



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
MAESTRÍA EN CIENCIAS (NEUROBIOLOGÍA)
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

**PARTICIPACIÓN DE LA VÍA DORSAL AUDITIVA EN LA PERCEPCIÓN DEL RITMO EN
LA MÚSICA, EVALUADA MEDIANTE IRMf**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS (NEUROBIOLOGÍA)

PRESENTA:
CIRCE AMANDA WILKE QUITERIO

TUTOR PRINCIPAL
DR. LUIS CONCHA LOYOLA
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DR. ERICK HUMBERTO PASAYE ALCARAZ
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

DR. VICTOR HUGO DE LAFUENTE FLORES
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

QUERÉTARO, MÉXICO

AGOSTO, 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Neurobiología

Los miembros del Comité Tutorial certificamos que la tesis elaborada por: Circe Amanda Wilke Quiterio, cuyo título es: “Participación de la vía dorsal auditiva en la percepción del ritmo en la música, evaluada mediante IRMf” se presenta como uno de los requisitos para obtener el grado de Maestra en Ciencias (Neurobiología) y cumple con los criterios de originalidad y calidad requeridos por la División de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Firma

Presidente

Dr. Jose Luis Díaz Gómez

Secretario

Dr. Luis Concha Loyola

Vocal

Dra. María Magdalena Giordano Noyola

Suplente

Dr. Erick Humberto Pasaye Alcaráz

Suplente

Dr. Hugo Merchant Nancy

Aprobado por el Comité Académico

Dr. Alfredo Varela Echavarría

Coordinador del Programa de Maestría en Ciencias (Neurobiología)

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México:

Instituto de Neurobiología.
Unidad de Resonancia Magnética

Por las instalaciones, el equipo, la ayuda técnica y los recursos humanos (técnicos, investigadores, administrativos, personal de mantenimiento, etc.).

A mi supervisor:

Dr. Luis Concha Loyola.

Por la supervisión de la investigación, y en particular por su enseñanza sobre la resonancia magnética.

A mi comité tutor:

Dr. Erick Humberto Pasaye Alcaráz.

Dr. Victor de Lafuente Flores.

Por todas sus observaciones durante las evaluaciones tutelares.

A los integrantes de los laboratorios C-13 y C-12, en especial a:

Dra. Arafat Alejandra Angulo Perkins, por la asesoría constante durante todo el proyecto y la realización de las resonancias a todos los voluntarios.

Biol. Cand. a Dr. en C., Edgar Morales Ramírez, por todo el apoyo técnico al laboratorio C-13, y a este proyecto en particular.

Lic. en Tec., Daniel Ramírez, por su ayuda en la selección y procesamiento de los estímulos musicales utilizados en esta investigación.

Med. Cand. a Dra. en C., María Guadalupe García Gomar, por su paciente ayuda en el aprendizaje básico del uso de la terminal y el pre-procesamiento de imágenes.

M. en C. Laura Verónica Cuaya, por el curso expres de FSL.

Técnico Académico Titular B T.C., M. en C. Leopoldo González Santos, por su enseñanza en el manejo de R, para la realización del análisis estadístico.

Fís. Juan José Ortiz Retana (Unidad de Resonancia), por el apoyo técnico con el resonador.

A mis compañeros de maestría, en especial a:

Biol., Cand. a M. en C. Ana Marina Jiménez Santiago

Psic., Cand. a M. en C. José Rafael Moreno Salazar

QFI, Cand. a M. en C. Itzamná Carlos Sánchez Moncada

Lic en Nut., Cand. a M. en C. Mildred Chagoya Ruiz

Quim., Cand. a M. en C. Anaí del Rocío Campos Contreras

Por toda su ayuda técnica, teórica y humana, necesaria para comenzar, continuar y concluir un proyecto de investigación.

A la Unidad de Enseñanza:

M. en C. Leonor Casanova Rico, por toda su paciencia y eficiencia en la realización de los cuantiosos trámites, desde el examen de admisión, hasta la titulación.

A todo el personal bibliotecario.

A mi familia:

Tec. Lngs. Virginia Quiterio Montiel.

Biol. Jesús Rojas Soria.

Lic. en CiPol. Iztac Hernández Quiterio.

Lic. en Crim. Ulises Hernández Quiterio.

Por su apoyo económico y humano en los momentos más urgentes.

El presente proyecto fue financiado por:

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Becario no. 293761

Por lo que se agradece de manera especial a todos los contribuyentes cuyos impuestos cubren la totalidad del financiamiento que reparten las instituciones gubernamentales.

*A mi familia...que la buena música nos
siga dando noches de desvelo.*

Aún faltan 43...que la ciencia no los olvide.

ÍNDICE

RESUMEN	9
SUMMARY	10
INTRODUCCIÓN.....	11
Capítulo I: MARCO TEÓRICO.....	13
ANTECEDENTES.....	13
Sensación y percepción	13
Psicoacústica y neuropsicología	14
¿Por qué estudiar el efecto de la música en el cerebro?	16
¿Cómo estudiar los efectos de la música?	18
Resonancia magnética.....	19
Imagenología por resonancia magnética funcional	22
Corteza cerebral y percepción auditiva.....	25
¿Cómo se detecta la frecuencia en el sistema auditivo?	27
De la cóclea al encéfalo: percepción espacial y temporal.....	29
Corteza auditiva y organización tonotópica	31
Corteza auditiva y codificación de estímulos complejos: efecto de la temporalidad en la lateralización funcional	35
¿Existen regiones específicas para la percepción musical dentro de la corteza auditiva?	39
Regiones activadas por la música, fuera de la corteza auditiva	41
Procesamiento distribuido de tareas auditivas	43
Vías auditivas ventral y dorsal	45
Capítulo II: DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	47
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	47
JUSTIFICACIÓN	47
HIPÓTESIS.....	47
OBJETIVOS.....	48
General	48
Particulares.....	48
MATERIAL Y MÉTODOS.....	48
Procesamiento y selección de estímulos.....	48
Sujetos de estudio	50
Diseño experimental	50

Análisis de datos	51
Regiones de interés (ROIs).....	53
Capítulo III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
RESULTADOS.....	54
Piloto.....	54
Análisis preliminares.....	58
Resultados a nivel de grupo	59
Correlación entre señal BOLD y claridad rítmica	62
Covariables	66
Regiones de interés	69
DISCUSIÓN.....	77
¿El ritmo activa “regiones del lenguaje”?	77
Percepción del ritmo en la corteza auditiva primaria	80
Ritmo y sintaxis.....	80
Corteza insular: estímulos novedosos y expectativa.....	82
El ritmo y la vía dorsal auditiva.....	83
Expectancia: ondas delta y beta	87
Atención y percepción del ritmo	88
Cerebelo y percepción del ritmo	89
Lateralización hemisférica para el procesamiento del ritmo	90
Actividad relacionada con la elección	91
<i>Planum polare</i> : categorización de la música a través del ritmo.....	93
¿Plasticidad?.....	94
CONCLUSIONES	96
LIMITACIONES.....	97
PERSPECTIVAS.....	98
LITERATURA CITADA.....	100
LISTA DE TABLAS	107
LISTA DE FIGURAS	107
APÉNDICES	109
Apéndice 1: Encuesta piloto	109
Apéndice 2: Cuestionario de musicofilia y experiencia musical.....	110
Apéndice 3: Máximas locales, contraste Rítmico>Arrítmico.....	112

Participación de la vía dorsal auditiva en la percepción del ritmo en la música, evaluada mediante IRMf

Circe Amanda Wilke Quiterio

*...incluso los sentimientos estéticos
están relacionados con procesamiento
neuronal de información
(Juan G. Roederer)*

RESUMEN

La parte anterior del giro temporal superior (*planum polare*) se activa preferencialmente en respuesta a la música, por lo que en este trabajo se evaluó el efecto de la manipulación rítmica de estímulos musicales en la actividad tanto de esta región como del resto del cerebro. Para esto, se cambió el inicio de cada una de las notas de los estímulos musicales, con la finalidad de afectar su ritmo, pero sin afectar su contorno melódico o características espectrales; posteriormente, se evaluó la percepción de músicos profesionales y personas sin entrenamiento musical. Por último, se comparó la actividad BOLD (Blood-Oxygen-Level Dependent) provocada por los estímulos rítmicos contra la provocada por los arrítmicos.

