



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

**INSTITUTO DE FISIOLÓGÍA**

**“PERCEPCIÓN DEL RÍTMO DE PULSOS BINAURALES  
MEDIANTE UN METRÓNOMO BINAURAL INTERNO”**

**TESIS**

Que para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS FISIOLÓGICAS**

Presenta:

**L.N.C PAULINA MARTÍNEZ PLATAS**

Director de Tesis

Dr. Elías Manjarrez López

Codirectora de Tesis

Dra. Amira Flores Urbina

22 de marzo de 2024

<b>Índice</b>	<b>Pág.</b>
<b>Resumen</b>	<b>2</b>
<b>Introducción</b>	<b>4</b>
<b>Antecedentes específicos</b>	<b>15</b>
<b>Planteamiento del problema</b>	<b>22</b>
<b>Justificación</b>	<b>23</b>
<b>Hipótesis</b>	<b>23</b>
<b>Objetivo general</b>	<b>23</b>
<b>Objetivos específicos</b>	<b>23</b>
<b>Métodos</b>	<b>25</b>
<b>Resultados</b>	<b>31</b>
<b>Discusión</b>	<b>43</b>
<b>Conclusión</b>	<b>51</b>
<b>Anexos</b>	<b>52</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>55</b>

## **Resumen.**

Un ritmo de pulsos binaurales es una ilusión auditiva percibida internamente a una frecuencia (F3) cuando dos ondas sinusoidales externas de tono puro de diferentes frecuencias (F1 y F2) se presentan a cada uno de los oídos. Dicha frecuencia F3 del ritmo de pulsos binaurales no existe físicamente de manera externa, sino que es creada por los circuitos neuronales del cerebro que median la integración auditiva binaural. A dicho ritmo generado binauralmente, le denominamos “metrónomo binaural interno”.

Aunque se conoce que el humano es capaz de percibir pulsos binaurales ilusorios inexistentes en las señales auditivas externas, no hay un estudio sistemático de la percepción del ritmo de pulsos binaurales. Por consiguiente, el objetivo de esta tesis fue usar el metrónomo binaural interno para caracterizar la eficiencia con la que los sujetos sanos pueden percibir el ritmo de pulsos binaurales inexistentes en las señales auditivas externas. Dicha eficiencia en la percepción del ritmo binaural, la calculamos mediante el coeficiente de correlación de los intervalos del ritmo esperado, versus los intervalos generados por los participantes mediante el “tapping test”. En esta prueba, los sujetos presionan una tecla para contabilizar el ritmo que escuchan. De tal manera que un coeficiente de correlación cercano a 1 indica una gran eficiencia en la percepción del ritmo de pulsos binaurales.

Los experimentos se llevaron a cabo en 70 voluntarios sanos. Encontramos que no todos pueden percibir el ritmo de pulsos binaurales de manera eficiente la primera vez que se les presentaron, aun cuando si pueden percibir el ritmo monoaural en el oído izquierdo o derecho de manera separada. Por lo que los clasificamos en dos subgrupos: 53 “normales” y 17 “atípicos”. En una segunda etapa, repetimos los experimentos durante 5 días consecutivos, con el fin de examinar si los 17 sujetos atípicos podrían mejorar en su eficiencia de percepción del ritmo binaural. Realizamos curvas de aprendizaje y encontramos que 14/17 participantes aprendieron a percibir los ritmos binaurales después del segundo día

de la prueba; sin embargo, 2/17 de los participantes solo pudieron obtener una mejoría al quinto día, y un sujeto no pudo aprender la prueba.

Concluimos que fue posible cuantificar el ritmo binaural mediante un metrónomo binaural interno, y que algunos sujetos no pueden percibir el ritmo binaural de manera eficiente la primera vez; pero pueden aprender a percibirlo. Ello sugiere que la percepción de ritmos binaurales está mediada por circuitos neuronales que exhiben plasticidad. Por lo que, en trabajos futuros, sería relevante examinar la eficiencia en la percepción de ritmos binaurales mediante el metrónomo binaural interno en pacientes con disfunciones de la percepción sensorial.

## Introducción

### Antecedentes generales

#### *El sistema auditivo*

El sistema auditivo es el conjunto de estructuras biológicas cuya función es la localización, captación y el análisis de los sonidos para integrar y comparar estos datos con otros órganos sensoriales para poder analizar el ambiente que nos rodea de una manera general.<sup>1</sup>

La audición humana comienza cuando el órgano receptor del oído interno transforma la energía sonora en señales eléctricas y las envía al cerebro. En este órgano existen amplificadores celulares que aumentan la sensibilidad auditiva y permite distinguir entre los diferentes componentes de la frecuencia.<sup>1</sup>

Las células receptoras que llevan a cabo la transformación auditiva se les conoce como células ciliadas, las cuales pueden medir movimientos de grandes dimensiones, transformar estímulos a señales eléctricas y también son responsables del sentido del equilibrio.<sup>1</sup>

La descripción anatómica y fisiológica del sistema auditivo humano evolucionado conforme se ha ampliado la cantidad de técnicas experimentales que posibilitan la ampliación de los conocimientos sobre el receptor auditivo y sus elementos sensoriales. Tradicionalmente, el sistema auditivo humano se ha dividido en 2 partes bien caracterizadas tanto morfológicamente como funcionalmente.<sup>2</sup>

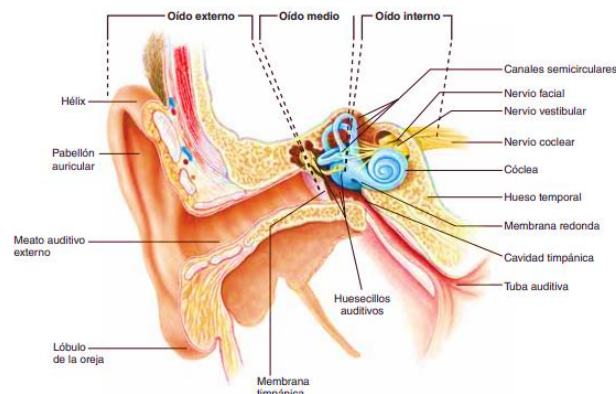


Figura 1. El sistema auditivo periférico: oído interno, medio y externo (Tomada de: Stuart Ira Fox. Fisiología Sensorial. En: Fisiología Humana. 13va edición. McGraw-Hill 2013, p. 282.)<sup>3</sup>

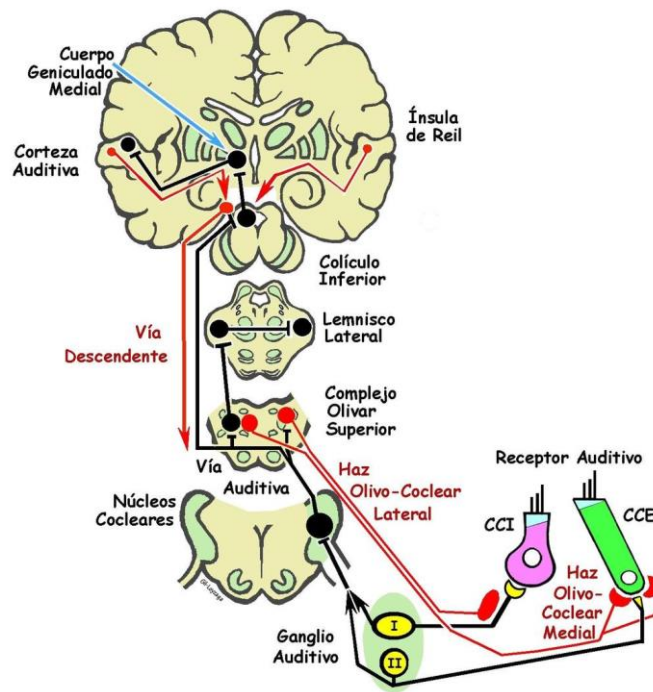


Figura 2. Esquema de la Vía Auditiva. (Pablo E. Gil-Loyzaga).

Para oír, nuestros oídos deben captar energía mecánica, transmitirla al órgano receptor del oído y transformarla en señales eléctricas que el sistema nervioso pueda analizar. Estas tres situaciones constituyen las funciones del oído externo, el oído medio y el oído interno, respectivamente.

La capacidad del oído externo para localizar sonidos en el espacio no es uniforme; la superficie arrugada de la oreja recolecta mejor los sonidos de distintas frecuencias provenientes de distintas posiciones. El conducto auditivo externo acaba en el tímpano, un diafragma fino que mide alrededor de 9 mm de diámetro.

El oído medio es una cámara ocupada por aire que se abre a la faringe, a la que está conectado por la trompa de Eustaquio. La energía mecánica avanza a través del oído medio gracias al movimiento de tres huesecillos: el martillo, el yunque y el estribo. Estos tres huesecillos están unidos mediante ligamentos; la

base del martillo está fijada al tímpano, le sigue el yunque y al final el estribo. Este último cuenta con una terminación aplanada la cual se inserta en una apertura del hueso, la ventana oval, que protege al caracol.

En el oído interno encontramos el caracol (o cóclea) (Fig. 3), consiste en menos de tres vueltas que van disminuyendo su diámetro de manera progresiva, situadas dentro de una estructura similar a la concha de un caracol. Lo cubre una capa fina de hueso laminar. Dentro del caracol encontramos tres estructuras llenas de líquido: la escala vestibular, la escala timpánica y la escala media. El líquido en estas cavidades tiene las siguientes funciones: a) Facilitar la transferencia a las células sensoriales de la onda sonora; b) establecer un ambiente rico en potasio; c) participan en el transporte de nutrientes y gases.<sup>4</sup>

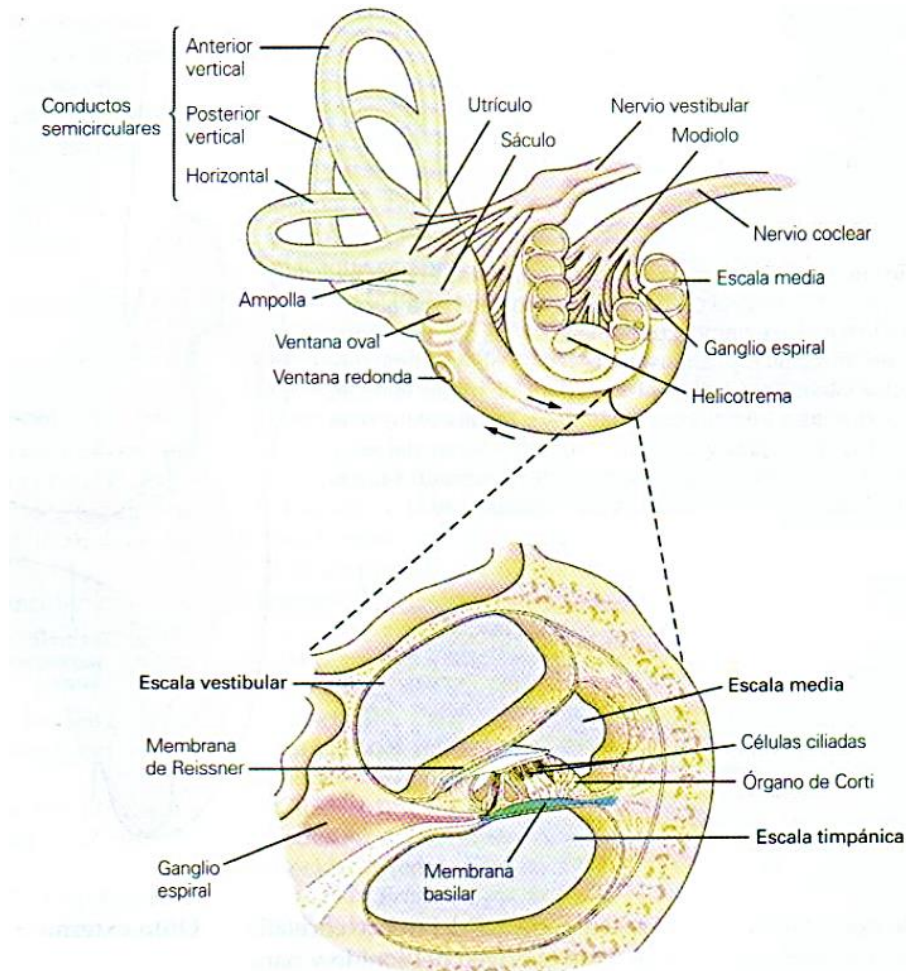


Figura 3. La cóclea. (Tomada de: Erick R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell. Audición. En: Principios de Neurociencia. 5ta edición. McGraw-Hill 2011, p. 576.)<sup>1</sup>

### ***Mecánica coclear.***

La mecánica coclear involucra la capacidad del ligamento anular de Rudinger para permitir el desplazamiento de la platina del estribo dentro y fuera de la ventana oval, generando movimientos de pistón. Estos movimientos, a su vez, generan una onda líquida en la perilinfa de la rampa vestibular. A pesar de la delicadeza y facilidad de movimiento de la membrana vestibular de Reissner, no obstaculiza el paso de la onda sonora de la rampa vestibular a la rampa media, tratándose efectivamente como una única rampa en términos de transmisión de sonido.<sup>5</sup>

La onda líquida, originada por los movimientos del estribo, se desplaza a lo largo del conjunto de la rampa vestibular y el conducto coclear, estimulando la vibración de la membrana basilar. Esta vibración sigue un patrón ondulatorio sincronizado con la frecuencia del estímulo sonoro. La ondulación de la membrana basilar se desplaza desde la ventana oval hacia el helicotrema, y presenta características distintivas: la amplitud de la onda aumenta gradualmente hasta alcanzar un punto máximo, después de lo cual disminuye rápidamente hasta llegar a una amplitud de cero, desapareciendo el movimiento ondulatorio.<sup>5</sup>

El compartimiento superior corresponde a la escala vestibular, la base de esta cámara corresponde a la ventana oval, sellada por el pie del estribo. La escala timpánica se encuentra en la cámara inferior. La escala media se mantiene unida por un par de tabiques elásticos. La membrana basilar, que se para a la escala media de la timpánica, es una estructura compleja en la que tiene lugar la transformación auditiva.<sup>1</sup>

El órgano de Corti (Fig 4) conforma el receptor auditivo y ésta situado sobre la membrana basilar. En él se distinguen dos tipos de células: células sensoriales (ciliadas, internas y externas) y células de soporte (de Deiters e interdentes). El órgano de Corti está cubierto por la membrana tectoria y ésta participa en la activación de las células ciliadas.<sup>6</sup>

Cuando la membrana basilar vibra como respuesta a un sonido, arrastra consigo al órgano de Corti y a la membrana que lo cubre. Sus desplazamientos

oscilatorios de atrás adelante entre la superficie superior del órgano de Corti y la inferior de la membrana tectoria. Los haces de cilios sufren también desplazamientos y esto sirve de estímulo adecuado que excita a cada célula ciliada del caracol y también es estímulo para las células ciliadas de los órganos vestibulares. Este desplazamiento se traduce en un potencial receptor.<sup>6</sup>

La sensibilidad direccional de las células, el desplazamiento hacia arriba de la membrana basilar causa la despolarización de las células, mientras que el movimiento hacia abajo provoca la hiperpolarización. Como consecuencia de esta disposición de la membrana basilar y las células ciliadas, cada una es más sensible a la estimulación de una frecuencia específica.<sup>1</sup>

En resumen, cualquier estímulo sonoro induce un movimiento ondulatorio en la membrana basilar, y el punto de máxima amplitud de la onda varía en la cóclea según la frecuencia del sonido. En sonidos agudos, la onda se agota rápidamente, con el máximo desplazamiento cerca de la ventana oval, mientras que, en sonidos graves, la onda viaja más lejos, y su amplitud máxima se localiza cerca del ápex, próximo al helicotrema.

