es afectada por distintos parámetros incluyendo la frecuencia, duración y ancho de banda.

3.6.2 Nivel de sonoridad y curvas de igual sonoridad (*Equal-loudness contours*)

El nivel de sonoridad no indica cuán sonoro es un tono sino que muestra el nivel que debe tener un tono de cualquier frecuencia, para que sea de igual sonoridad, comparado con un tono de 1000 Hz con nivel fijo. El nivel de sonoridad se mide en fonos, mientras que la sonoridad se mide en sonos.

Para obtener resultados se fija el nivel del tono de 1000 Hz y se pide al sujeto que vaya ajustando el tono de prueba (de cualquier frecuencia) hasta que se perciba que los dos tonos tiene la misma sonoridad (*loudness matching*).

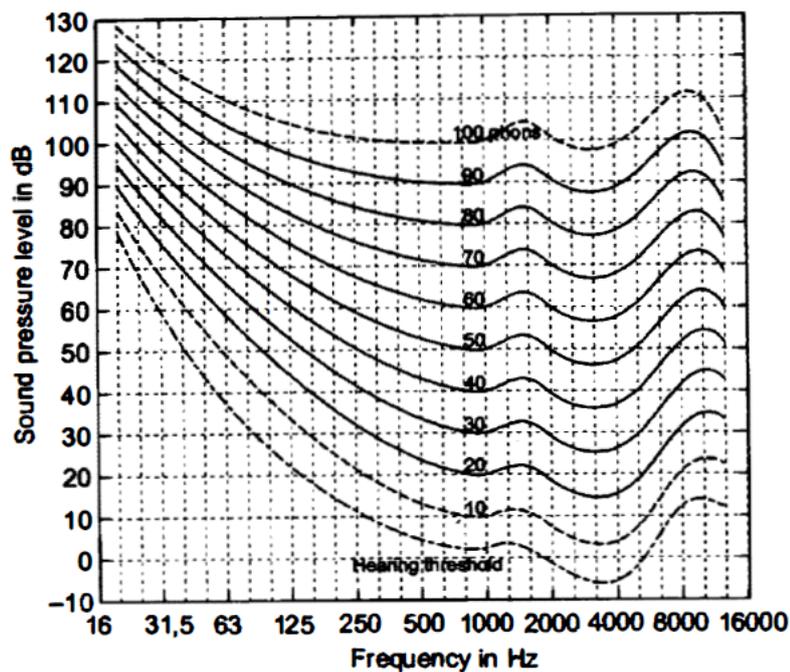


Figura 3.14 Curvas de igual-sonoridad o *Equal-loudness contours*.

Tomado de: Moore, B., 2013, p. 135.

Cuando se realiza dicho experimento para varias frecuencias se obtiene las curvas de igual-sonoridad (en inglés *Equal-loudness contour*). Dichas curvas proveen el fundamento para el análisis teórico y práctico de las características intensidad-frecuencia del sistema auditivo.

Por ejemplo, para generar de la curva de 50 fonos lo que se hace es reproducir un tono de 1000 Hz a 50 dB SPL y se pide ajustar el nivel de cada frecuencia individualmente, luego juntar los resultados y graficar la curva.

En la figura 2.17 se muestran las curvas de igual-sonoridad, aquí podemos ver que se incluye la curva del umbral absoluto (*Minimum Audible Field*). Para la medida de todas las curvas se usó las mismas condiciones que para la medición del *MAF* (sonido frontal, en campo libre y sin reflexiones).

Las otras curvas tienen forma parecida a la *MAF* pero tienden a ser más planas en altos niveles. Por ejemplo, la curva del umbral absoluto para escuchar un tono de 100 Hz se necesita aproximadamente 26 dB y un tono de 1000 Hz se requiere 2 dB; mientras que en la curva de 100 fonos el valor requerido para 100 Hz es de 106 dB y para 1000 Hz es de 100 dB. Con este ejemplo se puede decir que para altos niveles el oído tiende a ser más sensible en bajas frecuencias comparándolo con bajos niveles y en bajos niveles el oído es más sensible en altas frecuencias.

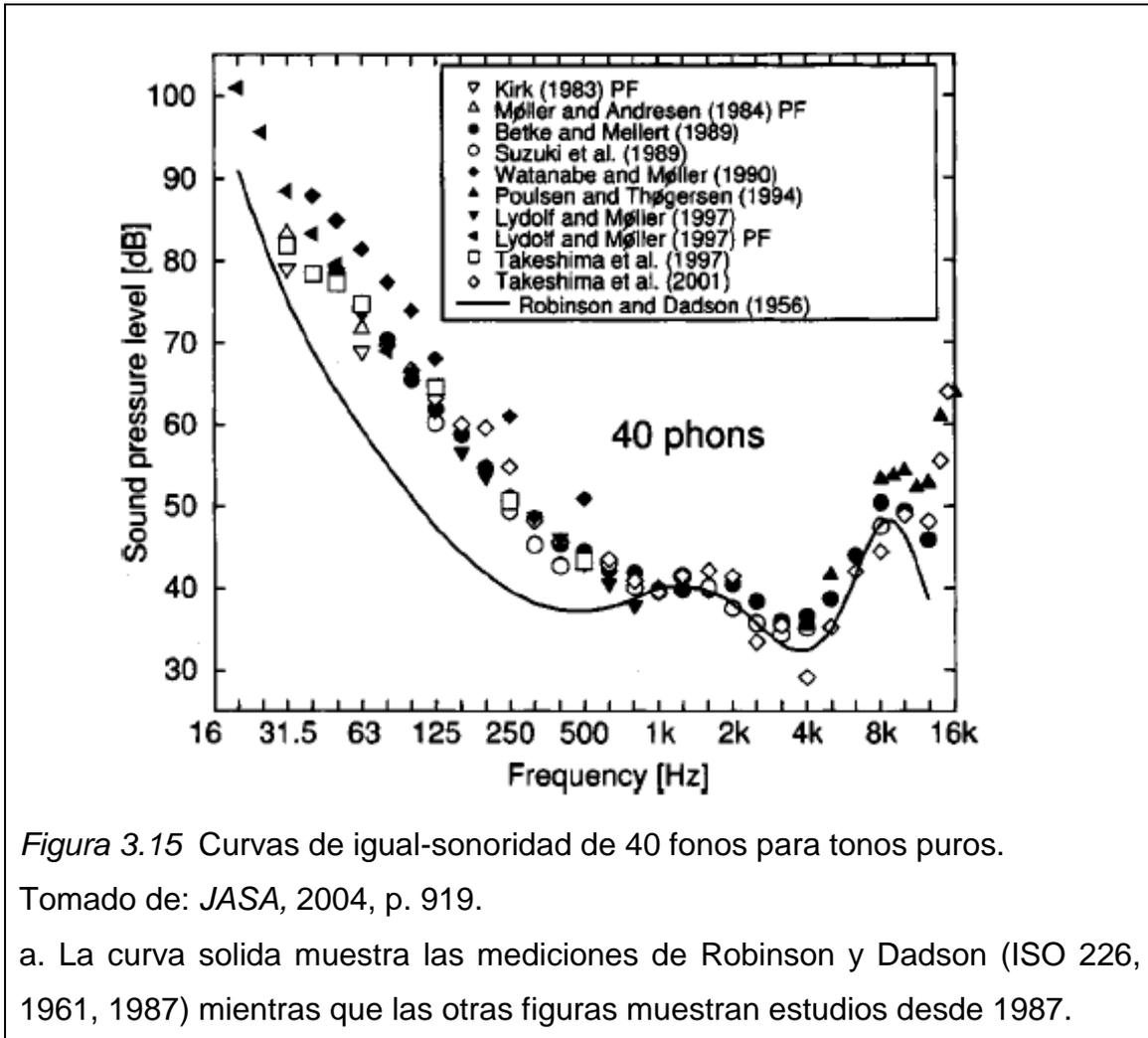
El primer experimento de medición de las curvas de igual-sonoridad fue reportado por Kingsbury en 1927 bajo condiciones limitadas y monoauralmente. En 1933, Fletcher y Mumson presentaron el conjunto completo de curvas. Otras curvas notables fueron presentadas por Churcher y King (1937), Zwicker y Feldtkeller (1955), Robinson y Dadson (1956). Estos últimos son consideradas las curvas de estándar internacional según la ISO 226.

Las curvas de Robinson y Dadson han sido altamente aceptadas, sin embargo ha existido varias diferencias con curvas que han sido medidas desde mediados de los años 80.

Por ejemplo, en 1987 Fastl and Zwicker encontraron varias diferencias en las curvas de Robinson y Dadson en la región cercana a los 400 Hz. Estas diferencias fueron confirmadas por varios expertos.

En el 2004, Suzuki y Takeshima reunieron varias mediciones de las curvas isofónicas para analizarlas y tener como resultado un nuevo grupo de curvas.

Los datos recientes de curvas isofónicas muestran que para frecuencias menores a los 800 Hz los niveles de sonoridad son más altos que los medidos por Robinson y Dadson (1956). Un ejemplo de esto, como explica Suzuki y Takeshima (2004, p. 918), (...) “es la diferencia de niveles de los niveles de sonoridad en los 40 fonos en las que se encuentran diferencias de 12.7 a 20.6 dB en los 125 Hz”.



Para llegar a un nuevo conjunto de curvas se compararon curvas clásicas (Fletcher-Mumson, Churcher-King, Zwicker-Feldtkeller, y Robinson-Dadson) con varios estudios recientes. Además se realizó los procedimientos correspondientes para llegar al conjunto de curvas que se indica a continuación.

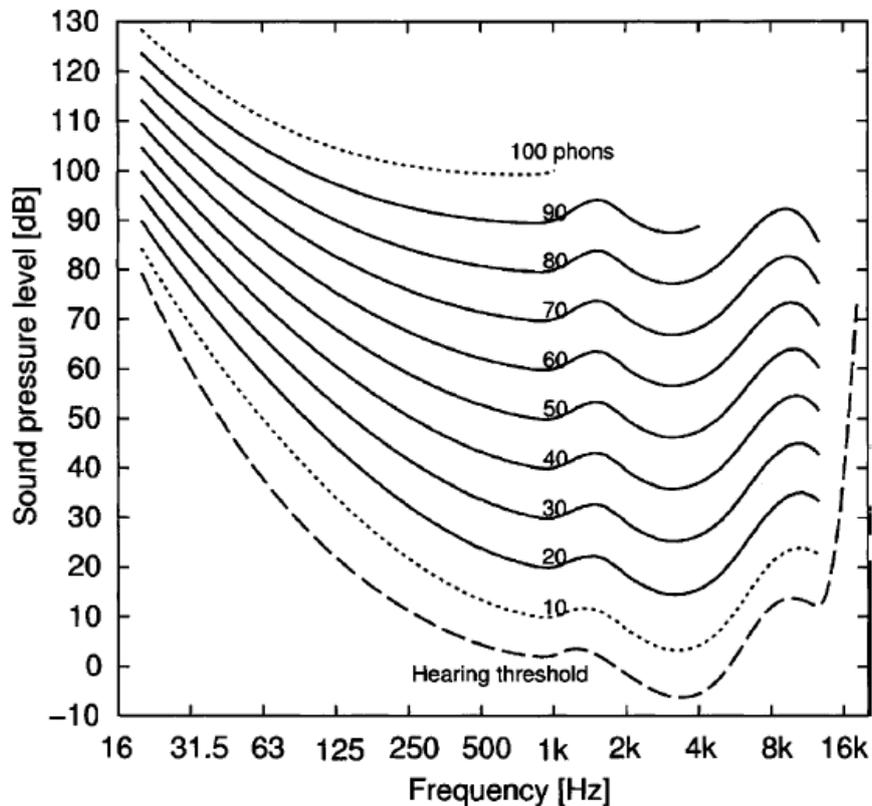


Figura 3.16 Curvas de igual-sonoridad según Suzuki y Takeshima.

Tomado de: JASA, 2004, p. 928.

a. La curva entrecortada muestra el umbral auditivo. La curva de 100 fonos no está completa porque solo un instituto mostro resultados. En la curva de 10 fonos se tiene falta de información.

Estas curvas son usadas en varios casos prácticos. Uno de ellos es el botón *loudness* (sonoridad) que se incluye en varios amplificadores para incrementar “bajos” y algunas frecuencias bajas a niveles de reproducción bajos.

Otra aplicación de las curvas es su uso en el diseño de sonómetros. El sonómetro no suma las intensidades de todas las frecuencias sino que pondera la intensidad de cada frecuencia medida, de acuerdo a las formas de las curvas isofónicas antes de hacer la sumatoria. Cuando se mide a bajos niveles, los componentes de baja frecuencia contribuyen mínimamente en el total de la sonoridad de los sonidos complejos, en este caso la ponderación usada es la

A. Esta reduce la contribución de frecuencias bajas a la lectura final del sonómetro. Dicha ponderación es basada en la curva de 30 fonos. Para niveles altos todas las frecuencias contribuyen más o menos igual a la sonoridad, es por eso que se usa la ponderación C. Para niveles medios, la ponderación usada es la B que está basada en la curva de 70 fonos.

3.6.3 Escala de sonoridad

El trabajo pionero de realizar escalas de sonoridad fue realizado por S. Stevens en 1957. El propósito de tener una escala de sonoridad es relacionar las magnitudes físicas de los sonidos propiamente y la sonoridad subjetiva.

Para realizar este objetivo se han usado dos métodos:

- Estimación de la magnitud: En este método se pide al sujeto asignar un número de acuerdo a la sonoridad percibida.
- Producción de la magnitud: Aquí se pide al sujeto que ajuste el nivel de un tono de prueba según se desee. Por ejemplo, el doble más sonoro, cuatro veces, etc.

La ley de potencia de Stevens para la sonoridad es:

$$L = k I^{0.3} \quad [\text{sonos}] \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde, k es una constante que depende plenamente del sujeto y las unidades que se han usado. Stevens fue el que propuso al *son* como unidad para la sonoridad. A dicha unidad se la define como la sonoridad de un tono de 1000 Hz a 40 dB SPL.

Esta ecuación muestra que la sonoridad de un sonido es proporcional a su intensidad con potencia de 0.3. Como este exponente es 0.3 entonces el nivel de presión sonora tendría que incrementar en 10 dB. Po eso se sabe que esto corresponde a un incremento de la intensidad por el factor 10. Entonces un aumento en 10 veces de la intensidad corresponde al doble de la sonoridad. Por ejemplo, para un tono de 1000 Hz de 50 dB SPL (que es el doble de

sonoro que 40 dB SPL) se le asigna un valor de 2 sonos. Esto solo funciona para niveles superiores a 40 dB SPL.

Cuando el sonido es presentado monoauralmente la sonoridad en sonos es de 0.67 veces que cuando es binaural.

3.6.4 Integración temporal de la sonoridad

Se ha medido extensamente el efecto que produce la duración en relación a la sonoridad de un sonido. Después de varios experimentos se ha llegado al consenso de que para una intensidad dada, la sonoridad incrementa para duraciones superiores de 100-200 ms.

La sonoridad en sonidos de corta duración puede depender de su energía total.

3.6.5 Detección de los cambios de intensidad sonora

El ser humano es capaz de percibir cambios muy pequeños de intensidad sonora. El mínimo cambio de intensidad percibida se ha medido mediante varios métodos. Uno de los procedimientos más usados es conocido como 2AFC (Alternativas de opción forzada en español). En este caso se tiene dos intervalos en los cuales se presenta dos estímulos sucesivos que difieren en intensidad o en presencia/ausencia de modulación de la amplitud. El sujeto debe elegir uno de los intervalos forzosamente dependiendo de lo que el experimento requiera.

El umbral que se obtiene es definido como la diferencia que el estímulo produce un porcentaje de respuestas correctas, en algunos casos de 70,7% o 79,4% dependiendo del método usado (métodos adaptivos; *two down-one up* y *three down-one up* respectivamente).

Tres métodos han sido usados para cuantificar la discriminación de la intensidad:

- Detección de modulación: Se presenta un estímulo no modulado y el otro con la amplitud modulada. El sujeto debe decir en cual está la modulación.

- Detección de incremento: Un estímulo de fondo es presentado mientras un incremento de nivel es impuesto en uno de los posibles intervalos.
- Discriminación de intensidad o estímulo de pulso: Dos pulsos de un sonido son presentados sucesivamente siendo uno más intenso que el otro (de forma randómica). El sujeto debe indicar cuál es el más intenso.

3.6.5.1 Discriminación de intensidad (*Intensity discrimination*)

A la habilidad para detectar una disimilitud en la intensidad de dos sonidos se le denomina discriminación de la intensidad. Esta habilidad puede ser evaluada midiendo el cambio más pequeño en diferencias de intensidad que una persona pueda detectar.

Así como en los umbrales y los casos de las curvas de igual sonoridad, la discriminación de la intensidad varía con la frecuencia siendo el rango medio el más sensible (1 a 4 kHz). “La precisión en la discriminación mejora mientras el nivel de la señal incrementa alcanzando valores menores a 1 dB cuando el nivel de base alcanza los 40 dB HL (*Hearing Level*)” (Roeser, R. J., Valente, M., & Hosford-Dunn, H., 2011, p. 181).

En la mayoría de los experimentos, dos sonidos son presentados de manera separada. En el ejercicio uno de los sonidos presentados es más intenso, por lo que el sujeto debe escoger el que más intensidad tiene. La presentación de los intervalos se realiza aleatoriamente. Después de varias pruebas, la diferencia de intensidad de los dos sonidos se va reduciendo hasta el punto en que el sujeto no pueda distinguir cuál de los dos intervalos es el más sonoro (umbral). Por lo general el procedimiento utilizado es el de 2AFC (dos alternativas forzadas).

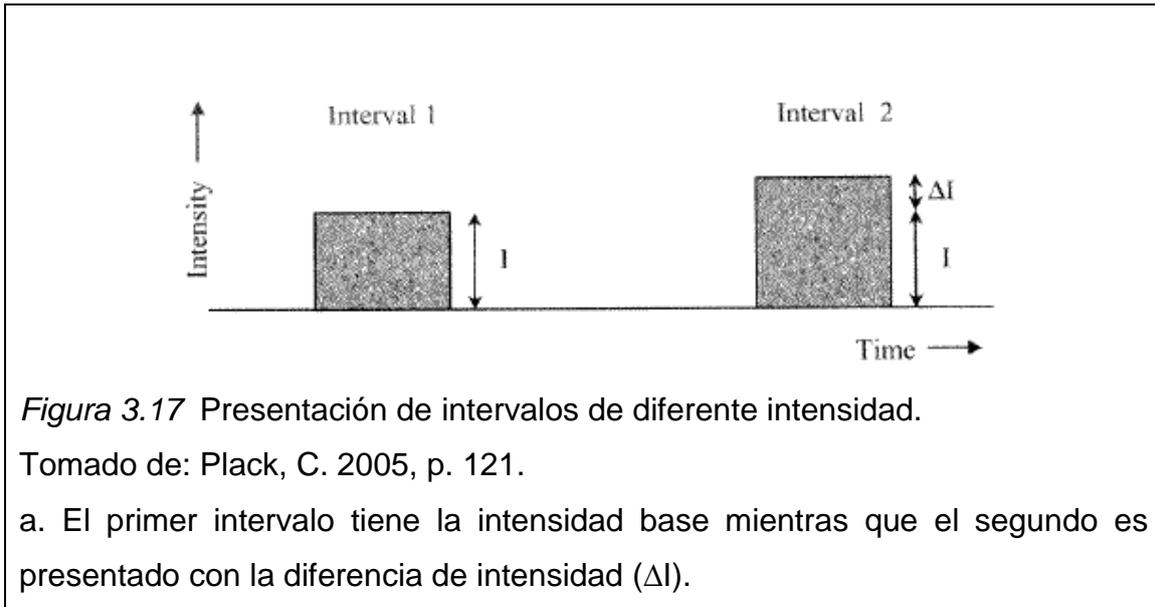
Muchas veces el umbral es expresado como:

$$\text{Fracción de Weber} = \Delta I / I \quad (\text{Ecuación 14})$$

En decibeles viene referido como:

$$\text{Fracción de Weber} = 10 \log_{10} (\Delta I / I) \text{ [dB]} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde I es la intensidad sonora base y ΔI es el cambio detectable más pequeño en dicha intensidad.



Otra forma de expresar el umbral es como el cambio de nivel:

$$\Delta L = 10 \log_{10} [(I + \Delta I) / I] \text{ [dB]} \quad (\text{Ecuación 16})$$

La ley de Weber dice que el cambio detectable más pequeño (*Just-noticeable difference*) en un estímulo es proporcional a la magnitud de ese estímulo. La ley de Weber se mantiene para tonos de banda ancha. Esta ley no se cumple para tonos puros.

En cambio existe la llamada ley *near miss* de Weber (ley aproximada de Weber) la cual si funciona en tonos puros. Para esta, la fracción de Weber decae a intensidades altas de lo normal.

En un estudio realizado por Schroder, Viemeister, y Nelson en 1994, se muestran las diferencias que existen entre personas con audición normal y personas con pérdida auditiva en cuestión de discriminación de intensidad. En

dicho experimento participaron tres sujetos con audición normal y cinco sujetos con daños cocleares. Los umbrales absolutos de cada uno de ellos fueron medidos con procedimientos adaptivos con tonos burst de 125 Hz a 8 kHz.