Se encontró que los estímulos rítmicos provocan mayor actividad BOLD que los estímulos arrítmicos, principalmente en tres regiones del hemisferio izquierdo: una incluye los giros pre y post-centrales (cortezas motora y somatosensorial primarias, respectivamente); otra región se localizó en el giro temporal superior posterior (GTSp), incluyendo a la corteza auditiva primaria y el *planum temporale*; y una más en el giro precentral, abarcando el área premotora y el área motora suplementaria. Es interesante recalcar, que todas estas regiones son parte de la vía dorsal auditiva, que está relacionada con el procesamiento de la información espacial del sonido; así, se presenta evidencia de que la red temporo-parieto-frontal izquierda, dentro de la vía dorsal auditiva, se modula, en parte, por el contenido rítmico de estímulos musicales, lo cual se relaciona con la teoría motora de la percepción rítmica y la teoría de atención dinámica.

También se encontró actividad en los lóbulos cerebelares V y VI (este último participa en la percepción cognitiva del ritmo), así como en el GTSp derecho, incluyendo las mismas regiones del hemisferio contralateral. Asimismo, se observó activación un poco anterior en el GTS, llegando hasta la ínsula y la parte posterior del *planum polare*, en ambos hemisferios. Además, al analizar específicamente las regiones de interés, se encontró mayor señal BOLD en respuesta a los sonidos rítmicos que a los arrítmicos, tanto en el *planum polare* como en el *planum temporale*, bilateralmente, pero mayor en el lado derecho; y se halló una correlación negativa en el *planum polare* derecho, entre la diferencia de porcentaje de cambio de señal BOLD provocada por estímulos rítmicos y arrítmicos, y los “errores de percepción” de los sujetos de estudio, por lo que puede concluirse que esta estructura juega un papel importante en la discriminación de sonidos musicales rítmicos vs arrítmicos, lo cual constituye un proceso importante para la categorización musical.

Por otro lado, existe una lateralización hemisférica en las regiones frontales, siendo que el lado derecho (incluida la región análoga al área de Broca) correlaciona negativamente con la claridad rítmica, mientras que el lado izquierdo lo hace de manera positiva. Adicionalmente, se notó que los músicos utilizan más recursos cognitivos (surco intra-parietal) para realizar la tarea de percepción rítmica.

Role of the dorsal auditory pathway in the perception of rhythm in music, assessed by fMRI

Circe Amanda Wilke Quiterio

We hear the melody in music, but we feel the beat

(Jessica Phillips-Silver & Laurel Trainor)

SUMMARY

The anterior portion of the superior temporal gyrus (*planum polare*) is preferentially active in response to musical stimuli. This work evaluates whether carefully controlled rhythmic manipulations of musical stimuli modulate cortical activity throughout the brain, specifically in the *planum polare*. To this end, we jittered the onset of each note in order to affect the rhythmicity of the stimuli without affecting its melodic contour or spectral characteristics, and tested the perception of non-musicians and professional musicians. Then, we compared the BOLD activity elicited from rhythmic versus non-rhythmic stimuli.

Rhythmic stimuli elicited stronger BOLD activity than non-rhythmic stimuli, mainly in three large regions on the left hemisphere: the first includes pre and post-central gyri (primary somato-motor cortex); the second was a *cluster* on the posterior superior temporal gyrus (pSTG), including the primary auditory cortex and *planum temporale*; and the last was the precentral gyrus, on the premotor cortex and the supplementary motor area. All these areas belong to the auditory dorsal pathway, which is related to the processing of the spatial information embedded in sound. Our findings show evidence that there is a left temporo-parietal-frontal network within the dorsal auditory stream that is modulated by rhythmic content in musical stimuli. That is related to the Motor Theory of Rhythm Perception and the Theory of Attentional Dynamics.

We also found activity on the right cerebellar lobes V and VI (that participate in the cognitive perception of rhythm) and on the right pSTG, including the same regions of the contralateral hemisphere. Notably, we encounter activation of the anterior portion of the STG, comprising the insula and the posterior *planum polare*, in both hemispheres. Furthermore, using regions of interest, we found higher BOLD signal in response to rhythmic than non-rhythmic stimuli, both, in *planum polare* and *planum temporale*, bilaterally, but stronger in right side. In the right *planum polare*, the difference of percentage BOLD signal change elicited between rhythmic and non-rhythmic stimuli, correlated negatively with the misperceptions of the study subjects; leading to the deduction that this structure has an important role in the discrimination of rhythm vs non-rhythm musical sounds, that it's important to musical categorization.

We also concluded that there is a lateralization between frontal regions, where the right side (including Broca's analogous area) is negatively correlated with rhythmicity, while the left side correlates positively. Additionally, we noticed that in order to accomplish the rhythmic perception task, trained musicians engage more neurocognitive regions, such as the intra-parietal sulcus.

INTRODUCCIÓN

Una cuestión cuya respuesta no es trivial es ¿qué hace único al humano?, en respuesta se suele aludir a la inteligencia o al lenguaje, sin embargo, el ser humano no es el único animal con inteligencia y capacidad de comunicación, sobre todo los primates pero también otros mamíferos y aves son capaces de resolver problemas y aprender a realizar tareas complejas, y en definitiva, todas las especies de animales pueden comunicarse con sus congéneres. Entonces, ¿qué hace al humano diferente? Se puede decir que lo que nos hace lo que somos es nuestra creatividad, sin embargo, tal como proponen Picciuto & Carruthers, no hay ninguna diferencia cognitiva entre ciertas destrezas de otros animales (como los brincos aleatorios que da una gacela para huir de su depredador) y las humanas (como el baile); ambas implican secuencias estocásticamente seleccionadas de movimiento, sujetos a una serie de limitaciones contextuales; pero estos comportamientos se pueden distinguir entre sí, pues el escape de la gacela sólo tiene valor para el individuo, mientras que el baile puede ser apreciado por el resto de los congéneres. No obstante, existen aves que construyen “casas” y producen “cantos” muy elaborados que, a pesar de ser comportamientos innatos, dependen de la “personalidad” de cada individuo, y de hecho, el humano los reconoce como valiosos; sin embargo, éstos están limitados a un sólo dominio de su comportamiento. Incluso los primeros homínidos no parecen haber tenido una creatividad de dominio general, distintiva de nuestra especie, que le permite alcanzar el nivel de creatividad histórica (relativa a toda una sociedad) y no sólo la creatividad fisiológica (relativa a individuos) que se comparte con las demás especies.

Así, a punto de vista personal, lo distintivo en el humano no es sólo su creatividad, sino su capacidad de apreciar el resultado de esa creatividad, que llamamos arte. Y precisamente, la música es un arte.

La música, al igual que el habla, es una característica particular del ser humano que se ha desarrollado en todas las sociedades independientemente de la sofisticación de su tecnología (Brown, 1991), razón por la cual muchos investigadores se han dedicado no sólo a su estudio por separado, sino más bien a su análisis conjunto. Si bien algunos trabajos con imagenología por resonancia magnética funcional (IRMf) han demostrado la activación de las mismas áreas cerebrales para ambos estímulos (Koelsch, *et al.*, 2002; Abrams, *et al.*, 2010), también se ha demostrado que existen redes neuronales que los procesan diferencialmente (Rogalsky, *et al.*, 2011; Angulo-Perkins, *et al.*, 2014), entre las que se encuentra el *planum polare*, que se activa preferencialmente con estímulos musicales y se localiza en la región anterior del giro temporal superior (GTS), formando parte de la corteza auditiva secundaria. El estudio preciso

de esta área y de aquellas que se relacionen con características espectro-temporales específicas de la música, permitirá conocer mejor el funcionamiento de la corteza auditiva en sus procesamientos más complejos.

