

Relación entre el Promedio de Umbrales Tonales y el Umbral de Captación obtenido mediante la Técnica de Tillman-Olsen

Relationship between the Average of Pure-tone Thresholds and the Speech Recognition Threshold obtained by the Tillman-Olsen Technique

Relação entre a Média dos Limiares Tonais e o Limiar de Recepção de Fala obtido pela Técnica de Tillman-Olsen

Ing. Horacio Cristiani ⁽¹⁾, Lic. Fga. Mariana Kuchman ⁽²⁾

Resumen

Introducción: En logaudiometría, se ha considerado que el llamado Umbral de Palabra coincide con el promedio de los umbrales tonales para las frecuencias centrales. La ambigüedad en la definición de este umbral, la multiplicidad de técnicas y baja reproducibilidad hacen que no sea conveniente para realizar la verificación cruzada entre ambos estudios. En este trabajo se demuestra que el Umbral de Captación, además de su validez psicoacústica, presenta alta correlación con el promedio de umbrales tonales, resultando un indicador adecuado para dicha verificación.

Material y Método: Se obtuvo el Umbral de Captación mediante dos métodos: el de Tillman y Olsen y con técnica descendente (25 palabras por nivel e interpolación lineal). Se compararon los resultados con el promedio de los umbrales tonales en las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz. Se estudiaron 63 sujetos (118 oídos) con distintos grados de pérdida auditiva sensorineural a quienes se realizó audiometría tonal y logaudiometría, presentando material de las listas del Prof. Tato et al., grabado digitalmente con nivel homogéneo.

Resultados: Se encontró correlación positiva significativa entre el Umbral de Captación obtenido por ambos métodos y el promedio de los umbrales de tono puro en 500, 1000 y 2000 Hz ($r(118) = 0.977775$, $p < 0.001$ y $r(118) = 0.9562$, $p < 0.001$, respectivamente). Se encontró correlación positiva entre los resultados de Umbral de Captación obtenido por

ambos métodos ($r(118) = 0.98$, $p < 0.001$).

Conclusión: El Umbral de Captación es un indicador adecuado para la verificación cruzada con los umbrales de tono puro.

Palabras clave: Logaudiometría, Umbral de Captación, método de Tillman y Olsen

Abstract

Introduction: In speech audiometry, the so-called Word Threshold has been considered to match with the average of pure tone thresholds for the central frequencies. The ambiguity in the definition of this threshold, the multiplicity of techniques and low reproducibility mean that this is not a convenient indicator for cross-checking the two tests. In this work it is shown that the Speech Recognition Threshold, in addition to its psychoacoustic validity, shows a high correlation with the average of tonal thresholds, resulting in an adequate parameter for threshold verification.

Material and Method: The Speech Recognition Threshold was obtained from Tillman Olsen method and by a descendent technique with 25 words in each level and lineal interpolation. Results were compared with the average of pure tone thresholds for 500, 1000 and 2000 Hz. 63 subjects (118 ears) with different degrees of sensorineural hearing loss were tested with pure tone and speech audiometry. The material used were the word list of Dr. Tato et al. digitally recorded at homogeneous level.

⁽¹⁾ Universidad del Salvador, Universidad del Museo Social Argentino, C.A.B.A., Argentina

⁽²⁾ Universidad Católica del Uruguay, Montevideo, Uruguay.

Mail de contacto: hcrystiani@mah.org.ar

Fecha de envío: 3 de Noviembre de 2020- Fecha de aceptación: 28 de marzo de 2021

Results: A significant positive correlation was found between the Speech Recognition Threshold obtained by both methods and the pure tone thresholds average at 500, 1000 and 2000 Hz ($r(118) = 0.977775$, $p < 0.001$ and $r(118) = 0.9562$, $p < 0.001$, respectively). A positive correlation was found between the results of the Catchment Threshold obtained by both methods ($r(118) = 0.98$, $p < 0.001$).

Conclusion: The Speech Recognition Threshold is a suitable indicator for cross-checking with the pure tone thresholds.

Keywords: Speech Audiometry, Speech Recognition Threshold, Tillman - Olsen method.

Resumo

Introdução: Na audiometria da fala, o denominado Limiar de Fala tem sido considerado coincidente com a média dos limiares tonais puros das frequências centrais. A ambigüidade na definição desse limiar, a multiplicidade de técnicas e a baixa reprodutibilidade fazem com que este não seja um indicador conveniente para o cruzamento dos dois estudos. Neste trabalho é mostrado que o Limiar de Aquisição, além de sua validade psicoacústica, apresenta uma alta correlação com a média dos limiares tonais, resultando em um parâmetro adequado para tal verificação.