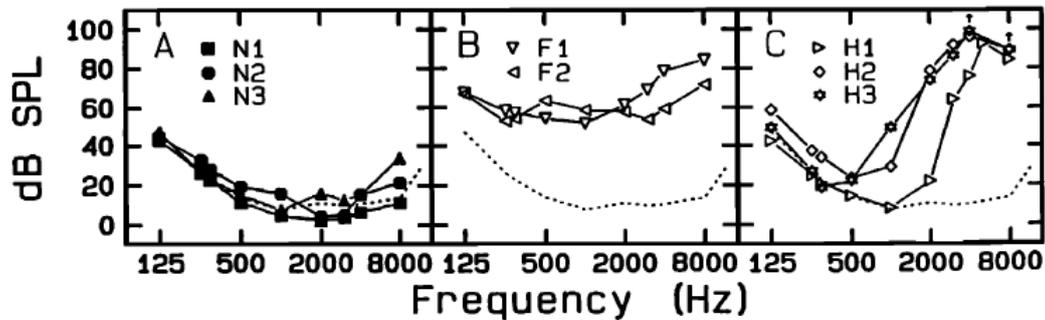


Figura 3.18 Umbrales absolutos para experimento.

Tomado de: Schroder, A. C., Viemeister, N. F., & Nelson, D. A., 1994, p. 2684.

a. El cuadro A muestra los umbrales de las personas con audición normal. Los cuadros B y C muestran a las personas con pérdida auditiva plana (B) y pérdida en frecuencias altas (C).

Las fracciones de Weber fueron determinadas para un nivel estándar bajo el umbral absoluto de 97 dB SPL. Los pasos con que se bajaba el nivel fueron 3 y 6 dB dependiendo si se estaba cerca del umbral. Para el caso de las personas con pérdida de audición los pasos fueron más pequeños debido al limitado rango dinámico disponible.

En las personas con audición normal se visualizó que la fracción de Weber decayó conforme el nivel estándar aumentaba demostrando así la ley *near miss* de Weber. Ellos compararon los resultados de las dos personas con pérdida auditiva plana y de las personas con audición normal a los mismos niveles y concluyeron que los valores son aproximadamente los mismos.

3.6.6 Fatiga de sonoridad

Cuando estamos expuestos a un estímulo de intensidad y duración constantemente la respuesta del sistema sensitivo cambia. En este caso podría

darse que la magnitud del estímulo decae o desaparece por completo. Este tipo de cambios son menos marcados en el sistema auditivo que en los otros sentidos. A pesar de eso se puede dar una modificación del umbral auditivo (la curva característica sube) si se está expuesto a niveles altos.

La fatiga es un parámetro muy importante cuando se trabaja en experimentos psicoacústica. Por ejemplo, el umbral absoluto de un sujeto es medido en una frecuencia particular luego se expone al sujeto a un tono fatigador de frecuencia particular, intensidad y duración. Seguidamente se mide nuevamente el umbral en donde se notará el cambio en el valor del dicho umbral. A este tipo de fatiga se la conoce como fatiga post-estímulo y al cambio del umbral como desplazamiento temporal del umbral (*Temporary Threshold Shift*).

3.6.6.1 Fatiga auditiva post-estímulo

Como ya se mencionó antes un término de gran importancia cuando se habla de fatiga es el *TTS*. La recuperación de la fatiga después del estímulo es rápida, por lo que conviene medir el desplazamiento del umbral lo más rápido posible.

Factores que influyen cuán grande será el *TTS* son:

- Duración del estímulo fatigador (D)
- Intensidad del estímulo fatigador (I)
- Frecuencia del estímulo fatigador (F_e)
- Frecuencia del estímulo de prueba (F_t)
- Intervalo de recuperación (R), tiempo entre la cesación del estímulo fatigador y la post-exposición para determinar el nuevo umbral.

Se conoce que la fatiga afecta más marcadamente en frecuencias superiores a 4 kHz.

Mientras el intervalo de recuperación (R) aumenta, el *TTS* disminuye. “El *TTS* es muy pequeño cuando el sujeto ha sido expuesto a bajos niveles pero incrementa rápidamente cuando los niveles son superiores a 90-100 dB” (Moore, 2013, p. 153).

Aunque los tiempos de recuperación varían dependiendo de la intensidad de exposición, de 16 horas en adelante son un tiempo óptimo para el restablecimiento.

Aunque la mayoría de veces el umbral absoluto vuelve a su estado normal para altos niveles (100 a 120dB) y larga duración de exposición puede registrarse pérdida auditiva permanente.

Según Moore (2013, p. 156-157), “La exposición a un nivel sonoro de 85 dBA durante 8 horas es seguro. Si se baja el tiempo a la mitad, el nivel aumentará 3 dB Así, 88 dBA por 4 horas, 91 dBA por 2 horas, 94 dBA por 1 hora, 97 dBA por 30 minutos y 100 dBA por 15 minutos”.

3.6.6.2 Adaptación auditiva

La adaptación auditiva ha sido investigada mediante pruebas de balance de sonoridad (*loudness balance*).

Para explicar la adaptación auditiva mediante el método de *Simultaneous Dichotic Loudness Balance (SDLB*, prueba particular en el método de balance de sonoridad) se tiene en mente un experimento relacionado. En un oído se aplica un tono de 80 dB SPL (oído de prueba) mientras que en otro oído se aplica otro tono de la misma frecuencia pero con nivel variado (oído de control). El balance que se obtiene en nivel es aproximadamente de 80 dB SPL (persona con audición normal). Después de esto el tono en el oído de prueba continúa durante 3 minutos sin el tono en el oído de control. De manera seguida se vuelve a realizar el balance de sonoridad (*loudness balance*) y se encuentra que el oído de control baja a 60 dB SPL. Debido a la adaptación el nivel ha bajado 20 dB SPL.

Con este tipo de métodos la adaptación que se da es rápida. Por ejemplo con 1 a 2 minutos de exposición. Con el método *SDLB* la adaptación se da en bajos y altos niveles.

En estudios que omiten la interacción entre los dos oídos se conoce que la adaptación solo ocurre para tonos menores a 30 dB SPL y es mayor en altas frecuencias.

3.7 Audición en niños

3.7.1 Introducción

Desde el nacimiento el niño recibe información de todo tipo lo que le permite introducirse de manera satisfactoria al mundo. A través de los cinco sentidos el ser humano aprende a comunicarse con otras personas.

El sentido auditivo es muy importante en el desarrollo del lenguaje y el aprendizaje que a su vez es fundamental en las relaciones interpersonales. Es importante diagnosticar si el niño posee pérdida auditiva ya que con esto se le puede ayudar por ejemplo con la amplificación necesaria, para evitar demora en el desarrollo del habla y sus habilidades de comunicación.

3.7.2 Desarrollo de la percepción auditiva en los niños

Fisiológicamente el sistema auditivo es funcional y útil al momento del nacimiento. Hay evidencia que las vainas de mielina que cubren las fibras nerviosas (transmisión de señales neuronales) se desarrollan después del nacimiento. La mielina alrededor del nervio auditivo se completa en los primeros seis meses de edad (Boothroyd, A., 1997). El desarrollo del sistema auditivo de un niño es bastante completo al nacimiento pero se va refinando en la niñez y adultez.

En la parte psicoacústica, los profesionales han desarrollado pruebas que son influenciadas por factores como la memoria, atención y el entendimiento pleno del proceso de la prueba. Un ejemplo de las diferencias entre niños y adultos en el desempeño psicoacústico, es que se conoce que para los niños, los niveles de umbrales auditivos en presencia de ruido no alcanzan a los de los adultos, hasta los 5 o 6 años. Existen casos como las curvas de sintonización (*psychoacoustic tuning curve*), las cuales en baja frecuencia son parecidas a los adultos en los 3 meses, mientras que las de alta frecuencia a los 6 meses

(Boothroyd, A.). Al igual que el desarrollo fisiológico el refinamiento se da en la niñez.

El procesamiento auditivo también es muy importante cuando hablamos de desarrollo auditivo. Las habilidades que se obtienen a través de los años son adquiridas por medio de práctica que da como resultado la experiencia. El criterio para decidir, la minimización de errores, mayor rapidez y atención son puntos que se desarrollan conforme pasan los años.

Se conoce que al mes de edad se transmite 20 dB menos de la energía sonora al oído interno en altas frecuencias comparado con lo que ocurre en los adultos. En bajas frecuencias la diferencia es de 5 a 10 dB. En bajas frecuencias mejora en 10 dB a los seis meses de edad (Werner, L., 2007).

3.7.3 Psicoacústica de desarrollo

La psicoacústica sirve como base para algunos métodos clínicos que usan los audiólogos. Además nos provee de información acerca del comportamiento del ser humano ante un estímulo dado. La psicoacústica de desarrollo lleva su atención hacia el entendimiento de las capacidades sensoriales de infantes y niños.

La experiencia con cualquier tipo de sonidos es muy importante en el desarrollo del habla y la comunicación entre humanos. Cuando existe algún tipo de pérdida auditiva, la cual priva de sonidos al individuo, esto puede afectar el procesamiento auditivo normal.

La sensibilidad a los sonidos va mejorando conforme el niño crece hasta los ocho años, a los diez años esta es parecida a la de un adulto. El nivel mínimo audible (conocido como umbral auditivo) en un adulto normal puede estar por los 10 dB aproximadamente. En los recién nacidos puede que el umbral este de 40 a 50 dB más arriba que el de los adultos. Se conoce que los umbrales de niños recién nacidos en altas frecuencia son muy pobres manteniéndose por algunos meses de la infancia (Werner, L. & VandenBos, G., 1993). De los tres a seis meses la sensibilidad en frecuencias altas aumenta mucho, pero de las

frecuencias bajas mejora poco. A los veinticuatro meses de vida la sensibilidad en el rango alto de frecuencias es parecida al de un adulto.

Las habilidades de detectar cambios en la intensidad sonora, detectar sonidos en ambientes ruidosos (o con un ruido presente) y otras, maduran al mismo tiempo que la detección del umbral absoluto. La habilidad para localizar sonidos en el espacio adecuadamente se da a los cinco años (Werner, L. & VandenBos, G., 1993).

3.7.4 Pérdida de audición en niños

En los niños también se da la pérdida de sensibilidad del sistema auditivo. En las escuelas es común realizar pruebas audiológicas en frecuencias medias (1000, 2000, 4000 Hz).

Los tipos conductivo y neurosensorial son muy comunes en los niños. Aunque existen personas que poseen los dos tipos la cual se denomina pérdida auditiva mixta.

3.7.4.1 Conductiva

La pérdida auditiva conductiva o de transmisión se da cuando existe algún problema en la transmisión mecánica del oído medio hacia el interno. Muchas veces este problema es temporal.

Por lo general se ven pérdidas de 26 a 55 dB HL (leve y moderado respectivamente).

Es muy común que se mejore la audición con un implante o audífono. Aunque la cirugía es un procedimiento muy común.

3.7.4.2 Neurosensorial

En esta enfermedad es muy común un daño en la sección del oído interno o también puede darse en el nervio auditivo (el cual conduce la información al cerebro). El problema puede darse por el mal funcionamiento de las células ciliadas el cual recae en la no estimulación del nervio auditivo.

A través del tiempo varios términos han sido usados para referirse a esta enfermedad, pero el más común es el de sordera (*Deafness*). La pérdida neurosensorial afecta a las altas frecuencias.

La mayoría de personas con este tipo de pérdida auditiva son el resultado de padres con la misma enfermedad. Generalmente se comunican por medio del lenguaje de signos aunque algunos, que han adquirido la enfermedad en la adultez o niñez, usan el lenguaje oral.

Se estima en Estados Unidos que al menos 1 niño de 1000 nace con pérdida auditiva neurosensorial bilateral (dos oídos) de al menos 40 dB. En este país un promedio de 4000 infantes nacen con pérdida auditiva severa a profunda bilateral y 8000 nacen con pérdida leve a moderada unilateral (Smith, R., Bale, J. & White, K., 2005). Esto puede afectar profundamente en la probabilidad de obtener empleo, conseguir objetivos personales o profesionales, expectativa de vida, entre otros.

3.7.4.3 Factores de riesgo

Los factores para la pérdida auditiva conductiva se dan por cerumen acumulado, edema en el canal auditivo y otitis media.

Para la pérdida neurosensorial son la exposición a niveles altos de ruido (trauma acústico), medicamentos, hereditariamente y meningitis.

El trauma acústico es una de las causas más comunes de pérdidas en frecuencias mayores a 4000 Hz. Los factores más notorios para este son la exposición a ruido continuo mayor a 85 dB y ruido impulsivo mayor a 140 dB.

La siguiente tabla muestra los valores de audición normal hasta pérdida auditiva profunda en dB HL.

Tabla 1. Porcentaje de pérdida auditiva y niveles auditivos.

Porcentaje de pérdida auditiva	Nivel auditivo (dB HL)
Normal	0 a 15
Mínimo	16 a 25
Leve	26 a 40
Moderado	41 a 55
Moderado/Severo	56 a 70
Severo	71 a 90
Profundo	90+

Tomado de Gifford, K. A., Holmes, M. G., Bernstein, H. H., 2009, p. 213.

3.7.5 Pruebas de audición en niños

Para la verificación del estado funcional del sistema auditivo se pueden realizar varias pruebas en el caso de niños. Entre ellas están *brainstem auditory evoked response* (respuesta provocada por el tronco encefálico), timpanometría, emisiones otoacústicas, entre otros.

Las emisiones otoacústicas son sonidos emitidos espontáneamente en respuesta de un estímulo acústico de corta duración. Estos sonidos son producidos por las células ciliadas externas ubicadas en la cóclea. Cuando el sujeto tiene pérdidas de más de 50 dB (pérdida moderada), las emisiones otoacústicas no están presentes.

La audiometría con tonos puros es muy usada para obtener umbrales mediante un audífono o vibrador. Para obtener umbrales por conducción del aire se usa un audífono pero cuando es por el hueso se presenta los sonidos por un vibrador ubicado en la corteza mastoidea. Debido a que se necesita la participación del niño en estas pruebas (las instrucciones pueden ser difíciles de entender), para menores de cinco años se usa la audiometría *conditioned play*. El CPA (Conditioned Play Audiometry) usa la condición del comportamiento para determinar la respuesta del niño. En niños mayores a cinco años se puede usar los procedimientos convencionales (como el de los

límites, constantes, etc.) para detectar umbrales auditivos. El más común es pedirle al niño que presione un botón si escucha el tono a pesar de que en este tipo de procedimientos no se obtenga un dato muy confiable. Existen procedimientos más valederos como los *Transformed up-down* que veremos más adelante (Sección 3.8).

3.7.6 Investigaciones relacionadas con umbrales auditivos en niños

Investigaciones referentes a los umbrales de audición no han sido publicadas frecuentemente. En adultos los experimentos han sido muy comunes. Con las publicaciones de los umbrales auditivos en adultos se han obtenido datos, en personas otológicamente normales, que se usan como referencia. En la norma ISO 389 se define a una persona otológicamente normal como la que posee un estado de salud normal, que no presenta signos de alguna enfermedad del oído y que no ha estado expuesto a ruido desmesuradamente. Debido a que no existe una normativa estándar para niños, se usa como base los resultados en jóvenes adultos (de 18 a 30 años).

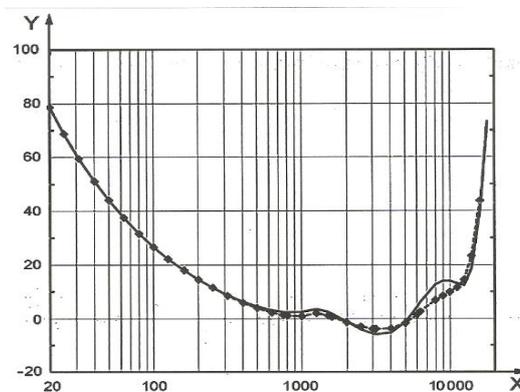


Figura 3.19 Umbral de audición de referencia para tonos puros en campo libre (línea continua) y campo difuso (línea entrecortada).

Tomado de: ISO 389-7:2005, 2006, p. 9.

La norma que rige para umbrales de audición de referencia en campo libre y campo difuso en la ISO 389-7. Se debe considerar que todos los individuos pueden tener algún daño o disminución de la habilidad auditiva, aunque

también se conoce que conforme la edad aumenta el umbral para escuchar alguna frecuencia sube.

3.7.6.1 Niveles de umbrales auditivos en niños de escuela

Los datos disponibles en niños con audición normal se han basado en estudios que están afectados por el *bias* psicológico (tendencia de tomar decisiones de manera ilógica bajo presión por ejemplo) y la falta de atenuación al ruido externo en el lugar donde se midió por lo que, no pueden ser considerados como una normativa. Para contrarrestar esto Haapaniemi en 1996 midió los niveles de audición (dB HL-audiogramas) en una escuela dentro de una cabina aislada y así propuso datos en niños otológicamente normales y sin chequeo previo. En este estudio existió una mejoría de 0 a 7 dB HL en comparación a otros estudios realizados anteriormente.

Tabla 2. Comparación de niveles de umbral auditivo (dB HL) en niños de 7 años.

Estudio	Probado en	Grupo	Nivel de umbral auditivo (dB HL)					
			0.5kHz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	
Eagles y Doerfler (1961)	Escuela		8.5	6.1	4.5	2.9		
Roberts y Federico (1972)	Cabina aislada		7.9	4.7	1.5	6.5	8.9	
Richardson (1976)	Escuela		9.5	6	4	3	6	
Haapaniemi (1996)	Cabina aislada	Otológicamente normales	I	3.1	0.2	0.1	1	3.3
		Sin chequeo previo	D	3.7	0.8	0.7	1.2	5.8
			I	5	2.4	1.5	3.2	6.2
			D	5.5	2.6	2	3.2	8.1

Tomado de Blandy y Lutman, 2005, p. 436.

Nota: En el estudio de Haapaniemi se muestran los resultados del oído izquierdo (I) y derecho (D).

3.7.6.2 Niveles de umbrales auditivos en niños de 7 años

En el 2005, Blandy y Lutman publicaron un estudio relacionado con los niveles del umbral de audición en niños de 7 años. Esta investigación se hizo en el Reino Unido en 189 niños con edades promedio de 7.65 años. Las frecuencias fueron 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz y se realizó la prueba en una cabina audiométrica. Los autores compararon sus resultados con estudios previos como el de Haapaniemi (en niños de escuela) y Smith en 1999 (en jóvenes adultos normales). Los dos grupos son los realizados en personas otológicamente normales y personas sin chequeo previo.

Tabla 3. Comparación de niveles de umbral auditivo (dB HL) entre niños de 7 años (Blandy y Lutman; Haapaniemi) y adultos jóvenes (18 a 25 años; Smith).

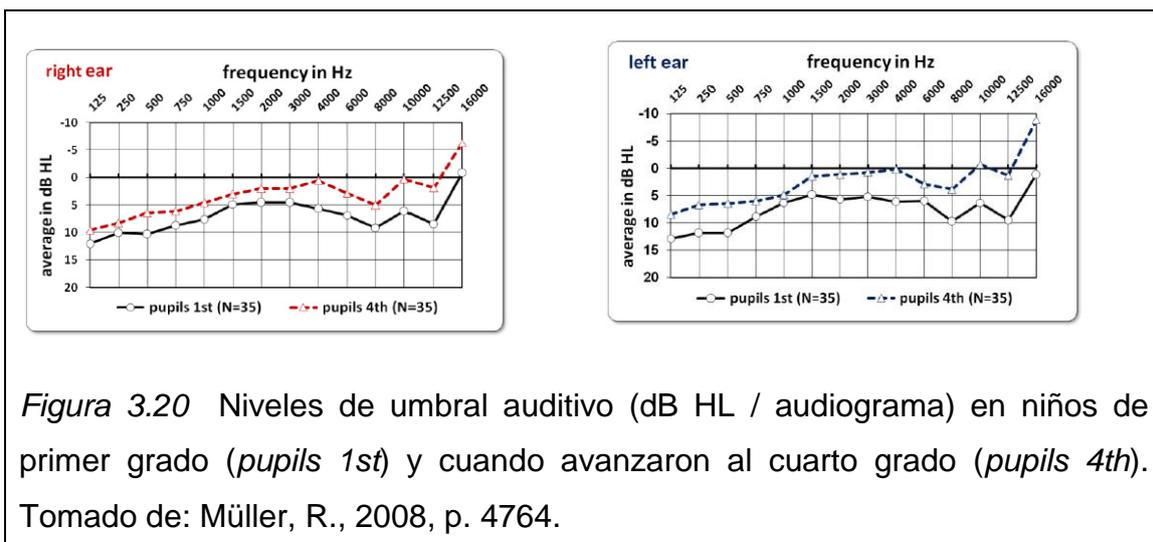
		Sin chequeo previo			Otológicamente normales		
Frec. (kHz)	Oído	Blandy y Lutman	Haapaniemi	Smith	Blandy y Lutman	Haapaniemi	Smith
0.5	I	6	5	6	2.4	3.1	2.6
	D	5.5	5.5	5.2	3.9	3.7	2.9
1	I	1.5	2.4	4.3	-1.8	0.2	0.9
	D	-0.6	2.6	4.1	-2.7	0.8	1.5
2	I	-0.4	1.5	5.8	-1.6	0.1	3
	D	-0.4	2	5.3	-0.6	0.7	3.5
4	I	2.2	3.2	5.9	0.3	1	3.1
	D	2.9	3.2	5.1	1.6	1.2	3.2
8	I	8.2	6.2	8.8	6.3	3.3	5.4
	D	6.2	8.1	9	4.6	5.8	4.7

Tomado de Blandy y Lutman, 2005, p. 438.