Por lo tanto, el presente trabajo tuvo como objetivo analizar el efecto de la manipulación temporal de estímulos musicales en la corteza cerebral tanto de personas con entrenamiento, como de pesrsonas sin entrenamiento musical. Si bien inicialmente el interés se centró en la modulación de la señal BOLD del *planum polare*, los resultados obtenidos muestran una red más amplia para el procesamiento del ritmo en la música, abarcando regiones que forman parte de la vía dorsal auditiva, como lo son la parte posterior del giro temporal superior, el lóbulo parietal inferior, las cortezas somatosensorial y motora primarias, la corteza premotora y el área motora suplementaria. Ademâs, también se encontró la participación del lóbulo VI del cerebelo.

Capítulo I: MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES

Sensación y percepción

Dos conceptos usualmente confundidos son el de **sensación** y el de **percepción**. La sensación se refiere al proceso por el cual los órganos sensoriales (fotorreceptores, mecanorreceptores, quimiorreceptores, termorreceptores, etc.) de un organismo reciben los estímulos físicos y químicos del ambiente, para luego transformarlos en energía eléctrica que “viaja” por el sistema nervioso central (**SNC**), en forma de potenciales de acción (**PA**). Este proceso puede ser muy similar en diferentes especies. Aunque hay que tomar en cuenta que en la psicología popular la conciencia es un componente fundamental de la sensación, ya que es una experiencia que resulta de la estimulación de alguno de los canales sensoriales, usualmente conocidos como “sentidos”, por lo que no es posible concebir ni tiene sentido hablar de una sensación inconsciente, es decir, una sensación se “siente” explícitamente (Díaz, 2005).

Posteriormente, la información que llega al cerebro es codificada e “interpretada” por distintas áreas de la corteza, lo que le da “significado” a las sensaciones recibidas. Este proceso se conoce como percepción, y, a diferencia de la sensación, es muy variable no sólo entre especies, sino entre individuos, ya que depende de conceptos pre-existentes para poder contextualizar la información entrante. De esta manera, la percepción está dominada por factores intrínsecos como la atención, la expectativa y la memoria, que de hecho, son el mecanismo por el cual seleccionamos diferentes estímulos dentro de la gama existente.

Existen dos estrategias de procesamiento de información: **bottom-up** (de abajo a arriba) y **top-down** (de arriba a abajo). El primero hace referencia a la información sensorial que entra al sistema y forma un “percepto nuevo”; el segundo se refiere al proceso por el cual el conocimiento almacenado (experiencias previas) influencia la manera de interpretar las sensaciones recibidas.

Con todo, la sensación y la percepción, así como la cognición, la conciencia, la memoria, el pensamiento y los sentimientos, están basados en impulsos transmitidos de neurona a neurona a través de sinapsis (Roederer, 2009).

Psicoacústica y neuropsicología

La **psicofísica** es la rama de la psicología experimental que estudia la relación entre la magnitud de un estímulo físico (energía) y la intensidad con la que es sentido y censado por un individuo. Para que un estímulo pueda modular la conducta se requiere que rebase cierto umbral (**estímulo supraumbral**), y para poder detectar dos estímulos diferentes, éstos deben tener una diferencia mínima de energía (**umbral diferencial**). Específicamente, cuando se habla de **ondas sonoras** nos referimos a energía elástica, es decir, oscilaciones de la presión, o la sucesión rápida de compresiones y expansiones del aire (también de líquidos y sólidos) (Roederer, 2009).

La **psicoacústica** es una rama de la psicofísica que estudia la relación de los estímulos acústicos con las sensaciones auditivas. Existen tres sensaciones primarias asociadas a un sonido musical: la **altura** (altura o elevación), la **sonoridad** (fuerza o intensidad) y el **timbre** (permite distinguir diferentes instrumentos aunque tengan la misma altura y sonoridad); en principio, cada una de estas sensaciones se relaciona en gran medida con características de la onda sonora: la altura con la **frecuencia** (número de oscilaciones por segundo), la sonoridad con la **amplitud** de la onda y el timbre con el **espectro**. Adicionalmente, la superposición de dos sonidos diferentes se conoce como **armonía** (Roederer, 2009).

Al igual que en los tonos simples, para discriminar entre dos tonos complejos debe existir una diferencia mínima entre sus frecuencias fundamentales. Así, la consonancia y la disonancia son sensaciones subjetivas de placer y disgusto, respectivamente, formadas al escuchar dos o más tonos simultáneamente. En todas las culturas parece existir un sistema auditivo con preferencia para determinados intervalos de frecuencia (la octava, la quinta, etc.) y son valuadas en el mismo orden en que aparecen en la serie de armónicos (Roederer, 2009).

Por otro lado, existen tres rangos temporales dentro de la **psicoacústica**: la **escala microscópica** incluye a las variaciones de las vibraciones, y va desde 0.00007 a 0.05 s, conduciendo a las sensaciones de altura, sonoridad y timbre (detectadas y codificadas desde el oído interno); la **escala intermedia** ronda un décimo de segundo, y es donde tienen lugar los cambios de **ataque** y **caída** de un tono (**articulación**) (afectando el trayecto natural que va desde el oído hasta la región auditiva del cerebro); y por último la **escala macroscópica** que es a partir de 1 segundo en adelante, donde ocurren las duraciones de los tonos, las sucesiones, la **melodía** y el **ritmo**, características procesadas en la corteza cerebral, la cual conceptualiza a la música como tal, y sus atributos (Roederer, 2009). Así, la percepción musical está

muy relacionada con la duración y posición de los elementos acústicos que la componen, y la organización de los intervalos entre sonidos provoca la percepción rítmica (Angulo-Perkins & Concha, 2014).

Peri para comprender un sonido, éste debe ser transformado de sus propiedades físicas a la representación perceptual abstracta, con ayuda de la memoria y la información semántica. Así, según Bizley & Cohen (2013), la unidad perceptual fundamental es el “**objeto auditivo**”, que es el “*resultado computacional de la capacidad del sistema auditivo para detectar, extraer, segregar y agrupar espectro-temporalmente las regularidades en el ambiente acústico*”, que, en palabras más simples, puede ser la percepción correspondiente a un sonido derivado de una fuente en particular. Cada objeto auditivo tiene propiedades espectro-temporales específicas que los separan de otros, en sí, los sujetos sanos puede reconocer y describir un objeto por la combinación de su tono, timbre y volumen, y, al igual que la visión, los objetos auditivos se reconocen independientemente de su contexto (por ejemplo, el sonido del violín es reconocido como tal independientemente de si se produce fuerte o suave, rápido o lento, sólo o en orquesta). Aún más, el mensaje de un sonido puede predecirse aunque no sea oído completamente (como el discurso de alguien que se vuelve inaudible cuando otra persona estornuda) (Bizley & Cohen, 2013).

Por lo tanto, la **neuropsicología** es la disciplina que estudia los procesos y las funciones del sistema nervioso que relacionan la recepción de estímulos con las respuestas mentales y conductuales, siendo que la representación del entorno es debida a la evocación **espacio-temporal** de impulsos nerviosos en determinadas áreas de la corteza cerebral. Ahora bien, la percepción musical implica el procesamiento de patrones espaciales causados por sonidos aislados o por superposiciones sonoras, así como el procesamiento de patrones temporales de largo plazo de las líneas melódicas (Roederer, 2009), pues la temporalidad de cada sonido es crucial para ser detectado (Bizley & Cohen, 2013).

A su vez, la atención es una condición importante, y aunque no siempre es necesaria para la formación de objetos o para percibir cambios repentinos de un sonido, la conciencia de un objeto puede ser influenciada por ella, de hecho, las respuestas neurales se suprimen cuando un sonido es “irrelevante” en relación con las respuestas a los sonidos a los que se les presta atención, lo que se conoce como “**efecto de la fiesta de coctel**”. Al contrario, un sonido que no variase en sus características físicas durante un tiempo prolongado, deja de percibirse, pues la capacidad de percibir objetos auditivos requiere la selección de ciertos parámetros, la tolerancia a las diferencias en estos parámetros y la habilidad de generalizar ciertas características para poder asignar un sonido a determinada categoría. La atención

también cobra importancia cuando es necesario resolver ambigüedades (cuando se presentan dos estímulos muy similares) y tomar una decisión. Otro factor que influye en el proceso de la formación de objetos auditivos, es la experiencia, por ejemplo, los actores activan más el giro temporal superior anterior izquierdo que los músicos (Bizley & Cohen, 2013).