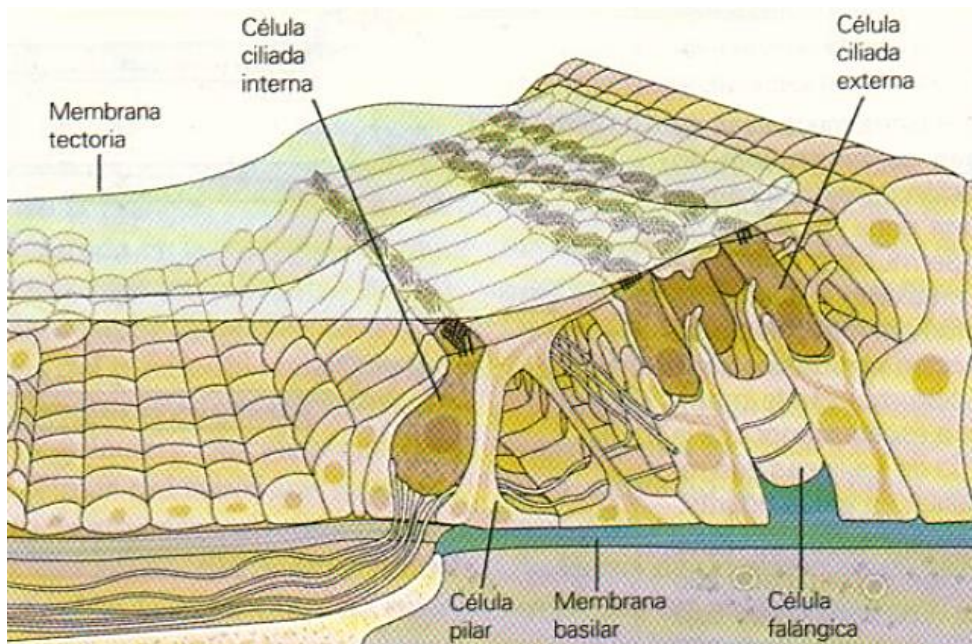


Figura 4. Órgano de Corti. (Tomada de: Erick R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell. Audición. En: Principios de Neurociencia. 5ta edición. McGraw-Hill 2011, p. 580)<sup>4</sup>

## ***Procesamiento nervioso de la información auditiva***

### *Vía auditiva ascendente*

La vía auditiva ascendente empieza en las neuronas aferentes del ganglio espiral, responsables de la inervación de los complementos sensoriales del órgano de Corti. Cada una de las células sensoriales reciben una inervación especial de las neuronas del ganglio espiral. Por eso, las células ciliadas reciben contactos dendríticos de las neuronas aferentes de tipo I. La gran mayoría de los axones aferentes acaba sobre las células ciliadas internas, cada una constituye la terminación única de 10 axones. Los axones eferentes inervan sobre todo las células ciliadas externas y de manera directa. Por otro lado, la inervación eferente de las células ciliadas internas es escasa.<sup>1</sup>

En teoría, la vía auditiva (Fig 2) se origina en la primera neurona (aferente de tipo I) que está ubicada en el ganglio espiral de la cóclea. A partir de esta neurona el mensaje pasa al sistema nervioso central y camina por la vía auditiva hasta llegar a la corteza del lóbulo temporal. Cada uno de los niveles de la vía mantiene un patrón de distribución de las frecuencias y, por la otra, realiza los procesos imprescindibles para el análisis de tonos puros o de sonidos complejos. En la vía auditiva se realizan, además, otros análisis que permiten la localización espacial y la audición binaural, entre otros.<sup>7</sup>

Los núcleos cocleares son el primer paso para la de integración y análisis central del mensaje auditivo. Se encuentran en el límite bulboprotuberancial del tronco cerebral y tienen dos regiones: dorsal (núcleo coclear dorsal, NCD) y ventral (NCV), dividido en: anteroventral (NCAV) y posteroventral (NCPV).<sup>7</sup>

Las fibras de las neuronas del ganglio coclear llegan a los núcleos cocleares por el nervio auditivo, donde cada fibra hace una bifurcación y, a continuación, hacen sinapsis sobre las neuronas que se encuentran junto. Estas bifurcaciones se reparten de manera tonotópica en el NCV.<sup>7</sup>

Algunas de las fibras de los núcleos cocleares se comunican con neuronas del complejo olivar superior (Fig 3). Las neuronas de las olivas lateral y medial

reciben fibras de los NCAV, formando parte en el análisis comparativo binaural que actúa en la localización espacial de la fuente del sonido. Las fibras eferentes del complejo olivar: 1) constituyen el sistema eferente lateral y el medial que van a la cóclea, o 2) se unen formando el lemnisco lateral.<sup>7</sup>

La mayoría de las fibras del lemnisco lateral llegan de manera directa al colículo inferior, el cual también posee una organización de tipo tonotópica. Las neuronas del colículo inferior se encargan de la localización de la fuente de sonido en los ejes horizontal y vertical. Desde el colículo inferior se proyectan fibras al cuerpo y sobre la corteza auditiva.<sup>7</sup>

### ***La corteza auditiva***

Se localiza en la circunvolución temporal superior (áreas 41 y 42 de Brodmann) que se encuentra organizada en dos regiones: primaria (AI) y secundaria (AII).

La AI, relacionada con el análisis frecuencial, está constituida por numerosos campos de neuronas organizados tonotópicamente (A, AI, P y VP) en bandas paralelas, de forma que los agudos se localizan en la región anterior y los graves en la posterior. La AI está organizada en columnas de activación y supresión, cada una de las cuales recibe estímulos de carácter binaural.<sup>7</sup>

Este arreglo de neuronas participa en el análisis frecuencia manteniendo la latencia de los mensajes. También responden a la frecuencia de forma muy precisa y determinada. Las neuronas de proyección de este núcleo se proyectan sobre todo a una de las capas del córtex auditivo primario.<sup>7</sup>

La zona dorsal carece de estructura laminar y de organización tonotópica; sus neuronas no tienen frecuencias características bien definidas y envían proyecciones al córtex auditivo secundario. Muchas de sus neuronas tienen una actividad polimodal, lo que implica que responden a varias estimulaciones sensoriales diferentes.<sup>7</sup>

### ***Vías auditivas descendentes***

Las vías auditivas descendentes mandan información desde la corteza hasta el receptor periférico, pero realizan escala en diversos núcleos. La corteza proyecta sobre el cuerpo geniculado medial y el colículo inferior, como en la vía ascendente. Las neuronas del colículo inferior proyectan, de manera bilateral, a los núcleos periolivares del complejo olivar superior, alrededor del origen del sistema eferente medial, y a los núcleos cocleares.<sup>7</sup>

### ***Complejo olivar superior***

El complejo olivar u oliva superior es un conjunto de núcleos de forma ovalada, parecida a la de una oliva, que se encuentran en la zona inferior del tronco del encéfalo. Estas estructuras son muy importantes para mantener la función auditiva, formando parte de las vías ascendentes y descendentes del sistema auditivo.

La oliva superior medial, uno de los núcleos que se encuentran en el complejo olivar superior y que contiene aproximadamente 15000 neuronas, es la encargada de medir las diferentes intensidades de los sonidos que llegan entre los oídos, siendo su función muy importante para clasificar los sonidos de alta frecuencia. Su función principal es la de detectar las señales de diferencias de tiempo interaurales.<sup>8</sup>

Este núcleo parece idealmente construido para la tarea de procesamiento en la localización binaural del sonido, analizando las diferencias de intensidad y el tiempo interaural con sus características.

El complejo olivar superior juega un papel determinante en este procesamiento debido a que estos núcleos tienen entradas binaurales que codifican diferencias interaurales en intensidad y tiempo de arribo del estímulo acústico. La respuesta diferencial de las neuronas de este complejo (tanto lateral como medial) depende de la integración de las entradas sinápticas excitatorias e inhibitorias, que traen información de lo que sucede en la cóclea.<sup>8</sup>

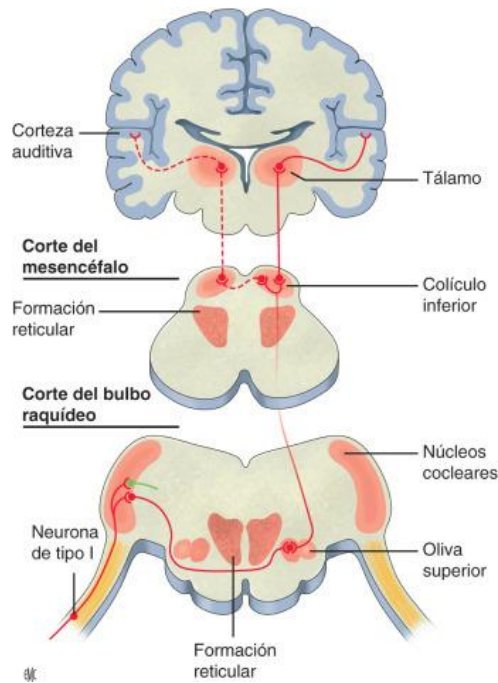


Figura 5. Vía  
Loundon, Sorderas  
- Otorrinolaringología,  
Pages 1-7. En: [https://doi.org/10.1016/S1632-3475\(21\)46021-2](https://doi.org/10.1016/S1632-3475(21)46021-2))<sup>9</sup>

auditiva. Tomada de: N. unilaterales infantiles, EMC Volume 51, Issue 1, 2022,

### ***Oliva superior lateral***

En la oliva superior se describen dos tipos neuronales: las células principales y las células marginales. Las neuronas de la oliva superior lateral, al igual que las de la oliva superior medial, son neuronas binaurales, es decir, reciben información auditiva procedente de ambos oídos. Estas neuronas presentan una respuesta excitadora con el aumento de la actividad cuando se estimula el oído ipsilateral y, en cambio, una respuesta inhibitoria con disminución de la actividad cuando se estimula el oído contralateral.<sup>10</sup>

Estas neuronas están bien sintonizadas y demuestran respuestas concretas a diferencias interaurales de intensidad, las cuales son clave para la localización de sonidos de alta frecuencia. Al igual que ocurre con los núcleos cocleares, los núcleos principales del complejo olivar superior están organizados con neuronas de similar frecuencia característica localizadas espacialmente en un mismo plano.<sup>11</sup>

### ***Colículo inferior***

El colículo inferior (CI) está situado en el techo del mesencéfalo. Lo constituyen dos partes:

Las cortezas dorsal y externa, organizadas en capas de neuronas sin distribución tonotópica precisa. Se ha indicado que están implicadas en el análisis complejo de la información auditiva y en la identificación de sonidos nuevos.

Un núcleo central formado por un importante grupo de neuronas organizadas tonotópicamente. Recibe fibras desde los núcleos cocleares, del complejo olivar superior y del núcleo del lemnisco lateral. La distribución de frecuencias en este núcleo es muy peculiar, en tanto que recibe la información de frecuencias graves del oído ipsilateral y las agudas del contralateral. Este núcleo participa en el análisis frecuencial del sonido, pero también en las diferencias interaurales de intensidad y tiempo.<sup>12</sup>

### ***Sumación espacial***

La excitación de una sola terminal presináptica sobre la superficie de una neurona casi nunca llega a activar la célula. La razón es porque en la cantidad de sustancia transmisora normalmente no supera los 0.5 a 1 mV, en vez de los 10-20 mV necesarios.<sup>13</sup>

Sin embargo, al mismo tiempo suelen estimularse muchas terminales presinápticas. Aunque estas estructuras se encuentran esparcidas por diversas regiones de la neurona, pueden sumarse sus efectos; es decir, agregarse uno a otro hasta que suceda la excitación neuronal. Esto sucede porque antes de un cambio de potencial en cualquier punto aislado del soma provocará una modificación casi igual hacia todas las partes de su interior debido al gran cuerpo de la neurona que presenta una conductividad eléctrica muy alta. Así, cuando el potencial excitatorio

postsináptico (PPSE) llegue a un nivel suficiente, alcanzará el umbral de disparo y producirá un potencial de acción en el segmento inicial del axón.<sup>13</sup>

Este efecto aditivo de los potenciales simultáneos mediante la activación de múltiples terminales situadas en regiones espaciadas se denomina *sumación espacial*.<sup>13</sup>

### ***Sumación temporal***

Cada vez que una terminal presináptica dispara, la sustancia transmisora abre los canales de membrana durante 1ms. Pero la modificación del potencial postsináptico dura hasta 15 ms una vez que los canales ya están cerrados. Por consiguiente, se necesitaría una segunda apertura de estos mismos elementos para incrementar el potencial postsináptico hasta un nivel aún mayor. Así pues, las descargas sucesivas de una sola terminal pueden añadirse unas a otras, como “sumándose”. Este tipo de adición se denomina *sumación temporal*.<sup>13</sup>

## **Antecedentes específicos.**

### ***Sonido***

El sonido, desde un punto de vista físico, consiste en una vibración que se propaga en un determinado medio, constituyendo la onda sonora. La propagación de esta onda necesita un medio físico, sea aire, agua, otros líquidos o incluso a través de medios sólidos.<sup>3</sup>

Estas ondas se caracterizan por su intensidad y frecuencia. La intensidad, o fuerza, guarda relación con la amplitud de las ondas de sonido, y se mide en unidades que se llaman decibeles (dB). La frecuencia se mide en hertzios (Hz), que es la nueva designación para ciclos por segundo (cps). El tono de un sonido tiene relación con su frecuencia –mientras mayor sea la frecuencia, más alto es su tono.<sup>3</sup>

El oído de un ser humano joven puede alcanzar a escuchar un rango de frecuencia de 20 a 20,000 Hz; a pesar de esto, todavía se puede distinguir entre dos tonos que tienen una ligera diferencia de frecuencia. Normalmente los humanos escuchamos el sonido con una combinación de dos oídos, gracias a esto se crea el ritmo monoaural, esto cuando dos tonos de frecuencias cercanas se fusionan antes de llegar a los oídos en lugar de fusionarse dentro del cerebro, como un pulso binaural.<sup>14</sup>

Hay diversas formas en las que las ondas cerebrales cambian en los humanos. Existen diversas técnicas de estimulación como lo son el color, el sonido o la música. Ahora, una de las técnicas emergentes es el ritmo binaural. Este fenómeno muestra que el cerebro escucha la diferencia entre dos tonos que llegan de cada oído, por consiguiente, se necesita que ambos oídos escuchen frecuencias distintas.<sup>14</sup>

Los oídos conforman canales receptores que son independientes uno de otro, no hay interferencias entre ellos. Los sonidos se reciben independientemente por cada oído y crean diferentes efectos en distintas partes dentro del cerebro. Solamente para niveles demasiado elevados, pequeñas partes de energía se transfieren de un oído a otro, gracias a la conducción del sonido a través de los

huesos del cráneo. Comparando los impulsos nerviosos que produce cada sonido recibidos y transformados en el cerebro, se interpretan finalmente todos los aspectos de la onda sonora, conociéndose a este fenómeno como fusión binaural.

### ***Ritmos binaurales***

Los ritmos binaurales son sonidos aparentes, cuya percepción se crea en el cerebro independientemente del estímulo físico. Son sonidos con diferentes frecuencias que llegan por separado y al mismo tiempo a los dos oídos cuando se usan audífonos, lo que provoca que el cerebro recalculé su frecuencia, creando un nuevo ritmo.<sup>15</sup>

El sonido producido por un origen sonoro situado fuera del plano sagital de una persona (el plano imaginario que divide el cuerpo humano en dos mitades aproximadamente simétricas a izquierda y derecha) alcanzará cada uno de sus oídos con distintas intensidades y con un espacio en un lapso temporal. Estas diferencias se conocen como diferencias interaurales.

La diferencia interaural de tiempo es el intervalo que transcurre desde que el frente de la onda es recibido por el oído que esté más cerca a la fuente de sonido hasta que es recibido por el oído más lejano. Esta diferencia de tiempo provoca que la fase con la que la onda sonora llega a cada oído sea distinta. Además de la diferencia interaural de tiempo, la diferencia interaural de intensidad se define como la diferencia en el nivel del sonido de una misma señal recibida en ambos oídos.