Material e Método: Foram estudados 63 sujeitos (118 orelhas) com diferentes graus de perda auditiva neurossensorial, aplicando audiometria tonal e audiometria de fala, apresentando material das listas do Prof. Tato et al., Gravado digitalmente com nível homogêneo. O Limiar de Recepção de Fala foi obtido por dois métodos: o método de Tillman e Olsen e uma técnica descendente, com 25 palavras por nível e interpolação linear. Os resultados foram comparados com a média dos limiares tonais nas frequências 500, 1000 e 2000 Hz.

Resultados: Foi encontrada uma correlação positiva significativa entre o Limiar de Recepção da Fala obtido por ambos os métodos e a média dos limiares de tom puro em 500, 1000 e 2000 Hz ($r(118) = 0,977775$, $p < 0,001$ e $r(118) = 0,9562$, $p < 0,001$, respectivamente). Foi encontrada correlação positiva entre os resultados do Catchment Threshold obtido pelos dois métodos ($r(118) = 0,98$, $p < 0,001$).

Conclusão: O Limiar de Recepção de Fala é um indicador adequado para verificação cruzada com os limiares de tom puro.

Palavras chave: Audiometria da fala, Limiar de Recepção de Fala, método do Tillman e Olsen

Introducción

La logaudiometría es la medición de la capacidad de un sujeto para reconocer estímulos del habla. En su forma más simple se evalúa el porcentaje de reconocimiento de palabras a través de la repetición de estímulos presentados a diferentes niveles, generando una curva psicométrica conocida como logaudiograma. También pueden definirse algunos valores particulares (umbrales de la logaudiometría). La norma IRAM 4028-3 (1996) ⁽¹⁾ sugiere métodos para la determinación de los umbrales de voz (UV), palabra (UP) y captación (UC). Se define el Umbral de Voz como el nivel de estímulo para el cual se detecta la presencia de voz, aunque no se reconozcan las palabras. El Umbral de Palabra es la intensidad de estímulo donde el sujeto es capaz de reconocer una palabra y el Umbral de Captación es el nivel de donde el sujeto reconoce el 50% de las palabras presentadas. Es importante destacar que el UP (valor de intensidad donde el logaudiograma se despega del eje de abscisas) no es un parámetro significativo en la literatura internacional sobre el tema. Aquí dos aspectos fundamentales pueden señalarse:

1. No tiene ninguna utilidad práctica consignar un valor de intensidad para el cual un sujeto es capaz de repetir correctamente un 4% de las palabras que se le presentan (equivalente a una palabra en el caso de una presentación de 25 palabras)

2. El umbral de palabra en la logaudiometría se encuentra en la zona de la curva psicométrica donde ésta presenta pendientes bajas. Esto implica menor precisión en la determinación de un umbral, ya que una variación accidental en solo una palabra detectada (buscando ese "pie" logaudiométrico) implica una diferencia de varios dB en la estimación de éste. En consecuencia, resulta conveniente consignar el valor de umbral en la zona de la curva que presenta mayor pendiente, cercana al umbral de captación, de modo tal que una variación accidental de una o dos palabras reconocidas sólo implique una variación mínima en la estimación del umbral (Fig.1). Esta es la zona del punto de inflexión, donde se produce el mayor aporte a la inteligibilidad por diferencia de nivel de estimulación.

Una diferencia accidental de 1 o 2 palabras ($\Delta D_1 = 8\%$) puede significar, como en el caso de la figura una diferencia en la estimación del UP de 20 dB (ΔL_1), mientras que la misma diferencia en la parte media de la curva ($\Delta D_2 = 8\%$) implica una diferencia de sólo 5 dB (ΔL_2) en la estimación de UC. A mayor pendiente, menor el error de estimación, siendo conveniente que el material utilizado en pruebas destinadas a evaluar umbrales determine una pen-

diente alta en su curva psicométrica. El parámetro que debe ser comparado con el promedio de umbrales tonales, para evaluar la consistencia de los datos medidos (correspondencia entre audiometría tonal y logaudiometría) es el Umbral de Captación.