En síntesis, los oídos reciben la mezcla de todos los sonidos del ambiente, y la función del cerebro es agrupar las características acústicas en características perceptuales y luego formar representaciones discretas (objetos) (Bizley & Cohen, 2013). De esta manera, un **mensaje musical** es la secuencia de sonidos individuales que adquiere su valor dependiendo de lo previamente almacenado, siendo una **melodía** el ejemplo más sencillo de un mensaje musical. Cuanto más avanzado se encuentre el procesamiento en la vía neural auditiva, existen más atributos psicológicos que influyen la codificación del mensaje, llámese aprendizaje, condicionamiento cultural o estado psíquico momentáneo del individuo (Roederer, 2009; Bizley & Cohen, 2013).

¿Por qué estudiar el efecto de la música en el cerebro?

Muchos investigadores se han dedicado a estudiar la música por su relación con el lenguaje, pues es innegable que tienen fuertes similitudes en la sintaxis, es decir, el lenguaje está conformado por fonemas y la música por notas, los fonemas forman palabras y las notas melodías, los cuales a su vez forman oraciones y canciones, respectivamente (Tabla 1, lado izquierdo).

SIMILITUDES		DIFERENCIAS	
Sintaxis		Temporalidad	
Lenguaje	Música	Lenguaje	Música
Fonemas	Notas	20-50 ms	150-250 ms
Palabras	Melodías	H. Izquierdo	H. Derecho
Oraciones	Canciones	Voz	Varios
Sonidos-Silencios			Armonía
Articulación			Ritmo
PROSODIA			

Tabla 1: Similitudes y diferencias entre música y lenguaje. La lateralización del procesamiento de música y lenguaje en los hemisferios derecho e izquierdo, respectivamente, es un concepto clásico, sin embargo, es importante recalcar que ambos hemisferios están involucrados en las dos clases de estímulos, y su predilección dependerá del análisis que se realice, por ejemplo, Flores-Gutiérrez, *et al.* (2007) encontraron que el hemisferio derecho se activa con música que provoca emociones negativas, y el hemisferio izquierdo con música que provoca emociones positivas. A su vez, los componentes prosódicos y pragmáticos del lenguaje también involucran al lado derecho.

Así, hay estudios comparativos sobre sus fundamentos neurobiológicos, la modulación del procesamiento cognitivo, usos clínicos de la música en problemas de lenguaje, el efecto del entrenamiento musical en la habilidad lingüística, y cuestiones evolutivas sobre los orígenes de la música y el lenguaje (Patel, 2013). Al respecto, hay teorías que proponen que la música es el resultado de la especialización del lenguaje. Roederer (2009) propone que el cerebro debe obtener información sensorial necesaria de su medio, haciendo predicciones de acuerdo a su experiencia (aprendizaje) y su información genética, para así tomar acciones beneficiosas para el organismo; razón por la cual menciona que escuchamos los sonidos como una respuesta innata para tomar conciencia de lo que nos rodea. Pero ¿qué información transmite la música y por qué respondemos emocionalmente a ella? Probablemente por la tendencia innata a entrenarse desde edades tempranas en la percepción del habla, siendo la percepción musical, secundaria a este procesamiento (Roederer, 2009). Sin embargo, también existe la teoría contraria que propone que la música se desarrolló antes que el lenguaje, de hecho, en las revisiones de Fitch (2010) y Patel (2013) se menciona que desde 1871 Darwin propuso que los ancestros “cantaban” antes de desarrollar el lenguaje, es decir, existió un “protolenguaje musical” del cual derivó el lenguaje conforme incrementó la inteligencia.

Independientemente de cuál habilidad precedió a la otra, existe una recopilación clara de información anatómica, fisiológica y neurofisiológica que demuestra que la evolución de las cortezas motoras de los primates correlaciona con la emergencia de habilidades cognitivas superiores como el lenguaje y la percepción rítmica (Mendoza & Merchant, 2014) indispensable para la comprensión de la música, en el humano, sugiriendo que estas regiones no sólo se involucran en las respuestas motoras sino también en la percepción de los estímulos auditivos.

Sin embargo, las investigaciones actuales demuestran que si bien existen zonas de la corteza que se activan tanto con el lenguaje como con la música (Koelsch, *et al.*, 2002; Abrams, *et al.*, 2010), también hay otras que lo hacen preferencialmente con alguna de las dos (Rogalsky, *et al.*, 2011; Angulo-Perkins, *et al.*, 2014), lo cual, presumiblemente se debe a las diferencias en la temporalidad de codificación que requiere cada una.

Aunado a esto, se pueden reconocer funciones adaptativas de la música, entre ellas la de suscitar y mantener la atención de un individuo o de muchos al mismo tiempo, transmitir información afectiva e igualar los estados emocionales de un grupo de oyentes; incluso tiene un rol en ritos religiosos, sexuales, proselitistas, etc., demostrando su importancia en lograr coherencia de conducta en masas humanas

(Roederer, 2009).

Además, la utilización de estímulos musicales permite ahondar en el estudio de la corteza auditiva a niveles más especializados, y comprender su participación en la integración de los estímulos ambientales y la formación de perceptos.

¿Cómo estudiar los efectos de la música?

En general existen dos métodos utilizados en neurociencias para conocer la relación entre el funcionamiento del cerebro y la conducta. Uno es el **método de mediciones (electrofisiología, electroencefalografía, magnetoencefalografía, tomografía por emisión de positrones, y resonancia magnética funcional)**, en donde se pone a los sujetos a hacer alguna tarea mientras se mide su actividad cerebral. El otro es el **método de manipulación**, en donde se manipula la estructura o función cerebral para luego examinar sus efectos. Dentro de este último hay dos ramas: la **directa** consiste en interrumpir o aumentar la actividad neuronal por segundos o minutos, siendo la **estimulación magnética transcraneal (EMT)** la última tecnología para lograrlo, y la **indirecta** se basa en la comparación de personas con y sin lesiones cerebrales (Huettel, *et al.*, 2009). Particularmente, para conocer la función de las distintas regiones de la corteza auditiva, se estudian los efectos conductuales de pacientes con daño cerebral (Peretz, *et al.*, 1994; Samson & Zatorre 1994; Lai, *et al.*, 2012), y se realizan experimentos con imagenología funcional en personas sanas (Zatorre *et al.*, 2002).

Algunos de los métodos mencionados para medir la actividad neuronal, son invasivos; entre ellos está la **electrofisiología**, que utiliza electrodos para medir los cambios en el potencial de membrana y las corrientes iónicas, por lo que raramente puede utilizarse directamente en humanos. Por otro lado están los métodos no invasivos como la **electroencefalografía (EEG)** y la **magnetoencefalografía (MEG)**, que utilizan sensores colocados externamente para medir los trazos electrográficos resultantes de millones de potenciales de acción y los cambios que provocan en un campo magnético, en el tiempo preciso de la actividad cerebral; su limitación es la resolución espacial (Huettel, *et al.*, 2009).

Resonancia magnética

La **imagenología por resonancia magnética (IRM)** es una técnica que forma imágenes del interior del cuerpo, y está basada en los principios de la **resonancia magnética nuclear (RMN)**, entre ellos el movimiento de precesión de las partículas subatómicas del núcleo eléctricamente cargadas, particularmente protones, también llamado “**spin**” (Hornak, 1996). Por precesión se entiende al movimiento asociado con el cambio de dirección en el espacio que experimenta el eje instantáneo de rotación de un cuerpo, es decir, la inclinación del movimiento de rotación de un cuerpo rígido cuando se aplica una fuerza externa, describiendo un eje de rotación de forma cónica.