Algunas propiedades de la binauralidad son:

- Discriminación de las palabras en ambientes ruidosos: esta característica permite escuchar una señal (por ejemplo, el habla) mientras es encubierta por otra señal de ruido.
- Sumación binaural: esta es la capacidad de integrar a nivel central los sonidos recibidos en cada oído cuando las señales son percibidas simultáneamente (tomando en cuenta al tiempo e intensidad), de tal manera que se mejora la percepción auditiva.

- Localización del sonido: con base en las diferencias de la intensidad y distancia entre la fuente del sonido y los oídos, se puede ubicar la fuente del sonido en el espacio. La localización es más precisa cuando existe la función binaural.
- Efecto de sombra o barrera del cráneo: la cabeza actúa como una barrera acústica, así los sonidos de diferentes fuentes llegan a cada oído con diferencia de tiempo e intensidad.<sup>16</sup>

Fisiológicamente hablando, se piensa que la sensación de los ritmos binaurales tiene origen en el núcleo olivar superior del tronco encefálico, y tienen relación con la capacidad del cerebro para seguir los sonidos del movimiento. La recepción de las frecuencias impuestas al cerebro la realiza el tálamo, que es la estructura que se encarga de recibir y filtrar los estímulos externos.<sup>15</sup>

Una manera más sencilla de explicar los ritmos binaurales y como estos llegan a “crearse” en el cerebro, es mencionar la escala de Shepard y la de Risset. La escala de Shepard consiste en una serie de notas que, al tocarse de una forma cíclica, provocan la sensación de formar una escala siempre ascendente o descendente. La escala de Risset es una versión continua de la de Shepard, o sea, un sonido cuya altura parece aumentar indefinidamente, a pesar de ser cíclico.<sup>17</sup>

Estas escalas podrían interpretarse como una ilusión acústica, pero, existe una aún más simple llamada “fundamental inexistente”. Esta ilusión habla sobre los tonos puros de notas musicales llamados armónicos, cuyas frecuencias son múltiplos de una dada que se llama fundamental y como el timbre de un instrumento está determinado por las intensidades de los estados armónicos. Si se elimina la fundamental, el oído humano sigue percibiendo el sonido evaluado como el timbre original, a pesar de no estar presente en el sonido, la fundamental se puede oír y así obtenemos la fundamental inexistente.<sup>17</sup>

Se han desarrollado numerosos modelos teóricos para describir el fenómeno de percepción sonora binaural en el complejo olivar superior. Se han identificado dos entradas básicas utilizadas en la localización binaural del sonido: la diferencia interaural de fase (DIF) para ondas de baja frecuencia y la diferencia interaural de

nivel (DIN) para ondas de alta frecuencia. Otra propuesta es la teoría “dúplex” de la localización del sonido, que describe que hay dos sistemas separados que operan en la audición binaural: los sistemas de baja frecuencia, que utilizan la DIF que resulta cuando la señal tiene una longitud de onda más grande que la distancia entre los oídos, y los sistemas de alta frecuencia, que operan con la DIN creada por los efectos de “sombra acústica” de la cabeza y el pabellón auricular.<sup>18</sup>

Dejando de lado al DIN, el DIF se representa como la diferencia de tiempo entre las descargas originadas de ambos oídos, por lo que el sistema es básicamente un detector de coincidencias o de correlación cruzada que opera sobre la descarga del cierre de fase para estímulos de baja frecuencia.

Esta habilidad del cierre de fase para las ondas de alta frecuencia no se relaciona con las características de tono de las frecuencias. Sin embargo, las descargas del cierre de fase pueden aportar los estímulos necesarios para la determinación de la DIF hacia frecuencias menores de los 3,000 Hz usados para la localización del sonido por la información binaural.<sup>19</sup>

En 1973, Gerald Oster describió en que rangos de frecuencias uno es capaz de diferenciar los ritmos binaurales. Una frecuencia de pulsación de unos seis Hertz sonaría como un vibrato en la música. Si el intervalo entre frecuencias se reduce, se pueden producir pulsos muy lentos, hasta aproximadamente uno por segundo, pero a esta velocidad los pulsos pueden ser difíciles de percibir. Los ritmos rápidos, de hasta unos 30 hercios, se escuchan como asperezas superpuestas al sonido. Con intervalos aún mayores, los pulsos no se escuchan; los dos tonos se perciben por separado.<sup>19</sup>

Los sonidos binaurales, como ya mencionó anteriormente, se han propuesto como un tipo de estimulación no invasiva enfocada en la generación de potenciales evocados de carácter auditivo que impulsan la sincronización neuronal mediante la exposición a dos sonidos de distinta frecuencia que, escuchándose al mismo tiempo, pueden generar un pulso de frecuencia equivalente a la diferencia entre las dos frecuencias iniciales; provocando lo que en la literatura se ha denominado respuesta de seguimiento de frecuencia (FFR, por sus siglas en inglés), la cual

consiste en la sincronización de áreas cerebrales específicas que se da como resultado de un seguimiento de la actividad ondulatoria del córtex frente a la frecuencia presentada por el pulso antes mencionado.<sup>20</sup>

### ***Vía fisiológica de la estimulación auditiva binaural***

La oliva superior, ubicada caudalmente cerca del núcleo facial en el tegmento de la parte inferior del puente, es mucho más pequeña y menos evidente que la oliva inferior en los seres humanos. Se sitúa al nivel de los bordes superiores de la oliva inferior, cerca del pedúnculo cerebeloso medio, y consta de partes lateral, medial y periolivar. En los humanos, los núcleos olivares superiores medio y lateral son cilíndricos y distintos, ubicados de manera medial, dorsal y ligeramente superior a la oliva principal, mientras que las células periolivares forman una capa indistinta alrededor de ellos, aunque en otras especies se agrupan en núcleos separados.<sup>21</sup>

Funcionalmente, la oliva superior sirve como un punto de relevo entre el núcleo coclear y el colículo inferior. Las proyecciones del núcleo coclear se dirigen directamente al colículo inferior o hacen sinapsis en la oliva superior antes de continuar hacia el colículo inferior. Tanto el colículo como la oliva superior reciben información de los núcleos cocleares bilaterales, permitiendo así la integración de datos de ambos oídos. En la oliva superior, se lleva a cabo la comparación de las entradas de ambos oídos para calcular las diferencias de tiempo, fase, frecuencia e intensidad interaural, transmitiendo luego estos datos al colículo inferior para su procesamiento adicional.<sup>21</sup>

La oliva superior medial procesa predominantemente frecuencias más bajas en comparación con la oliva superior lateral, y ambas componentes están organizadas tonotópicamente. También presentan un segundo eje que representa la magnitud de la distancia interaural. Para una frecuencia dada, los axones ipsilaterales y contralaterales corren en direcciones opuestas, estimulando diversas neuronas de salida. Estas neuronas de salida solo se activan cuando son estimuladas casi simultáneamente por ambos axones o en fase de coincidencia, según las propiedades de la sinapsis. Este doble eje contribuye a la formación de un mapa mental de sonidos en el espacio.<sup>22</sup>

Dado que los primates, con sus cabezas relativamente grandes, son capaces de distinguir mejor frecuencias más bajas, la oliva superior medial humana es más grande en comparación con la mayoría de los mamíferos. Al igual que la retroalimentación del cerebelo a la oliva inferior, la oliva superior también envía retroalimentación a los núcleos cocleares. Estas proyecciones olivococleares actúan sobre las células ciliadas internas y externas, disminuyendo la estimulación auditiva en rangos de frecuencia específicos. Esta retroalimentación desempeña un papel en la regulación de la atención a estímulos competitivos y puede contribuir a la protección contra la pérdida auditiva inducida por el ruido.<sup>22</sup>

### *¿Qué se ha investigado?*

Como ya se explicó, se puede producir un pulso binaural presentando dos tonos de frecuencia diferente, uno en cada oído. Se ha sugerido en la literatura que dicha estimulación auditiva influye en el comportamiento y la cognición a través del proceso de arrastre cortical. Sin embargo, hasta ahora algunas investigaciones sólo han demostrado la frecuencia que sigue a las respuestas en los rangos de frecuencia tradicionales del EEG de delta, theta y gamma. Además, no se ha buscado proponer una estandarización de las frecuencias a utilizar para generar los ritmos binaurales para obtener resultados normativos del tiempo de reacción de los sujetos de estudio a estos ritmos binaurales.

Vernon et al., realizaron un estudio donde el objetivo fue determinar si sería posible producir cambios claros en el EEG en los rangos de frecuencia alfa o beta. Estos cambios, de ser posibles, tendrían una serie de implicaciones importantes, así como posibles aplicaciones. Un objetivo secundario era rastrear cualquier cambio observable en el EEG a lo largo de la época de arrastre para obtener una idea de la naturaleza de los efectos de arrastre sobre cualquier cambio en un esfuerzo por identificar regímenes de arrastre más efectivos.<sup>23</sup>

En sus resultados y conclusiones, indican que la presentación de pulsos binaurales alfa y beta intercalados de un minuto de duración no logró provocar ninguna evidencia clara de un cambio en el EEG. Esto limita gravemente las

posibles aplicaciones de los pulsos binaurales, dado que una suposición clave es que median el cambio de comportamiento mediante el arrastre de la actividad cortical.

Otro estudio realizado por Nantawachara et al., explica como decidieron investigar las respuestas de la actividad theta a un pulso binaural controlando los factores que afectan la localización, incluida la frecuencia del pulso, la frecuencia del tono de la portadora, la duración de la exposición y el procedimiento de grabación. En este estudio se utilizó la exposición a un pulso binaural de 6 Hz en un tono portador de 250 Hz durante 30 minutos.<sup>24</sup>

La actividad theta fue inducida por un pulso binaural de 6 Hz en un tono portador de 250 Hz. Se produjeron respuestas en todas las regiones corticales; sin embargo, en comparación con el grupo de control, las respuestas inducidas en las regiones frontal y parietal-central fueron dominantes en el hemisferio izquierdo. Además, el patrón de actividad theta fue similar al de un estado meditativo, en el que los ritmos theta generales aumentaron en las regiones frontal y parietal-central y la actividad theta de la línea media frontal apareció en la posición Hz dentro de los 10 minutos de exposición al estímulo.

Varios factores, incluida la frecuencia de los pulsos, la frecuencia elegida, la duración de la exposición y los procedimientos de registro, pueden interferir con el proceso de discusión porque estos factores influyen en las respuestas cerebrales y las diferencias en estos factores no permiten comparaciones claras entre los estudios.

## **Planteamiento del problema**

Es una tarea difícil para el sistema nervioso percibir y procesar señales ambientales complejas resultantes de la combinación de múltiples entradas. Un ejemplo clásico es la percepción del sistema auditivo de tonos de sonido complejos, cuyos mecanismos siguen siendo controvertidos. Recientemente se propuso un mecanismo de percepción del tono basado en la llamada resonancia estocástica fantasma.<sup>25</sup>

Según este paradigma, los niveles de ruido apropiados producen respuestas neuronales subarmónicas óptimas a la combinación de dos o más señales armónicas que carecen de una frecuencia fundamental, pero que son percibidas por el sistema. Lo mismo sucede a nivel del sistema motor cuando hay una estimulación periódica que involucra dos entradas aferentes reflejas monosinápticas Ia, pueden ocurrir contracciones musculares periódicas a frecuencias que en realidad no están presentes en la entrada aferente, incluso aunque estas entradas estén por debajo del umbral. En un estudio de Manjarrez et al.<sup>26</sup> donde proporcionaron una explicación para este fenómeno en la médula espinal del gato, al que denominaron "respuesta motora alucinatoria". Se observaron respuestas motoras fantasma reflejas en frecuencias que no estaban presentes en el estímulo de entrada. Esta fue la primera evidencia experimental de respuestas reflejas fantasmas en el sistema nervioso. Las vías neuronales a nivel del SNC pueden permitir que haya una suma de entradas sensoriales a diferentes frecuencias que permiten generar una frecuencia interna, y debido a eso, nos dimos la tarea de hacerlo en humano con ritmos binaurales para realizar una caracterización psicofísica de la percepción del ritmo de pulsos binaurales mediante un metrónomo binaural interno.

## **Justificación**

Aunque se conoce que el humano es capaz de percibir pulsos binaurales ilusorios inexistentes en las señales auditivas externas, no hay un estudio sistemático con datos normativos de los rangos de frecuencia perceptibles de dicha ilusión en sujetos sanos. Tampoco se han caracterizado las curvas de aprendizaje para la detección de estos pulsos binaurales. Consideramos que los datos normativos que se obtengan serán de utilidad para compararlos con datos que resulten de futuros experimentos en pacientes con diversas patologías neurológicas o psiquiátricas. Por ejemplo, sería deseable realizar experimentos, como los de esta tesis, en pacientes con esquizofrenia, los cuales exhiben preceptos auditivos ilusorios endógenos. Por otro lado, la metodología que se está empleado en dicha tesis será útil para evaluar el grado de integridad de la vía auditiva a nivel central, en los centros de integración sináptica de las entradas binaurales.

## **Hipótesis**

Un metrónomo binaural interno es útil para cuantificar la eficiencia en la percepción del ritmo de pulsos binaurales. Dicha eficiencia es diferente en sujetos sanos, exhibiendo una plasticidad, de manera que el aprendizaje puede mejorarla.

## **Objetivo General.**

Obtener datos normativos de la eficiencia en la percepción del ritmo de pulsos binaurales inexistentes en las señales auditivas externas con un metrónomo auditivo interno en sujetos sanos.

## **Objetivos Específicos.**

Objetivo 1.- Diseñar un programa de Matlab que se pueda combinar con un programa de internet de generación de pulsos binaurales.

Objetivo 2.- Examinar la eficiencia en la percepción del ritmo de pulsos binaurales y que los participantes puedan seguir con la activación de una tecla (respuesta psicofísica).

Objetivo 3.- Elaborar gráficas que evalúen el aprendizaje en la detección psicofísica del ritmo de pulsos binaurales.

## Material y Métodos

### *Estrategia de trabajo*

Se realizó un estudio cuantitativo, transversal, experimental y controlado con un grupo mixto de setenta sujetos que fueron sometidos a pruebas auditivas para obtener datos normativos de la percepción de pulsos binaurales inexistentes en las señales auditivas externas con un metrónomo auditivo interno.

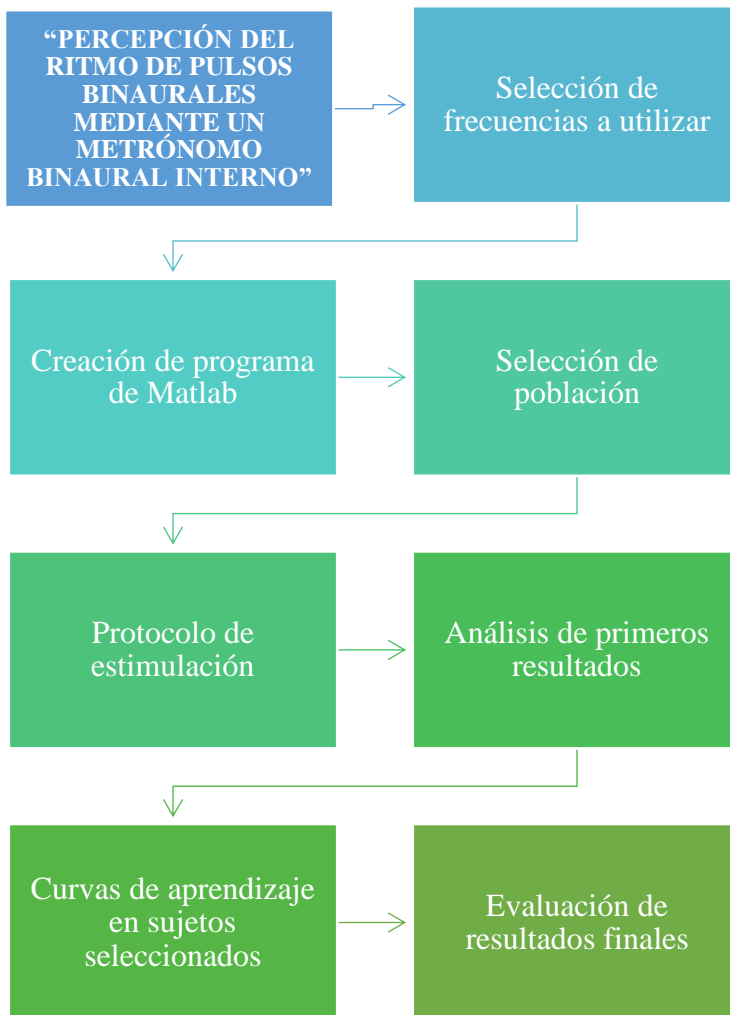


Figura 6. Diagrama de estrategia de trabajo. Elaboración propia.