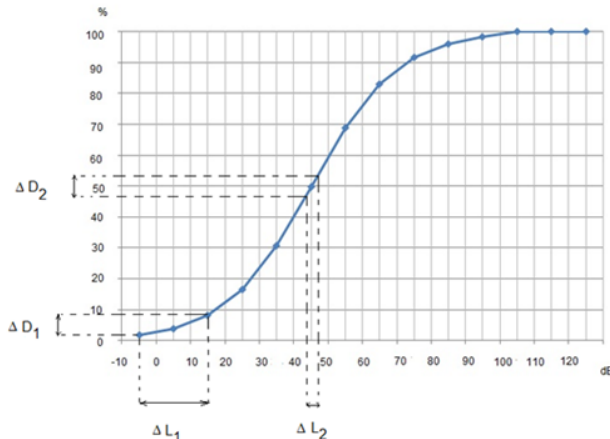


Fig. 1 Efecto de la pendiente de la curva psicométrica en la estimación de umbrales. Nótese en este ejemplo, que los incrementos de discriminación son iguales ($\Delta D_1 = \Delta D_2$) pero los correspondientes incrementos de nivel son muy distintos. ($\Delta L_1 \gg \Delta L_2$)

En muchos países se diferencian las pruebas destinadas a establecer umbrales ya sea el SDT, Speech Detection Threshold (UV) o el SRT, Speech Recognition Threshold (UC) y las que buscan el WRS (Word Recognition Score) es decir el porcentaje de discriminación en función al nivel de estímulo. Para encontrar el SRT se usan palabras espondeicas en inglés y en diversas lenguas se han presentado listas de palabras bisílabas para estos fines. Las mismas deberían cumplir con las siguientes condiciones:

- Ser palabras de uso familiar
- Las palabras de una misma lista deben presentar las mismas condiciones de dificultad y audibilidad (ser psicométricamente equivalentes).
- La curva psicométrica obtenida con este material debe tener alta pendiente

Para las pruebas de discriminación se utilizan listas de monosílabos, fonéticamente balanceados cuando se encuentra suficiente cantidad de ellos en el idioma. Para realizar la prueba se suele partir de un nivel de estímulo superior en 10 dB al del SRT previamente hallado (Katz, 2015⁽²⁾).

Dada la escasez de palabras monosilábicas con significado en nuestro idioma, se ha optado por la generación de un conjunto de listas de palabras fonéticamente balanceadas, bisílabas graves (Tato et al., 1948⁽³⁾). Con este material se suelen realizar

las pruebas de logaudiometría para hallar el WRS y encontrar umbrales logaudiométricos.

Objetivos

Comparar los umbrales de captación obtenidos para las listas de palabras del Dr. Tato con el método de Tillman y Olsen, propuesto en la norma IRAM 4028-3(1996) y la técnica convencional descendiente con 25 palabras con el promedio de los umbrales de tono puro en las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz.

Material y Método

Formaron parte de este estudio 63 sujetos (118 oídos), con edad promedio 58.13 años ($\sigma=20.13$ años) (35 de sexo femenino) y pérdidas auditivas sensorineurales. El criterio de inclusión respecto a las pérdidas auditivas fue amplio en cuanto al grado, abarcando desde sujetos con audición normal hasta pérdidas severas y profundas con pendientes planas y con caída abrupta, manteniendo la condición de que el gap óseo-aéreo no excediera los 5 dB. Se fijaron criterios de exclusión en la muestra reconociéndose, en algunos casos, la existencia de discrepancia entre los promedios tonales y el SRT, ya tomadas en cuenta por diferentes autores, entre éstas; pacientes sospechosos de presentar pseudohipoacusia, configuraciones audiométricas atípicas tales como pérdidas auditivas con audición normal en las frecuencias superiores a 8000 Hz (Berlin et. al 1978⁽⁴⁾), debiéndose las diferencias en este caso a mayor sensación de sonoridad percibida para el habla que para los tonos puros en los mismos niveles de audición (Ventry, 1976⁽⁵⁾), o en casos de pérdida sensorineurales de nivel significativo (Roesner, 1982⁽⁶⁾), como puede manifestarse en pacientes candidatos a implantes cocleares. La correspondencia puede verse alterada también cuando el paciente se encuentra afectado por déficits cognitivos o de lenguaje (Working Group and Speech Understanding and Aging, 1988⁽⁷⁾).