Habitualmente se analiza el fenómeno de resonancia del protón del hidrógeno incluido en las moléculas de agua, sumamente abundante en tejidos biológicos. Cuando los spin son expuestos a un campo magnético, éstos se alinean a él, ya sea de manera paralela o anti-paralela, de esta forma, si dos spin tienen cargas opuestas, se eliminan, por lo que la imagen que se forma por RMN estará dada únicamente por aquellos spin no apareados (Hornak, 1996).

el movimiento del eje de rotación de un cuerpo rígido, como una peonza, cuando se aplica un par perturbador mientras que el cuerpo está girando de tal manera que el eje de rotación describe un cono, con la vertical a través del vértice del cuerpo como eje del cono, y el movimiento del cuerpo en rotación es perpendicular a la dirección del par. Cuando un paquete de spins que se encuentra precesando (alrededor de un campo magnético) es expuesto a otro campo magnético (radiofrecuencia) de menor magnitud pero de la misma frecuencia de precesión que los spin, éstos son atraídos por él. Una vez que es retirado este segundo campo de energía, los spin regresan a su estado original, liberando la energía que absorbieron (decaimiento de la señal), y el tiempo que tardan en hacerlo es llamado **relajación longitudinal** o **relajación tipo T1** (Fig. 1). (Hornak, 1996). T1 depende de la composición del tejido, la estructura y el ambiente; además tiene que ver con el intercambio de energía térmica realizado desde los protones al medio: entre más líquido es el medio, es más difícil para los protones deshacerse de su energía, debido al rápido movimiento de las moléculas, razón por la cual, el agua tiene T1 largos, mientras que la grasa presenta T1 cortos debido a que los enlaces de carbono de los extremos de los ácidos grasos poseen frecuencias cercanas a la frecuencia de precesión del hidrógeno, produciendo una transmisión de energía más efectiva (Caicedo & Aldana, 2010) Así, dependiendo de su densidad, cada tejido tiene su propio T1, por lo que en un mismo momento cada uno aportará una señal diferente, con lo que se formará una imagen contrastada que permitirá visualizarlos por separado.

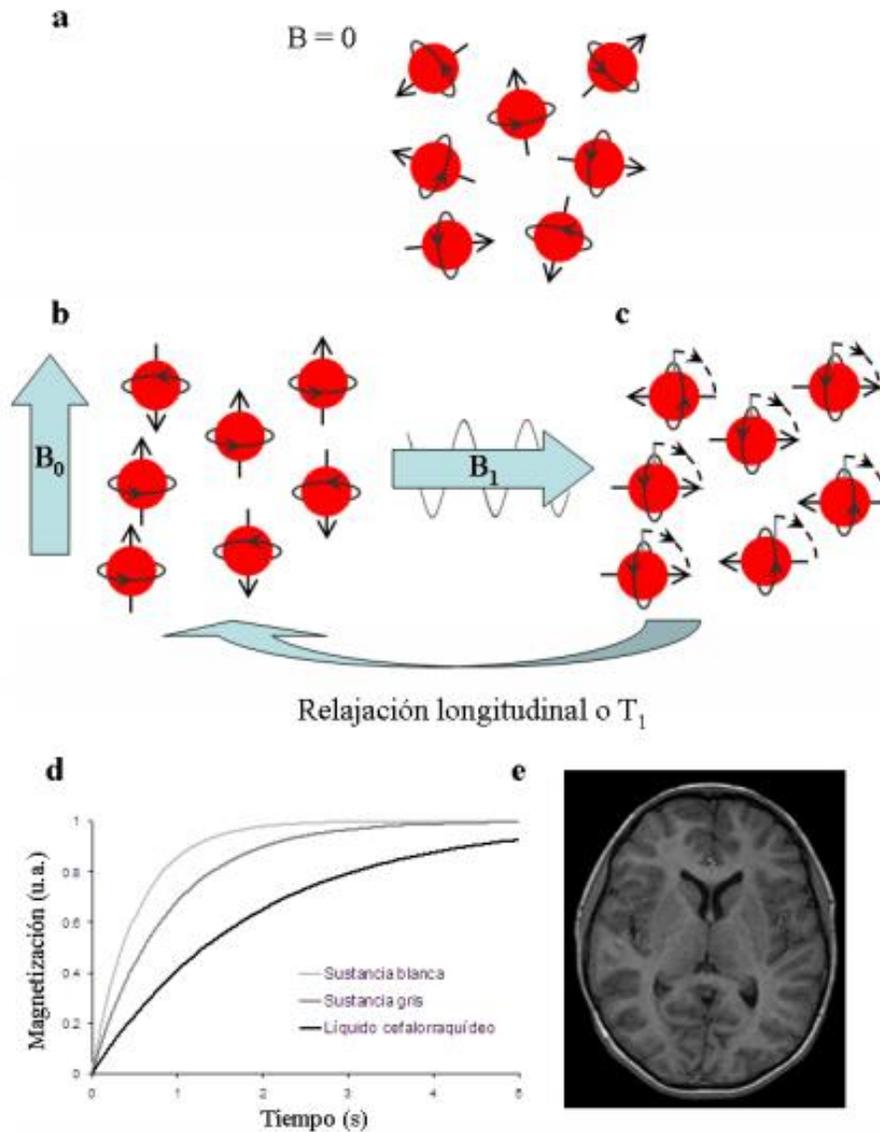


Figura 1: “Proceso de relajación longitudinal o T1. (a) En ausencia de un campo magnético externo, los spins de los núcleos de hidrógeno apuntan en direcciones aleatorias, por lo que la suma vectorial es cero y, por ende, el momento magnético total de la muestra es nulo. (b) Al colocarse la muestra en un campo magnético B_0 , los spins tienden a alinearse en la dirección de éste; una mayor cantidad lo hace en dirección paralela que antiparalela, generando así un momento magnético neto en dirección del campo externo (longitudinal). (c) Un breve pulso electromagnético B_1 en dirección perpendicular a B_0 inclina los spins al plano perpendicular reduciendo el momento magnético total longitudinal a cero. Al apagar el campo B_1 los spins retornan gradualmente a su posición original, recuperándose de esta manera la magnetización en la dirección del campo externo B_0 , proceso que se denomina relajación longitudinal o T1. (d) Este proceso tiene diferentes constantes de tiempo dependiendo del medio en el que se encuentren los protones (u.a.=unidades arbitrarias). (e) Mediante la medición de los valores de relajación longitudinal en distintas partes del cerebro se puede construir una imagen anatómica o de tipo T1”. (Tomado de Armony, et al. 2012).

Simultáneamente se da también la **relajación transversal (T2*)**, que se refiere al tiempo en que se pierde la señal transversal después de un pulso de radiofrecuencia (Fig. 2), es decir, en su regreso al campo magnético original, el movimiento de los protones se vuelve no uniforme, lo que significa que no todos

precesan a la misma frecuencia, debido a dos factores: la interacción molecular entre núcleos cercanos (T_2) y las variaciones azarosas en el campo magnético y la frecuencia de precesión de protones individuales (T_2'); así, entre menos diferencias existan en los campos magnéticos de un tejido, T_2 se vuelve más largo (Hornak, 1996; Huettel, *et al.*, 2009; Caicedo & Aldana, 2010).