Los datos presentados estuvieron muy de acuerdo con los de Haapaniemi, aunque al parecer se ve mejoría en las frecuencias medias. Las diferencias entre otológicamente normales y si chequeo fluctuaron entre 1 y 3 dB. Comparando los resultados de los niños con los jóvenes adultos se puede visualizar un poco más de sensibilidad en las frecuencias de 1 y 2 kHz pero en general "(...) la audición de los niños parece ser igual o mejor que la de los adultos jóvenes" (Blandy y Lutman, 2005, p. 440). Los autores recomendaron realizar las mediciones en condiciones óptimas y tener en cuenta los lapsos de concentración de los niños.

3.7.6.3 Desarrollo de umbrales auditivos con tonos puros en niños de escuela

Un estudio, realizado en niños, se presentó por Müller en Alemania en el 2008. Aquí se midió los niveles del umbral auditivo en niños cuando se encontraban en el primer grado y luego en el cuarto grado. Se encontró que la ejecución auditiva en los niños mayores es mejor, es decir, el umbral mejoró. El mejoramiento del umbral se puede explicar que conforme la edad aumenta, la ejecución y ejercicio de los sentidos también lo hacen. Estos resultados contrastan con Schechter que en 1985 encontró que los grupos más jóvenes son más sensibles para frecuencias superiores a los 8 kHz.



Haapaniemi también halló mejoras en los umbrales auditivos en frecuencias superiores a los 8 kHz en niños de 7, 10 y 14 años de edad. En frecuencias bajas, por lo general se tiene la misma tendencia.

3.7.6.4 Comparación de umbrales auditivos con tonos puros en infantes y adultos

Se ejecutó una comparación entre niños de 7.2 a 11 meses y adultos a comienzos de los 20 años en 1983 (Aslin, Pisoni y Sinnott). Las frecuencias que se tomaron en cuenta fueron 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz. También se efectuó una comparación entre tonos de 0.5 y 1 segundo. Para los tonos de 1 segundo, los niveles de los umbrales de audición de los niños superaron de 21 a 27 dB, dando como resultado una peor audición que la de los adultos. Mientras que, en los tonos de 0.5 segundo, los umbrales de los infantes superaron de 17 a 25 a los de los adultos. La sensibilidad de los infantes incrementó en los 8000 Hz.

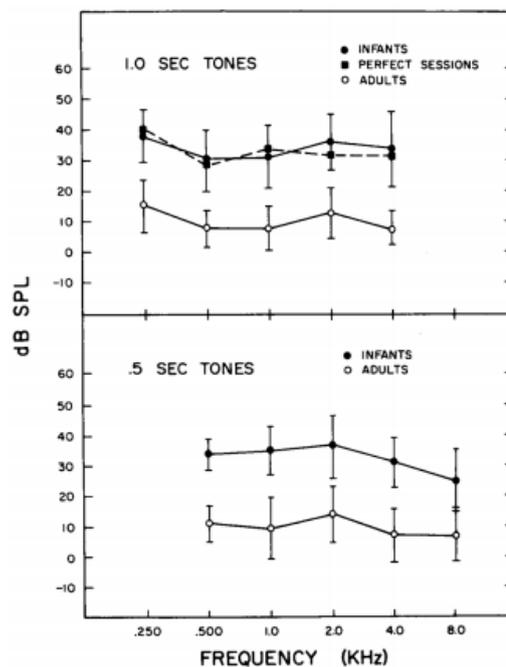


Figura 3.21 Promedio de umbrales auditivos en infantes y adultos con tonos de 1 segundo (arriba) y 0,5 segundos (abajo).

Tomado de: Sinnott, J. M., Pisoni, D. B., & Aslin, R. N., 1983, p. 14.

3.7.6.5 Comparación de umbrales auditivos entre niños y adultos

Estudios de investigación se realizaron en base al desarrollo de sensibilidad auditiva. En la publicación *Developmental Psychoacoustics*, Nozza muestra resultados de varios laboratorios que midieron la diferencia de umbrales auditivos en infantes y adultos en frecuencias de 500 a 4000 Hz. Aquí se nota que los umbrales de los niños son bastante altos en comparación a los adultos. Los datos se obtuvieron con el audífono ER3A. La edad de los infantes va de los 6 a 12 meses.

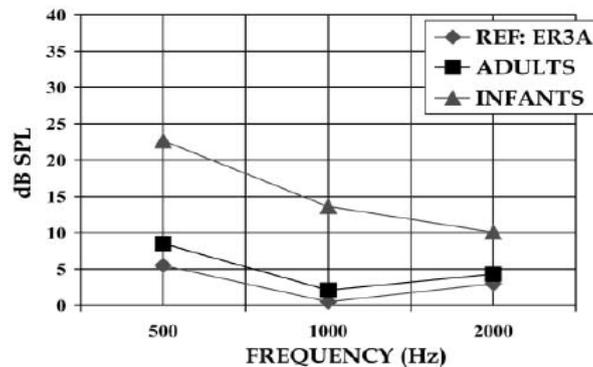


Figura 3.22 Umbrales auditivos de niños y adultos.

Tomado de: Nozza, R., 2001, p. 39.

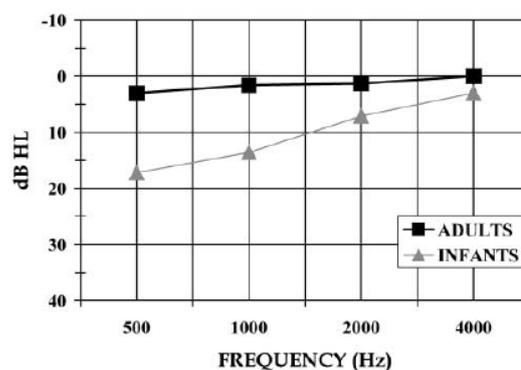


Figura 3.23 Audiograma de niños y adultos.

Tomado de: Nozza, R., 2001, p. 40.

3.7.6.6 Sensibilidad de tonos puros en infantes

Un estudio realizado en 1988 por Olsho, L., Koch, E., Carter, E., Hapin, C. & Spetner, N. muestra la sensibilidad auditiva en infantes de 3, 6, 12 meses y adultos. Para este estudio se consideró un rango de frecuencias de 250 a 8000 Hz. Los sonidos presentados por medio de un audífono monoauralmente. Los umbrales de los infantes de 6 y 12 meses fueron de 10 a 15 dB más altos que los adultos. Los umbrales de infantes 3 meses se visualizó valores de 15 a 30 dB más altos que los adultos.

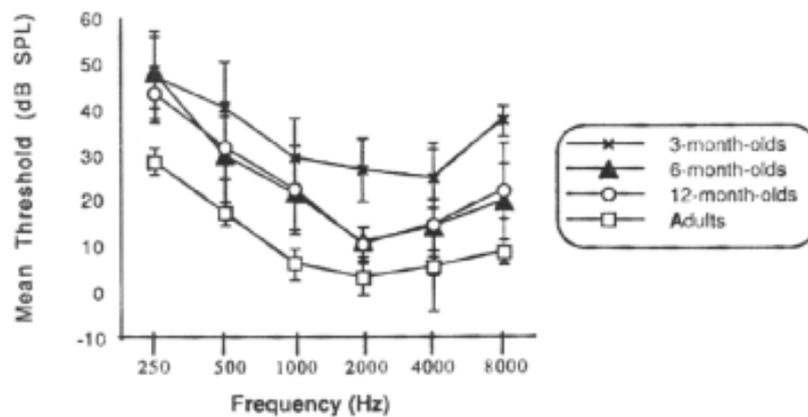


Figura 3.24 Umbrales auditivos con tonos puros de infantes de 3, 6, 12 meses y adultos.

Tomado de: Olsho, L., Koch, E., Carter, E., Hapin, C. & Spetner, N., 1988, p. 20.

a. Media de umbrales en dB versus frecuencia en Hz. Derivación estándar de ± 1 .

En la siguiente grafica se puede apreciar un experimento comparando la sensibilidad de tonos puros (umbrales auditivos) en infantes de dos semanas de nacidos hasta el umbral de un adulto. Podemos ver como el umbral baja conforme pasan los años. Desde los diez años el umbral es casi parecido al de un adulto.

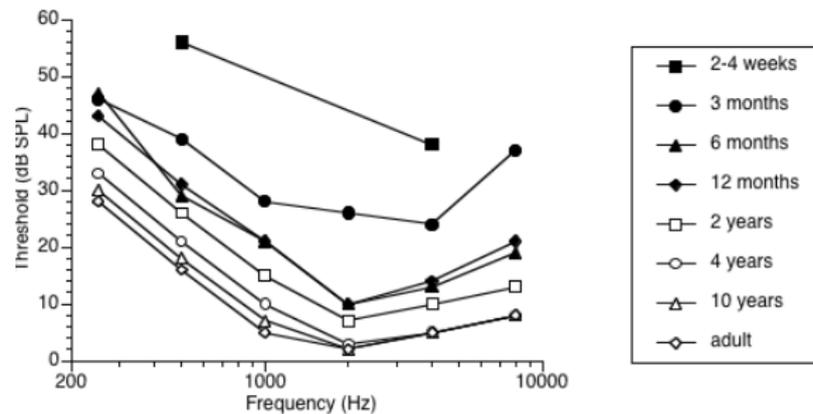


Figura 3.25 Umbrales auditivos de infantes de 2 a 4 semanas de nacidos hasta el umbral de un adulto.

Tomado de: Werner, L., 2007, p. 74.

3.8 Procedimientos adaptativos para la medición de umbrales auditivos

3.8.1 Introducción

Como ya hemos visto anteriormente, el umbral se refiere a la intensidad sobre la cual será detectada el sonido y por debajo no se detectará. Se conoce que esta definición no es del todo satisfactoria por lo que es mejor decir que hay un rango de intensidades en las que el sujeto encuentra o no la señal.

La teoría de detección de señales es muy importante en los experimentos psicoacústicos. Habitualmente esta provee la posibilidad de separar factores relacionados con el criterio, motivación y prejuicio (*bias*), de los factores relacionados meramente con las capacidades auditivas. Además, está el hecho de que las respuestas pueden variar de prueba a prueba, aunque el mismo estímulo sea presentado en cada prueba.

En la psicofísica se han desarrollado procedimientos que son ventajosos en los experimentos psicoacústicos. A estos se los conoce como adaptativos. En un procedimiento adaptativo el nivel de cualquier prueba es determinado por el estímulo y la respuesta anterior.

Es de vital importancia conocer las ventajas y desventajas de los procedimientos clásicos y nuevos usados en los experimentos. En particular los métodos *up-down* (arriba-abajo) tienen un campo extenso de aplicación en la psicoacústica.

3.8.2 Función psicométrica

En la siguiente figura se muestra la curva clásica de la función psicométrica. El nivel (o magnitud) del estímulo es dibujado en el eje de las abscisas, mientras que en las ordenadas se muestra el porcentaje de respuestas correctas.

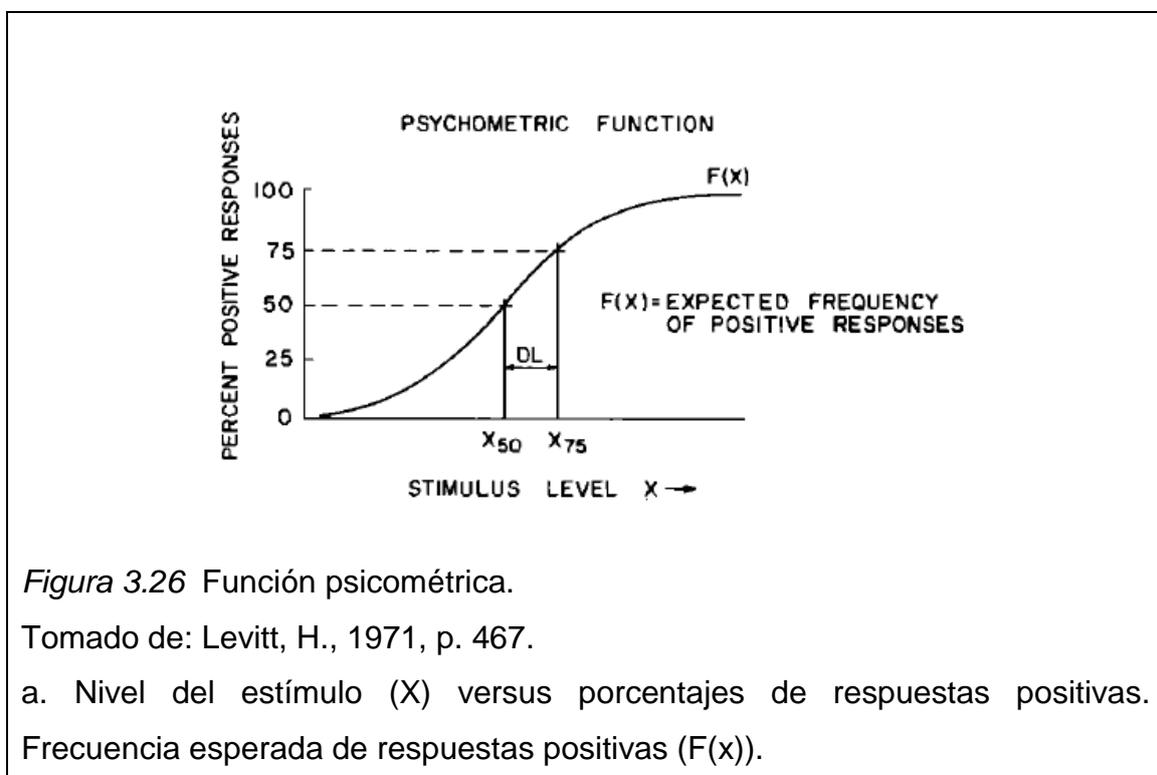


Figura 3.26 Función psicométrica.

Tomado de: Levitt, H., 1971, p. 467.

a. Nivel del estímulo (X) versus porcentajes de respuestas positivas. Frecuencia esperada de respuestas positivas ($F(x)$).

El término “respuestas positivas” depende exclusivamente del experimento. Por ejemplo, en la detección del umbral auditivo para una determinada frecuencia el sujeto podría responder “si escucho” o “no escucho”. En el caso de los experimentos de opción-forzada (*forced-choiced*) las respuestas positivas pueden ser consideradas como la identificación de un estímulo en un determinado intervalo (opción).

En la función psicométrica los parámetros de interés son:

- La localización de la curva, definida por el nivel del estímulo correspondiente a 50% de respuestas correctas (X_{50}).
- El esparcimiento de la curva, distancia (DL) entre dos puntos convenientes en la curva ($X_{75}-X_{50}$; $X_{70}-X_{30}$).

En la aplicación, el término X_{50} es usualmente definido como el umbral y DL es conocido como el umbral diferencial. En experimentos de opción forzada, es común que se determine un solo punto en la curva, correspondiente por ejemplo a el nivel de 75% (X_{75}).

Dos consideraciones básicas gobiernan el uso de cualquier experimento, la ubicación de las observaciones y la estimación basada en los datos resultantes. El mejor escenario se da cuando la ubicación de las observaciones es buena seguido de un buen método de estimación. El peor escenario es el contrario (Levitt, 1971, p. 468).

En la práctica, es suficiente tener una buena ubicación de las observaciones y un simple pero efectivo método de estimación. Según Levitt (2013, p. 469), “un buen procedimiento es definido como uno altamente eficiente, robusto y relativamente libre de *bias*”.

3.8.3 Procedimientos tradicionales

3.8.3.1 Método de las constantes

En este método, el experimentador escoge varios niveles para los estímulos. Dichos sonidos son constantes y presentados de forma aleatoria.

Un método de estimación, por ejemplo análisis *probit*, es usado para encajar los datos resultantes de la prueba en la curva psicométrica.

La ventaja de este método es que cubre un rango muy amplio de datos (observaciones ubicadas en un rango de X_{10} a X_{90}). Pero siempre es mejor realizar pruebas preliminares para conocer el rango requerido. Debido a que el

estímulo se presenta aleatoriamente, el sujeto no puede anticipar una secuencia, por lo que se reduce la posibilidad del *bias*.

Una de las desventajas del método es que su duración es muy larga, por lo tanto puede causar fatiga auditiva, y debido a esto pueden los datos resultantes pueden ser erróneos. Además no la hay posibilidad de tener cambios graduales en los parámetros durante la prueba.

3.8.3.2 Método de los límites

En el método de los límites el experimentador presenta un estímulo que tiene alta posibilidad de ser una respuesta positiva. Si esta respuesta positiva se da por parte del sujeto entonces el estímulo es disminuido. Si esto ocurre de nuevo se disminuye con la misma proporción, lo que se conoce como *step size* (tamaño de paso). Este procedimiento continúa hasta que la respuesta negativa se obtiene. El valor promedio de los dos últimos estímulos es un estimado de X_{50} en la curva psicométrica. El procedimiento también puede realizarse de forma opuesta.

Este método es muy usado en la audiología o cuando se requiere un rápido estimado de X_{50} .

Una de las desventajas es que las observaciones no se ubican bien. El estimado puede ser perjudicado por el *bias*, ya que este es dependiente del *step size* y la elección del nivel inicial de estímulo (Anderson, McCarthy, y Tukey, 1946; Brown, 1965). Para el método de los límites descendente el sujeto tiende a “escuchar” el estímulo sonoro cuando ya no está presente, ya que por continuidad de secuencia el cerebro hace que se lo imagine.

3.8.4 Procedimientos *up-down* (arriba-abajo)

3.8.4.1 Simple *up-down*

A este método también se lo conoce como método escalera (staircase). A diferencia del método de los límites el cual termina su curso después del primer reverso (cambio de respuesta positiva a negativa), el método simple *up-*

down no termina allí. Es recomendado que la prueba continúe por lo menos hasta que se obtengan seis u ocho reversos (Wetherill y Levitt, 1965).

En el siguiente gráfico se aprecia cada uno de los elementos en este método. A los incrementos, en los cuales el estímulo sube o baja de nivel, se los conoce como pasos (*steps*). En este, no existen cambios de paso por lo que es fijo. El valor inicial (*inicial value*) se refiere al primer nivel con que se inicia la prueba. La serie de pasos, dirigidos solo en una dirección, se la denomina como corrida (*run*). Por ejemplo, de las pruebas (*trials*) 1 a 3 es la primera corrida, de la 3 a la 7 la segunda y así sucesivamente.

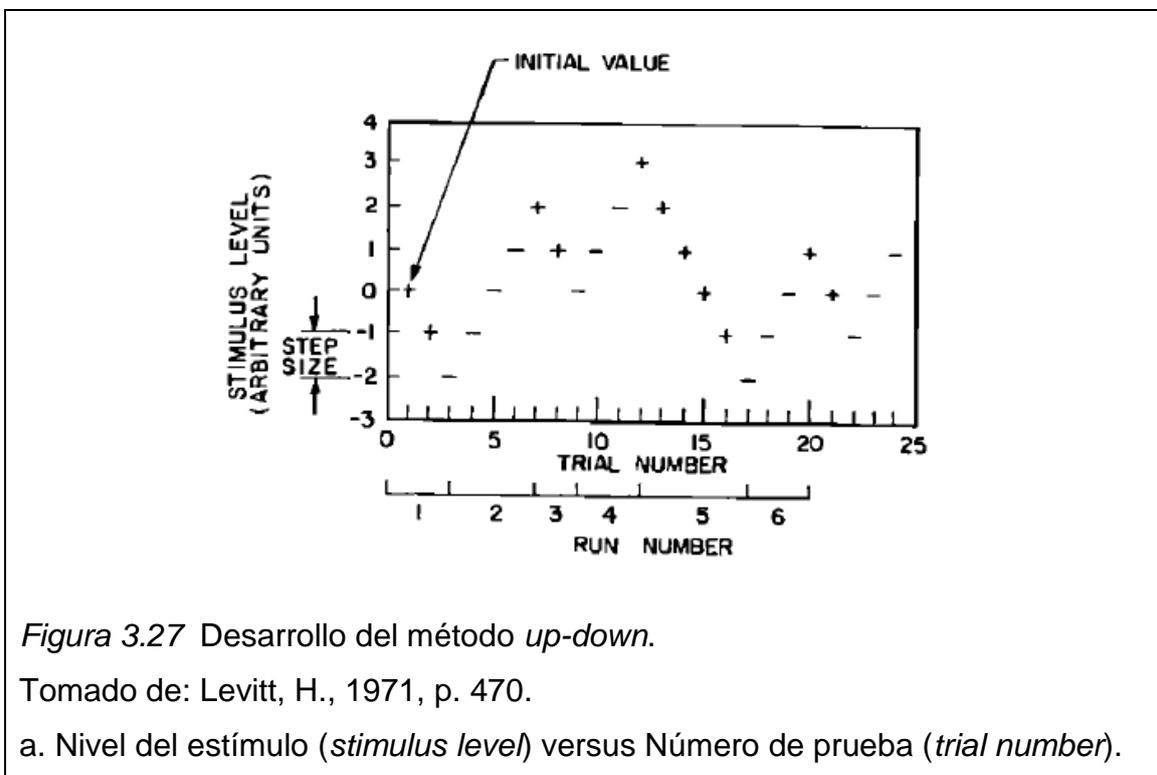


Figura 3.27 Desarrollo del método *up-down*.

Tomado de: Levitt, H., 1971, p. 470.

a. Nivel del estímulo (*stimulus level*) versus Número de prueba (*trial number*).

Las ventajas de este método son las siguientes. La mayoría de las observaciones están ubicadas en o cerca del punto X_{50} , lo cual es bueno para estimar el nivel del 50% de detección. Si existe acumulación durante la prueba, la ubicación de las observaciones seguirá esta acumulación.