Se realizó audiometría tonal, mediante la técnica convencional de Hughson-Westlake y se calculó el promedio de los umbrales (PTA) correspondiente a las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz. Se determinó el Umbral de captación (UC) mediante el método propuesto en la norma IRAM 4820-3 (1996), basado en la fórmula de Tillman y Olsen (1973)⁽⁸⁾, con intervalos de presentación de 5 dB y 5 palabras por nivel y la logaudiometría convencional a través de la presentación de listas de 25 palabras a diferentes niveles, con procedimiento descendente e interpo-

lación lineal para la obtención de UC. Las mediciones fueron realizadas en el Hospital Militar de las Fuerzas Armadas con un audiómetro Interacustics AC40, auriculares Sennheiser HDA 200 y en el consultorio de la Lic. Fonoaudióloga Mariana Kuchman con audiómetro Ladie 161, con auriculares Telephonics TDH39, en Montevideo Uruguay y en la Mutualidad Argentina de Hipoacúsicos, en Buenos Aires, Argentina, con audiómetro Interacoustics AC33, con auriculares Telephonics TDH-39. En todos los casos las pruebas se hicieron en cabina sonoamortiguada y los audiómetros fueron verificados en su calibración de acuerdo con las normas ANSI 389-3:2016⁽⁹⁾ e ISO 8253-3:2012⁽¹⁰⁾. Se utilizaron las listas de Dr. Tato B2, B3 Y B4 (y ocasionalmente las C2 y C3) que fueron calificadas por un grupo de 7 audiólogas como de “dificultad moderada”. Estos resultados coinciden con un estudio (Sala, 2012)⁽¹¹⁾ donde se evaluó el conjunto de las listas del Prof. Tato realizando el cálculo de los errores cometidos en la repetición por parte de sujetos con audición normal. En este estudio, las mismas listas mencionadas presentaron un número de errores similar. El conjunto de listas fue grabado en un estudio de audio profesional con el siguiente equipamiento: micrófono Neumann U67, consola Tascam M320 y software de procesamiento Sound Forge Pro-11. La locución estuvo a cargo de una estudiante de fonoaudiología argentina, y el material fue homogeneizado en cuanto al nivel con verificaciones independientes de dos jueces utilizando el vumetro de un audiómetro clínico similar a los de este trabajo. Esta forma de verificación del nivel de entrada es la misma utilizada por los audiólogos para el control de la emisión cuando se realiza la logaudiometría a viva voz, según se detalla en la norma ANSI S3.6-2004. Las grabaciones incluyen una pista con un tono puro de 1000 Hz para realizar el ajuste inicial del nivel de entrada de señal. Estas listas son las de uso común en los centros participantes de este estudio.

Resultados

Correlación de Pearson y Regresión Lineal

1. UC por el método de Tillman y Olsen vs. PTA

Se encontró correlación positiva significativa entre el Umbral de Captación (UC) y el promedio de umbrales tonales (PTA) con un coeficiente de correlación de Pearson, $r(118) = 0.9789788$, $p < 0.001$. En la figura 2 se observa el gráfico de dispersión de UC calculado mediante el método de Tillman - Olsen vs. PTA. El análisis de los residuos indica que los mismos siguen una distribución cercana a la normal

normal con un error típico para las 118 mediciones de 4.65 dB.

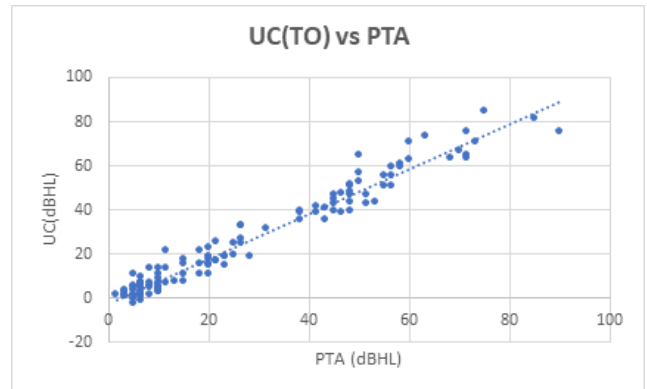


Figura. 2 Gráfico de dispersión del Umbral de Captación mediante el Método de Tillman y Olsen vs Promedio de umbrales tonales

- El análisis de las diferencias UC-PTA arroja un valor promedio de -1.98 dB ($\sigma=4.82$ dB) y la mediana situada en -2.4 dB. El primer cuartil (Q1) se ubica en -5.5 dB y el tercer cuartil (Q3) en 0.5 dB. Esto significa que, el 50% de los resultados UC-PTA obtenidos se ubica entre estos dos valores, situación que puede verse en el histograma de la figura 3.a. La figura 3.b muestra los residuos de la regresión lineal en función de los valores del PTA para todo el experimento. También se observa que en el 75% de los casos evaluados el PTA se ubicó como máximo 0.5 dB por debajo del UC.