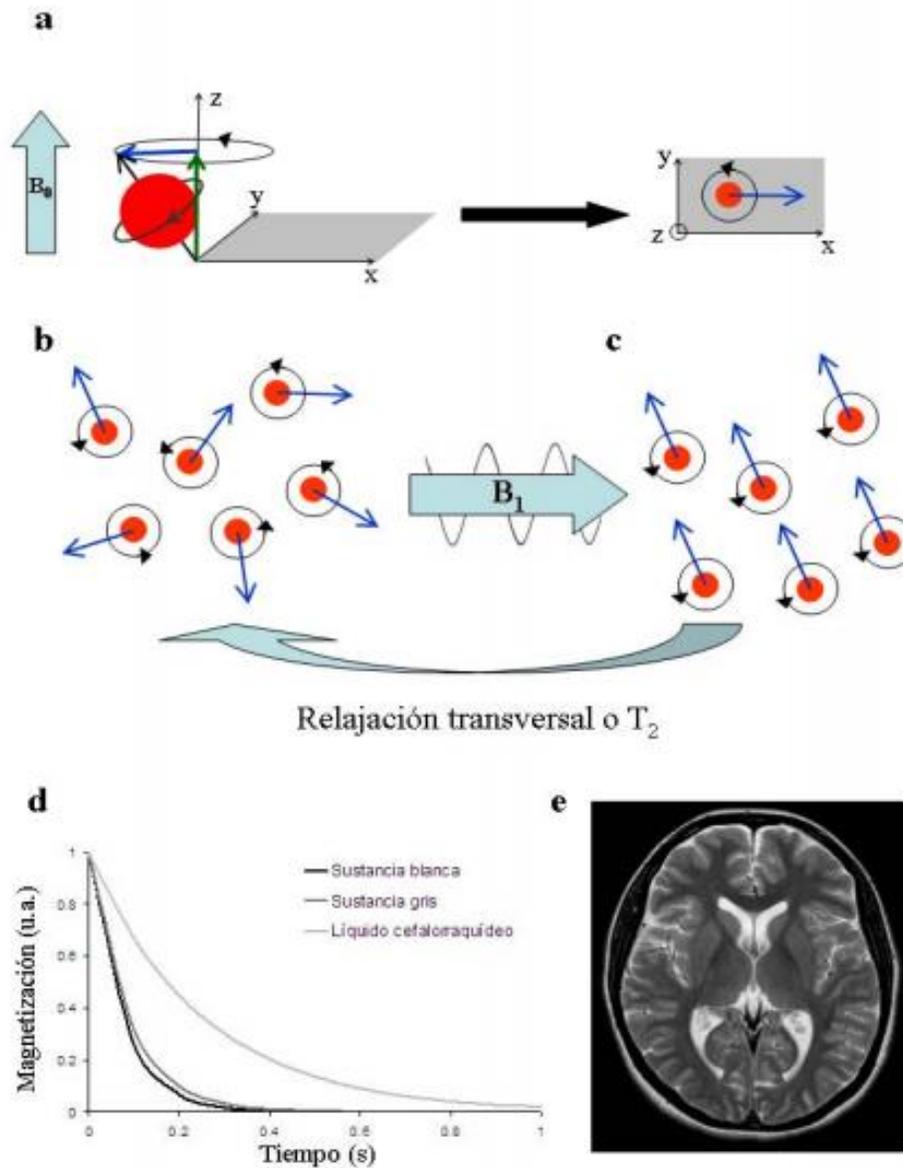


Figura 2: “Proceso de relajación transversal o T_2 (a) En presencia del campo magnético externo B_0 , los spins no se alinean completamente en la dirección del campo, sino que presentan un movimiento de precesión alrededor de dicha dirección, por lo que, además del componente longitudinal, sus spins (y momentos magnéticos) poseen un componente transversal. (b) Los spins giran en el plano perpendicular con la misma velocidad, pero fuera de fase, por lo que el momento magnético neto en este plano es cero. (c) El campo de radiofrecuencia B_1 hace que los spins entren en fase, generándose un momento magnético neto que rota en el plano perpendicular al campo B_0 con la frecuencia de Larmor. Al apagar este campo, la coherencia entre spins se va perdiendo por las interacciones entre núcleos vecinos, mediante un proceso de relajación transversal o T_2 . (d) Este proceso de relajación tiene una constante de tiempo que depende del medio en el que se encuentran los spins. (e) La adquisición de imágenes del tipo T_2 permite obtener una imagen anatómica del cerebro complementaria a la que se obtiene mediante la relajación longitudinal o T_1 ”. (Tomado de Armony, *et al.* 2012).

Aunque T1 y T2* ocurren de manera simultánea, T2* siempre es más corto (ms) que T1 (s) (Hornak, 1996; Huettel, *et al.*, 2009). Distintos tejidos presentan tasas de relajación particulares, reflejando así su composición interna y/o características.

Las imágenes estructurales requieren de calidad en el contraste, por lo que se necesitan tiempos relativamente largos para su adquisición y se utiliza el contraste T1. En cambio, para adquirir imágenes funcionales es necesario un muestreo rápido que refleje los cambios fisiológicos de interés, aunque se sacrifique la calidad de la imagen; la técnica más utilizada para estos fines se conoce como “**eco-planar imaging (EPI)**”, que es sensible al contraste T2*, y permite la adquisición de 20 o más imágenes por segundo (Huettel, *et al.*, 2009). Así, las imágenes ecoplanares son las más utilizadas cuando se requiere la obtención de imágenes por resonancia magnética funcional.

Imagenología por resonancia magnética funcional

Desde mediados del siglo XVIII Emanuel Swedenborg postuló que la corteza cerebral era responsable de los procesos cognitivos, y que diferentes partes de ella se asociaban a diferentes funciones. Pero fue a partir del siglo XIX que la ciencia se empezó a interesar en la relación entre las características del cuerpo y el comportamiento de una persona, específicamente en los aspectos representados en diferentes regiones cerebrales; aun así, fue décadas después que los científicos se acercaron al estudio de los cambios fisiológicos del cerebro para medir la actividad del mismo, siendo la **Imagenología por Resonancia Magnética Funcional (IRMf)** la técnica más novedosa para el estudio de procesos cognitivos en humanos (Huettel, *et al.*, 2009).

Como ya se mencionó, el agua es la molécula más abundante en los tejidos, por lo que la “detección” de sus protones de hidrógeno es lo más utilizado en las técnicas de imagenología por resonancia magnética. Ogawa *et al.*, en 1990, exploraron los cambios que provoca la señal del agua cuando aumenta en condiciones fisiológicas específicas, cambios que suelen ser muy pequeños, pero que en la sangre, donde el agua se mueve constantemente, son muy evidentes.

La investigación de Ogawa y sus colaboradores demostró el efecto en el contraste de las imágenes tomadas con RM al cambiar los estados fisiológicos de los animales de estudio, por inhalación de gases y por hipoglucemia inducida con insulina. Encontraron que la presencia de desoxihemoglobina en la

sangre provoca un cambio en la señal (la disminuye) de protones de las moléculas de agua alrededor de los vasos sanguíneos en gradiente de eco produciendo un **contraste dependiente del nivel de sangre oxigenada (BOLD)**, por sus siglas en inglés). Este contraste se logra cuando la oxihemoglobina, que es diamagnética (repele el campo magnético), libera su oxígeno y se vuelve desoxihemoglobina, que es paramagnética (atraída por el campo magnético, aunque en menor grado que los objetos ferromagnéticos); las sustancias paramagnéticas producen una diferencia en la susceptibilidad magnética entre los vasos y el tejido circundante (reducen la señal). Así, la señal BOLD depende del estado de oxigenación de la sangre, y los estados fisiológicos que cambien la tasa de oxi/desoxigenación permitirán la acentuación de este contraste en ecos de gradiente con campos magnéticos altos (Ogawa *et al.*, 1990).

A este cambio en la señal BOLD asociado a un proceso neuronal breve se conoce como **Respuesta Hemodinámica (RHD)**, y es un proceso lento que obedece a las leyes de la física de fluidos, llegando a ser visible hasta los 2-3 segundos después de iniciada la actividad neuronal, y alcanzando su máximo a los 4-6 s. Después la RHD decrece incluso debajo de la línea base, a los 8-12 s, probablemente por el sobreconsumo de oxígeno (que es mayor al necesario para reponer el consumo de las neuronas) (Armony, *et al.*, 2012) y, si no hay un estímulo adicional, la señal BOLD regresa a la línea base en aproximadamente 20 s (Fig. 3).

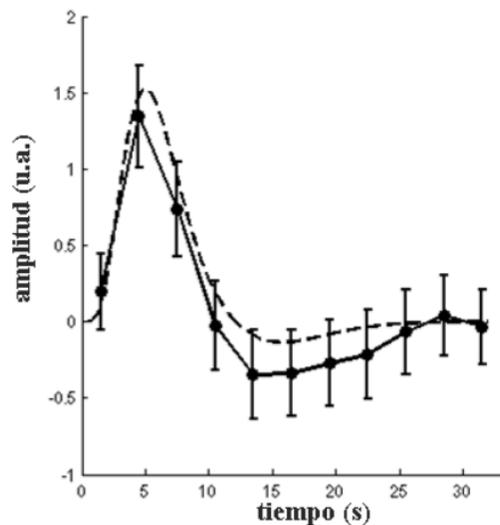


Figura 3: Respuesta hemodinámica. La respuesta hemodinámica (RHD) es producida por la actividad neuronal, pero comienza a ser visible hasta 2-3 s después, alcanzando su máximo entre los 4-6 s, para luego disminuir gradualmente entre los 8-10 s, llegando a valores más bajos que los de la línea base, pero reestableciéndose a los 20 s en caso de que no haya un estímulo adicional. La línea punteada refleja el modelo típico de RHD (tomado de Armony, *et al.*, 2012).