### ***Diseño y Tipo de Muestreo***

Diseño no probabilístico, muestreo por conveniencia de rango de edad de 20 a 30 años. Se decidió usar este tipo de diseño y muestreo porque los sujetos de estudio fueron voluntarios seleccionados al aceptar la invitación a participar.

### ***Selección y Tamaño de la Muestra Población***

La población para la investigación está constituida por participantes jóvenes entre 20 y 30 años. No se considerará incidencia en la preferencia de género.

### ***Muestra***

Para efectos de la recolección de la información se tomará una muestra de aquellos adultos jóvenes que cumplan con los criterios que se mencionan a continuación.

### ***Criterios de Selección de la Muestra***

#### *Inclusión*

Personas de ambos sexos, con una edad comprendida entre los 20 y 30 años, sanos que tengan acceso a internet y cuenten con una computadora y/o teléfono inteligente, audífonos y que puedan descargar el programa Matlab.

#### *Exclusión*

Personas de ambos sexos que no que no entren en el rango de edad, que reporten alguna enfermedad neurológica diagnosticada previo al experimento, que no tengan acceso a internet, computadora y/o teléfono inteligente, audífonos y el permiso para descargar el programa Matlab.

#### *Eliminación*

Serán eliminadas de la muestra aquellas personas que presenten o manifiesten circunstancias que les imposibilite participar en los experimentos, determinado número de cancelaciones para las reuniones de los experimentos o que deseen salirse del estudio.

## **Variables**

Para presentar a los sujetos del estudio, se realizó como variables:

- Cantidad de hombres: 27
- Cantidad de mujeres: 43
- Rango y media de las edades: Rango (20 a 30 años) Media: 22 años.
- Demográficas:

Solteros	Casados	Licenciatura	Posgrado
69	1	68	2

- Estatus neurológico
- Consumo de fármacos

Para cada sujeto se llenó una hoja de datos recolectando su nombre completo, edad, sexo, correo electrónico y se realizó un cuestionario sobre antecedentes neurológicos de relevancia (anexos).

## **Protocolo de estimulación**

La estimulación binaural consistió en aplicar en el oído izquierdo una frecuencia base de 100 Hz y en el oído derecho una frecuencia entre 100.7 Hz a 102.5 Hz. La selección del orden de las frecuencias en el oído derecho fue aleatoria, sorteando cada frecuencia dentro del intervalo seleccionado y dejando siempre la frecuencia base en el oído izquierdo. De esta manera, los voluntarios podían escuchar un ritmo de pulso binaural de 0.7 Hz a 2.5 Hz; es decir, un ritmo con intervalos de 1.4 segundos a 0.4 segundos.

Hz	dB
<b>100</b>	20.00
<b>100.7</b>	20.03
<b>100.9</b>	20.04
<b>101.1</b>	20.05

<b>101.3</b>	20.06
<b>101.5</b>	20.06
<b>101.7</b>	20.07
<b>101.9</b>	20.08
<b>102.1</b>	20.09
<b>102.3</b>	20.10
<b>102.5</b>	20.11

Tabla 3. Tabla de valores de frecuencias a usar en Hertz (Hz) y en decibeles (dB). Elaboración propia.

Para cuantificar la frecuencia binaural se creó un programa en MATLAB llamado “botón”, ya que éste es el que ayudó a cuantificar la frecuencia binaural en cada sujeto. Se le explicó a cada participante que iba a escuchar y que tenía que hacer cada vez que escuchara la frecuencia binaural, esto siendo apretar la tecla “Enter” del teclado. De esta manera, los voluntarios podían generar una secuencia de intervalos de tiempo que indican la frecuencia del ritmo binaural percibido.

El programa está hecho para eliminar los primeros seis clics, quedando así con veinte datos para cada frecuencia. Es decir, 20 ensayos (“trials”) para cada ritmo binaural presentado, que fueron 10. Este programa se aplicó con ayuda de MATLAB en cada sujeto, guardando así los doscientos datos generados por cada uno. Se recolectaron un total de catorce mil datos de los setenta sujetos. Una vez recolectados los datos se procedió a la creación de base de datos, estadística y análisis de los primeros resultados.

Para este análisis se utilizó el software SigmaPlot 11 en el cual se realizaron 70 archivos con los datos de cada sujeto. En las columnas de la hoja de trabajo se anotaron los siguientes datos:

- Frecuencia base en el oído izquierdo (100 Hz)
- Intervalo de frecuencias del oído derecho 100.7-102.5 (Hz) (solo se selecciona una frecuencia)

- Diferencia de cada frecuencia en comparación con la frecuencia base (Hz)
- Tiempo estimado (s)
- Tiempo de respuesta (s)

El tiempo estimado (s) se refiere a la respuesta ideal que debería tener cada sujeto y el tiempo de respuesta (s) es lo que se recolectó de la respuesta en el teclado dada por cada sujeto. Para la creación de los gráficos se utilizó un gráfico de dispersión simple por cada sujeto, en el cual el eje X es el tiempo estimado (s) y el eje Y el tiempo de respuesta (s). Cada participante tiene un gráfico de dispersión donde se pueden leer los primeros resultados y la estadística de estos, tomando en cuenta la media, la mediana, la desviación y el error estándar.

Posteriormente, se calculó la eficiencia en la percepción del ritmo binaural mediante el coeficiente de correlación de la regresión lineal entre los datos del tiempo estimado y el tiempo de respuesta.

Una vez realizados los gráficos, se exportaron a formato TIF y se separaron tanto los archivos de SigmaPlot como los archivos TIF en dos carpetas, dividiendo a los sujetos con resultados normales y a los sujetos con resultados atípicos. Una vez hecha la división, se realizó un archivo nuevo en SigmaPlot donde se colocaron todos los datos de los sujetos con resultados normales para tener una base global, lo mismo se realizó con los sujetos de resultados atípicos.

### *Curvas de aprendizaje*

Para la elaboración de las curvas de aprendizaje se tomaron como criterio los valores de las regresiones lineales de los sujetos clasificados como atípicos que estuvieran debajo de 0.69. Así se hizo una clasificación, contando con 17 sujetos atípicos. Se les realizó un total de 5 curvas de aprendizaje en diferentes fechas a cada uno para obtener nuevos resultados y comprender que es lo que falló en la primera prueba.

Se les explicó de manera diferente lo que tenían que realizar en estas siguientes pruebas para descartar que las instrucciones fueran el problema por el cual las regresiones lineales dieran valores bajos.

Una vez realizadas las 85 curvas de aprendizaje en los 17 sujetos, se prosiguió a realizar las gráficas globales para los tres grupos (normales, atípicos y curvas de aprendizaje) en Sigma Plot.

## **Resultados**

En esta sección se presentan los resultados del análisis de los datos obtenidos en la experimentación. Estos resultados muestran que la muestra llegó a estar dividida casi por mitad respecto a los diferentes valores que se obtuvieron, clasificando a los sujetos en dos grupos: “normales” y “atípicos”. Se destaca principalmente a un subgrupo en los sujetos “atípicos” los cuales obtuvieron valores fuera de rango y como se les aplicó diferentes veces la prueba de los ritmos binaurales para obtener más datos al momento de la comparación de estos.

### ***Pruebas y valoraciones iniciales***

Como se indicó en apartados anteriores, los sujetos de esta experimentación fueron sometidos a pruebas auditivas para obtener datos normativos de la percepción de pulsos binaurales inexistentes en las señales auditivas externas con un metrónomo auditivo interno. Se reclutaron un total de 70 sujetos de estudio que cumplían con los criterios de inclusión y se les sometió a una primera prueba auditiva con ritmos binaurales.

### ***Resultados globales***

En la Figura 7 se muestra el comportamiento de los promedios globales para los 70 participantes por cada par de frecuencias la primera vez que se realizó la prueba auditiva ( $r^2 = 0.98$ ).

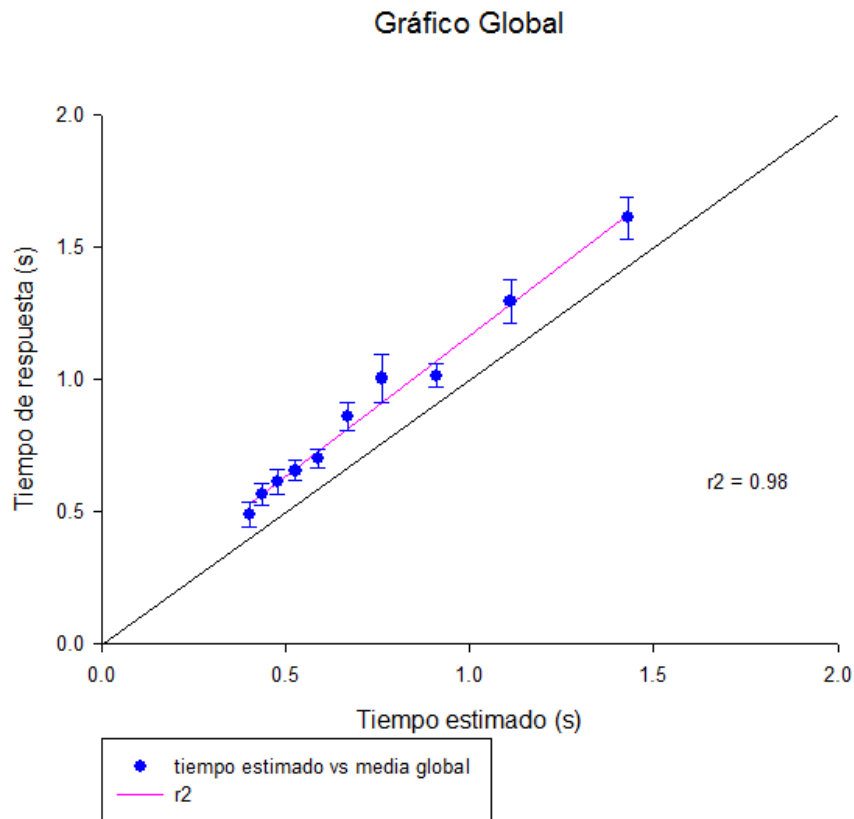


Figura 7. Gráfico global de promedios típicos y atípicos. Los puntos azules representan el lugar donde se encuentra cada valor y su relación con el eje X (Tiempo estimado) y el eje Y (Tiempo de respuesta). R2= regresión lineal.

**Resultados del primer grupo: “Normales”.**

En la Figura 8, se puede apreciar el comportamiento de los promedios de los tiempos de respuesta de los sujetos con resultados considerados como típicos (“normales”) la primera vez que se realizó la prueba binaural auditiva. Para la categorización de estos sujetos en el primer grupo, se tomaron en cuenta las regresiones lineales de cada prueba auditiva que fueran mayores a 0.69.

Una vez realizada la separación de sujetos, se puede observar que la regresión lineal de este gráfico es casi perfecta ( $r^2 = 0.99$ ) ya que estos participantes caen dentro de la normalidad de los tiempos en los que debe aparecer una respuesta.

### Gráfico Sujetos Normales

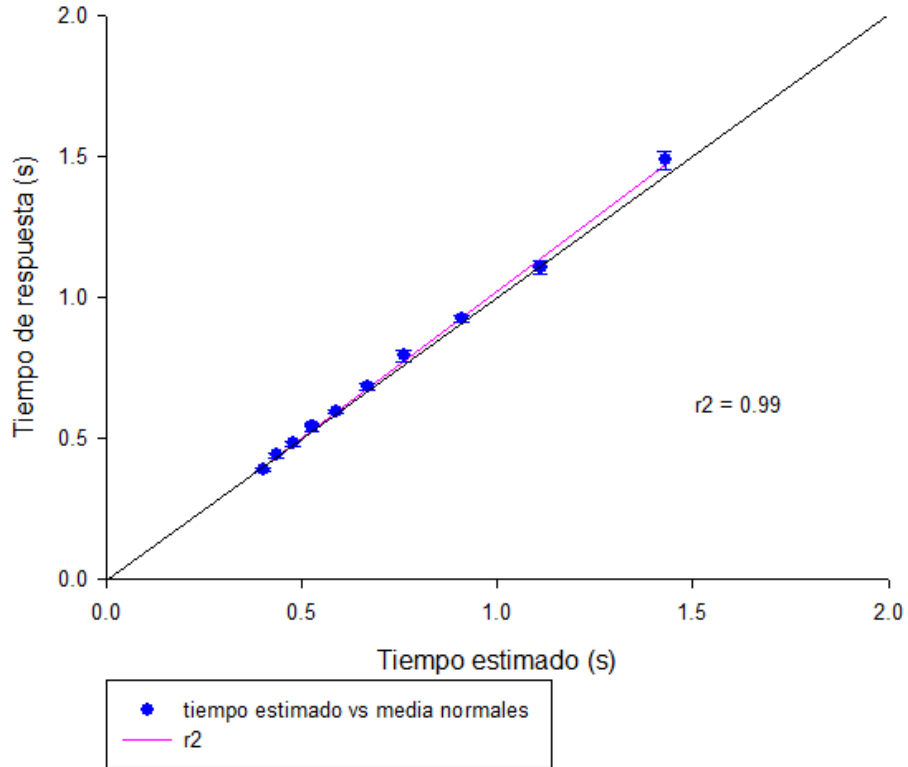


Figura 8. Gráfico de promedios del grupo típico, “sujetos normales”. Los puntos azules representan el lugar donde se encuentra cada valor y su relación con el eje X (Tiempo estimado) y el eje Y (Tiempo de respuesta).  $R^2$ = regresión lineal.

En las Figuras 9 y 10, se muestran ejemplos de gráficas de sujetos de manera individual, para observar con mayor detalle el comportamiento de los tiempos de respuesta frente al tiempo estimado.