Al igual que los anteriores métodos, en este también existen desventajas. Una de ellas es que los datos no están bien ubicados para estimar otros puntos diferentes a X_{50} . Por el lado del *step size* existen dificultades con pasos (*steps*):

- Con un *step size* muy largo, los datos se ubicarán mal en relación a X_{50} .
- Con un *step size* muy corto, muchas observaciones se malgastan en converger a X_{50} .

En general para los experimentos en psicofísica pueden existir problemas particulares. Como el sujeto conoce que el experimento consiste en una regla secuencial, puede anticiparse al estímulo y sus respuestas pueden ajustarse a eso. Para reducir la estimación del prejuicio (*bias*) es recomendado que un número par de corridas (*runs*) sea usado.

Para analizar los datos resultantes se pueden usar técnicas convencionales como el conocido análisis *probit*. Un método muy simple desarrollado por Wetherill (*mid-run method*) en 1963 es recomendado por Levitt en su publicación *Transformed up down methods in Psychoacoustics*. Este procedimiento de estimación es equivalente a tomar el punto medio de cada corrida como estimación de X_{50} . Estudios empíricos han demostrado que la estimación de la media-corrida (*mid-run*) es fuerte, eficiente y de baja valoración de *bias*. En el método simple *up-down* es recomendado usar un *step size* largo al comenzar el experimento, el cual vaya decreciendo conforme la prueba continua.

En la práctica es muy importante la decisión del *step size* inicial. Aquí, la reducción de eficiencia no es tan grande si un *step size* muy largo es usado, pero es muy mala si es muy pequeño. Levitt recomienda que “un procedimiento conveniente consiste en reducir a la mitad el *step size* después de la primera corrida, tercera, séptima, quinceava, etc.” (Levitt, 1971, p. 471).

3.8.4.2 *Transformed up-down* (Transformado arriba-abajo)

Un método general para determinar puntos en la función psicométrica es el *transformed up-down*. Las secuencias de observaciones son puestas en dos grupos, el grupo *up* y el grupo *down*.

Tabla 4. Grupo de respuestas y sus probabilidades de los métodos *transformed up-down*.

Entrada	Secuencia de respuestas		Grupo de respuestas	
	Grupo ascendente (<i>up group</i>), incrementar el nivel después de:	Grupo descendente (<i>down group</i>), disminuir el nivel después de:	Probabilidad de una secuencia del grupo descendente= $P[\text{down}]$	Probabilidad de una respuesta positiva en convergencia
1	-	+	$P(X)$	$P(X)=0.5$
2	+ - 0 -	++	$[P(X)]^2$	$P(X)=0.707$
3	--	- + 0 +	$[1-P(X)]P(X)+P(x)$	$P(X)=0.293$
4	++- 0 +- 0 -	+++	$[P(X)]^3$	$P(X)=0.794$
5	+++ - 0 ++ - 0 + - 0 -	++++	$[P(X)]^4$	$P(X)=0.841$
6	----	--- + 0 -- + 0 - + 0 +	$1-[1-P(X)]^4$	$P(X)=0.159$
7	Respuestas con 1 o más respuestas negativas	++++	$[P(X)]^4$	$P(X)=0.841$
8	-- -+- +- -	++ +-+ -++	$[P(X)]^2[3-2P(X)]$	$P(X)=0.5$

Tomado de: Levitt, 1971, p. 471.

Nota: La entrada uno corresponde al método *simple up-down*. Las siguientes entradas corresponden a métodos usados por Levitt, Zwislocki, Heinemann, Campbell y Rabiner.

El cambio de nivel del estímulo se da solo después de una secuencia de observaciones que pertenecen al grupo *up* o *down*. Si esta secuencia no se da, el nivel del estímulo no cambia. Como ejemplo se puede tomar la entrada 2 (ver tabla 4 abajo). Como vemos esta dice que el nivel será incrementado después de una respuesta positiva y negativa o solo negativa; mientras que el nivel disminuirá solo después de dos respuestas positivas.

La siguiente figura muestra un caso del procedimiento *transformed up-down*. Este obedece a la entrada dos de la tabla la cual converge al punto $X_{70.7}$. Además, se aprecia que el número de pruebas (*trials*) por corridas (*runs*) aumentó en comparación a método *simple up-down*.

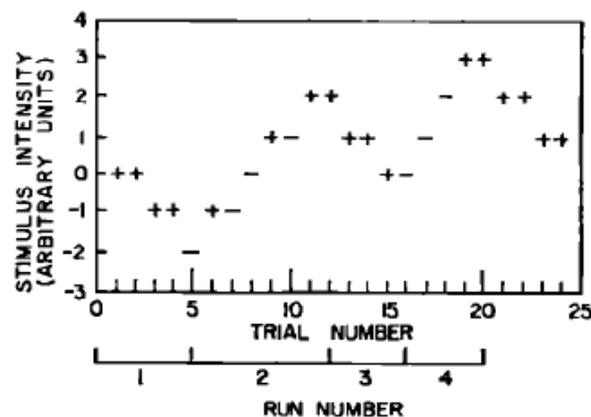


Figura 3.28 Desarrollo del método *transformed up-down*.

Tomado de: Levitt, H., 1971, p. 472.

a. Número de prueba (*trial number*) versus intensidad del estímulo (*stimulus intensity*). Entrada 2 / 2down-1up.

Este procedimiento tiende a converger en el nivel del estímulo en el cual la probabilidad de una secuencia de respuestas descendentes es igual a la probabilidad de una secuencia de respuestas ascendentes. El ejemplo con

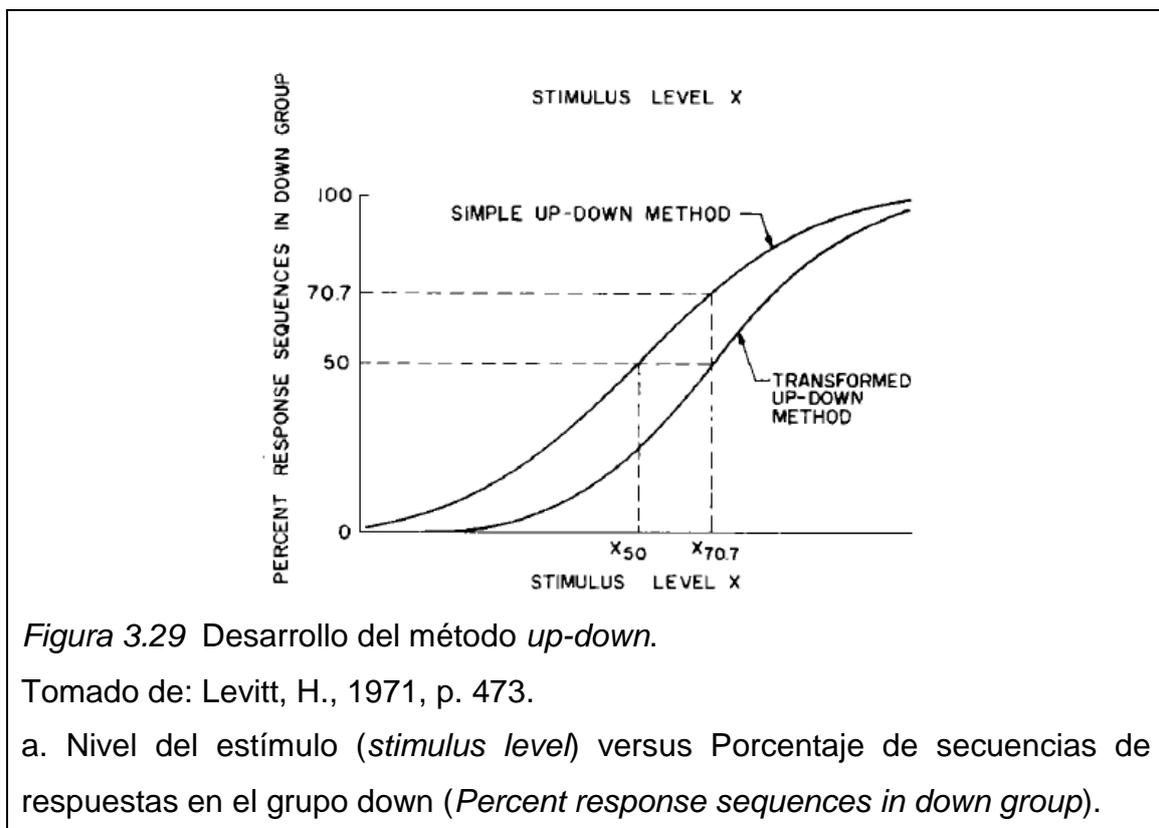
base en la entrada 2 sería que la probabilidad de obtener una secuencia hacia arriba (*up sequence*) es:

$$P(X) [1-P(x)] + [1-P(X)] \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde $P(X)$ es la posibilidad de una respuesta positiva a un nivel del estímulo X , $[1-P(X)]$ probabilidad de respuesta negativa, $P(X) [1-P(x)]$ probabilidad de respuesta positiva seguida de una negativa.

La probabilidad de que una secuencia hacia abajo (*down sequence*) es $[P(X)]^2$. Por lo tanto, $[P(X)]^2=0.5$; $P(X)=0.707$.

La curva que se relaciona a la probabilidad de una secuencia de respuestas descendentes es conocida como la curva de respuesta transformada (*transformed response curve*). La curva del método simple *up-down* es numéricamente igual a la del método *transformed up-down*.



Para la entrada número 4 (que corresponde al procedimiento conocido como 3 *down 1 up*) la curva converge al 79.4%. Por ejemplo, si estamos midiendo umbrales con este método, esto describe que la probabilidad de que el sujeto de una respuesta correcta es del 79.4%. En el gráfico superior el 70.7% corresponde a la entrada número 2 (que corresponde al procedimiento conocido como 2 *down 1 up*). En los procedimientos transformados *up-down* se puede usar los mismos métodos de estimación que en el simple *up-down*.

3.8.5 Procedimiento *Alternative Forced Choice* (de elección alternativa forzada)

En la psicoacústica estos procedimientos son muy usados. En estos experimentos existen dos o más alternativas que se presentan en la prueba, en una de estas opciones está presente el “objetivo”. Los métodos de elección forzada son usualmente denotados como AFC (por sus siglas en inglés) aunque algunos autores también lo llaman intervalo de opción forzada (*Interval Forced Choice*). Un ejemplo que ilustre este procedimiento podría ser el de discriminación de intensidad sonora. Usando un 2AFC (dos opciones), dos estímulos son presentados en cada intervalo aquí el sujeto tendrá que elegir en cuál de los se encuentra el más intenso.

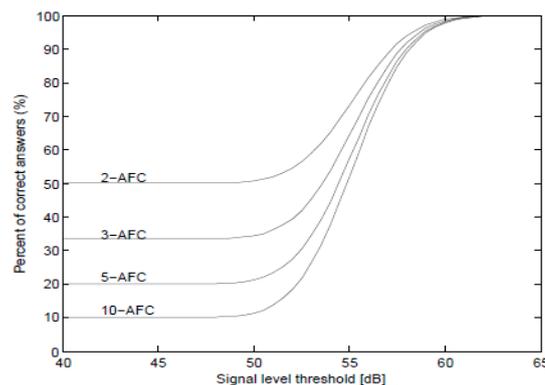


Figura 3.30 Procedimientos AFC.

Tomado de: Levitt, H., 1971, p. 473.

a. Nivel del estímulo (*stimulus level*) versus Porcentaje de respuestas correctas (*Percent of correct answers*).

Cuando se usa este tipo de procedimientos existe la posibilidad de que el sujeto adivine la respuesta correcta inclusive si este no la escucha o detecta alguna diferencia entre los intervalos. Debido a esto se da un cambio en la curva psicométrica. Como en el ejemplo que se dio, si se usa un procedimiento 2AFC la posibilidad de respuestas correctas es de un 50%, en cambio sí se usa un 3AFC la posibilidad cambia al 33%, y así gradualmente.

3.8.6 Aplicaciones de los métodos

Las aplicaciones de los procedimientos *up-down* son diversas. Una de las más útiles es el rastreo gradual de cambios en valores de parámetros importantes. En 1958 Zwislocki usó un equivalente a la entrada 2 de la tabla 4 (semejante a métodos *forced-choiced*) para rastrear variaciones en la detección auditiva.

Usar un método adaptivo en lugar de uno de estímulo constante reduce la duración de la prueba; un algoritmo de selección (AFC) adecuado asegura que la mayoría de pruebas puedan ser escuchadas claramente.

Estos tipos de procedimientos son usados en pruebas de inteligibilidad, detección de tonos en presencia de ruido, discriminación de intensidad, discriminación de nivel, umbrales de audición, enmascaramiento, entre otras pruebas usadas para la investigación psicoacústica.

Las ventajas de los procedimientos adaptivos son muchas en comparación a los procedimientos convencionales. Entre estas ventajas están la alta eficiencia, gran flexibilidad, y demás.

Se debe tener en cuenta que no existen procedimientos óptimos ya que cada uno tiene ventajas y desventajas. Por lo general, técnicas que son óptimas teóricamente son muy complejas en la práctica. Los métodos *transformed up-down* se adaptan a los requerimientos de cada experimento además son simples, altamente eficientes y robustos.

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGÍA

4.1 Características de la investigación

4.1.1 Documentación de bibliografía

La información considerada como útil para esta investigación se obtuvo de fuentes como libros, publicaciones de revistas científicas, artículos de internet y bibliotecas virtuales. La indagación fue fundamental en el desarrollo bibliográfico del trabajo investigativo.

4.1.2 Equipos e instrumentos

Para el desarrollo del trabajo de tesis se utilizaron los siguientes equipos:

- **Soporte de audífonos**

Debido a la necesidad de medir el nivel de presión sonora de los audífonos a utilizar, se decidió construir un soporte para mantener a los audífonos firmes durante la calibración.



Figura 4.1 Medición de nivel de presión sonora en audífonos con sonómetro.

Este consta de un agujero, de 1,5 cm de diámetro, para que el micrófono del sonómetro ingrese. Esto se realizó para medir en condiciones similares a cuando el audífono se utiliza, esto es, que habrá cierta presión y hermetismo cuando está puesto. Las medidas de este instrumento son las siguientes:

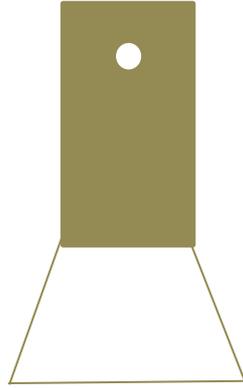


Figura 4.2 Vista frontal de soporte con agujero para el ingreso del micrófono del sonómetro.

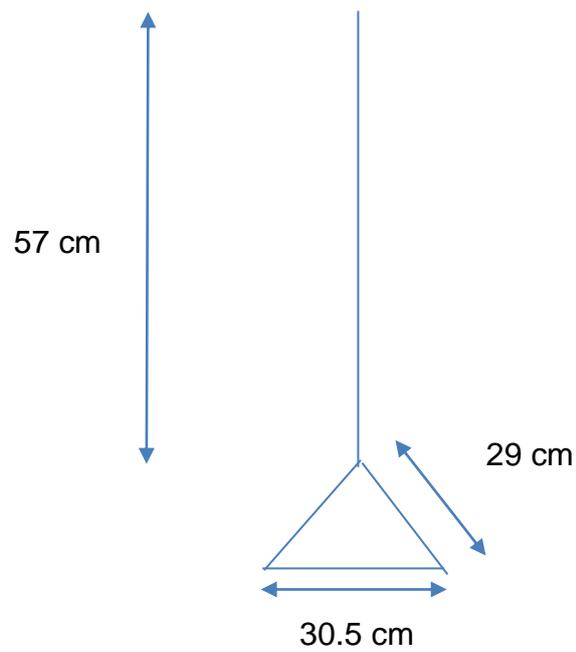


Figura 4.3 Medidas de soporte de audífonos. Vista lateral.

- **Sonómetro CESVA SC310 e implementos**

El sonómetro CESVA SC310 es un sonómetro integrador tipo 1 según IEC (Comisión Electrotécnica Internacional en español) y ANSI (Instituto Nacional Americano de Estándares en español). Este sonómetro también puede ser usado como analizador de espectro en bandas de octava (de 31,5 Hz a 16 kHz) o tercio de octava (de 20 a 10 kHz) en tiempo real. Además tiene módulos que sirven para medir tiempo de reverberación, vibraciones, etc. Las ponderaciones que permite son A, C y Z.

La pantalla gráfica que posee permite visualizar las funciones medidas. Además, posee una pantalla iluminada lo que permite trabajar en ambientes de escasa luminosidad. Los modos disponibles en este sonómetro son *modo sonómetro*, *modo analizador 1/1* y *modo analizador 1/3*. Para este proyecto se utilizó el modo sonómetro con la función L_{ZF} la cual calcula el nivel de presión sonora con ponderación Z (no hay ponderación) temporal rápida.

Los implementos usados fueron el calibrador acústico CB006, el micrófono C130 y el trípode TR040.



Figura 4.4 Medidas del sonómetro CESVA SC310.

- **Audífonos KRK KNS 8400**

Este audífono es de tipo dinámico circumaural. Estos poseen espuma viscoelástica (poliuretano) conocido como *memory foam*. La espuma asegura alta confiabilidad en la reproducción y aislamiento (hasta 30 dBA). Su respuesta de frecuencia va de 5 Hz hasta los 23 kHz. Consta de un adaptador

que permite intercambiar entre conectores de 1/8"-1/4". Su distorsión armónica total no supera el 0,1% y su impedancia nominal es de 36 ohmios.

- **Audífonos Sennheiser HD280 pro**

Los audífonos Sennheiser HD280 pro son dinámicos circumaurales. La impedancia nominal es de 64 ohmios. La atenuación sonora es de 32 dB. Su respuesta de frecuencia va desde los 8 Hz a los 25 kHz. En cuanto a la distorsión armónica total, ésta es menor al 0,1%.

- **Computador HP Pavilion dv600**

Este computador se utilizó para realizar todas las mediciones de umbrales auditivos. El sistema operativo con el que trabajó es de 64 bits con la edición de *Windows 7 Professional*. La memoria RAM es de 2,5 GB.

- **MATLAB R2013b**

Este programa fue usado como plataforma para ejecutar el código *Psychoacoustics*. Se trabajó con la versión MATLAB R2013b que fue la más actual que se logró conseguir.

- ***Psychoacoustics toolbox***

Esta herramienta de MATLAB fue desarrollada por Alessandro Soranzo y Massimo Grassi. Esta puede trabajar con versiones de MATLAB superiores a la 7.0. La herramienta viene con varios experimentos psicoacústicos por defecto los cuales pueden ser usados para obtener diversos parámetros. Fue desarrollada con tres procedimientos adaptivos clásicos para la estimación del umbral auditivo. El método escalera (*staircase*), estimación de parámetros por evaluación secuencial (*PEST*) y procedimiento de máxima probabilidad (*Maximum Likelihood Procedure*). Los niveles que entrega son dados en dBFS (*Full Scale/digital*). El software posee un código de calibración para que los resultados sean transformados de dBFS a dB SPL. Adicional a todo, el programa permite guardar los resultados con los datos de cada individuo después de cada experimento. Lo hace en el formato .txt. Como se puede ver en la figura se puede añadir datos poblacionales (*demographic data*) como número, nombre, sexo, edad y notas. La sección de características del experimento (*experiment features*) permite cambiar el número de bloques, nivel inicial, nivel estándar (en experimentos más complejos) y escoger entre

pruebas si-no o de opción alternativa forzada (*nAFC*). Como para este trabajo se usó el método *transformed up-down*, la gráfica indica las características como el método, número de reversos, *step size*, tipo de promedio, y reversos por umbral.