De esta manera, las altas concentraciones de hemoglobina desoxigenada en el cerebro brindan una imagen con contraste BOLD muy alta, aunque la sensibilidad del método se reduce cuando los vasos no están ortogonales (perpendiculares) a la dirección del campo magnético; así, la vasculatura del plano coronal es ventajosa (Ogawa *et al.*, 1990).

Como puede deducirse, la IRMf es una técnica no invasiva que permite observar los niveles de oxigenación del cerebro y crear imágenes del mismo (Ogawa *et al.*, 1990); sin embargo, tiene la limitante de la resolución temporal, porque en lugar de detectar directamente la actividad neuronal, lo que muestra son los cambios fisiológicos que se correlacionan con ésta, es decir, ésta técnica se basa en la detección de la proporción entre hemoglobina desoxigenada y oxigenada que se encuentra en la zona del cerebro que fue activada al realizar alguna tarea motora, sensorial y/o cognitiva, ya que, para que las neuronas funcionen necesitan glucosa y oxígeno, requerimiento que es cubierto por el flujo sanguíneo. De esta forma, el nivel de oxigenación de la sangre funciona como un indicador fisiológico del consumo de oxígeno durante la actividad neuronal (Huettel, *et al.*, 2009). La latencia del efecto es un impedimento para considerar los cambios detectados en relación temporal directa con los estímulos o con las tareas cognitivas, pero a diferencia del EEG que es temporalmente mucho más preciso, permite la ubicación espacial de la activación neuronal en sectores cada vez más delimitados.

Hay que recalcar que el contraste BOLD está basado en imágenes sensibles a T2*, y aunque no es el único método, resulta ser el más utilizado dentro de la resonancia magnética funcional. Como ya se dijo, las imágenes tipo T2* combinan ambos efectos de la relajación transversal: la causada por la interacción spin-spin y la de los cambios en la frecuencia de precesión debidos a las inhomogeneidades del campo magnético (causadas en este caso por la desoxihemoglobina) (Hornak, 1996; Huettel, *et al.*, 2009).

Aunque existen varias técnicas estadísticas para el análisis de las imágenes adquiridas por IRMf, la mayoría de los trabajos está basado en el **Modelo Lineal General**, el cual postula que la intensidad de un voxel en una imagen se relaciona linealmente con una serie de variables independientes que afectan la condición del cerebro durante la adquisición de la imagen (Rojas, *et al.*, 1996; Turner, *et al.*, 1998).

Lo anterior se puede resumir en la ecuación:

$$y = Xb + e$$

Donde **y** corresponde a la intensidad de un solo voxel en el curso de tiempo medido.

X representa la matriz de diseño que contiene los predictores (matriz de variables independientes

que explican la variación de la variable dependiente) a lo largo del tiempo.

\mathbf{b} es el vector de valores beta de la regresión.

Y \mathbf{e} son los términos del error aleatorio que conforman la distribución normal (BrainVoyager QX User's Guide v2.8, 2014).

La figura 4 representa gráficamente esta ecuación:

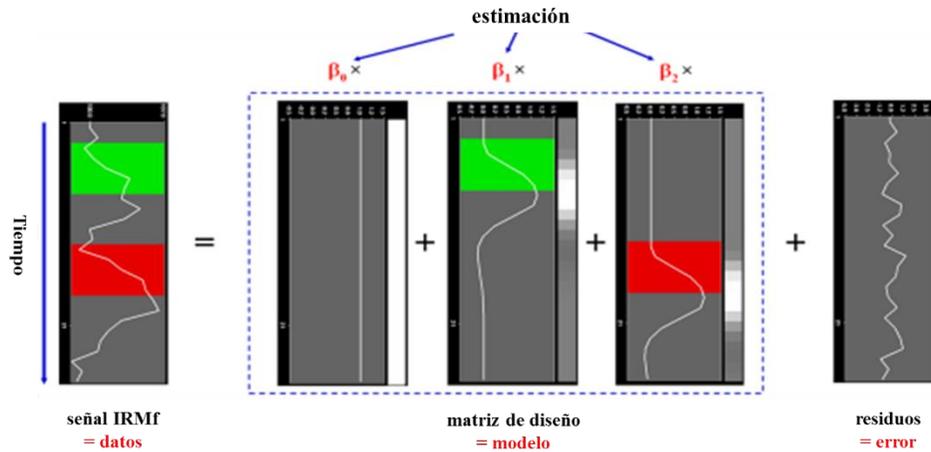


Figura 4: Modelo Lineal General. La imagen izquierda antes de la igualdad representa \mathbf{y} (señal o intensidad del voxel en el tiempo) y es “explicada” por los términos del lado derecho de la igualdad; así, las tres imágenes intermedias después de la igualdad son el modelo o matriz de diseño, y en la ecuación representan a \mathbf{Xb} (los predictores a lo largo del tiempo por el vector de valores beta de la regresión), mientras que la última imagen de la derecha representa \mathbf{e} (error aleatorio).

Finalmente, este método es una alternativa a la **Tomografía por Emisión de Positrones (PET)**, por sus siglas en inglés) (Ogawa *et al.*, 1990; Armony, *et al.*, 2012), el cual se basa en la adquisición de imágenes a través de la acción de trazadores radioactivos utilizados para medir el flujo sanguíneo o el metabolismo de glucosa, y que tiene la desventaja de ser invasivo (por los isótopos radioactivos), costoso y lento en cuanto a la adquisición de las imágenes (Huettel, *et al.*, 2009).

Corteza cerebral y percepción auditiva

De manera general la corteza cerebral está formada por ondulaciones que forman giros y surcos, que en el humano tienen un promedio de 2500 cm². La región más reciente de la corteza en términos evolutivos es la neocorteza, la cual tiene, en promedio, 3-5 mm de espesor y se compone por seis capas (I-VI), de las cuales, la IV parece ser la encargada de recibir los estímulos (aferencias), mientras que las V y VI se encargan de la salida de los mismos (eferencias).

Korbinian Brodmann publicó en 1909 un mapa citoarquitectónico en el que divide a la corteza en 47 regiones, conocidas como **áreas de Brodmann (AB)** (Fig. 5). Este mapa aún es utilizado como referencia en estudios descriptivos y comparativos que utilizan IRMf y PET, incluso, actualmente existen **atlas** computarizados que incluyen las AB, como el atlas de Talairach & Tournoux (Huettel, *et al.*, 2009).

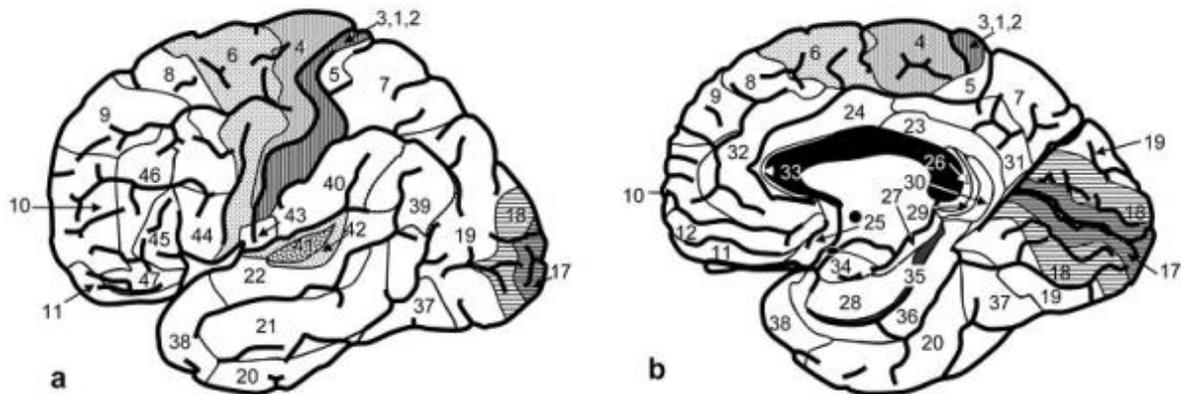


Figura 5: Áreas de Brodmann en **a)** vista lateral y **b)** medial (tomado de Paxinos, 2004).