Gráfico Sujeto PMP (46)

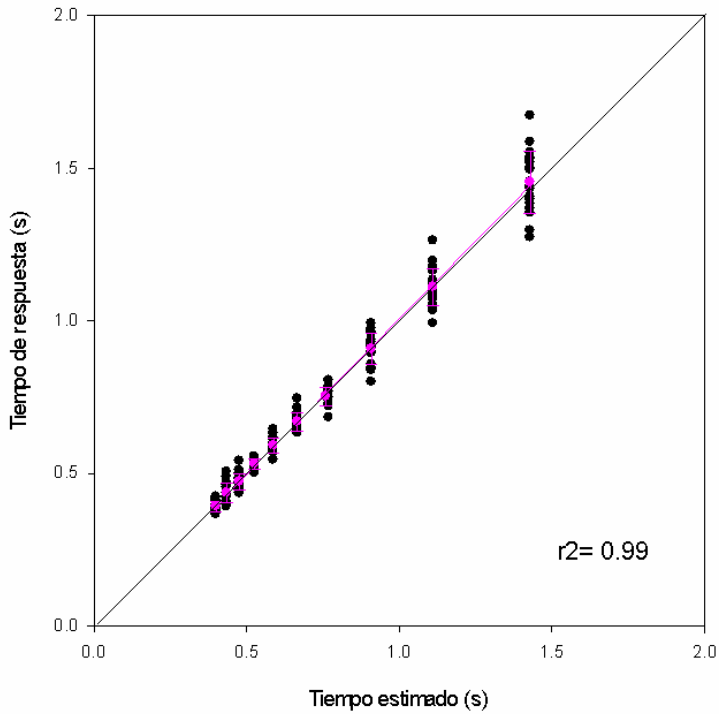


Gráfico sujeto MFCPL (38)

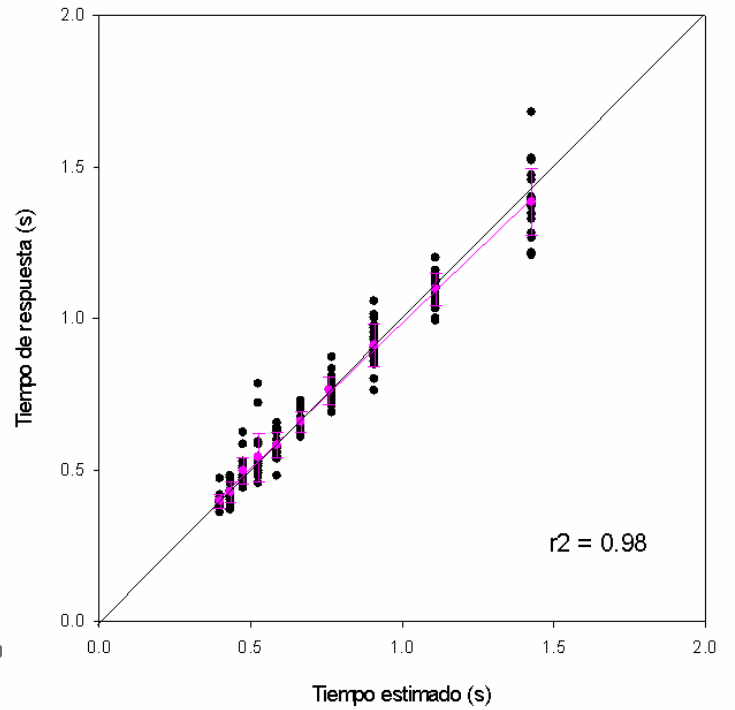


Gráfico sujeto MFMS (39)

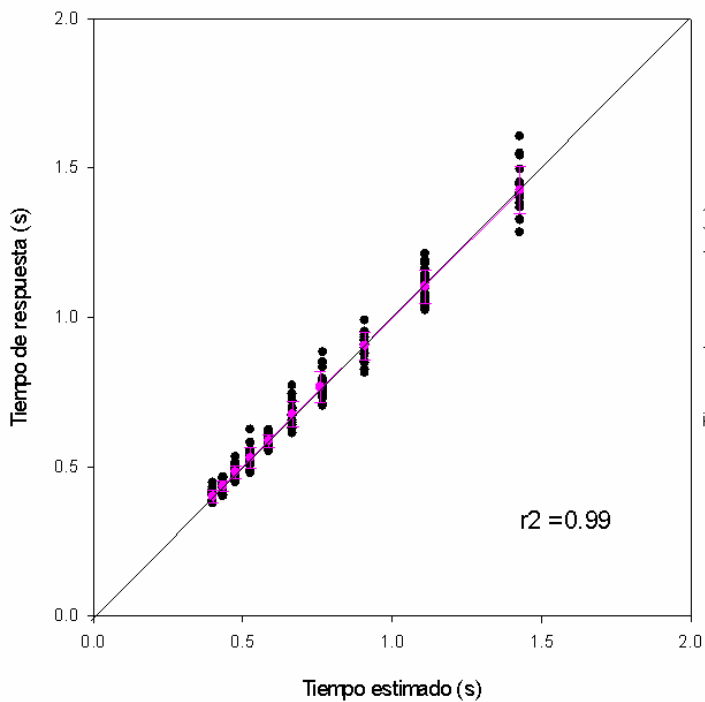


Gráfico Sujeto OPA (44)

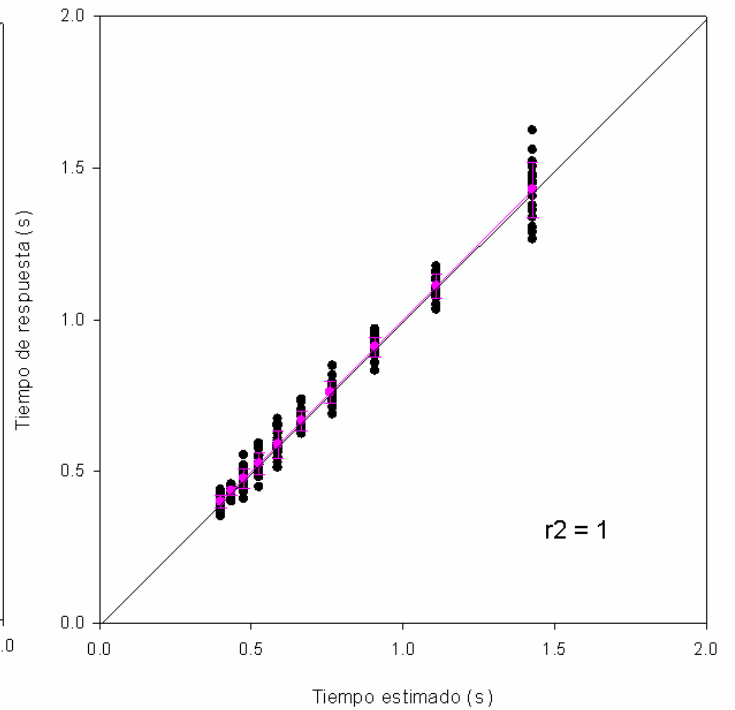


Figura 9. Ejemplos del grupo de sujetos "normales". Los puntos negros representan el lugar donde se encuentra cada valor y su relación con el eje X (Tiempo estimado) y el eje Y (Tiempo de respuesta). R2= regresión lineal.

Gráfico Sujeto SASF (70)

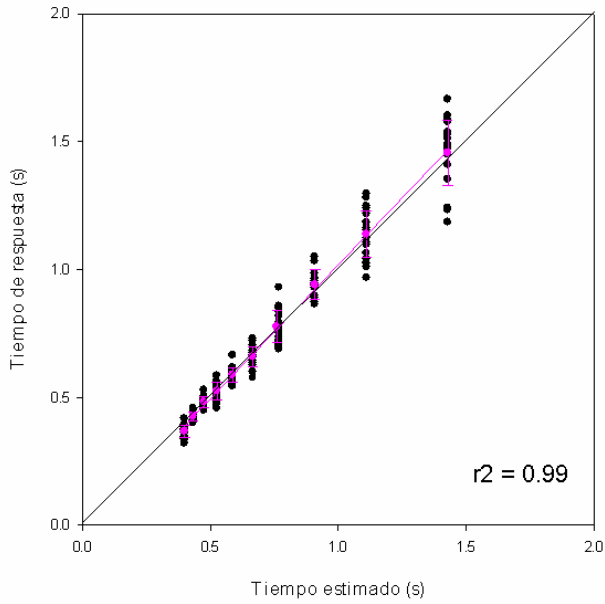


Gráfico Sujeto SCS (65)

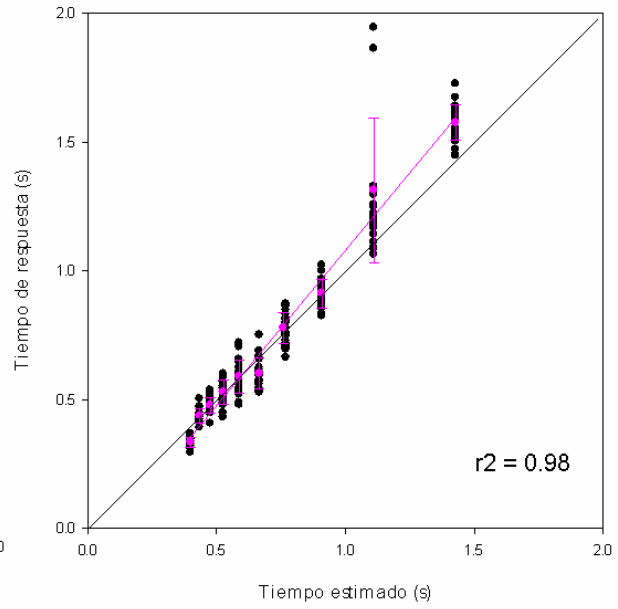


Gráfico Sujeto RMB (50)

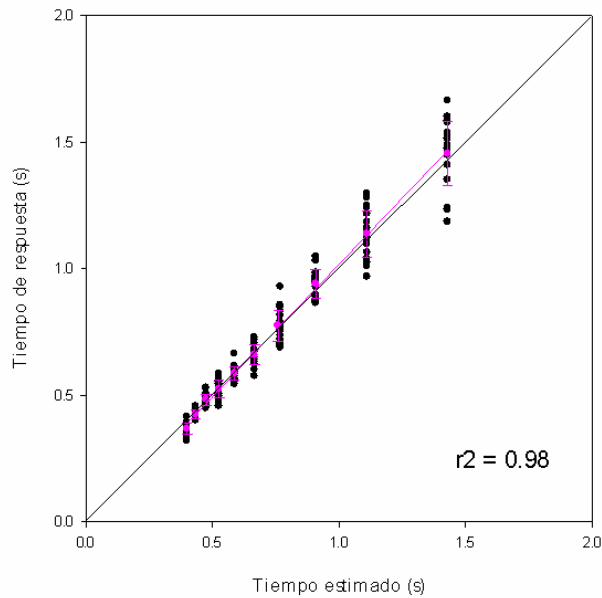


Gráfico sujeto JHM (26)

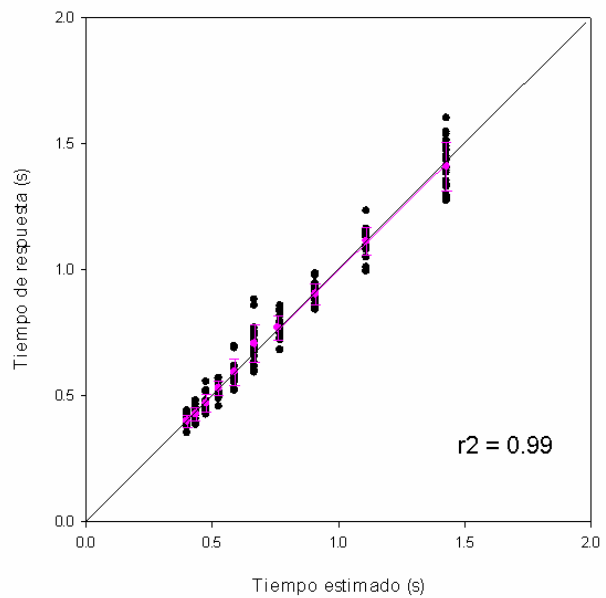


Figura 10. Ejemplos del grupo de sujetos “normales”. Los puntos negros representan el lugar donde se encuentra cada valor y su relación con el eje X (Tiempo estimado) y el eje Y (Tiempo de respuesta). R2= regresión lineal.

### Resultados del segundo grupo: "Atípicos"

En la Figura 11 se puede apreciar, de igual manera, el comportamiento de los promedios de los tiempos de respuesta de los sujetos con resultados considerados como "atípicos". Para la categorización de estos sujetos en el primer grupo, se tomaron en cuenta las regresiones lineales de cada prueba auditiva que fueran menores a 0.69 ya que el intervalo que muestra una correlación de mayor fuerza es entre 0.70 y 1.<sup>27</sup>

Los resultados que se muestran en este gráfico son solo de la primera prueba auditiva, dando como resultados  $r^2 = 0.89$ . Es evidente que hay un desplazamiento hacia arriba de la diagonal, lo cual indica que los sujetos en este caso atípico tienden a percibir más lento el ritmo de los pulsos binaurales.

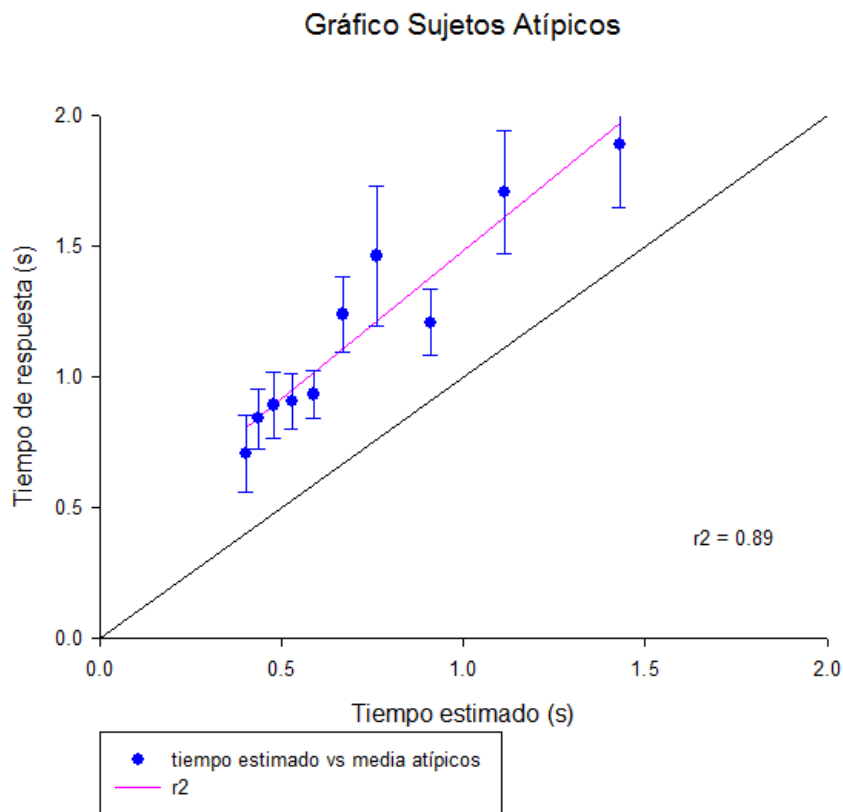


Figura 11. Gráfico del grupo "sujetos atípicos". Los puntos azules representan el lugar donde se encuentra cada valor y su relación con el eje X (Tiempo estimado) y el eje Y (Tiempo de respuesta).  $R^2$ = regresión lineal.

En las Figuras 11 y 13, se muestran gráficas de sujetos de manera individual para observar con mayor detalle el comportamiento de los tiempos de respuesta frente al tiempo estimado en los sujetos con comportamiento atípico.