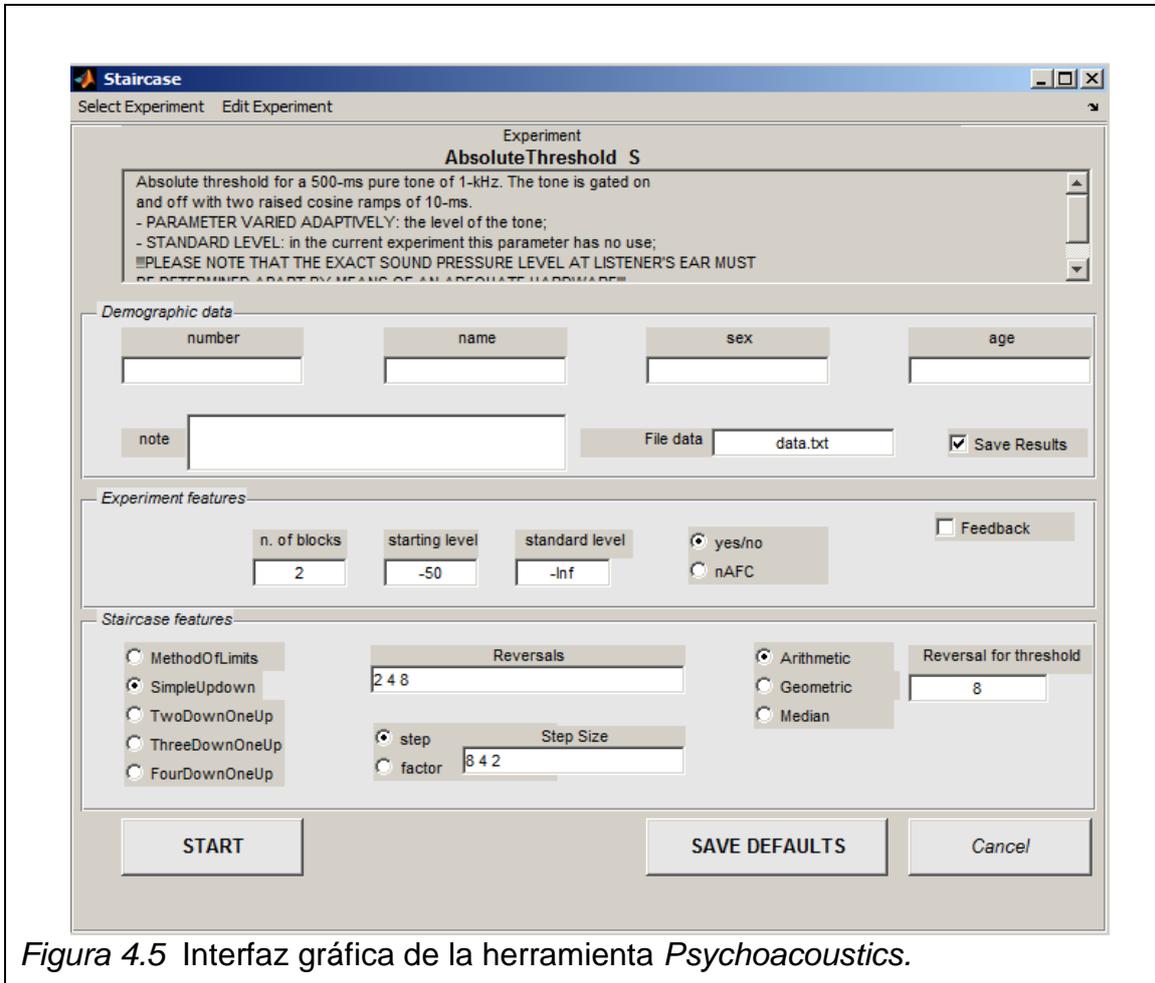


Figura 4.5 Interfaz gráfica de la herramienta *Psychoacoustics*.

- Interfaz Focusrite iTrack Solo

Esta interfaz fue desarrollada por Focusrite. Es un equipo el cual se puede conectar vía USB. Consta de dos entradas y dos salidas. En la parte delantera existe un *switch* el cual permite intercambiar entre prendido-apagado (*on-off*) para enviar a los monitores. Su respuesta de frecuencia va de 20 Hz a los 20 kHz. La distorsión armónica total es menor a 0.1%. La frecuencia de muestreo puede ser de 44.1, 48, 88.2 y 96 kHz mientras que el número de bits es de 24 bits. El rango dinámico puede ser de hasta 105 dBA en sus entradas y salidas.

En este experimento se usó sólo el pre amplificador, además de la sección del monitor para escuchar los experimentos (*direct monitor on*, perilla monitor y el conector de ¼" para los audífonos).

- **Multímetro Fluke 75 y 111**

El multímetro Fluke 75 consta de una pantalla *display*, un *switch* rotatorio para fijar la escala medir (Voltaje AC rms, prueba de diodo, voltaje DC, entre otros) y los terminales para conectar los cables. El multímetro Fluke 111 consta de lectura rms en tiempo real en voltaje AC. Tiene exactitud de 1,5%. El *switch* rotatorio fija la escala a medir, además de la pantalla de display.

- **Cable TRS hembra a macho**

Este cable se usó para medir voltaje AC entre el canal izquierdo y la tierra. Fue construido manualmente con un cable de audio estéreo, un conector TRS y *plug* TRS.



4.1.3 Trabajo de campo

Se realizaron mediciones de umbrales absolutos en el oído izquierdo de todos los sujetos implicados en este trabajo. Para el desarrollo, se realizó una calibración del sistema de reproducción usado con el fin de tener datos confiables.

Los equipos fueron instalados y conectados adecuadamente antes de cada prueba. Estas mediciones se llevaron a cabo en las salas sonoaisladas denominadas CR2, EG1 (Universidad de las Américas) y en casa del autor de este trabajo de tesis.

4.1.3.1 Calibración

Para la calibración el primer paso fue la colocación de los audífonos en el soporte. Se colocó los audífonos rodeando el orificio en dónde estaba el micrófono verificando que no existan “fugas” evidentes. Una vez puestos en esta forma se mantuvieron en una sola posición.



Figura 4.7 Colocación de audífonos en soporte.

Los audífonos fueron conectados a la interfaz Focusrite, la cual actuó como pre amplificador de los tonos puros enviados desde la computadora mediante el programa MATLAB y la herramienta *Psychoacoustics*.

Se calibraron los niveles en los audífonos para ello se usó el código referido por los autores del programa *Psychoacoustics* (Ver anexo 2), en este fueron cambiando los valores de las frecuencias (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 12500, 16000 Hz).

El código de calibración envía el tono puro en dBFS (Full Scale-digital). Para la transformación a dB NPS el autor indica usar la siguiente formula:

$$\text{Respuesta sonora del audífono} = \text{dBNPS} - \text{Nivel FS} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Como se puede apreciar en el anexo 2 el valor del nivel FS (*FS_level*) es -10 dBFS para todas las frecuencias. Este es el nivel fijado por debajo de 0 dBFS que es el 1 digital (nivel máximo). Los dB NPS de la formula corresponden a los decibeles que se miden en el sonómetro al momento de correr el código de

calibración. Este procedimiento se repite para las nueve frecuencias estudiadas. Con la siguiente fórmula se obtiene los valores de la respuesta sonora del audífono que luego serán usados para el cálculo del umbral en cada frecuencia. Por ejemplo, si el sonómetro marca 70 dB en 1 kHz se restaría -10 dB y quedaría este valor de respuesta sonora del audífono:

$$\text{Respuesta sonora del audífono} = 70 - (-10) = 80 \text{ dB NPS} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Con ese valor se puede calcular el nivel del umbral auditivo para esa frecuencia. El valor del umbral que entrega el programa se expresa en dBFS (valor negativo). Para calcularlo se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Valor del umbral} = \text{Nivel del umbral} + \text{Respuesta sonora} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Por ejemplo, si el nivel del umbral da -74 dBFS el valor del umbral será de 6 dBSPL.

Esta calibración se realizó una vez para todas las frecuencias. Luego se calibró solo en 1 kHz. Como el sistema es lineal, si se bajaría 3 dB en 1 kHz entonces todos los niveles en cada frecuencia bajarían 3 dB. El valor de respuesta sonora para la calibración del sistema fue de 80,5 dBNPS en 1 kHz. Previamente a cada medición particular de umbrales auditivos (en cada uno de los sujetos), se calibró en 1 kHz.

4.1.3.2 Calibración con voltaje

Debido a la dificultad de transportar el sonómetro, a los niños (y algunos adultos), papeleo y requerimientos para la obtención del sonómetro se ideó un procedimiento para la calibración del sistema, sin necesidad de cada vez utilizar el sonómetro ni transportar participantes. Para esto se utilizó el cable construido manualmente (TRS hembra a macho).

Para lograr esto se armó el sistema con el computador, interfaz, cable TRS, audífonos y soporte. Se ajustó el nivel de la interfaz para que el sonómetro marque un valor de 70.5 dB (aplicando ecuación 18, da el valor 80.5 dB). Obteniendo este nivel de presión sonora se midió el voltaje AC (en mili voltios)

entre el cable del canal izquierdo y la tierra (en cable TRS). Este procedimiento fue realizado en la sala CR2. El resultado fue de 17 mV en 1 kHz.

En casa del autor de esta tesis, se midió el valor en mili voltios para una señal de 1 kHz. El nivel de la interfaz se variaba para lograr los 17 mV en esta frecuencia.



Figura 4.8 Calibración con multímetro.

4.1.3.3 Procedimiento para mediciones de umbrales

Todos los datos de niveles de umbral auditivo en cada uno de los individuos se obtuvieron en una sola sesión, dichas sesiones se realizaron en la sala EG1, CR2 o en casa del autor de esta tesis. Esto se realizó con el sistema completo que consta de computadora HP, interfaz Focusrite, audífonos KRK KNS 8400 (los audífonos Sennheiser se utilizó como apoyo en caso de daño de los otros) además del programa *Psychoacoustics*. Previamente a este proceso se realizó un cuestionario para conocer los antecedentes de salud general y auditiva, y ver si seleccionar o excluir a la persona.

En los experimentos realizados se ocupó el experimento *Absolute Threshold* (código de MATLAB en Anexo 3) el cual entrega tonos puros (de cada una de las nueve frecuencias medidas) con duración de 500 milisegundos que incluyen rampas de 10 milisegundos al comienzo y final. La frecuencia de muestreo fue de 44100 Hz y el número de bits de 16 bits. Se optó por el método *staircase*, con el procedimiento *transformed up down (2 down 1 up)* desarrollado para mediciones psicoacústicas. Este procedimiento corresponde a la entrada 2 de la tabla 4 y converge al 70.7% de las respuestas correctas en la curva

psicométrica. Para que el sujeto responda se usó el *task* (tarea) “si escucho” “no escucho”. Las respuestas fueron hechas por medio del teclado (tecla 1=sí; tecla 0= no). Este procedimiento fue explicado por el autor antes de cada sesión.

Las frecuencias estudiadas, para adultos y niños, fueron presentadas aleatoriamente entre estos cuatro grupos:

Tabla 5. Grupos de frecuencias aleatorias para cada sujeto.

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
500	2000	16000	250
2000	250	1000	16000
250	12500	250	1000
12500	8000	4000	125
4000	125	12500	8000
125	1000	500	2000
16000	500	8000	12500
1000	4000	2000	4000
8000	16000	125	500

Nota: En esta etapa se usó un grupo para cada individuo, es decir, se utilizó desde el grupo 1 hasta el 4 para los sujetos 1 al 4; para el sujeto 5 se comenzó de nuevo en el grupo 1 y así sucesivamente.

El valor inicial para el programa *Psychoacoustics* (*starting level*) de cada una de las frecuencias en los dos audífonos se presenta a continuación:

Tabla 6. Valor inicial para cada frecuencia.

Frecuencia	dBFS (KRK)	dBFS (SENN)	dBNPS (KRK)	dBNPS (SENN)
125	-30	-20	45.7	54.1
250	-45	-40	31.7	37.1
500	-50	-50	30	37.4
1000	-50	-55	30.5	31.6
2000	-50	-55	32,6	33.6
4000	-45	-50	29.5	28.2
8000	-45	-50	18.6	29.1
12500	-40	-40	28.8	33.6
16000	-15	-15	53.3	49.4

Estos valores fueron elegidos en base a pruebas piloto en las cuales se identificó el nivel al cual cada una de las frecuencias era claramente audible. El tamaño de pasos (*step size*) comenzó en 8 dB, luego fue reducido a 4 dB después de los dos primeros *turning points* (puntos de retorno), y por último fue reducido a 2 dB después de dos *turning points* hasta el final. En todas las sesiones se usó catorce *turning points* pero el cálculo aritmético del umbral absoluto fue hecho promediando los ocho últimos (con *step size* de 2 dB).

En las frecuencias 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 se utilizó dos bloques (es decir se obtuvo dos umbrales para cada frecuencia). Para 8000, 12500, 16000 se prefirió probar con tres bloques (tres umbrales para cada una de estas frecuencias) ya que las altas frecuencias son propensas a variar más. Cabe señalar que si el estimado umbral absoluto de los dos o tres bloques (en cualquier frecuencia) difería en más de 3 dB, no se tomaba en cuenta ese valor y se procedía a realizar una prueba más promediando solo las que no varían fuera de este rango.

En los adultos se hizo una pausa cada diez minutos hasta terminar la prueba mientras que en los niños la pausa se efectuó cada ocho minutos. Los recesos duraron tres minutos con el fin de evitar fatiga.

4.2 Muestra

Para este proyecto se trabajó con un total de veinticuatro personas. Entre las doce primeras personas se incluyeron adultos jóvenes con edad de 18 a 30 años. Las doce restantes son niños con edades de 7 a 14 años. Antes de esta tesis, ninguno de los sujetos había participado en experimentos relacionados con la psicoacústica.

El grupo de adultos estuvo compuesto por cuatro mujeres y ocho hombres. En este conjunto no se consideró trabajar con personas mayores de 30 años debido a que la mayoría de normativas desarrolladas para umbrales auditivos eligen individuos con edades entre 18 a 30 años considerados como adultos jóvenes. Para este grupo el promedio de edad fue de 22,6 años.

El grupo de los niños, compuesto por cuatro niños y ocho niñas. Se consideró trabajar con niños no menores a los 7 años debido a que pueden ser más inquietos y aburrirse con lo que las respuestas dadas, ya que el método utilizado constaba de varios estímulos antes de alcanzar el umbral promedio, no podrían ser correctas. Para este conjunto la edad promedio fue de 10,6 años.

Todos los individuos que participaron en este proyecto no presentan antecedentes de salud (general o auditiva) que puedan comprometer la confiabilidad de los datos tomados. Para conocer acerca de la salud general y auditiva del paciente, antes de cada sesión, se realizó un cuestionario (Ver Anexo 1) para determinar si los sujetos cumplían con los criterios de inclusión. En todos los sujetos se realizó la medición de umbral auditivo sólo en el oído izquierdo.

4.3 Variables

En un proyecto de investigación las variables son muy importantes. Estas pueden ser dependientes o independientes. Como su nombre lo indica la variable independiente no depende de otras sino que influye o afecta a otras variables. En la investigación experimental el investigador se encarga de

manipular esta variable. La variable dependiente es la que cambia como consecuencia de la manipulación del experimentador de la variable independiente. Estas son las que se miden.

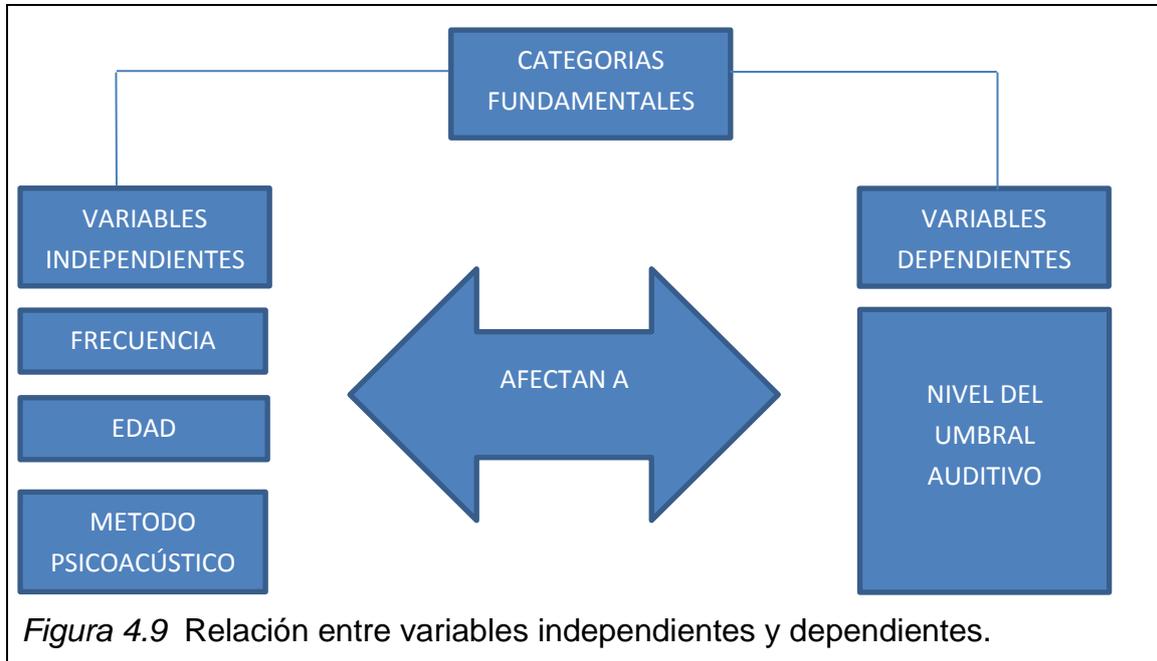


Figura 4.9 Relación entre variables independientes y dependientes.

A continuación se muestra un resumen de las variables mostradas anteriormente.

Frecuencia: Característica entregada por el programa *Psychoacoustics*, esta es medida en Hertz. En este proyecto se utilizaron nueve frecuencias especiales que fueron 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 12500, 16000 Hz.

Método psicoacústico: Para las mediciones de umbrales auditivos se usó el método *2down 1up* (dos arriba uno abajo) perteneciente al grupo *staircase* (escalera). Para recibir las respuestas por parte de los individuos se utilizó el procedimiento si-no.

Edad: La edad es importante para conocer si existirán cambios en los umbrales auditivos entre los niños y adultos.

Nivel del umbral: El nivel del umbral es dado para cada frecuencia. Es el valor del promedio aritmético de los reversos en la medición. Esta variable es la que depende de la mayoría de variables independientes.

4.4 Tabulación de datos

La tabulación de los datos obtenidos se realizó en esta tabla:

Tabla 7. Tabulación de datos en cada individuo.

Frecuencia (Hz)	Umbral 1 (dBFS)	Umbral 2 (dBFS)	Umbral 3 (dBFS)	Promedio (dBFS)	Promedio SPL (dB)
125	x	X		X	x
250	X	x		X	X
500	x	X		X	X
1000	X	X		X	X
2000	X	X		X	X
4000	X	x		X	X
8000	x	X	x	X	X
12500	x	x	X	X	X
16000	x	x	x	X	X

4.5 Análisis de datos

Para el análisis de los datos obtenidos se utilizó el programa para análisis estadístico IBM SPSS Statistics 19.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para poder efectuar el análisis se realizaron 24 mediciones de umbrales auditivos en personas normales sin ningún antecedente de salud que pueda comprometer su audición. La muestra está dividida en dos grupos que son: niños y adultos. El grupo de los niños está constituido por 12 individuos con un rango de edad entre 7 a 14 años. En el grupo de adultos participaron 12 personas con un rango de edad entre 18 a 30 años (considerados como adultos jóvenes).

5.1 Resultados generales

Los gráficos presentados a continuación se han realizado en el programa MATLAB R2013b para mayor comprensión de los datos obtenidos y mejor presentación.

5.1.1 Respuesta sonora de los audífonos usados

Tabla 8. Valores de la respuesta sonora de cada audífono.

Frecuencia [Hz]	Respuesta sonora, audífono KRK [dB NPS]	Respuesta sonora, audífono Sennheiser [dB NPS]
125	75.7	74.1
250	76.7	77.1
500	80	87.4
1000	80.5	86.6
2000	82.6	88.6
4000	74.5	78.2
8000	63.6	79.1
12500	68.8	73.6
16000	68.3	64.4

Como se explicó en el capítulo anterior, el programa *Psychoacoustics* requería obtener la respuesta del audífono midiendo el nivel de presión sonora con el sonómetro y aplicando la ecuación 18. Este procedimiento permitía obtener el valor del umbral auditivo para cada frecuencia aplicando la ecuación 20. Los niveles de respuesta sonora obtenidos para los audífonos (KRK KNS 8400 y Sennheiser HD280 pro) en cada frecuencia se muestran a continuación (a pesar de que en la práctica solo se usó el audífono KRK, el otro fue usado como apoyo en caso de algún inconveniente presentado):

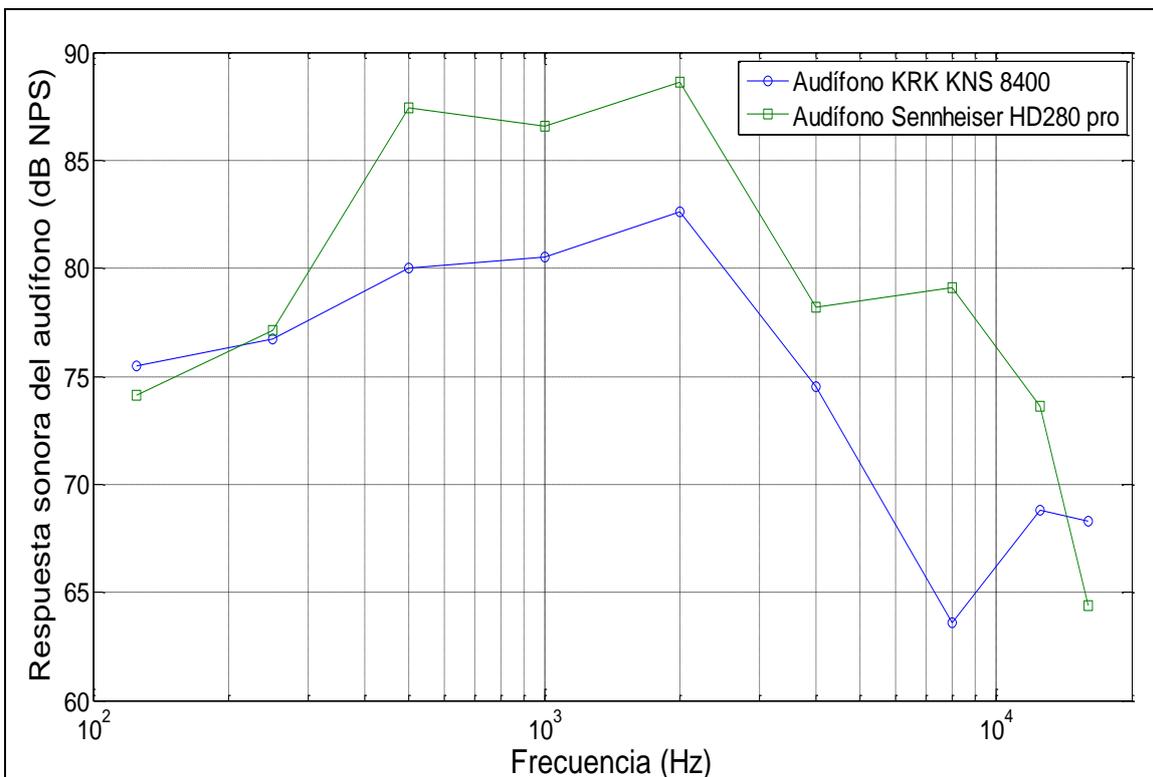


Figura 5.1 Curvas de respuesta sonora de los dos audífonos en el rango de frecuencias medido.

a. Respuesta del audífono en dB NPS versus frecuencia Hz.