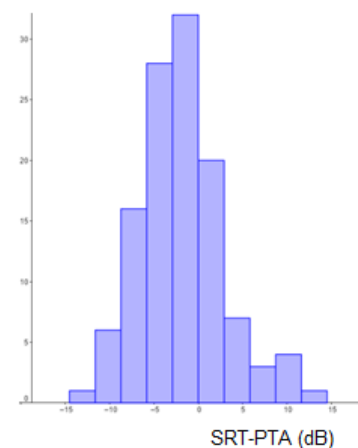


Figura. 3a Histograma de las diferencias UC-PTA.

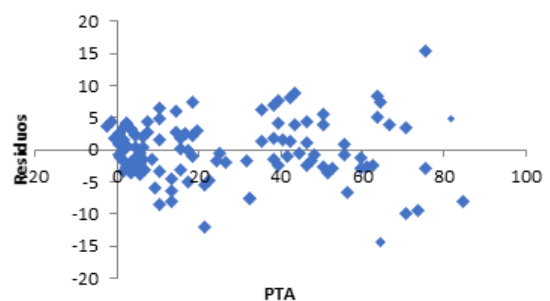


Figura. 3b Gráfico de residuos de la regresión lineal

Este análisis, permite la construcción de un modelo de regresión lineal, de donde se extrae la fórmula que vincula UC (dBHL) y el PTA (dBHL):

$$UC (dBHL)=1.019 PTA(dBHL)-2,5157$$

Como se ha señalado más arriba, el error estándar para este cálculo es de 4.65 dB.

2. UC por interpolación lineal vs PTA

El coeficiente de correlación de Pearson $r(118) = 0.9562$, $p < 0.001$ muestra una fuerte correlación positiva, observándose en el gráfico de la figura 4 que para valores de pérdida auditiva elevada la dispersión es mayor. Los máximos valores de residuo se dan para las pérdidas profundas.

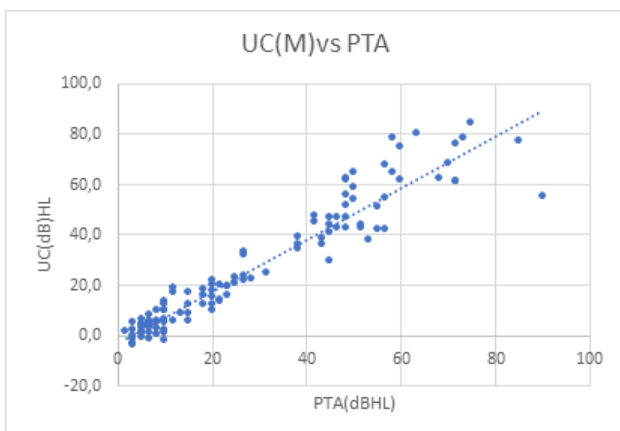


Figura. 4 Grafico de dispersión del umbral de medido con la técnica convencional y extrapolación lineal vs. promedio de umbrales tonales

3. UC por interpolación lineal vs. Tillman Olsen

El análisis comparativo de ambos métodos de obtención del umbral de captación se realizó evaluando la curva de regresión que se ve en la fig. 5, obteniéndose un coeficiente de correlación de Pearson $r(118) = 0.98$, $p < 0.001$

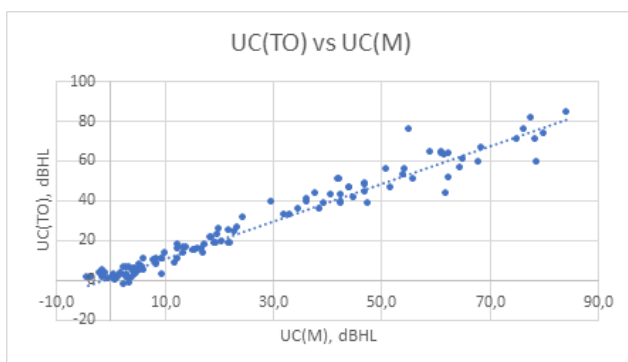


Figura. 5 Grafico de dispersión del umbral de medido con la técnica convencional y extrapolación lineal vs. Método de Tillman y Olsen.

El análisis de las diferencias $UC(M) - UC(TO)$ entre los valores obtenidos a través de ambos métodos para cada paciente muestra un valor medio de tan solo -0.1 dB ($\sigma = 4.83$ dB).