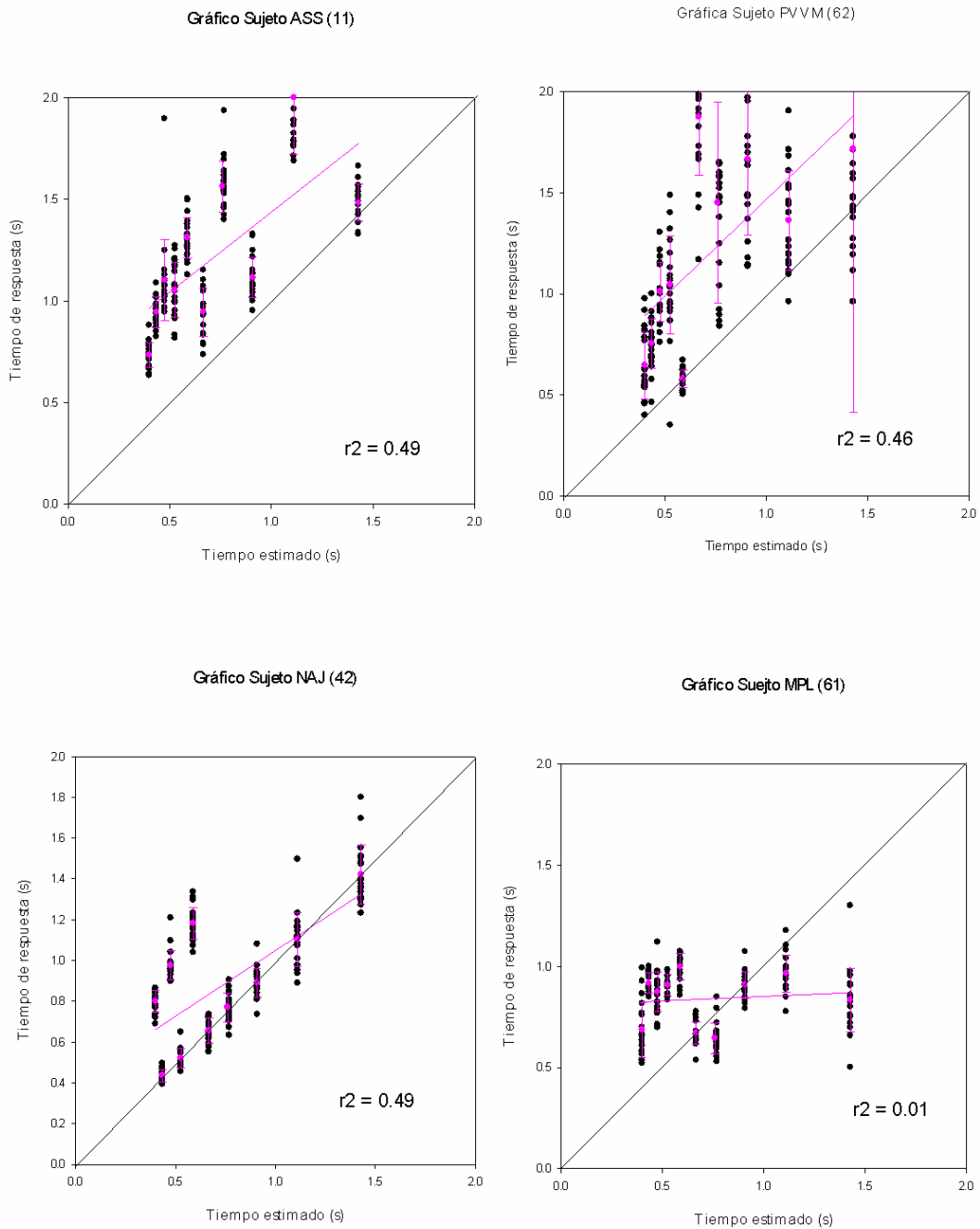


Figura 12. Ejemplos del grupo de sujetos "atípicos". Los puntos negros representan el lugar donde se encuentra cada valor y su relación con el eje X (Tiempo estimado) y el eje Y (Tiempo de respuesta). R2= regresión lineal.

Gráfico Sujeto ARS (21)

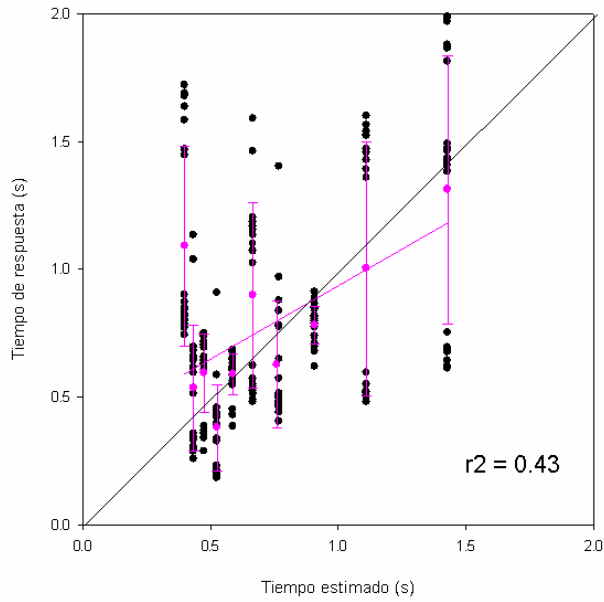


Gráfico sujeto JRGR (28)

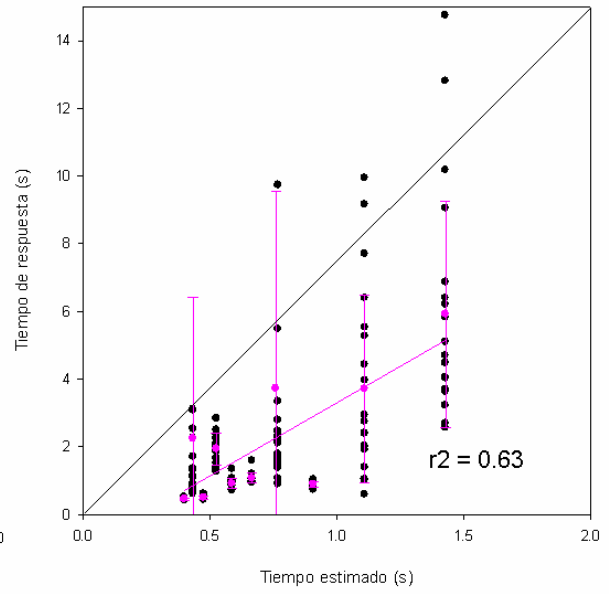


Gráfico Sujeto FZM (52)

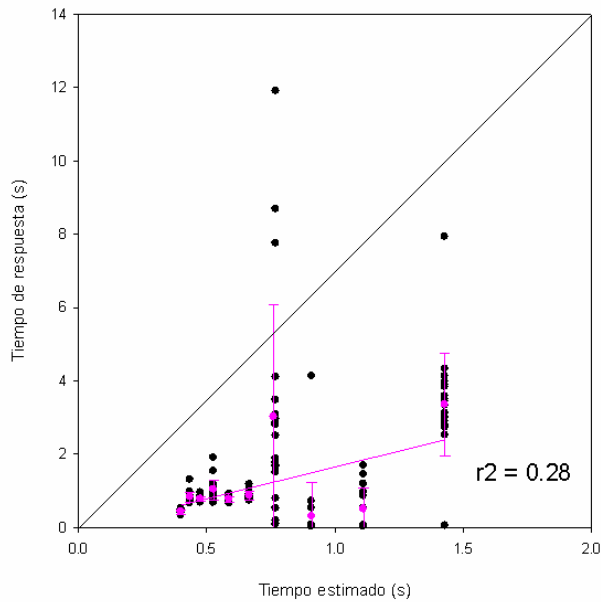


Gráfico Sujeto HCR (19)

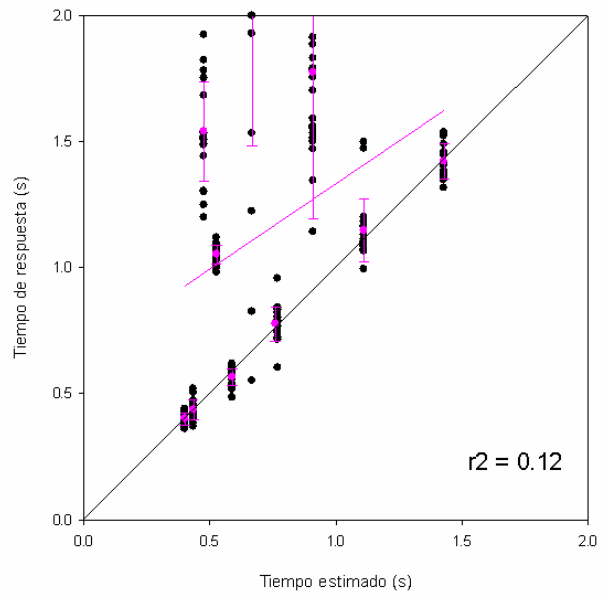


Figura 13. Ejemplos del grupo de sujetos “atípicos”. Los puntos negros representan el lugar donde se encuentra cada valor y su relación con el eje X (Tiempo estimado) y el eje Y (Tiempo de respuesta).  $R^2$ = regresión lineal.

Debido a los resultados atípicos que se encontraron en esta prueba, se seleccionaron a diecisiete sujetos para realizar cinco nuevas pruebas llamadas “curvas de aprendizaje” donde sale el primer subgrupo de esta investigación.

Estos 17 sujetos fueron los que obtuvieron los valores más bajos de los coeficientes de correlación de las regresiones lineales. A continuación, en la Figura 14 se muestran las diferencias de valores entre cada nueva prueba, empezando con la prueba original y agregando las cinco nuevas.

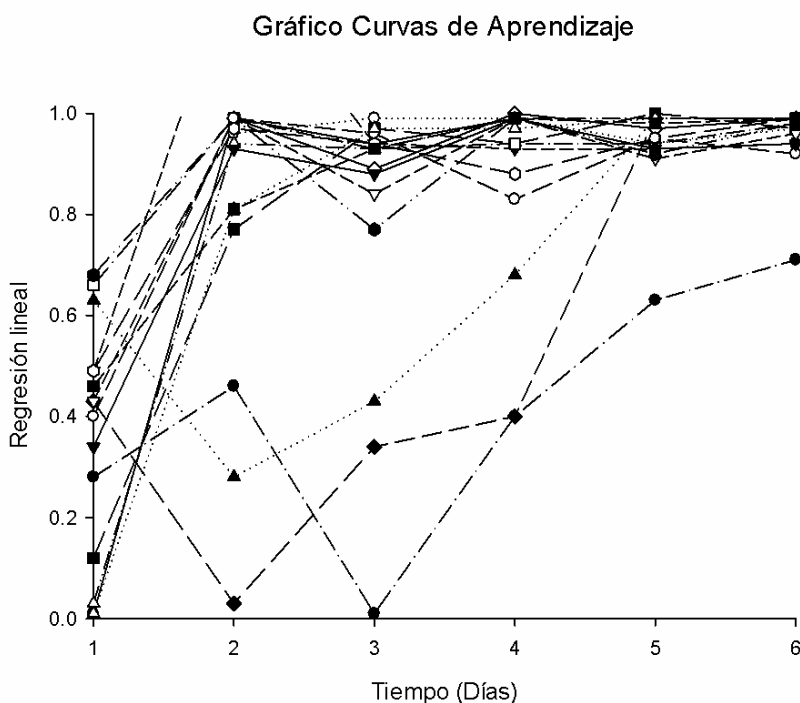


Figura 14. Gráfico del grupo “curvas de aprendizaje”. Cada figura de las líneas representa los valores obtenidos de la regresión lineal por los sujetos. Las figuras son diferentes para cada uno.

Se puede observar la tendencia a subir al valor  $r^2 = 1$  o cercano con cada nueva curva de aprendizaje en la mayoría de los sujetos, a excepción de tres voluntarios (Figura 15) atípicos que no mostraron una mejor respuesta a pesar de repetir la prueba.

Para el análisis de comparación entre el primer valor de los sujetos atípicos y los valores de las cinco curvas de aprendizaje realizadas, se ocupó el análisis estadístico de ANOVA Ranks en Sigma Plot. Se utilizó la prueba estadística de Kruskal-Wallis One Way Analysis of Variance on Ranks, lo cual arrojó una  $p < 0.001$ . Las diferencias en los valores entre los grupos de tratamiento son mayores de lo que se esperaría por casualidad; hay una diferencia estadísticamente significativa

**Kruskal-Wallis One Way Analysis of Variance on Ranks**

Data source: Data 1 in Notebook1

Group	N	Missing	Median	25%	75%
regresión lineal	17	0	0.430	0.240	0.638
r2 curva 1	17	0	0.960	0.800	0.990
r2 curva 2	17	0	0.930	0.823	0.945
r2 curva 3	17	0	0.970	0.867	0.990
r2 curva 4	17	0	0.950	0.930	0.990
r2 curva 5	17	0	0.980	0.955	0.990

H = 25.719 with 5 degrees of freedom. (P = <0.001)

The differences in the median values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = <0.001)

(Tabla 1).

Tabla 1. Tabla de resultados de prueba estadística. Elaborada en Sigma Plot.

Para el análisis de comparación de los grupos 1 y 2 (normales y atípicos respectivamente) se ocupó el análisis estadístico de ANOVA en Sigma Plot, utilizando la prueba estadística de Kruskal-Wallis, análisis unidireccional de la varianza en los rangos, lo cual arrojó una  $p < 0.001$ . Las diferencias en los valores entre los grupos de tratamiento son mayores de lo que se esperaría por casualidad; hay una diferencia estadísticamente significativa (Tabla 2).

### Mann-Whitney Rank Sum Test

Data source: Data 3 in Comparación ANOVA-TUKEY curvas de aprendizaje.JNB

Group	N	Missing	Median	25%	75%
r2 normales	53	0	0.980	0.940	0.990
r2 atipicos	17	0	0.430	0.240	0.638

Mann-Whitney U Statistic= 106.000

T = 259.000 n(small)= 17 n(big)= 53 (P = <0.001)

The difference in the median values between the two groups is greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = <0.001)

Tabla 2. Tabla de resultados de prueba estadística. Elaborada en Sigma Plot. La diferencia en los valores de la mediana entre ambos grupos es mayor, hay diferencia significativa.

Gráfico 2 Curvas de aprendizaje sujetos 21, 28 y 52

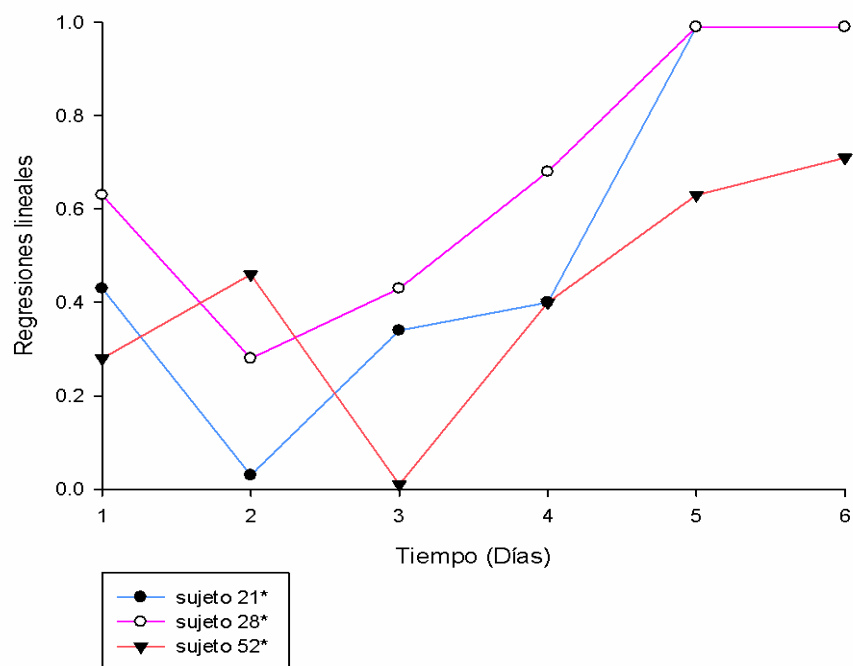


Figura 15. Gráfico de curvas de aprendizaje de 3 sujetos atípicos. Cada figura representa el valor obtenido de la regresión lineal después de aplicar las curvas de aprendizaje.

### **Prueba de audición a sujetos atípicos**

Para descartar posibles fallos en la percepción de las frecuencias a las que los sujetos estuvieron expuestos, se realizaron nuevas pruebas a los 17 sujetos atípicos para comprobar si podían escuchar los diferentes sonidos de manera monoaural en el oído izquierdo y derecho de manera separada. A cada sujeto se le pidió informar si escuchaba la frecuencia que estaba siendo reproducida en un oído determinado; la frecuencia de 100 Hz fue reproducida en el oído izquierdo y las demás frecuencias en el oído derecho, de manera independiente.