Estos valores resultan válidos ya que se siguió el procedimiento de calibración que el autor del programa *Psychoacoustics* sugirió. Para que la calibración esté normalizada se hubiera tenido que contar con un simulador de oído el cual imita la impedancia acústica de un oído real (consta de un acoplador acústico y micrófono de medición). Un ejemplo de simulador de oído es el 4152 (6cc coupler) de Brüel and Kjær.

5.1.2 Ejecución del procedimiento *two down-one up* (dos arriba-uno abajo)

Para la localización de los umbrales auditivos en las nueve frecuencias probadas se utilizó el procedimiento *two down-one up*. A continuación se muestra un ejemplo de los datos del procedimiento para un adulto y un niño realizado en 250 Hz:

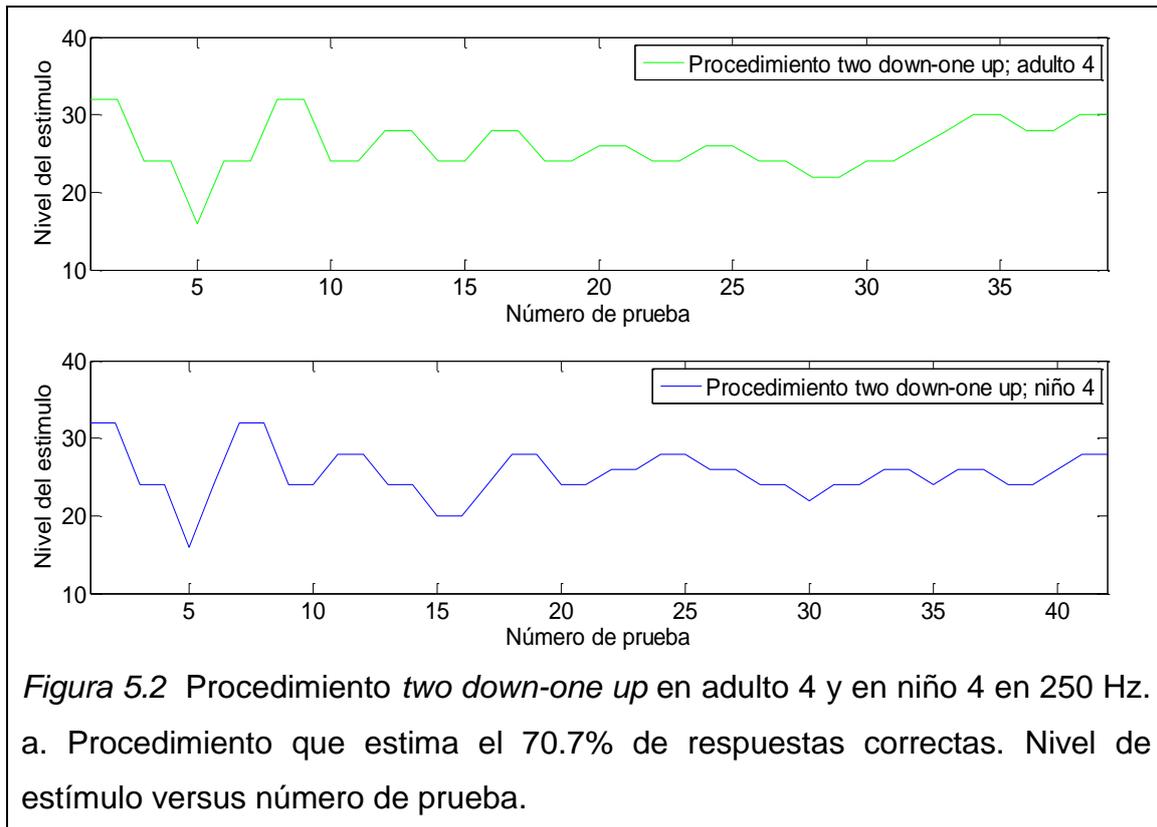


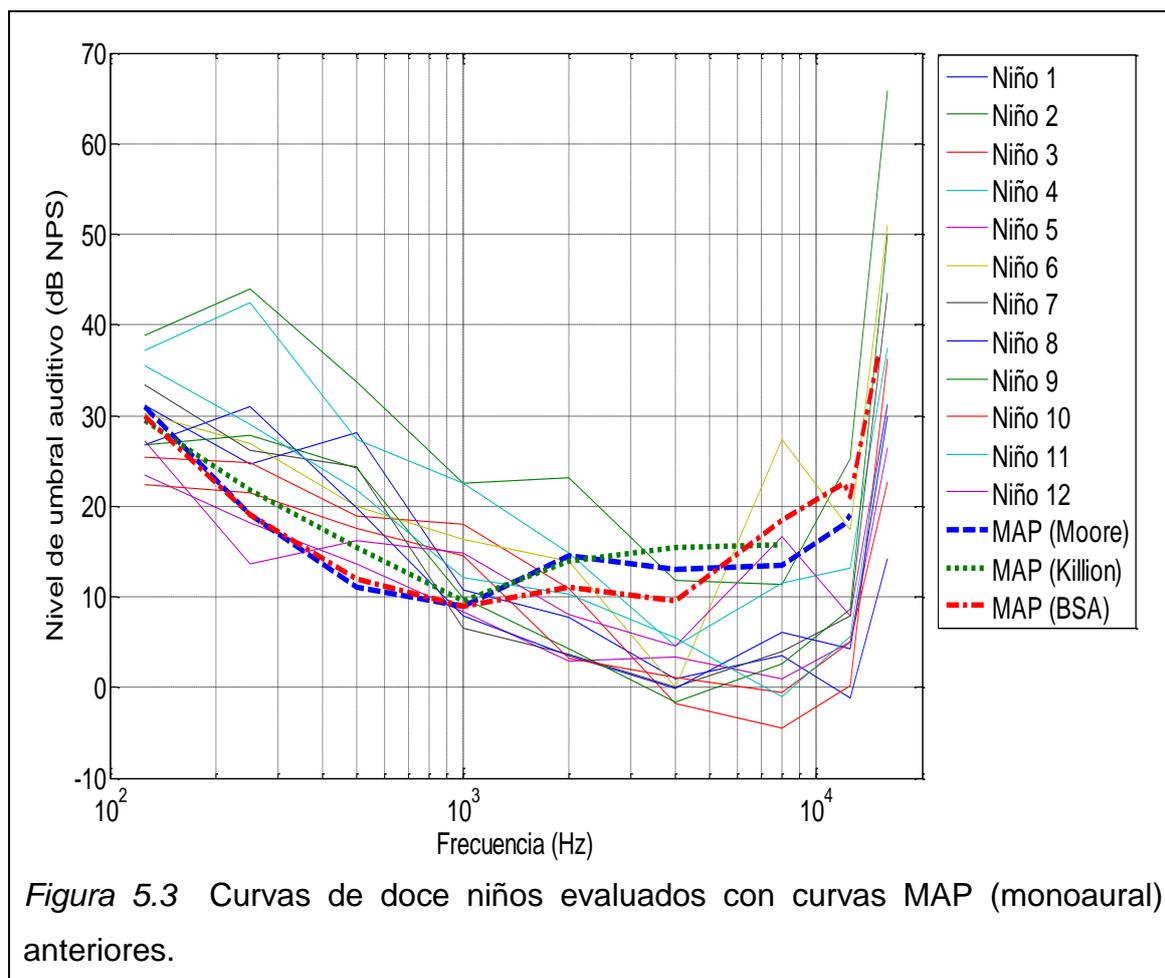
Figura 5.2 Procedimiento *two down-one up* en adulto 4 y en niño 4 en 250 Hz.
a. Procedimiento que estima el 70.7% de respuestas correctas. Nivel de estímulo versus número de prueba.

5.2 Resultados de umbrales auditivos en niños y adultos

5.2.1 Umbrales auditivos en niños con audición normal

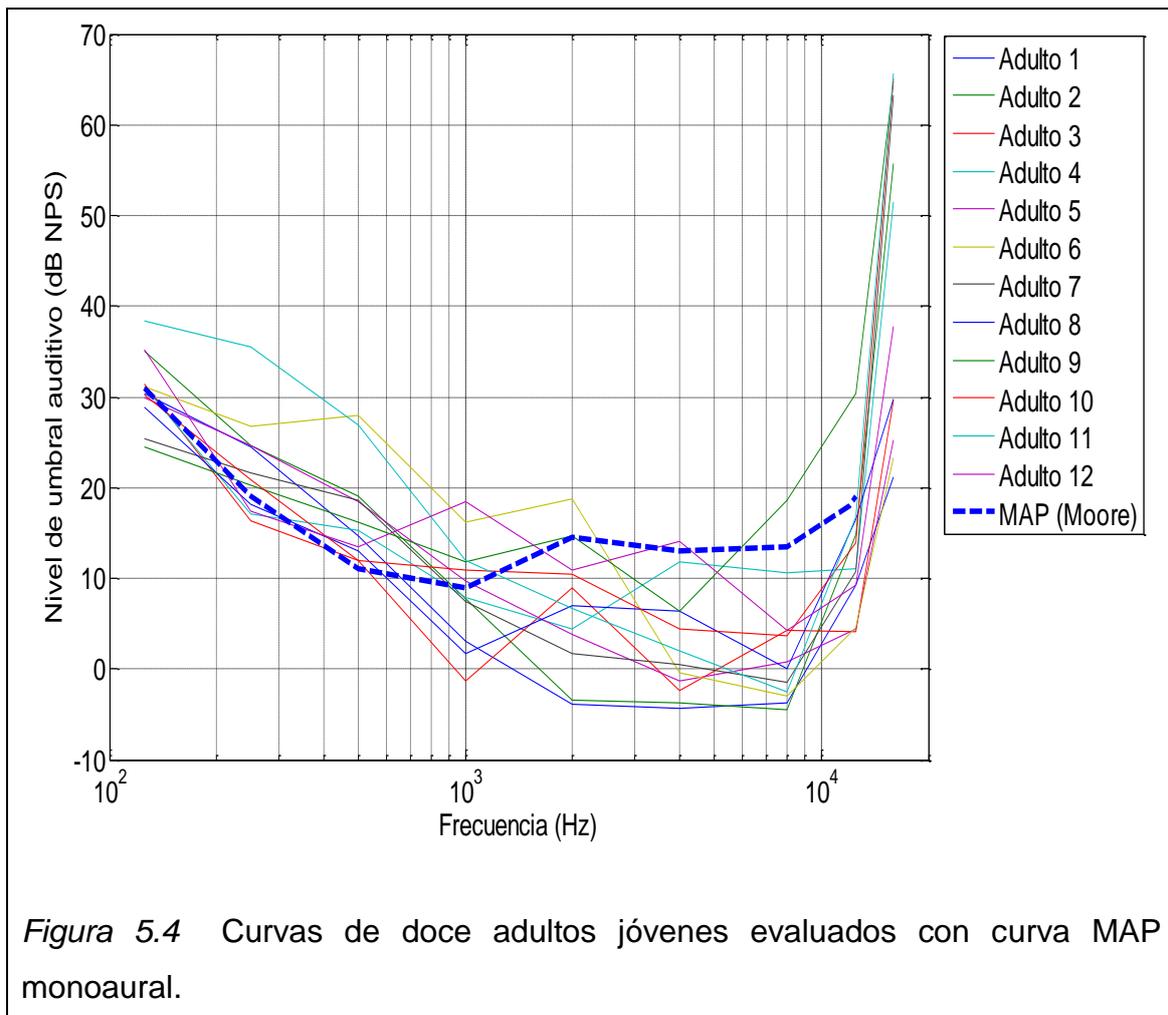
En la siguiente figura se muestra los umbrales auditivos de los doce niños evaluados en las frecuencias: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 12500 y 16000 Hz solo en el oído izquierdo. Las curvas obtenidas son comparadas con curvas MAP (*Minimum Audible Pressure-Monoaural*) medidas anteriormente por Moore, Killion y BSA (Asociación de Estándares Británicos). Se eligió medir monoauralmente ya que los datos disponibles en la bibliografía permitieron una adecuada comparación. Además, se trató de optimizar el tiempo disponible. Para medir MAP se hubiera necesitado una sala especial con altavoces, la cual no se tuvo disponible.

Las curvas con líneas discontinuas son datos tomados anteriormente por otros investigadores. Las líneas continuas son los datos tomados en este trabajo.



5.2.2 Umbrales auditivos en jóvenes adultos con audición normal

Al igual que en el grupo de los niños, en este grupo de adultos se evaluó a doce personas, en las mismas nueve frecuencias que los niños, igualmente sólo en el oído izquierdo. En la siguiente figura se muestran los doce casos junto con la curva estándar MAP (Moore).



5.2.3 Comparación de umbrales auditivos de niños y adultos

Para poder realizar una comparación precisa, se ha graficado los niveles promedio de los umbrales auditivos de los dos grupos (Niños-Adultos). Además se ha añadido barras de error (*errorbar*) con ± 1 de la desviación estándar. Para establecer una comparación con datos medidos anteriormente se han añadido las curvas MAP de la bibliografía.

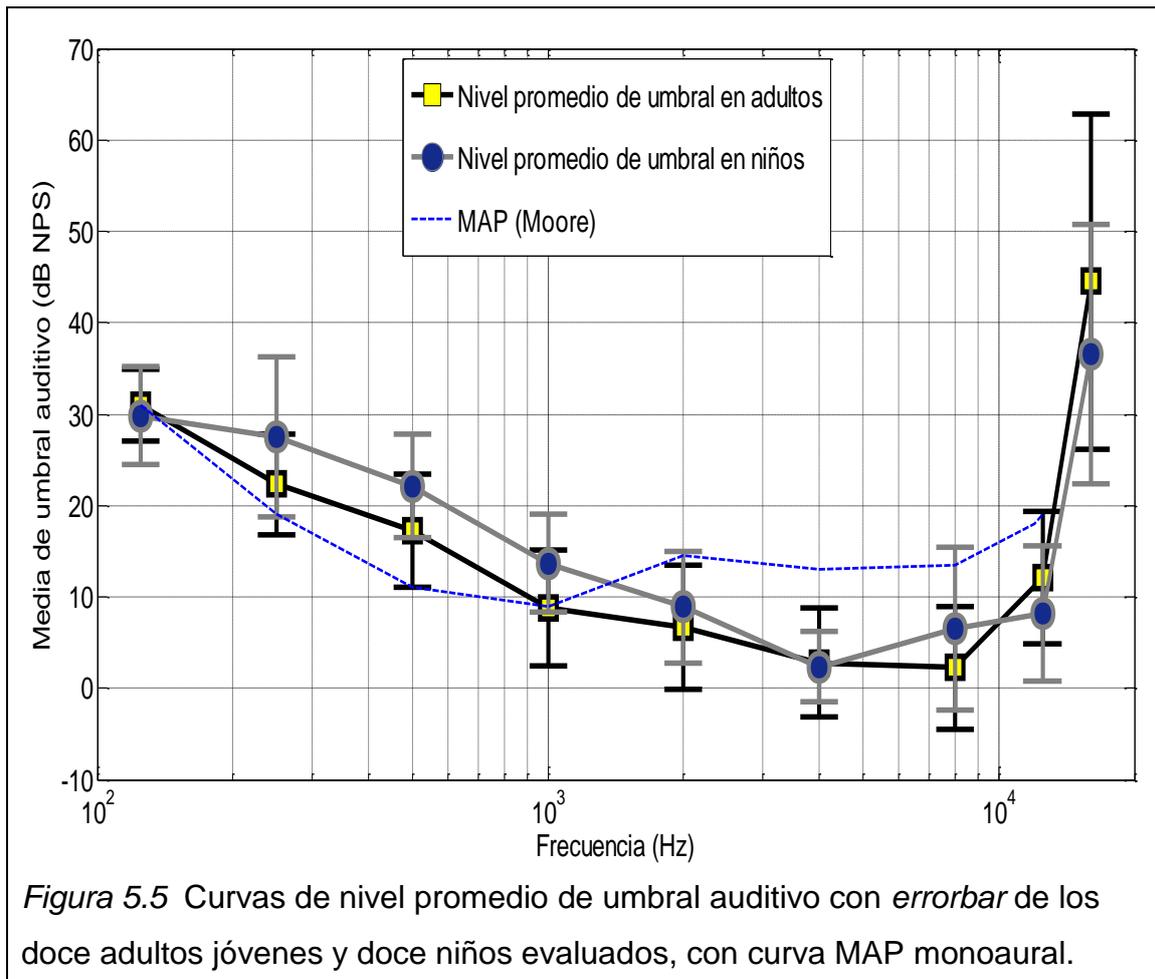
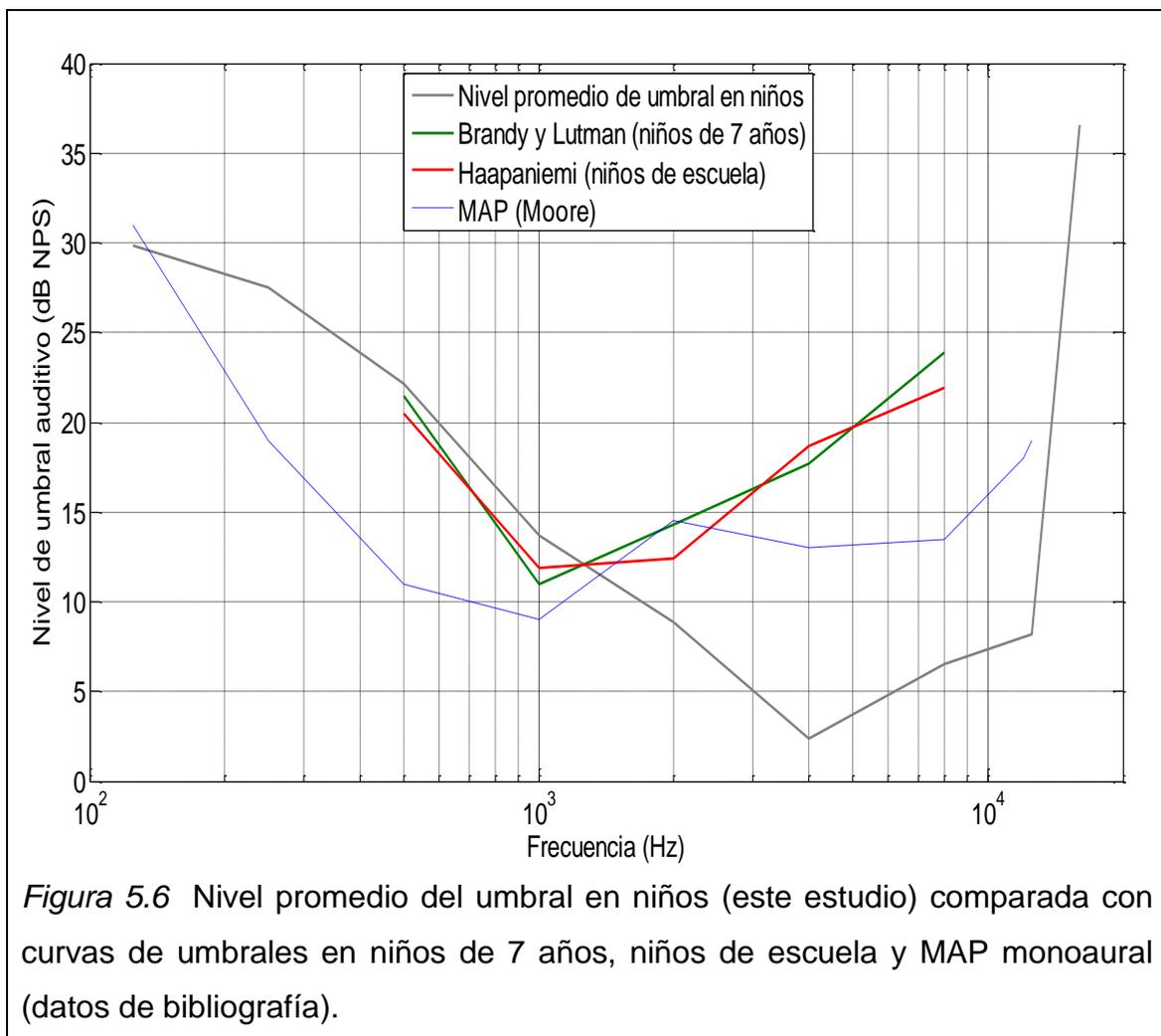


Tabla 9. Promedio de umbral auditivo en niños y adultos con su respectiva desviación estándar.