Discusión

La utilización del método recomendado por la norma argentina IRAM 4028-3 para la determinación del Umbral de Captación y la utilización de éste, para verificar la calidad de los umbrales obtenidos en la audiometría tonal debe ser analizada bajo diferentes aspectos, incluido el tiempo requerido, la confiabilidad y la reproducibilidad de los resultados. En Argentina se ha generalizado el uso del llamado “pie logoaudiométrico” (extremo inferior de la curva, o Umbral de palabra) como el punto a comparar con el promedio de los umbrales tonales. Aquí se muestra que su uso presenta inconsistencias. En primer lugar, es muy difícil encontrar valores precisos, incluso utilizando el método especificado en la norma IRAM para la determinación del UP, debido a la gran variabilidad de resultados obtenidos entre presentaciones sucesivas (escasa repetibilidad). Por otra parte, como se explica precedentemente, no tiene ninguna utilidad clínica ni significado práctico tomar en cuenta un nivel de presentación donde se detectan una o dos palabras, esto no brinda información en términos de posibilidades de comunicación. Definir un umbral en la zona de la curva de menor pendiente, ante un error accidental en una o dos palabras puede dar origen a un importante error 10 dB o más en la estimación del umbral obtenido. El uso del Umbral de Captación presenta las siguientes ventajas:

1. Es un mejor indicador del rendimiento del sujeto. Comprender el 50% de palabras aisladas equivale a una tasa mucho mayor de comprensión de habla continua debido a la inferencia contextual. El Umbral de Palabra representa una tasa de reconocimiento muy baja, que no refleja las habilidades del sujeto para una situación real.
2. Es recomendable buscar un umbral en la zona de la curva psicométrica donde la pendiente es mayor, donde los errores accidentales, en una o dos palabras, tendrán menor influencia en la determinación de dicho umbral.
3. La aplicación de un método seguro y sencillo, comprobado en el mundo, basado en la fórmula de Tillman - Olsen y recomendado tanto en la norma ISO 8253-3 y la IRAM 4028-3, proporciona valores inequívocos del umbral de captación.
4. Los valores de la diferencia $UC - PTA$ se distribuyen normalmente alrededor de -2 dB. En un

70% de los casos el PTA es mayor al UC y no menor a este, es decir, se ubica más cerca del UC que del UP.

5. Experimentalmente se encontró en este trabajo una fuerte correlación entre los UC obtenidos mediante ambos métodos, y el promedio de tonos puros (PTA).

Conclusiones

Se verificó una alta correlación positiva entre los valores de Umbral de Captación y el promedio de los umbrales de la audiometría tonal, para las frecuencias 500, 1000 y 2000 Hz utilizando listas de palabras del Dr. Tato, obteniéndose mediante regresión lineal una fórmula que vincula ambos valores, que puede utilizarse para verificar la correspondencia con los umbrales obtenidos en la audiometría tonal. Se ha discutido la conveniencia del uso del umbral de captación como valor representativo del reconocimiento de la palabra y se mostró analítica y experimentalmente que el método de Tillman Olsen resulta apropiado para la verificación de la consistencia de los datos obtenidos mediante la audiometría tonal. En un trabajo de los mismos autores, aceptado para publicación, se presenta una revisión bibliográfica a nivel global mostrando que a lo fines de la verificación cruzada entre los valores de la audiometría tonal y la logaudiometría se tiene en cuenta el nivel de estímulo necesario para obtener un 50% de reconocimiento del material presentado. Este concepto, independientemente del material utilizado, coincide con el del Umbral de Captación.

APÉNDICE: La fórmula de Tillman - Olsen

Para estimar el punto de la curva psicométrica que corresponde al 50% de aciertos Tillman y Olsen (1973) proponen un método basado en la ecuación de Spearman - Karber, (Finney ⁽¹²⁾, 1952), propuesta inicialmente por Spearman ⁽¹³⁾ (1908). El método, ampliamente usado en farmacología ha sido adoptado por la norma ISO 8253-3 e IRAM 4028-3. Wilson, Morgan y Dirks ⁽¹⁴⁾ (1972) mostraron la utilidad clínica y sugirieron la adopción de esta técnica como un método estandarizado. Este tipo de ensayo, que en farmacología es llamado cuantál, de todo o nada, o dicotómico, se caracteriza por aplicar dosis decrecientes de la sustancia bajo prueba a los animales de laboratorio, y calculando luego la tasa de respuesta positiva, ya sea muertes si se prueba un insecticida o sobrevivientes si se trata de un fármaco. De este modo, la respuesta es dicotómica, ya que sólo tiene dos posibles resultados: uno

positivo al que se le otorga valor 1, y uno negativo que se codifica como cero. En el caso de la determinación del UC, se trata de un experimento dicotómico con resultados "detección" o "no detección" y se aplican "dosis" (intensidades) decrecientes de estímulo.