A cada sujeto se le realizaron 20 pruebas por frecuencia en los dos oídos de manera separada, pidiendo informara si escuchaba o no el sonido. Estos fueron los resultados:

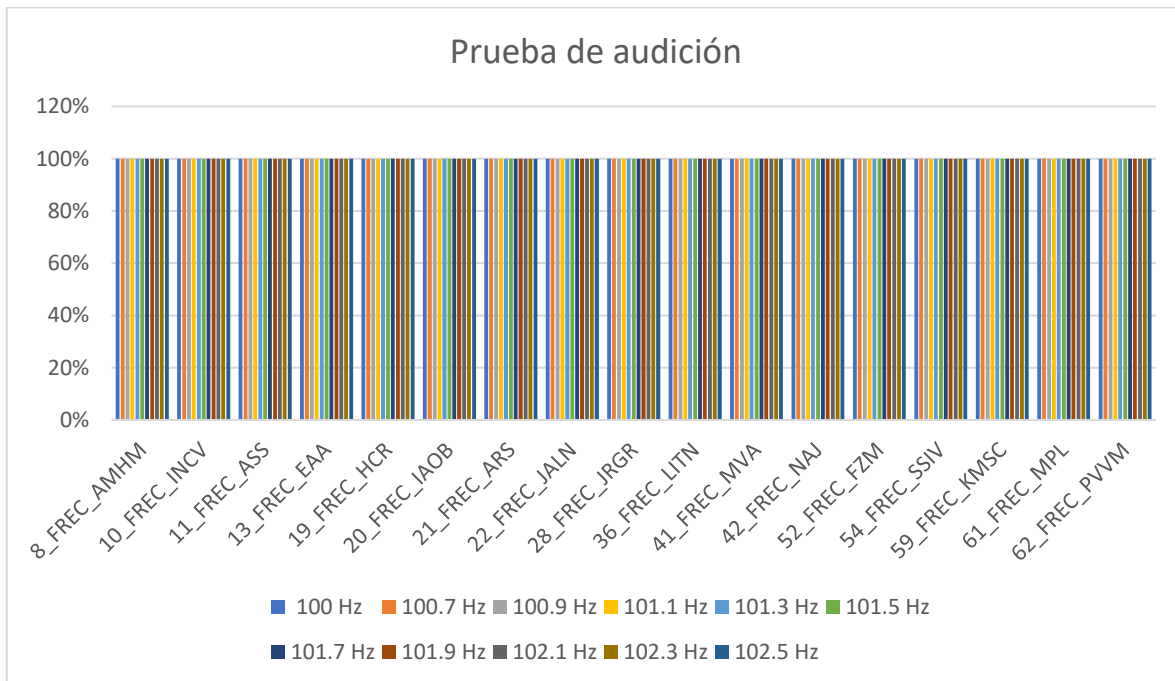


Figura 16. Gráfico de resultados de pruebas de audición. Las 20 pruebas por frecuencia están representadas en el porcentaje, siendo el 100% la representación de ningún fallo en ninguna prueba de audición.

Como se puede observar, el 100% de los sujetos atípicos no presentó dificultad al momento de escuchar cada frecuencia de manera monoaural, en su respectivo oído.

## **Discusión**

### *Comparación de los resultados*

#### *Grupo 1 (Normales).*

Se observa un comportamiento lineal casi perfecto con un coeficiente de correlación de 0.99. Esto sugiere que la línea de regresión se ajusta muy bien a los puntos de datos y que la relación entre las variables independientes y la variable dependiente es muy fuerte.

Esto puede indicar que los sujetos de este grupo entendieron las indicaciones del experimento y no existe una sobreestimación del tiempo al momento de la prueba. Estos resultados se pueden ocupar como la “normalidad” para hacer una comparación respecto a resultados atípicos y así crear un posible parámetro de evaluación para diferentes patologías neurológicas y de audición.

#### *Grupo 2 (Atípicos)*

En este grupo, se observa un comportamiento desplazado con un coeficiente de correlación de 0.89. El desplazamiento hacia arriba de la diagonal sugiere que los sujetos percibieron el ritmo de pulsos binaurales de manera anómala, tendiendo a reportar que los tiempos eran más lentos.

En este estudio tomamos en cuenta los valores atípicos como resultados significativos para crear un subgrupo de estudio: las curvas de aprendizaje.

*Grupo 2.1 (Curvas de aprendizaje).*

Para este subgrupo se analizaron los resultados de las regresiones lineales individuales y se tomaron en cuenta a 17 sujetos con coeficientes de correlación menores a 0.69.

<b>8_FREQ_AMHM</b>	<b>0.01</b>
<b>10_FREQ_INCV</b>	<b>5.04</b>
<b>11_FREQ_ASS</b>	<b>0.49</b>
<b>13_FREQ_EAA</b>	<b>0.03</b>
<b>19_FREQ_HCR</b>	<b>0.12</b>
<b>20_FREQ_IAOB</b>	<b>0.66</b>
<b>21_FREQ_ARS</b>	<b>0.43</b>
<b>22_FREQ_JALN</b>	<b>2.36</b>
<b>28_FREQ_JRGR</b>	<b>0.63</b>
<b>36_FREQ_LITN</b>	<b>0.43</b>
<b>41_FREQ_MVA</b>	<b>0.68</b>
<b>42_FREQ_NAJ</b>	<b>0.49</b>
<b>52_FREQ_FZM</b>	<b>0.28</b>
<b>54_FREQ_SIV</b>	<b>0.4</b>
<b>59_FREQ_KMSC</b>	<b>0.34</b>
<b>61_FREQ_MPL</b>	<b>0.01</b>
<b>62_FREQ_PVVM</b>	<b>0.46</b>

Tabla 4. Tabla de regresiones lineales de los sujetos del grupo 2.1. Elaboración propia.

Se proporcionaron las indicaciones nuevamente al momento de repetir la prueba auditiva de los ritmos binaurales, para descartar o comprobar que la explicación previa a las pruebas donde a los sujetos se les da las indicaciones a seguir fue el motivo de los resultados atípicos. Se realizaron un total de cinco curvas de aprendizaje a los 17 sujetos, dando un total de 85 nuevas pruebas para realizar la comparación de los datos obtenidos en la primera prueba y en estas cinco para examinar si se presentaba algún cambio.

La prueba estadística arrojó una  $p < 0.001$ , lo cual indica que los resultados son altamente significativos, al existir una diferencia al momento de aplicar las curvas de aprendizaje.

Independientemente de la nueva técnica de explicación y el mismo ambiente, los datos arrojaron que tres sujetos no tuvieron un cambio positivo al momento de realizar las curvas de aprendizaje, ya que seguían sobreestimando el tiempo de reacción esperado y no distinguían el ritmo binaural como los demás sujetos, a pesar de estar en el mismo ambiente y con la misma técnica de investigación.

### *Comparación con otros estudios*

En el estudio realizado, el objetivo principal fue obtener datos normativos de la percepción de pulsos binaurales inexistentes en las señales auditivas externas con un metrónomo auditivo interno en sujetos sanos. A pesar de no haber utilizado los típicos materiales para un experimento neurofisiológico, como lo es el electroencefalograma, al obtener de manera cuantitativa la percepción de pulsos binaurales inexistentes en nuestro plano, se obtuvieron resultados significativos para dar una interpretación a la sobreestimación del tiempo de ritmos binaurales en algunos sujetos.

Goodin, et al. (2012)<sup>28</sup> realizaron un estudio con el objetivo de examinar si la estimulación del pulso binaural alteraba la vigilancia o las frecuencias corticales y si estaban involucrados rasgos de personalidad ocupando bandas de frecuencia Theta (7 Hz) o Beta (16 Hz) mientras realizaban una tarea de vigilancia.

Ocuparon bandas de frecuencia Theta (7 Hz) o Beta (16 Hz) mientras realizaban una tarea de vigilancia de retroceso cero. Se utilizó un tono estándar de 400 Hz y un tono portador de 407 Hz para Theta o 416 Hz para Beta para intentar el arrastre. Reportaron que no se encontraron diferencias significativas.

Esto puede sugerir que una presentación breve de pulsos binaurales en estado estacionario no es suficiente para alterar la vigilancia o arrastrar frecuencias corticales. Es posible que las frecuencias utilizadas (400-417 Hz, 400-416 Hz) den como resultado ritmos binaurales de 7 y 16 respectivamente. Es por ello por lo que puede ser difícil escuchar sonidos y posiblemente lleguen a escucharse de manera independiente ambas frecuencias. Al mismo tiempo, la exposición a estos ritmos fue

tan breve (4 minutos) que, posiblemente, los sujetos no pudieron acostumbrarse a las frecuencias.

En el caso de nuestro estudio, cada sujeto estuvo expuesto a los ritmos binaurales en un lapso de entre 20 a 25 minutos y se ocuparon frecuencias más bajas y diferentes (10 pares en total), dando oportunidad a los sujetos a identificar los ritmos y a diferenciar las frecuencias unas de otras.

Los sujetos del subgrupo 2.1 estuvieron un total de 6 veces, expuestos a los mismos ritmos binaurales y, en su mayoría, mostraron una mejoría al momento de la identificación de los ritmos.

Grose et al. (2012)<sup>29</sup> realizaron un estudio donde trataron de determinar la confiabilidad de la respuesta electrofisiológica del pulso binaural como un indicador de la codificación de la estructura fina temporal, particularmente en lo que se refiere al sistema auditivo envejecido. Su hipótesis dice que la respuesta sería más sólida en una región de frecuencia más baja que en una más alta y en adultos más jóvenes que en adultos mayores.

Se llevaron a cabo dos experimentos donde se midieron la respuesta de estado estable del pulso binaural de 40 Hz (par de tonos de 390 y 430 Hz) y (par de tonos de 810 y 850 Hz). También se registraron las respuestas de seguimiento de frecuencia (FFR) evocadas por los tonos. Participaron diez adultos jóvenes y 10 adultos mayores.

Sus resultados muestran una diferencia entre los tonos de las frecuencias aplicadas y entre cada grupo de su muestra, dando como resultado una mejor respuesta con las frecuencias de tono menor tanto en los sujetos jóvenes como en los sujetos mayores. A diferencia del primer par de frecuencias, los tonos más elevados fueron más difíciles de distinguir a pesar de tener el mismo ritmo binaural (40 Hz) en el grupo de adultos mayores. La menor prevalencia de la respuesta del pulso binaural en adultos mayores, proporciona un apoyo tentativo a la sensibilidad de esta medida a los déficits relacionados con la edad en el procesamiento temporal.

Comparando con el estudio presente, la técnica que se utilizó para realizar nuestros experimentos sigue mostrando ser más objetiva gracias a las curvas de aprendizaje, diferentes rangos de frecuencia y el uso de tonos bajos en éstas. A pesar de haber realizado los experimentos en personas jóvenes (20-30 años) para obtener datos normativos, se presentaron datos atípicos en dicha población. Esto abre una puerta a proponer los ritmos binaurales en dichas frecuencias como prueba de evaluación en deterioro de audición u otras patologías asociadas tanto en personas jóvenes como adultos mayores, por ejemplo, la hipoacusia o acúfenos.

Dicha propuesta puede llevar a otras preguntas: ¿Qué rangos son los indicados? ¿Qué tonos son los más fáciles de distinguir? Entre más grave o más agudo ¿el estímulo será mayor o menor?

Beauchene et al. (2017)<sup>30</sup> realizó otro estudio con enfoque a la memoria y la conectividad cortical. Examinaron los efectos de diferentes condiciones de estimulación acústica durante una tarea de memoria de trabajo y midieron la precisión de la respuesta de los participantes y la topología de la red cortical mediante grabaciones de EEG. Se utilizaron seis condiciones de estimulación acústica: ninguna, tono puro, música clásica, ritmos binaurales de 5 Hz, ritmos binaurales de 10 Hz y ritmos binaurales de 15 Hz. Las frecuencias que usaron fueron de 240-245 Hz, 240-250 Hz y 240-255 Hz respectivamente, notoriamente con tonos más bajos que los estudios anteriores. Sus resultados determinaron que escuchar pulsos binaurales de 15 Hz durante una tarea de memoria aumentó la precisión del participante, moduló la respuesta de frecuencia cortical y cambió la intensidad de la conexión de la red cortical durante la tarea.

En este estudio tuvieron resultados significativos con un solo ritmo binaural (15 Hz) a diferencia de todos los que se usaron en nuestro estudio (0.7 Hz, 0.9 Hz, 1.1 Hz, 1.3 Hz, 1.5 Hz, 1.7 Hz, 1.9 Hz, 2.1 Hz, 2.3 Hz y 2.5 Hz) dando a entender que los ritmos binaurales por debajo de estos rangos, se pueden identificar de mejor manera y probar que tienen un efecto a nivel cerebral con ayuda de un estudio electroencefalográfico.

Aunque otros autores han hecho experimentos con ritmos binaurales, no se hizo un análisis en diferentes sesiones para ver las curvas de aprendizaje y en diferentes tiempos y rangos de frecuencias.

Se puede notar que varios estudios han analizado el cambio de la actividad cerebral respecto a los ritmos binaurales con frecuencias relativamente bajas y han examinado cómo se comportan las ondas cerebrales mediante un electroencefalograma. Lo que no podemos ver en esos estudios es la cuantificación de lo inexistente en nuestro plano; la cuantificación de los ritmos binaurales y el tiempo de respuesta por parte de los sujetos, para indicar que hubo un estímulo en tiempo y forma o un estímulo tardío.

En las curvas de aprendizaje, se pudo observar a determinado número de sujetos que tuvieron una curva desplazada, una sobreestimación del tiempo del ritmo binaural esperado. Ello abre la pregunta de si ¿existirá una relación con un electroencefalograma?

Si se aplica esta prueba ahora no a personas sanas, sino a personas con alguna patología neurológica como el trastorno por déficit de atención, enfermedad de Parkinson, esquizofrenia, autismo, entre otros; o incluso en sujetos con patologías o lesiones auditivas, se puede proponer esta técnica como un método diagnóstico para estos trastornos neuropsiquiátricos o neurológicos.

Gálvez et al. (2018)<sup>31</sup> publicaron un estudio de los efectos a corto plazo de los pulsos binaurales sobre la potencia funcional del EEG, conectividad, cognición, marcha y ansiedad en la enfermedad de Parkinson. La frecuencia binaural seleccionada para su estudio fue de 14 Hz, nuevamente un ritmo binaural con una frecuencia de tono bajo. Sus conclusiones fueron que el uso de estimulación del ritmo binaural para la Enfermedad de Parkinson (EP), parece ser un método eficaz, portátil, económico y no invasivo para modular la actividad cerebral. Muestran que la influencia sobre la actividad cerebral no indujo cambios en la ansiedad o los parámetros de la marcha; sin embargo, resultó en una normalización de la potencia del EEG (alterada en la enfermedad de Parkinson), normalización de la conectividad y funcionalidad cerebral (también alterada en la EP).

Este tipo de estudio pone sobre la mesa la incógnita de si los ritmos binaurales son candidatos para volverse un tratamiento en determinadas patologías, no solo un método diagnóstico. Ya sea por el cambio electrofisiológico que se puede observar en un electroencefalograma, o por datos clínicos en los pacientes.

Daengruan et al. (2021)<sup>32</sup> decidieron estudiar si hay relación entre los ritmos binaurales y el trastorno depresivo mayor. El propósito de su estudio fue determinar la efectividad de la musicoterapia (MT) con pulsos binaurales de 10 Hz integrados en combinación con el tratamiento estándar en comparación con solo el tratamiento estándar solo en pacientes diagnosticados con trastorno depresivo mayor (TDM). Este enfoque es diferente ya que, al incluir música, los sujetos no podrán escuchar los pulsos binaurales puros. En cuanto a la frecuencia de uso, se les indicó a los sujetos que tuvieran sus sesiones de musicoterapia 3 veces por semana durante 8 semanas. Se tuvo un grupo de experimentación y uno control. Este estudio concluyó que los pacientes con trastorno depresivo mayor que recibieron musicoterapia integrada con pulso binaural de 10 Hz combinado con el tratamiento estándar no habían experimentado diferencias significativas en comparación con el grupo de control en términos de puntuación de depresión, calidad de vida y cumplimiento de la medicación.

Volviendo al debate, se tiene que estandarizar las frecuencias, los tonos, el tiempo de exposición, el número de frecuencias y si se repetirán o no las pruebas para tener un mejor entendimiento de la actividad de los ritmos binaurales sobre el cerebro humano.