Frecuencia [Hz]	Promedio umbral en adultos [dB SPL]	Desviación estándar en umbral de adultos	Promedio umbral en niños [dB SPL]	Desviación estándar en umbral de niños
125	30,96	3,92	29,84	5,42
250	22,31	5,58	27,49	8,75
500	17,30	6,17	22,14	5,69
1000	8,78	6,28	13,69	5,41
2000	6,68	6,73	8,87	6,15
4000	2,79	5,97	2,36	3,87
8000	2,26	6,72	6,50	8,94
12500	12,13	7,28	8,22	7,39
16000	44,50	18,33	36,57	14,21

5.2.4 Comparación con datos de la bibliografía

Es importante graficar datos de niños medidos anteriormente con los medidos en esta tesis. Los valores de la bibliografía corresponden a umbrales auditivos medidos en niños de 7 años (Blandy y Lutman, 2005) y en niños de escuela (Haapaniemi, 1996) para las frecuencias: 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz (ver tabla 2). Como los valores de los umbrales estaban en dB HL, estos se han transformado a dB SPL usando la curva de referencia de Killion (1978), esto para poder establecer una comparación.



5.3 Formulación de hipótesis

Para el análisis estadístico de resultados se plantea un contraste de hipótesis. En esta investigación se utilizó la hipótesis nula (H_0) y la alternativa (H_1).

La hipótesis del autor de la tesis que es la siguiente: Al realizar la medición de umbrales auditivos en niños y adultos con un método psicoacústico confiable y robusto se estima a priori, en base a los resultados de mediciones anteriores en niños, que los umbrales auditivos de los niños con audición normal tienden a ser más altos que los umbrales auditivos de los jóvenes adultos al menos en parte del rango de frecuencias estudiadas.

A partir de este enunciado se anuncian las siguientes hipótesis.

H_0 : Se estima a priori que los umbrales auditivos de los niños con audición normal, no son más altos que los umbrales auditivos de los jóvenes adultos en ninguna de las frecuencias estudiadas.

H_1 : Se estima a priori que los umbrales auditivos de los niños con audición normal tienden a ser más altos que los umbrales auditivos de los jóvenes adultos al menos en parte del rango de frecuencias estudiadas.

Para el análisis de los datos obtenidos se usará la prueba t de student (o *t-test*) la cual nos guiará a aceptar o rechazar la hipótesis propuesta.

5.4 Análisis estadístico de resultados

Esta prueba se eligió debido es la más indicada cuando se trata de analizar dos grupos en un mismo momento, la variable es numérica y las muestras son independientes.

El *t-test* sirve para evaluar si las medias de dos grupos difieren estadísticamente, y así descartar o aceptar la hipótesis nula. En esta prueba el porcentaje de significancia más comúnmente utilizado es el de 5 % (0.05). A este valor se lo denomina alfa (α). Cuando se evalúa la hipótesis, si el valor p (*p-value* o también *Sig.* en SPSS) es menor o igual al α se rechaza la hipótesis nula, cuando el valor p es mayor al α se acepta la H_0 .

Antes de realizar la prueba t de student se debe comprobar que la variable en los dos grupos este distribuida normalmente, para poder lograr esto se utiliza la prueba de Kolmogorov-Smirnor cuando las muestras son relativamente grandes (más de 30 individuos), si la muestra no alcanza este número (menos de 30) se utiliza la prueba de Shapiro-Wilk. El criterio para determinar si la variable es o no distribuida normalmente es el siguiente

- Si el valor p es $\geq \alpha$, los datos provienen de una distribución normal.
- Si el valor p es $< \alpha$, los datos no provienen de una distribución normal.

Además de la distribución normal se debe corroborar si existe igualdad de varianzas entre los dos grupos (niños-adultos). Esto se realiza mediante la prueba de Levene, con el siguiente criterio:

- Si el valor p es $\geq \alpha$, las varianzas son iguales.
- Si el valor p es $< \alpha$, existe diferencias significativas entre varianzas.

Después de realizar estos procedimientos la prueba t de student es realizada. En esta instancia se procede a comprobar si se acepta o no la hipótesis nula. El criterio es el siguiente:

- Si el valor p es $\leq \alpha$, se rechaza la H_0 .
- Si el valor p es $> \alpha$, se acepta la H_0 .

5.4.1 Análisis por frecuencias

A continuación se muestra los estadísticos de cada grupo en las nueve frecuencias medidas. Esta tabla muestra el número de elementos de cada grupo, media, desviación estándar y error típico de la media.

Tabla 10. Estadísticas de los grupos (niños y adultos) en todas las frecuencias.

Estadísticos de grupo					
	Grupo	N (Muestra)	Media	Desviación estándar	Error típico de la media
125 Hz	Niños	12	29,8	5,4	1,6
	Adultos	12	30,9	3,9	1,1
250 Hz	Niños	12	27,5	8,8	2,5
	Adultos	12	22,3	5,4	1,5
500 Hz	Niños	12	22,1	5,7	1,6
	Adultos	12	17,3	5,3	1,5
1000 Hz	Niños	12	13,7	5,4	1,6
	Adultos	12	8,8	5,7	1,6
2000 Hz	Niños	12	8,9	6,1	1,8
	Adultos	12	6,7	6,7	1,9
4000 Hz	Niños	12	2,3	3,9	1,1
	Adultos	12	2,8	5,9	1,7
8000 Hz	Niños	12	6,5	8,9	2,6
	Adultos	12	2,2	6,7	1,9
12500 Hz	Niños	12	8,2	7,4	2,1
	Adultos	12	12,1	7,2	2,1
16000 Hz	Niños	12	36,6	14,2	4,1
	Adultos	12	44,5	18,3	5,3

Seguido de esto se indica la prueba t-test por frecuencias para los dos grupos de análisis (niños-adultos). Primero se debe comprobar si la variable está distribuida normalmente, por medio de la prueba de Shapiro-Wilk que se muestra a continuación:

Tabla 11. Prueba de Shapiro-Wilk para cada frecuencia en niños y adultos.

Grupo		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	Grado de libertad	Valor de significación
125 Hz	Niños	,944	12	,557
	Adultos	,949	12	,626
250 Hz	Niños	,925	12	,326
	Adultos	,887	12	,108
500 Hz	Niños	,971	12	,925
	Adultos	,850	12	,036
1000 Hz	Niños	,935	12	,440
	Adultos	,975	12	,958
2000 Hz	Niños	,872	12	,070
	Adultos	,975	12	,953
4000 Hz	Niños	,868	12	,062
	Adultos	,927	12	,353
8000 Hz	Niños	,902	12	,169
	Adultos	,857	12	,044
12500 Hz	Niños	,905	12	,187
	Adultos	,874	12	,072
16000 Hz	Niños	,972	12	,927
	Adultos	,844	12	,031

Podemos ver que todas las frecuencias, excepto en 500, 8000 y 16000 Hz en los adultos se cumple la normalidad ($\text{Sig.} \geq \alpha$). Como la distribución normal es importante para realizar una prueba t de student, se puede ejecutar otra prueba que no requiera que los datos estén distribuidos normalmente.

Como se ve en la prueba de Shapiro-Wilk los resultados no fueron los esperados por tal motivo se procede a ejecutar la prueba no paramétrica (t de student es paramétrica) la cual no hace supuestos de una distribución específica. La prueba se denomina mediana de Mood y se presenta a continuación:

Tabla 12. Prueba no paramétrica mediana de Mood.

Estadísticos de contraste			
	500 Hz	8000 Hz	16000 Hz
N (muestra)	24	24	24
Mediana	18,7550	3,0500	36,8850
Valor de significación exacta	,039	,684	,684

Para la prueba t de student es importante comprobar si las varianzas son iguales, esto se logra mediante la prueba de Levene para la igualdad de varianzas.

Tabla 13. Prueba de Levene para igualdad de varianzas en todas las frecuencias.

		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas	
		F (Probabilidad continua)	Valor de significación
125 Hz	Se han asumido varianzas iguales	2,7	,113
	No se han asumido varianzas iguales		
250 Hz	Se han asumido varianzas iguales	1,1	,314
	No se han asumido varianzas iguales		
500 Hz	Se han asumido varianzas iguales	,108	,746
	No se han asumido varianzas iguales		
1000 Hz	Se han asumido varianzas iguales	,003	,956
	No se han asumido varianzas iguales		
2000 Hz	Se han asumido varianzas iguales	,045	,833
	No se han asumido varianzas iguales		
4000 Hz	Se han asumido varianzas iguales	2,8	,110
	No se han asumido varianzas iguales		
8000 Hz	Se han asumido varianzas iguales	,848	,367
	No se han asumido varianzas iguales		
12500 Hz	Se han asumido varianzas iguales	,001	,972
	No se han asumido varianzas iguales		
16000 Hz	Se han asumido varianzas iguales	3,8	,063
	No se han asumido varianzas iguales		

Como los valores de significación (Valor p) son mayores a 0,05 (valor de alfa) se sabe que la igualdad de varianzas existe. A continuación se muestra la prueba t de student en todas las frecuencias evaluadas para los dos grupos.

Tabla 14. Prueba de t de student para igualdad de medias en todas las frecuencias.

		Prueba T para la igualdad de medias						
		t	Grado de libertad	Valor de significación (bilateral)	Diferencia de medias	Error típico de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
							Inferior	Superior
125 Hz	Se han asumido varianzas iguales	-,579	22	,568	-1,1	1,9	-5,1	2,9
	No se han asumido varianzas iguales	-,579	20	,569	-1,1	1,9	-5,1	2,9
250 Hz	Se han asumido varianzas iguales	1,7	22	,095	5,2	2,9	-,96	11,3
	No se han asumido varianzas iguales	1,7	18,3	,097	5,2	2,9	-1,04	11,4
500 Hz	Se han asumido varianzas iguales	2,1	22	,043	4,8	2,2	,16076	9,5
	No se han asumido varianzas iguales	2,1	21,9	,043	4,8	2,2	,15969	9,5
1000 Hz	Se han asumido varianzas iguales	2,1	22	,042	4,9	2,3	,18910	9,6
	No se han asumido varianzas iguales	2,1	21,9	,042	4,9	2,3	,18823	9,6
2000 Hz	Se han asumido varianzas iguales	,831	22	,415	2,2	2,6	-3,2	7,6
	No se han asumido varianzas iguales	,831	21,8	,415	2,2	2,6	-3,2	7,6

4000 Hz	Se han asumido varianzas iguales	-,213	22	,833	-,43750	2,1	-4,7	3,8
	No se han asumido varianzas iguales	-,213	18,8	,834	-,43750	2,1	-4,7	3,8
8000 Hz	Se han asumido varianzas iguales	1,3	22	,202	4,2	3,2	-2,4	10,9
	No se han asumido varianzas iguales	1,3	20,4	,203	4,2	3,2	-2,4	10,9
12500 Hz	Se han asumido varianzas iguales	-1,307	22	,205	-3,9	2,9	-10,1	2,2
	No se han asumido varianzas iguales	-1,307	21,9	,205	-3,9	2,9	-10,1	2,2
16000 Hz	Se han asumido varianzas iguales	-1,185	22	,249	-7,9	6,7	-21,8	5,9
	No se han asumido varianzas iguales	-1,185	20,7	,249	-7,9	6,7	-21,8	5,9

A pesar de que la variable de los adultos en 500 Hz no está distribuida normalmente, los resultados en la prueba t de student son parecidos a la prueba de mediana de Mood. En la tabla 14, se puede visualizar que el valor de p (Valor de significación-bilateral) es menor a 0,05 (valor de alfa) en 500 y 1000 Hz, por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa: Se estima a priori que los umbrales auditivos de los niños con audición normal tienden a ser más altos que los umbrales auditivos de los jóvenes adultos al menos en parte del rango de frecuencias estudiadas. Esto también es corroborado por la prueba de medias de Mood en 500 Hz (ver tabla 12). Para las frecuencias restantes (125, 250, 2000, 4000, 8000, 12500 y 16000), como el valor de p es mayor a alfa, se acepta la hipótesis nula Se estima a priori que los umbrales auditivos de los niños con audición normal, no son más altos que los umbrales auditivos de los jóvenes adultos en ninguna de las frecuencias estudiadas.

5.4.2 Análisis de desviación estándar de los niveles de cada frecuencia

En esta sección se muestra el análisis de las desviaciones estándar de los niveles en el rango estudiado (Ver tabla 9). Se presenta el análisis estadístico de las desviaciones de las nueve frecuencias medidas en niños y adultos.

Tabla 15. Prueba Shapiro-Wilk para normalidad.

		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	Grado de libertad	Valor de significación
Desviaciones	Niños	,861	9	,098
	Adultos	,607	9	,000

Como se aprecia el valor de p en los niños se comporta normalmente, pero el de los adultos no pertenece a una distribución normal. Por este motivo se procede a ejecutar la prueba de mediana de Mood.

Tabla 16. Prueba no paramétrica, mediana de Mood.

Estadísticos de contraste	
	Desviaciones
N (muestra)	18
Mediana	6,2250
Valor de significación exacta	1,000

Tabla 17. Prueba de Levene para las desviaciones.

		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas	
		F (Probabilidad continua)	Valor de significación
Desviaciones	Se han asumido varianzas iguales	,022	,884
	No se han asumido varianzas iguales		

La prueba de Levene nos muestra que las varianzas son iguales, debido a que 0,884 es mayor que 0,05.

Tabla 18. Prueba t de student para análisis de desviaciones.

	Prueba T para la igualdad de medias						
	t	Grado de libertad	Valor de significación (bilateral)	Diferencia de medias	Error típico de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
						Inferior	Superior
Desviaciones Se han asumido varianzas iguales	-,074	16	,942	-,12778	1,7	-3,8	3,5
No se han asumido varianzas iguales	-,074	14,660	,942	-,12778	1,7	-3,8	3,5

El valor en la prueba t de student, al igual que el valor en la prueba de mediana de Mood, es mayor al valor 0,05 por lo que se acepta la hipótesis nula: No existen diferencias estadísticamente significativas entre las desviaciones estándar de los datos.

5.5 Discusión

Para dar comienzo a la discusión de resultados, cabe recalcar que se encontró información y gráficos anteriores acerca de umbrales auditivos en niños además de datos de audiometrías para los dos oídos. Para una correcta comparación entre los datos de niños y adultos se utilizó curvas MAP medidas monoauralmente en jóvenes adultos. No se encontró las mismas medidas en niños.

En la figura 5.3 (Ver página 86), se puede visualizar todas las curvas de los umbrales auditivos de los niños (líneas solidas) comparadas con las curvas MAP (líneas discontinuas). Aquí se aprecia que en todos los casos (umbrales de niños) la forma de las curvas es similar a los valores de las curvas MAP de otros estudios.

En los umbrales de baja frecuencia de los niños, a simple vista se nota que los valores son parecidos a las curvas MAP, a excepción de los niños 2 y 4. En

estos dos individuos los umbrales están un poco arriba de lo normal (se considera normal de 15 a 20 dB SPL por encima y por debajo de las curvas MAP), los valores exactos son 22,5 y 23,75 para los niños 2 y 4 respectivamente.

En alta frecuencia se nota variaciones más grades entre las curvas medidas en este trabajo y las medidas por otros investigadores. Esto se puede deber a que, las curvas MAP de Moore son medidas mediante micrófonos ubicados cerca del tímpano de una persona en donde (...) “pequeños cambios en su posición pueden afectar marcadamente los resultados en altas frecuencias” (Moore, 2013, p. 58). Además de que, en este trabajo investigativo, para la calibración de niveles del audífono se usó un soporte hecho de madera, con el micrófono al ras del orificio (no adentro simulando un canal auditivo) lo cual difiere con el canal auditivo que tiene aproximadamente unos 25 milímetros de largo y 8 milímetros de diámetro. Cuando ingresan al oído las ondas de alta frecuencia (longitudes de onda más pequeñas) el pabellón y el canal auditivo actúan como una sala en la que actúan las reflexiones y la resonancia. Debido a esto los niveles, en estas frecuencias, se escuchan más fuerte y por lo tanto los umbrales son más bajos.

En la figura 5.4 (Ver página 87), se puede visualizar todas las curvas de los umbrales auditivos de los adultos jóvenes (líneas solidas) comparadas con las tres MAP (discontinua). Al igual que los niños, la tendencia en las curvas de los umbrales auditivos es normal.

En los valores de baja frecuencia se aprecia que todas las curvas no están tan dispersas (como en los niños) sino que se apegan más a las curvas estándar. La dispersión puede deberse a que los niños están en un rango de desarrollo por la edad. En los adultos 6 y 11, se visualiza un desplazamiento del umbral en 500 y 250 Hz. Estos valores no sobrepasan los 15 dB, por lo que se consideran normales.

En las curvas de los adultos (fig. 5.4), en 1000 Hz existen valores que son menores a 0 dB y algunos valores están por debajo de los valores estándar.

Esto contrasta con los valores del umbral de los niños en 1000 Hz en los que la mayoría está por arriba de los estándares. En 500 Hz, los valores en los niños y adultos no están por debajo de los valores estándar siguiendo así una tendencia similar a las curvas medidas por otros investigadores. En el rango de frecuencias medias altas existen valores promedio de umbrales que son más altos en los niños que pueden ser atribuidos al desarrollo del oído humano. Los resultados de esta tesis están de acuerdo con las curvas medidas por Werner (Figura 3.25; Ver página 58) las cuales sugieren que los umbrales de audición de los niños de diez años (al igual que el promedio de edad de los niños en este estudio) son algo mayores para las frecuencias donde se notó la diferencia (500 y 1000 Hz) y no para frecuencias mayores (Werner, 2007).

Se comprobó que en 500 y 1000 Hz existen diferencias significativas entre niños y adultos. Estos resultados parecen tener lógica con lo visto en la bibliografía a pesar de que el *setup* usado para la calibración no simula la forma de un oído humano. En las demás frecuencias se aceptó la hipótesis nula la cual indica que no existen diferencias estadísticamente significativas.

Las desviaciones estándar tienden a ser mayores en las frecuencias altas para los dos grupos por el *setup* usado. Para que la desviación estándar no sea tan alta en dichas frecuencias, se debería haber hecho una calibración para cada individuo ya que la forma del pabellón y canal auditivo son diferentes en cada persona. Esto se debe a que la respuesta en alta frecuencia es más sensible a la posición de la fuente sonora y las características del oído de cada persona. El análisis estadístico de las desviaciones estándar, en todo el rango de frecuencias, no fue significativo entre niños y adultos.

Se sabe que para niños de 10 años a 12 años aproximadamente el umbral auditivo es parecido al de un adulto ya que su sistema auditivo está desarrollado por completo (Werner, 2007). Entre los niños participantes se tuvo solo dos niños de siete años y uno de catorce, debido a que son muy pocas muestras no se pudo efectuar un buen análisis estadístico.

En los niños es común que se mida los umbrales en rangos de frecuencias desde los 500 a 4000 Hz. Esto es porque el rango de la voz está aproximadamente entre esos valores. En este trabajo se estableció un rango de frecuencias amplio en el cual se pueda apreciar diferencias entre las más bajas y altas. Esto muestra que el *setup* y el método usados fueron lo suficientemente adecuados porque se notaron las diferencias esperadas.

Un rango de frecuencias más amplio es mucho más ideal ya que se puede conocer si existen más diferencias a otras frecuencias diferentes a las medidas.

CAPÍTULO VI

6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Total de horas empleadas en el desarrollo del proyecto:

- Investigación teórica: 320 horas
- Asesoría: 20 horas
- Calibración y ensamble: 160 horas
- Evaluación de umbrales auditivos en niños y adultos: 192 horas

La inversión para el presente trabajo se presenta a continuación:

Tabla 19. Valor individual de cada equipo usado en esta tesis.

Equipo	Precio
Soporte de audífonos	\$5
Alquiler sonómetro	\$50
Audífonos (KRK y Sennheiser)	\$300
Computador (laptop)	\$700
Software MATLAB	\$134
Interfaz Focusrite	\$180
Herramienta <i>Psychoacoustics</i>	Gratis
Multímetro Fluke 111	\$180
Cable TRS macho-hembra	\$5
Extras	
Trasporte	\$100
Comida para voluntarios	\$60
Total	\$1714

A estos valores habría que sumar los valores si los participantes hubieran sido pagados por cada sesión/hora. A 15 dólares la hora, en 24 participantes, el total de esta sección hubiera sido 360 dólares más al total.

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Con toda la información recolectada acerca los métodos que sirven para ejecutar pruebas psicoacústicos, se concluye que los procedimientos adaptativos son generalmente ventajosos, en especial los métodos *transformed up-down* (transformado arriba-abajo). Los métodos *transformed up-down* son conocidos debido a que se puede bajar significativamente el *bias*.

Observando la ejecución de la prueba en los adultos, se trató de optimizar el tiempo en las mediciones de los niños. Cabe recalcar que las mediciones se pudieron realizar en una sola sesión. En la primera prueba de los niños se observó que se al terminar terminaban demasiado aburridos. Por este motivo se procedió a bajar los niveles de inicio de la prueba (*inicial value*). Por esto, en base a la experiencia de la obtención de datos, se concluye que es importante dar mayores recesos a los niños entre pruebas.

Al comparar las medias de los dos grupos (niños-adultos) se observó que los umbrales de los niños en las frecuencias 250, 500, 1000, 2000 y 8000 Hz están más elevados que la media de los adultos.

En las frecuencias 125, 4000, 12500 y 16000 Hz, los umbrales de los dos grupos fueron iguales o difieren muy poco. Esto puede deberse a que el sistema auditivo y el procesamiento psicológico están prácticamente desarrollados (de 10 años en adelante) como lo sugiere los datos de Werner para el rango de frecuencias altas (a los diez años los umbrales de los niños son parecidos a los de los adultos).