La curva psicométrica puede ser interpretada como la función de distribución de probabilidad acumulada correspondiente a una variable aleatoria, $F(x)$, donde x es el valor de los niveles de presentación en dB (escala logarítmica). La función de distribución indica la tasa de aciertos (repeticiones correctas en nuestro caso) en función del nivel de estímulo. El valor de estímulo para obtener el 50% de respuesta en la función de distribución coincide con el máximo de la función de densidad de probabilidad $f(x)$, es decir la media poblacional μ . Dicha función de densidad muestra cual es el aporte de cada intervalo de estímulos a la inteligibilidad. En nuestro caso, UC será el valor de la media muestral m .

El estímulo se presenta en k diferentes niveles, es decir, tendremos x_i niveles con

$$i=1,2,\dots,k$$

Con p_i designamos a la tasa de aciertos para el nivel i . Este es el cociente entre la cantidad de palabras repetidas correctamente (c_i) y la cantidad total de palabras presentadas a ese nivel (n_i). Es decir

$$p_i = \frac{c_i}{n_i}$$

A partir de la curva de distribución de probabilidad acumulada $F(x)$ es posible obtener la función de densidad de probabilidad $f(x)$ recordando la relación entre ambas:

$$\frac{dF(x)}{dx} = f(x) \quad (1)$$

Que equivale a considerar el aporte que cada rango de intensidad hace a la inteligibilidad, es decir, a realizar la derivada de la curva psicométrica.

La media está dada por la expresión:

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF(x)$$

Pero teniendo en cuenta (1):

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx$$

Para el caso de los datos experimentales agrupados, se puede escribir como:

$$m = \sum_{i=1}^k (p_{i+1} - p_i) \left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2} \right)$$

Esta fórmula aparece en el texto de Finney¹² (1952). El factor $\frac{x_i+x_{i+1}}{2}$ es el punto medio de cada clase, también conocido como *marca de clase*.

Se desarrollarán a continuación, algunos términos de esta sumatoria. Asumiremos $k=5$, aunque luego generalizamos las conclusiones para cualquier valor de k , simplemente para facilitar la notación y la comprensión.

$$m = \frac{1}{2} [(p_2 - p_1)(x_1 + x_2) + (p_3 - p_2)(x_2 + x_3) + (p_4 - p_3)(x_3 + x_4) + (p_5 - p_4)(x_4 + x_5)]$$

Se considera que la curva psicométrica varía entre 0 y 100% de aciertos, por lo tanto:

$p_1 = 0$ y $p_k = 1$. Es decir, para el nivel más bajo de presentación no habrá repeticiones correctas y para el máximo nivel todas las repeticiones serán correctas.

La igualdad anterior queda:

$$m = \frac{1}{2} [(p_2)(x_1 + x_2) + (p_3 - p_2)(x_2 + x_3) + (p_4 - p_3)(x_3 + x_4) + (1 - p_4)(x_4 + x_5)]$$

Desarrollando:

$$m = \frac{1}{2} [p_2 x_1 + p_2 x_2 + p_3 x_2 + p_3 x_3 - p_2 x_2 - p_2 x_3 + p_4 x_3 + p_2 x_1 + p_4 x_4 - p_3 x_3 - p_3 x_4 + x_4 + x_5 - p_4 x_4 - p_4 x_5]$$

Algunos términos (señalados, aquí en rojo) se anulan, y reagrupando:

$$m = \frac{1}{2} [p_2(x_1 - x_3) + p_3(x_2 - x_4) + p_4(x_3 - x_5) + x_4 + x_5]$$

Ahora podemos volver a generalizar para cualquier valor de k :

$$m = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{j=2}^{k-1} [p_j(x_{j-1} - x_{j+1})] + x_{k-1} + x_k \right\}$$