Vernon et al. (2014)<sup>33</sup> investigaron la posibilidad de inducir cambios significativos en el electroencefalograma (EEG) en los rangos de frecuencia alfa o beta mediante la presentación de latidos binaurales. Se ha sugerido que este tipo de estimulación auditiva puede influir en el comportamiento y la cognición a través del proceso de arrastre cortical. Aunque investigaciones previas han demostrado respuestas de frecuencia en los rangos tradicionales del EEG, como delta, theta y

gamma, este estudio buscaba identificar posibles cambios en las bandas de frecuencia alfa y beta.

Los resultados del análisis de los cambios en las amplitudes de banda ancha y estrecha, así como en la frecuencia, no revelaron efectos significativos de la frecuencia del latido binaural que provocaran alteraciones posteriores en el EEG. El estudio discute posibles factores mediadores y sugiere recomendaciones para futuras investigaciones que exploren los efectos del arrastre cortical inducido por la presentación de latidos binaurales.

Una suposición central de los latidos binaurales es que pueden provocar un efecto de arrastre, a veces denominado respuesta de seguimiento de frecuencia (FFR), en la actividad electrocortical del cerebro y, por lo tanto, representan un mecanismo para un posible cambio de comportamiento.<sup>34, 35</sup>

Destacando en nuestro estudio, los resultados de las curvas de aprendizaje nos dejan muchas puertas abiertas para poner a prueba todos los factores mencionados anteriormente, ya sea con sujetos sanos o sujetos con patologías y/o lesiones relacionadas a la neurología y audición.

Los ritmos binaurales son un fenómeno auditivo que ocurre cuando se presentan dos tonos de diferente frecuencia en cada oído de una persona. Estos dos tonos, cuando son reproducidos simultáneamente en cada oído con auriculares estéreo, generan un tercer tono que parece estar "dentro" del cerebro del oyente. Este tercer tono es la diferencia entre las frecuencias de los dos tonos originales y se percibe como un ritmo de pulsación.

Se cree que los ritmos binaurales pueden tener efectos en el cerebro debido a un fenómeno llamado "seguimiento binaural" o "seguimiento de frecuencia binaural". Se ha sugerido que la exposición a ritmos binaurales de ciertas frecuencias puede influir en el estado de ánimo, la relajación, la concentración y otros aspectos de la cognición. Algunos entusiastas afirman que los ritmos binaurales pueden ser utilizados para inducir estados de meditación, sueño

profundo, o incluso mejorar el aprendizaje, aunque la evidencia científica que respalda estas afirmaciones es mixta y se necesita más investigación.

Se han realizado muchas investigaciones sobre las respuestas cerebrales a estímulos de pulsos binaurales; sin embargo, los resultados son controversiales y siguen siendo objeto de debate de acuerdo con las revisiones realizadas en el apartado de discusión.

Se cree que existen varios factores, incluidos la frecuencia de los pulsos, la frecuencia del tono del portador, la duración de la exposición y los procedimientos de grabación, pueden llegar a interferir con el proceso de discusión, ya que estos factores pueden llegar a afectar a las respuestas cerebrales y las diferencias en estos factores no permiten comparaciones claras entre los estudios.

Es importante tener en cuenta que no todas las personas experimentan efectos significativos a partir de la exposición a ritmos binaurales, y los resultados pueden variar de una persona a otra.

En esta tesis hemos logrado cuantificar lo inexistente, cuantificar la eficiencia de la percepción de ritmos binaurales en diferentes sujetos. Sin embargo, es esencial estudiar en futuros experimentos diferentes variables y factores de los ritmos binaurales y sobre todo en diferentes poblaciones.

## **Conclusión**

Concluimos que fue posible cuantificar el ritmo binaural mediante un metrónomo binaural interno, y que algunos sujetos no pueden percibir el ritmo binaural de manera eficiente la primera vez, aun cuando si pueden percibirlo monoauralmente. También encontramos que dichos sujetos pueden aprender a percibir el ritmo después de cierto número de sesiones. Ello sugiere que la percepción de ritmos binaurales está mediada por circuitos neuronales que exhiben plasticidad. Por lo que, en trabajos futuros, sería relevante examinar la eficiencia en la percepción de ritmos binaurales mediante el metrónomo binaural interno en pacientes con disfunciones de la percepción sensorial.

## Anexos

### i. Consentimiento informado

Puebla, Pue., a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ de 20\_\_

#### CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Título de la Investigación:

---

Nombre del Investigador Principal:

---

Nombre de la persona que participará en la Investigación:

---

A través de este documento que forma parte del proceso para la obtención del consentimiento informado, me gustaría invitarlo a participar en la investigación titulada:

---

Antes de decidir, necesita entender por qué se está realizando esta investigación y en qué consistirá su participación. Por favor tómese el tiempo que usted necesite, para leer la siguiente información cuidadosamente y pregunte cualquier cosa que no comprenda. Si usted lo desea puede consultar con personas de su confianza (Familiar y/o Médico tratante) sobre la presente investigación.

#### 1. ¿Dónde se llevará a cabo esta investigación?

Esta investigación se llevará a cabo de manera virtual o, en caso necesario, en las instalaciones del Instituto de Fisiología de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, específicamente ubicado en \_\_\_\_\_.

#### 2. ¿Cuál es el objetivo de esta investigación?

Esta investigación tiene como objetivo obtener datos normativos de la eficiencia en la percepción del ritmo de pulsos binaurales inexistentes en las señales auditivas externas con un metrónomo auditivo interno en sujetos sanos.

#### 3. ¿Estoy obligado a participar?

Su participación es **voluntaria**, **anónima** y **confidencial**; no tiene que participar forzosamente. No habrá impacto negativo alguno si decide no participar en la investigación,

y **no demeritará de ninguna manera la calidad de la atención** que reciba por parte del investigador principal o en las instalaciones del Instituto de Fisiología.

#### **4. ¿En qué consistirá mi participación y cuánto durará?**

Su participación consistirá en lo siguiente:

Escuchar con audífonos ritmos binaurales en un tiempo aproximado de 20 a 25 minutos y accionar un programa de computadora con una tecla del teclado de la misma.

Si está de acuerdo en participar, le pediremos que escriba su nombre y firme el formato de Consentimiento Informado y firme al final de este.

### **FIRMA DE CONSENTIMIENTO [fecha dd/mm/20XX]**

Yo, \_\_\_\_\_, manifiesto que fui informado (a) del propósito, procedimientos y tiempo de participación y en pleno uso de mis facultades, es mi voluntad participar en esta investigación titulada.

No omito manifestar que he sido informado(a) clara, precisa y ampliamente, respecto de los procedimientos que implica esta investigación.

He leído y comprendido la información anterior, y todas mis preguntas han sido respondidas de manera clara y a mi entera satisfacción, por parte de \_\_\_\_\_.

---

**NOMBRE Y FIRMA DEL  
PARTICIPANTE**

---

**NOMBRE Y FIRMA DEL  
INVESTIGADOR PRINCIPAL**

ii. **Cuestionario de datos neurológicos de relevancia.**

DATOS NEUROLÓGICOS DE RELEVANCIA

Nombre: \_\_\_\_\_ Edad: \_\_\_\_\_ Sexo: \_\_\_\_\_

1. ¿Cuenta con alguno de los siguientes diagnósticos expedido por un profesional de la salud?
  - TDAH
  - Autismo
  - Depresión
  - Ansiedad
  - Epilepsia
  - Tumor cerebral
  - Afección traumática del sistema nervioso
  - Problemas de audición o deficiencia auditiva
2. ¿Toma algún fármaco? Si su respuesta es 'Sí' describa cual o cuales.
3. ¿Consume algún tipo de droga? Si su respuesta es 'Sí' describa cual o cuales.

## **Bibliografía**

- 1.- Kandel E, Schwartz J. Audición. Principles of Neural Science. 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill Professional Publishing; 2011, p. 530
- 2.- Latarjet M, Ruiz Liard A. Anatomía humana volumen I - tercera edición -. Editorial Medica Panamericana; 1998.
- 3.- Stuart Ira Fox. Fisiología Sensorial. En: Fisiología Humana. 13va edición. McGraw-Hill 2013, p. 282.
- 4.- González PM. (2013) Influencia de la estimulación sonora binaural en la generación de ondas cerebrales. Estudio electroencefalográfico. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Recuperado a partir de: <https://docta.ucm.es/entities/publication/6e4d122a-b7b5-41f2-aa8d-e4b9325b179a>
- 5.- Hernández-Zamora E, Poblano A. The auditory pathway: levels of integration of information and principal neurotransmitters. Gac Med Mex [Internet]. 2014;150(5):450–60. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25275847/>
- 6.- Erick R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell. Audición. En: Principios de Neurociencia. 5ta edición. McGraw-Hill 2011, p. 580
- 7.- Pablo Gil-Loyzaga; Remy Pujol. Capítulo 16: Fisiología del receptor y la vía auditiva. En: Fisiología humana. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. De C.V; 2010.
- 8.- Kulesza RJ, Grothe B. Yes, there is a medial nucleus of the trapezoid body in humans. Front Neuroanat [Internet]. 2015;9. Available from: <http://dx.doi.org/10.3389/fnana.2015.00035>
- 9.- Loundon N. Sorderas unilaterales infantiles. EMC - Otorrinolaringol [Internet]. 2022;51(1):1–7. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/s1632-3475\(21\)46021-2](http://dx.doi.org/10.1016/s1632-3475(21)46021-2)
- 10.- Boudreau JC, Tsuchitani C. Cat superior Olive S-segment cell discharge to tonal stimulation. In: Contributions to Sensory Physiology. Elsevier; 1970. p. 143–213.

- 11.- Covey E, Casseday JH. (1991) The monaural nuclei of the lateral lemniscus in an echolocating bat: parallel pathways for analyzing temporal features of sound. *Journal of Neuroscience*, 11(6), 1991. <https://www.jneurosci.org/content/11/11/3456.short>
- 12.- Viaje al mundo de la audición [Internet]. [www.cochlea.eu](http://www.cochlea.eu). [cited 2023 Sep 27]. Available from: <http://www.cochlea.eu/es/cerebro-auditivo/tronco-cerebral/lemnisco-y-coliculo>
- 13.- Guyton AC, Hall JE. El sistema nervioso: Principios generales y fisiología de la sensibilidad. En: *Tratado de fisiología médica*. London: Elsevier Health Sciences Spain, 2011. p. 543 – 594.
- 14.- Abadin AFMZ, Imtiaz A, Ahmed MM, Dutta M. A brief study of binaural beat: A means of brain-computer interfacing. *Adv Hum-Comput Interact* [Internet]. 2021; 2021:1–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1155/2021/6814208>
- 15.- Garcia G L. Binaural beats: Brain wave induction and the use of binaural beats to induce brain wave patterns. *Curr Res Integr Med* [Internet]. 2018;03(02). Available from: <http://dx.doi.org/10.4172/2529-797x.1000030>
- 16.- Morera C, Manrique M, Ramos A, Garcia-Ibanez L, Cavalle L, Huarte A, et al. Advantages of binaural hearing provided through bimodal stimulation via a cochlear implant and a conventional hearing aid: A 6-month comparative study. *Acta Otolaryngol* [Internet]. 2005;125(6):596–606. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/00016480510027493>
- 17.- Parrondo JMR. Juegos matemáticos: la frecuencia fantasma. *Investig Cienc* [Internet]. 2004 [cited 2023 Sep 9] ;(328):86–7. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=789905>
- 18.- Zamora EH, Poblano A. La vía auditiva: niveles de integración de la información y principales neurotransmisores. *Gac Med Mex* [Internet]. 2014;150(5):450–60. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4831509>

- 19.- Oster, G. (1973). Auditory Beats in the Brain. *Scientific American*, 229(4), 94–102. doi:10.1038/scientificamerican1073-94
- 20.- Chaieb L, Wilpert EC, Reber TP, Fell J. Auditory beat stimulation and its effects on cognition and mood states. *Front Psychiatry* [Internet]. 2015;6. Available from: <http://dx.doi.org/10.3389/fpsy.2015.00070>
- 21.- Moore JK. Organization of the human superior olivary complex. *Microsc Res Tech* [Internet]. 2000;51(4):403–12. Available from: [http://dx.doi.org/10.1002/1097-0029\(20001115\)51:4<403::aid-jemt8>3.0.co;2-q](http://dx.doi.org/10.1002/1097-0029(20001115)51:4<403::aid-jemt8>3.0.co;2-q)
- 22.- Vetter DE. The mammalian olivocochlear system—A legacy of non-cerebellar research in the Mugnaini lab. *Cerebellum* [Internet]. 2015;14(5):557–69. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s12311-014-0637-5>
- 23.- Vernon D, Peryer G, Louch J, Shaw M. Tracking EEG changes in response to alpha and beta binaural beats. *Int J Psychophysiol* [Internet]. 2014;93(1):134–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.10.008>
- 24.- Jirakittayakorn N, Wongsawat Y. Brain responses to a 6-Hz binaural beat: Effects on general theta rhythm and frontal Midline theta activity. *Front Neurosci* [Internet]. 2017;11. Available from: <http://dx.doi.org/10.3389/fnins.2017.00365>
- 25.- Balenzuela P, García-Ojalvo J. Neural mechanism for binaural pitch perception via ghost stochastic resonance. *Chaos* [Internet]. 2005;15(2). Available from: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1871612>
- 26.- Manjarrez E, Balenzuela P, García-Ojalvo J, Vásquez EE, Martínez L, Flores A, et al. Phantom reflexes: Muscle contractions at a frequency not physically present in the input stimuli. *Biosystems* [Internet]. 2007;90(2):379–88. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystems.2006.10.002>
- 27.- Daniel WW, Cross CL. *Biostatistics: A foundation for analysis in the health sciences*, EMEA edición. 11th ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons; 2019.
- 28.- Goodin P, Ciorciari J, Baker K, Carrey A-M, Harper M, Kaufman J. A high-density EEG investigation into steady state binaural beat stimulation. *PLoS One*

[Internet]. 2012;7(4): e34789. Available from: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0034789>

29- Grose JH, Mamo SK. Electrophysiological measurement of binaural beats: Effects of primary tone frequency and observer age. *Ear Hear* [Internet]. 2012;33(2):187–94. Available from: <http://dx.doi.org/10.1097/aud.0b013e318230bbbd>

30.- Beauchene C, Abaid N, Moran R, Diana RA, Leonessa A. The effect of binaural beats on verbal working memory and cortical connectivity. *J Neural Eng* [Internet]. 2017;14(2):026014. Available from: <http://dx.doi.org/10.1088/1741-2552/aa5d67>

31.- Gálvez G, Recuero M, Canuet L, Del-Pozo F. Short-term effects of binaural beats on EEG power, Functional Connectivity, cognition, gait and anxiety in Parkinson's disease. *Int J Neural Syst* [Internet]. 2018;28(05):1750055. Available from: <http://dx.doi.org/10.1142/s0129065717500551>

32.- Daengruan P, Chairat R, Jenraumjit R, Chinwong D, Oon-arom A, Klaphajone J, et al. Effectiveness of receptive music therapy with imbedded 10 Hz binaural beats compared with standard care for patients with major depressive disorder: A randomized controlled trial. *Complement Ther Med* [Internet]. 2021;61(102765):102765. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ctim.2021.102765>

33.- Vernon D, Peryer G, Louch J, Shaw M. Tracking EEG changes in response to alpha and beta binaural beats. *Int J Psychophysiol* [Internet]. 2014;93(1):134–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.10.008>

34- Jirakittayakorn N, Wongsawat Y. Brain responses to a 6-Hz binaural beat: Effects on general theta rhythm and frontal Midline theta activity. *Front Neurosci* [Internet]. 2017;11. Available from: <http://dx.doi.org/10.3389/fnins.2017.00365>

35.- Orozco Perez HD, Dumas G, Lehmann A. Binaural beats through the auditory pathway: From brainstem to connectivity patterns. *eNeuro* [Internet]. 2020;7(2): ENEURO.0232-19.2020. Available from: <http://dx.doi.org/10.1523/eneuro.0232-19.2020>