A pesar de lo que se visualiza en las medias, las pruebas de estadística demostraron que existían diferencias significativas solo para 500 y 1000 Hz entre niños y adultos. Los resultados concuerdan con el estudio desarrollado por Nozza en 2001, el cual muestra diferencias en el rango de 500 a 4000 Hz pero las más significativas están ubicadas en 500 y 1000 Hz (Ver figura 3.22;

página 56). Estas diferencias concuerdan con los umbrales presentados por Werner entre niños de diez años y adultos (Ver figura 3.25; página 58). Los niveles promedio de umbrales de los niños, al menos en 500 y 1000 Hz, concuerdan con los umbrales medidos por Brandy-Lutman en niños de 7 años y Haapaniemi en niños de escuela (Ver figura 5.6; página 90) a pesar de que la media de edad en este estudio era de 10 años.

Las desviaciones estándar presentan un comportamiento no normal. En altas frecuencias (En 8000, 12500 y 16000 Hz) la desviación es más grande lo que implica que los datos son más dispersos. Esto es probable a cómo influye el nivel de presión sonora de las altas frecuencias en cada oído.

Los resultados de las mediciones difieren con los tres valores medidos anteriormente presentados para la comparación. Esta diferencia, en especial en altas frecuencias, probablemente se debe a que en los datos medidos anteriormente (Moore, Killion, BSA) se obtuvieron de diferente manera a la de este estudio. En estos estudios, y en anteriores, el umbral del sujeto se mide enviando las señales por audífonos mientras se monitorea la presión sonora (en el canal auditivo muy cerca del tímpano mediante un micrófono) que corresponde a esos umbrales (Gelfand, 2004). En esta tesis los datos fueron tomados de distinta manera. La calibración se realizó con un soporte de tabla, la cual no tiene ni volumen ni la impedancia de un oído humano, esto afecta principalmente a las altas frecuencias en las cuales el nivel se puede escuchar más fuerte debido a la resonancia del canal auditivo y por lo tanto los niveles de los umbrales son más bajos; probablemente por esto la diferencia principalmente en altas frecuencias (Moore, 2013, p. 23).

En base a lo mencionado, se logró ver diferencias entre los umbrales de niños y adultos para la muestra utilizada. La diferencia que se observó se debe probablemente al desarrollo auditivo humano. Además esto se pudo apreciar, ya que se midió en el rango de edad en el que el desarrollo se puede visualizar.

7.2 Recomendaciones

En esta tesis se utilizó el procedimiento *2down 1up*, con la prueba sin opción forzada (el sujeto tenía que escoger “si escucho” o “no escucho”; teclas numéricas 1 y 0 respectivamente). Para posteriores mediciones se recomienda incorporar al método el *test* de condición forzada (*Alternative Forced Choice*) para así minimizar la posibilidad de que existan “falsos positivos” (intervalos en los que el sujeto puede presionar la tecla “si escucho” cuando el tono no está presente). Otra opción conveniente puede ser juntar un método *3down 1up* combinado con un 3AFC el cual minimiza aún más la posibilidad de que aparezcan falsos positivos (Levitt, 1971).

Se recomienda verificar la ponderación en que se encuentra el sonómetro para la calibración ya que esta requiere que no exista ninguna ponderación.

Se recomienda efectuar mediciones en un mayor número de frecuencias, para de esta forma mejorar la resolución y visualizar el desarrollo más en detalle.

Para futuros proyectos, sería importante tener más individuos en distintos rangos de edad más controlados, por ejemplo diez niños de 3, 5, 7, 9, 12 años y adultos jóvenes, para sí existe el desenvolvimiento del sistema auditivo.

En el caso de los niños más pequeños, separar las mediciones en dos o más sesiones puede resultar mejor para evitar el aburrimiento y desconcentración. Además se recomienda realizar sesiones previas para entrenar a los participantes para obtener resultados repetibles y confiables para cada condición a evaluar.

Se recomienda realizar mejoras al *setup* para que este simule las propiedades físicas del oído humano y de esta forma efectuar mediciones más confiables principalmente en altas frecuencias. Estos avances pueden estar relacionados con mejora del volumen de la cavidad auditiva, impresión 3D de una oreja y fuerza que ejerce los audífonos en la cabeza (teniendo en cuenta las dimensiones de una cabeza humana promedio).

REFERENCIAS

- Abdullah, M. (2014). *Gustav Theodor Fechner*. Recuperado el 19 de diciembre de 2014 de <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/203301/Gustav-Theodor-Fechner>
- Anderson, T. W., McCarthy, P. I., y Tukey, I. W. (1946). *Staircase Methods of Sensitivity Testing*. NAVORD Rep. 65-46 (21 Marzo).
- Bech, S (2006). *Psychological Acoustics, psychoacoustics and perception*. Recuperado el 11 de octubre de 2014 de http://www.tonmeister.ca/main/textbook/intro_to_sound_recordingch6.html.
- Blandy, S. y Lutman, M. (2005). Hearing threshold levels and speech recognition in noise in 7-year-olds. *International Journal of Audiology*, 44, 425-433.
- Boothroyd, A. (1997). *Auditory Development of the Hearing Child*. Recuperado el 1 de julio de 2015 de <http://www-rohan.sdsu.edu/~boothro/nas/Some%20Publications/1997%20Auditory%20development.pdf>
- Boyer, C. (1968). *A History of Mathematics*. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc.
- Brown, A. E. (1965). Measurement of Auditory Thresholds. *J. Acoust. Soc. Amer.* 38, 86-92.
- Camacho, A. (2014). *Procesado Tiempo-Frecuencia: Aplicación a la percepción humana del sonido (tesis doctoral)*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Cesva (2015). *Sonómetro y Analizador de espectro sc310*. Recuperado el 28 de mayo de 2015 de <http://www.cesva.com/es/productos/sonometros/sc310/>

- Davis, A. (1995). *Hearing in Adults*. Londres, Inglaterra: Whurr.
- Everest, F. & Pohlmann, K. (2009). *Master Handbook of Acoustics*. (5.^a ed). New York, USA: McGraw Hill.
- Fastl, H. & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and Models*. Berlin, Alemania: Springer.
- Fluke (2015). *Fluke Operator Manual*. Recuperado el 29 de mayo de 2015 de <https://isurplus.com.au/manuals/Fluke%2077BN%20User%20Manual.pdf>
- Focusrite (2015). *iTrack Solo User Guide*. Recuperado el 25 de mayo de 2015 de <http://d3se566zfvnmhf.cloudfront.net/sites/default/files/focusrite/downloads/8183/itrack-solo-user-guide-03.pdf>
- García, D. P., Georganti, E. y Lindgreen, T. S. (2008). *Signal Detection Theory: Psychoacoustic Measuring Methods*. Recuperado el 29 de enero de 2015 de http://www.troelslindgreen.dk/docs/31236_Signal_detection_theory_Psychoacoustic_measuring_methods.pdf
- Gates, G. y Mills, J. (2005). *Presbycusis*. Nueva York, Estados Unidos: The Lancet.
- Gelfand, S. (2004). *Hearing. An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics*. New York, USA: MARCEL DEKKER.
- Gifford, K. A., Holmes, M. G., Bernstein, H. H. (2009). Hearing Loss in Children. *American Academy of Pediatrics*, 30, 207-216.

- Haapaniemi, J. J. (1996). The Hearing Threshold levels of children at school age. *Ear and Hear*, 17, 469-477.
- Hansen, C.H. (2001). *Fundamentals of acoustics*. Ginebra, Suiza: World Health Organization.
- Heutschi, K. (2013). *Acoustics I: Fundamentals*. Recuperado en 29 de diciembre de 2014 de <http://www.isi.ee.ethz.ch/teaching/courses/ak1/acoustics-fundamentals.pdf>
- Kahneman, D., Slovic, P. y Tversky, A. (1982). *Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Killion, M. (1977). *Revised estimate of minimum audible pressure: Where is the "missing 6 dB"?* Recuperado en 15 de abril de 2015 de <http://www.etymotic.com/media/publications/erl-0060-1978.pdf>
- Kingdom, F. A. A. y Prins, N. (2009). *Psychophysics: A Practical Introduction*. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier.
- KRK SYSTEMS (2015). *KNS Series User Manual*. Recuperado el 29 de mayo de 2015 de http://www.krksys.com/manuals/headphones/kns_manual_sp.pdf
- Leeds, J (2010). *Psychoacoustics*. Recuperado el 11 de octubre de 2014 de <http://thepowerofsound.net/psychoacoustics/>
- Levitt, H. (1971). Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2B), 467-477. <http://doi.org/10.1121/1.1912375>

- Miyara, F. (2004). *Acústica y Sistemas de Sonido*. Bogotá, Colombia: Fundación Decibel.
- Miyara, F. (2006). *Introducción a la Psicoacústica*. Recuperado el 23 de diciembre de 2014 de <http://www.analfatecnicos.net/archivos/04.IntroduccionPsicoacusticaFedericoMiyara.pdf>
- Moore, B. (2013). *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Cambridge, Reino Unido: Brill.
- Morabito, C. y Della Roca, M. (2010). *Epistemological Models In Psychoacoustics: A Historical Review*. Recuperado el 28 de diciembre de 2014 de <http://philpapers.org/rec/MOREMI-3>
- Müller, R. (2008). *Development of pure tone auditory threshold in school children*. Giessen, Alemania: Euro Noise.
- Nozza, R. (2001). *Developmental Psychoacoustics: Science to Practice*. Recuperado el 3 de julio de 2015 de www.phonak.com/content/dam/phonak/b2b/Events/conference_proceedings/2nd_pediatic_conference_2001/2001proceedings_chapter3.pdf
- Olsho, L., Koch, E., Carter, E., Hapin, C. & Spetner, N. (1988). *Pure-Tone Sensitivity of Human Infants*. Recuperado el 1 de julio de 2015 de https://books.google.com.ec/books?id=K1TfCQAAQBAJ&pg=PA2&lpg=PA2&dq=developmental+psychoacoustics&source=bl&ots=7fQoTVeY9i&sig=auTyclKCxbRFAqmZN_FZSy88zNo&hl=en&sa=X&ved=0CEUQ6AEwCGoVChMIqoKztprbxglVRi-ICCh2-wYg#v=onepage&q=developmental%20psychoacoustics&f=false
- Parra, A., Paap, M., Morales, Y., & Céspedes, A. (2005). *Comparación de metodologías ascendente y descendente para la búsqueda del umbral en audiometría tonal (tesis)*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

- Pedraza, Z. y Solís, M. (2008). *El déficit de audición en la tercera edad*. México DF, México: UNAM.
- Plack, C. J. (2005). *The Sense of Hearing*. Kentucky, Estados Unidos: Psychology Press.
- Pletsch, B. (2002). *Auditory Transduction*. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=PeTriGTENoc>
- Raichel, D. (2006). *The Science and Application of Acoustics*. Fort Collins, USA: Springer.
- Roeser, R. J., Valente, M., & Hosford-Dunn, H. (2011). *AUDIOLOGY Diagnosis*. Thieme.
- Schechter, M. A., Fausti, S. A., Rappaport, B. Z. y Frey, R. H. (1984). Age categorization of high-frequency auditory threshold data. *J Acoust Soc Am*, 79 (3), 767-771.
- Schroder, A. C., Viemeister, N. F., & Nelson, D. A. (1994). Intensity discrimination in normal-hearing and hearing-impaired listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(5), 2683–2693. <http://doi.org/10.1121/1.411276>
- Sinnott, J. M., Pisoni, D. B., & Aslin, R. N. (1983). A Comparison of Pure Tone Auditory Thresholds in Human Infants and Adults. *Infant behavior & development*, 6(1), 3-17. [http://doi.org/10.1016/S0163-6383\(83\)80003-4](http://doi.org/10.1016/S0163-6383(83)80003-4)
- Smith, P., Davis, A., Ferguson, M. & Lutman, M. (1999). Hearing in young adults report ISO/TC43/WG1. *Noise and Health*, 4, 1-10.
- Smith, R., Bale, J. & White, K. (2005). *Sensorineural hearing loss in children*. Iowa City, USA: The Lancet.

- Sokolovski, A. (1974). *Minimum Audible Curve for the Cat (Monaural) Compared to the Minimum Audible Field Curve for Man (Biaural)*. Recuperado el 22 de mayo de 2015 de http://www.isa-audiology.org/periodicals/1971-2001_Audiology/1974,%20%20Audiology,%20%20Vol.%20%2013/No.%205%20%20%28357-436%29/Sokolovkski,%20%20Audiology,%20%201974.pdf
- Soranzo, A., & Grassi, M. (2014). *PSYCHOACOUSTICS: a comprehensive MATLAB toolbox for auditory testing*. Sheffield, UK: Frontiers in Psychology.
- Suzuki, Y., & Takeshima, H. (2004). Equal-loudness-level contours for pure tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(2), 918-933. <http://doi.org/10.1121/1.1763601>
- Tippens, P. (2011). *Física, conceptos y aplicaciones*. (7.^a ed.). México D.F., México: McGraw Hill.
- UNE-EN ISO 389-7 (2005). *Cero de referencia para la calibración de equipos audiométricos: Umbral de audición de referencia bajo condiciones de escucha de campo libre y campo difuso*. Madrid, España: AENOR
- Varela, A. (2013). *T Student Muestras Independientes*. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=W6fuVCGGK8I>
- Vassilakis, P. (2005). *Introduction to Psychoacoustics and Sound Perception*. Recuperado el 11 de octubre de 2014 de <http://acousticlab.org/psychoacoustics/>

Werner, L. & VandenBos, G. (1993). *Developmental Psychoacoustics: What Infants and Children Hear*. Recuperado el 1 de julio de 2015 de <http://ps.psychiatryonline.org/doi/abs/10.1176/ps.44.7.624>

Werner, L. (2007). *Human Auditory Development*. Washington, Estados Unidos: University of Washington.

Wetherill, G. B. y Levitt, H. (1965). *Sequential Estimation of Point son a Psychometric Function*. Brit. J. Math. Statist. Psychol. 18, 1-10.

Wolfe, J (s.f). *dB: What is a decibel?*. Recuperado el 5 de enero de 2015 de <http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/dB.htm>

Zwislocki, J., Maire, F., Feldman, A. S., y Rubin, H. (1958). *On the Effect of Practice and Motivation on the Threshold of Audibility*. J. Acoust. Soc. Amer. 30, 254-262.

ANEXOS

Anexo 1

Cuestionario en adultos y niños (Tomado de Parra, A., Paap, M., Morales, Y., & Céspedes, A.)

Ficha de antecedentes (adultos)

I. Identificación Personal:

Nombre: _____ Edad: _____
Fecha de Nacimiento: _____ Teléfono: _____
Dirección: _____ E-mail: _____
Profesión: _____ Actividad: _____ Fecha de Evaluación: _____

II. Antecedentes de Salud general:

- ¿Ha padecido alguna de las siguientes enfermedades?

Traumatismos encéfalo craneanos Sí () No () Cuándo _____
Papera Sí () No ()
Sarampión Sí () No ()

III. Antecedentes de Salud auditiva:

- ¿Presenta o ha presentado dentro de los últimos 12 meses los síntomas?

Tinnitus Si () No ()
Otitis Sí () No ()
Vértigo Si () No ()

Cirugía de oído Sí () No () Tipo de cirugía _____

- ¿Tiene o ha padecido alguna enfermedad en el oído?

Sí () No () Cuál _____ Cuándo _____

- ¿Utiliza audífonos?

Sí () No () Desde cuándo _____

Observaciones: _____

Ficha de antecedentes (niños)

I. Identificación Personal:

Nombre: _____ Edad: _____

Fecha de Nacimiento: _____ Teléfono: _____

Dirección: _____ E-mail: _____

Actividad: _____ Fecha de Evaluación: _____

II. Antecedentes de Salud general:

- ¿Ha padecido alguna de las siguientes enfermedades?

Traumatismos encéfalo craneanos Sí () No () Cuándo _____

Papera Sí () No ()

Sarampión Sí () No ()

III. Antecedentes de Salud auditiva:

- ¿Presenta o ha presentado dentro de los últimos 12 meses los síntomas?

Tinnitus Si () No ()

Otitis Sí () No ()

Vértigo Si () No ()

Cirugía de oído Sí () No () Tipo de cirugía _____

- ¿Tiene o ha padecido alguna enfermedad en el oído?

Sí () No () Cuál _____ Cuándo _____

- ¿Utiliza audífonos?

Sí () No () Desde cuándo _____

Observaciones: _____

Anexo 2

Código de calibración en MATLAB (Programa *Psychoacoustics*)

```
sf = 44100;      % frecuencia de muestreo
f = 1000;       % frecuencia a medir(Hz)
d = 10000;      % duracion de tono (ms)
FS_level = -10; % nivel de tono (dB FS)
% sintetizacion de tono
calibration_tone = GenerateTone(sf, d, f);
% Establecer nivel de tono
calibration_tone = AttenuateSound(calibration_tone,
FS_level);
% reproduccion de tono
sound(calibration_tone, sf)
```

**Link para programa completo de la herramienta de MATLAB
*Psychoacoustics***

<http://www.psy.unipd.it/~grassi/psychoacoustics.html>

Anexo 3

Código de MATLAB de *Absolute Threshold* de *Psychoacoustics Toolbox*

```
function [pos_ans, q] = AbsoluteThreshold_S(std_level,
var_level, nAFC)

% Absolute threshold for a 500-ms pure tone of 1-kHz. The
% tone is gated on
% and off with two raised cosine ramps of 10-ms.
% - PARAMETER VARIED ADAPTIVELY: the level of the tone;
% - STANDARD LEVEL: in the current experiment this
% parameter has no use;
% !!!PLEASE NOTE THAT THE EXACT SOUND PRESSURE LEVEL AT
% LISTENER'S EAR MUST
% BE DETERMINED APART BY MEANS OF AN ADEQUATE HARDWARE!!!

if nAFC
    error('This experiment is for "yes/no" task only!');
end;

%% BEGINNING EXPERIMENT'S PARAMETER %%
sf = 44100; % sample frequency in Hz
dur = 500; % overall duration of noise
freq =500; % tone frequency

% [1] %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% GENERATE SOUNDS
variable = GenerateTone(sf, dur, freq);
variable = GenerateEnvelope(sf, variable);
variable = AttenuateSound(variable, var_level);

% [2] %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% RANDOMIZE POSITION OF STANDARD AND VARIABLE AND SET,
% ACCORDINGLY, THE KEY
% THE SUBJECT HAS TO PRESS TO GIVE A CORRECT RESPONSE
pos_ans = 1;

% [3] %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PLAY THE SOUND
sound(variable, sf, 16);

% [4] %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ASK THE QUESTION TO THE SUBJECTs
q = 'Si puede escuchar el sonido presione ("1") sino
("0")?: ';
```

Anexo 4

Datos de umbrales auditivos en 12 niños y 12 adultos

Tabla 4. Niveles de umbrales auditivos en niños

Niños	Niño 1	Niño 2	Niño 3	Niño 4	Niño 5	Niño 6	Niño 7	Niño 8	Niño 9	Niño 10	Niño 11	Niño 12
Frecuencia [Hz]	SPL [dB]											
125	31.2	38.8	25.3	37.2	23.4	30.2	33.4	26.7	26.7	22.4	35.4	27.2
250	24.5	43.9	24.8	42.4	18.2	26.9	26.2	30.9	27.8	21.4	28.9	13.5
500	28.1	33.7	18.8	27.3	13.6	20	24.3	19.8	24.1	17.5	21.7	16.2
1000	10.7	22.5	18	22.5	8.38	16.3	6.5	7.88	9.88	14.5	12.1	14.8
2000	7.72	23.1	10.8	14.8	2.97	13.9	3.72	3.47	4.22	3.22	10.2	8.1
4000	0.88	11.8	-1.75	4.5	3.38	0	0	-0.13	-1.63	1.13	5.5	4.5
8000	3.55	11.3	-4.45	11.5	0.92	27.4	3.93	6.05	2.55	-0.58	-0.95	16.7
12500	-1.2	25.1	-0.2	13.2	4.97	17.4	7.88	4.22	8.68	5.05	5.55	7.8
16000	14.2	65.8	36.3	37.4	26.3	51.0	43.5	29.8	49.9	21.6	31.1	31.3

Tabla 5. Nivel de umbrales auditivos en adultos

Adultos	Adulto 1	Adulto 2	Adulto 3	Adulto 4	Adulto 5	Adulto 6	Adulto 7	Adulto 8	Adulto 9	Adulto 10	Adulto 11	Adulto 12
Frecuencia [Hz]	SPL [dB]	SPL [dB]	SPL [dB]									
125	30.3	35.0	31.4	31.2	29.9	31.0	25.4	28.8	24.4	30.2	38.33	35.2
250	24.4	24.7	16.3	17.0	24.7	26.7	21.5	18.2	20.3	20.83	35.45	17.33
500	14.6	19.1	12	15.2	18.3	28	18.6	13	16.2	12	26.88	13.5
1000	3.13	7.75	-1.38	7.88	9.63	16.2	7.38	1.75	11.7	10.88	12	18.38
2000	-3.9	-3.4	8.97	4.47	3.85	18.7	1.72	6.97	14.7	10.48	6.72	10.85
4000	-4.38	-3.75	-2.38	11.8	-1.25	-0.38	0.5	6.38	6.38	4.38	2	14.13
8000	-3.70	-4.45	4.3	10.5	0.8	-2.95	-1.45	0.05	18.5	3.68	-2.58	4.3
12500	9.30	14.1	4.05	11.3	4.43	4.63	10.6	16.5	30.4	13.93	16.8	9.3
16000	21.1	55.6	29.6	51.5	25.3	23.2	64.3	29.8	64.8	65.05	65.68	37.8