Haremos que los niveles de estímulo x_i sean equidistantes, es decir

$$x_{i+1} - x_i = d$$

Por lo tanto, para todo valor j se cumple: $x_{j-1} - x_{j+1} = -2d$

Reemplazando:

$$m = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{j=2}^{k-1} [p_j(-2d)] + x_{k-1} + x_k \right\}$$

$$m = \frac{(-2d)}{2} \sum_{j=2}^{k-1} p_j + \frac{1}{2} (x_{k-1} + x_k)$$

Es decir:

$$m = -d \sum_{j=2}^{k-1} p_j + \frac{1}{2} (x_{k-1} + x_k)$$

Dentro del término entre paréntesis, sumamos y restamos x_k sin alterar la igualdad:

$$m = -d \sum_{j=2}^{k-1} p_j + \frac{1}{2} (x_{k-1} + x_k + x_k - x_k)$$

Siendo $x_{i+1} - x_i = d$

$$m = -d \sum_{j=2}^{k-1} p_j + \frac{1}{2}(d+2x_k)$$

$$m = x_k + \frac{d}{2} - d \sum_{j=2}^{k-1} p_j$$

Teniendo en cuenta la definición de p_i dada, y si presentamos igual cantidad de palabras para todos los niveles ($n=N$), nos queda

$$m = x_k + \frac{d}{2} - \frac{d}{N} \sum_{j=2}^{k-1} c_j$$

Siendo la sumatoria la cantidad total de palabras correctamente repetidas (ac), este valor medio es el UC buscado:

$$UC = x_k + \frac{d}{2} - \frac{d}{N} ac$$

Por último, podemos hacer que la distancia entre los niveles de estímulo coincida con la cantidad de estímulos presentados por nivel, para llegar a la fórmula conocida, de Tillman y Olsen:

$$UC(dBHL) = x_k + \frac{d}{2} - ac$$

Donde x_k es el valor inicial del primer grupo de estímulos, d la diferencia en dB entre cada serie descendente de estímulos y ac la cantidad de aciertos totales (palabras repetidas correctamente desde la primera serie hasta que el sujeto no responde ninguna).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Lic. Sabrina Alonso, de la Mutualidad Argentina de Hipoacúsicos, por su colaboración en el presente trabajo.

Los autores no manifiestan conflictos de interés.

Bibliografía

1. IRAM 4028-3. Logaudiometría, Métodos básicos de prueba; 1996.
2. Katz J, Chasin M, English K, Hood L, Tillery T. Handbook of Clinical Audiology, Philadelphia, 7ma. Edición. USA. Editorial Wolters Kluwer Health; 2015.

3. Tato JM, Lorente Sanjurjo F, Bello J, Tato JM (h). Características acústicas de nuestro idioma. Revista de la Federación Argentina de Sociedades de Otorrinolaringología. 2004; 1948-67.
4. Berlin C Wexler K, Jerger J, Halperin H, Smith S. Superior ultra-audiometric hearing: a new type of hearing loss which correlates highly with unusually good speech in the "profoundly deaf". Archives of Otolaryngology. 1978; 86, 111-116.
5. Ventry I M. Pure tone-spondee threshold relationship in functional hearing loss. Journal of Speech and Hearing Disorders. 1976; 30, 377-386.
6. Roesner R. Moderate-to-severe hearing loss with an island of normal hearing. Ear and Hearing. 1982; 3, 284-286.
7. Working Group on Speech Understanding and Aging. Committee on Hearing, Bioacoustics, and Biomechanics, Commission on Behavioral and Social Sciences and Education, National Research Council. Speech Understanding and aging. Journal of the Acoustical Society of America. 1988; 83, 859-895.
8. Tillman TW, Olsen WO. Speech audiometry. En: Jerger J, editor, Modern Developments in Audiology. 2da ed. New York: Academic; 1973
9. ANSI S3.6-2004, American National Standard Specifications for Audiometers; 2004.
10. ISO 8253-3, Acoustics: Audiometric Test Methods- Part 3: Speech audiometry; 2012.
11. Sala LP Una nueva mirada sobre las listas de palabras fonéticamente balanceadas. 2012. Universidad FASTA. [Consulta: 21 de octubre de 2020]. Disponible en: <http://redi.ufasta.edu.ar:8080/xmlui/handle/123456789/185>
12. Finney DJ. Statistical Methods in Biological Assay. Londres: Charley Griffing Company; 1952.
13. Spearman C. The Method of the right and wrong cases (Constant Stimuli) without the Gauss Formulae. J. of Psych. 1908 11. Part 3
14. Wilson RH, Morgan DE, Dirks DD. A proposed SRT procedure and its statistical precedent, 1972. [Consulta: 15 de septiembre de 2020]. Disponible en: http://pubs.asha.org/ss/rights_and_permissions.aspx.