La corteza presenta cinco subdivisiones: los **lóbulos frontal, parietal, temporal, occipital e ínsula** (algunos anatomistas proponen también al **lóbulo límbico**). El lóbulo temporal está separado de los lóbulos frontal y parietal por la cisura de Silvio (o cisura lateral) (Fig. 6) y tiene funciones tanto auditivas como visuales. A pesar de las similitudes entre ambos hemisferios, existen sutiles diferencias anatómicas responsables de la laterización funcional, siendo comúnmente aceptado que el lado izquierdo es dominante para el lenguaje (Belin, *et al.*, 1998; Huettel, *et al.*, 2009; Rogalsky, *et al.*, 2012) y el derecho para procesar otro tipo de estímulos, como los musicales (Rogalsky, *et al.*, 2012), aunque también hay evidencia de que fragmentos musicales placenteros y alteraciones en la armonía de tonos musicales, activan el hemisferio izquierdo y no el derecho (Deike, *et al.*, 2004; Flores-Gutiérrez, *et al.*, 2007).

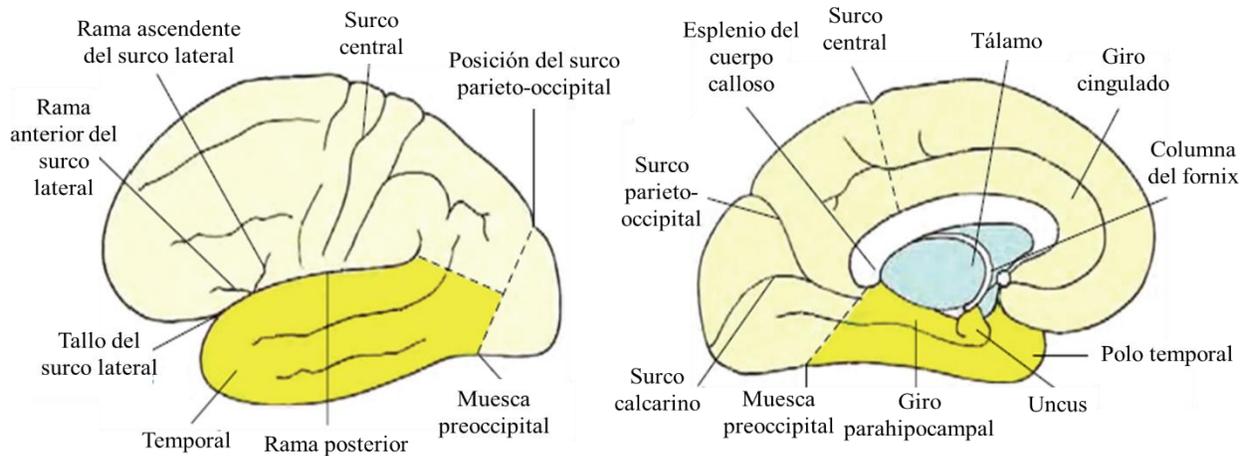


Figura 6: Límites del lóbulo temporal. Se muestran los principales giros, surcos y otras áreas anatómicas del hemisferio izquierdo (modificado de Kiernan, 2012).

Zatorre, *et al.*, en su revisión de 2002 citan investigaciones en donde se han encontrado asimetrías similares en otras especies de mamíferos, existiendo mayor información sobre la función del lóbulo temporal izquierdo (en los procesos temporales). Sin embargo, creen que estas similitudes se deben más a procesos de convergencia que a parentesco evolutivo, y parece ser que los procesos más complejos y jerárquicos de la percepción musical y lingüística son una característica particular en el ser humano que no comparte con otras especies.

¿Cómo se detecta la frecuencia en el sistema auditivo?

Escuchamos un sonido cuando el tímpano vibra debido a las pequeñas oscilaciones en la presión del aire en el canal auditivo. Si el tímpano ejecuta movimientos periódicos, sus vibraciones mecánicas se convierten en el oído interno en impulsos nerviosos eléctricos que se transmiten al cerebro, donde se interpretan como sonido (Roederer, 2009).

Las oscilaciones armónicas simples (movimientos periódicos, oscilatorios y vibratorios) del tímpano se transmiten por la cadena de huesecillos del oído medio (martillo, yunque y estribo) hacia la entrada del oído interno, la ventana oval. La **cóclea** (Fig. 7) se divide en dos canales, la rampa vestibular y la rampa timpánica, las cuales están llenas de fluido llamado perilinfa (filtrado directo del fluido cerebroespinal); ambos son un sistema hidrodinámico, limitados en el ápex (extremo final) por el helicotrema (orificio); la sección inferior está acordonada por una membrana elástica, la ventana redonda. La rampa media es un conducto que separa las otras dos rampas, y contiene otro fluido, la endolinfa; sus límites son la

membrana basilar, que sostiene al órgano sensorial (**órgano de Corti**), a la membrana de Reissner (vestibular) que separa la endolinfa de la perilinfa, y a la pared lateral de la cóclea. La elasticidad de la membrana basilar determina las propiedades hidromecánicas de la cóclea y decrece desde su base hasta el ápex 10,000 veces, por lo cual funciona para detectar sectorialmente las frecuencias (Purves, *et al.*, 2003; Roederer, 2009) y transmitir las tonotópicamente, es decir, diferentes células responden preferencialmente a frecuencias altas o bajas, dependiendo de su distribución (Cansino, 1999; Humphries, *et al.*, 2010).

Las vibraciones transmitidas por los tres huesecillos a la ventana oval se convierten en oscilaciones de presión en la perilinfa. Consecuentemente, las diferencias de presión resultantes a través de la partición coclear entre las dos rampas flexionan la membrana basilar para arriba y para abajo. A medida que la onda se propaga hacia el ápex, su amplitud alcanza su máximo en un punto determinado de su camino para luego decaer rápidamente hacia el ápex (Purves, *et al.*, 2003; Roederer, 2009).

Las células pilosas o ciliadas son unidades receptoras ordenadas en filas (una interna y tres externas) a lo largo de la membrana basilar, que recogen los movimientos de ésta y le mandan señales a las células nerviosas con las que están en contacto. Las células pilosas se llaman así por sus múltiples ramificaciones llamadas estereocilios, los cuales se proyectan en el fluido endolinfático, y cuyos desvíos disparan una serie de procesos electroquímicos en la célula pilosa y sus alrededores, culminando con la generación de señales eléctricas en el nervio acústico. La membrana tectorial (tejido gelatinoso suspendido en la endolinfa) tiene insertados los cilios de las células pilosas externas, y su función es estimular y recibir el movimiento de las mismas (Purves, *et al.*, 2003; Roederer, 2009).

La sensación de agudeza de un tono (altura) incrementa a medida que la frecuencia (ciclos por intervalo de tiempo) aumenta. Esta frecuencia se expresa en ciclos por segundo o Hertz (Hz), y las personas normales pueden percibir sonidos entre los 20 y los 15 000 Hz, siendo que el límite superior depende de la sonoridad (intensidad) de un tono y puede variar entre individuos y con la edad. Así, si un sonido produce un movimiento armónico simple del tímpano con características constantes (frecuencia, amplitud y fase), el humano percibe lo que se denomina **tono simple**. Sin embargo, la música no está hecha de tonos simples aislados; éstos sólo se pueden producir por osciladores electrónicos (que incluso pueden dejar de ser simples al llegar al oído) (Roederer, 2009). Los tonos son usados para construir melodías (patrones de tonos sobre el tiempo), coros (presentación simultánea de tonos) y armonías (presentación simultánea de más de una melodía) (Stewart, *et al.*, 2006).

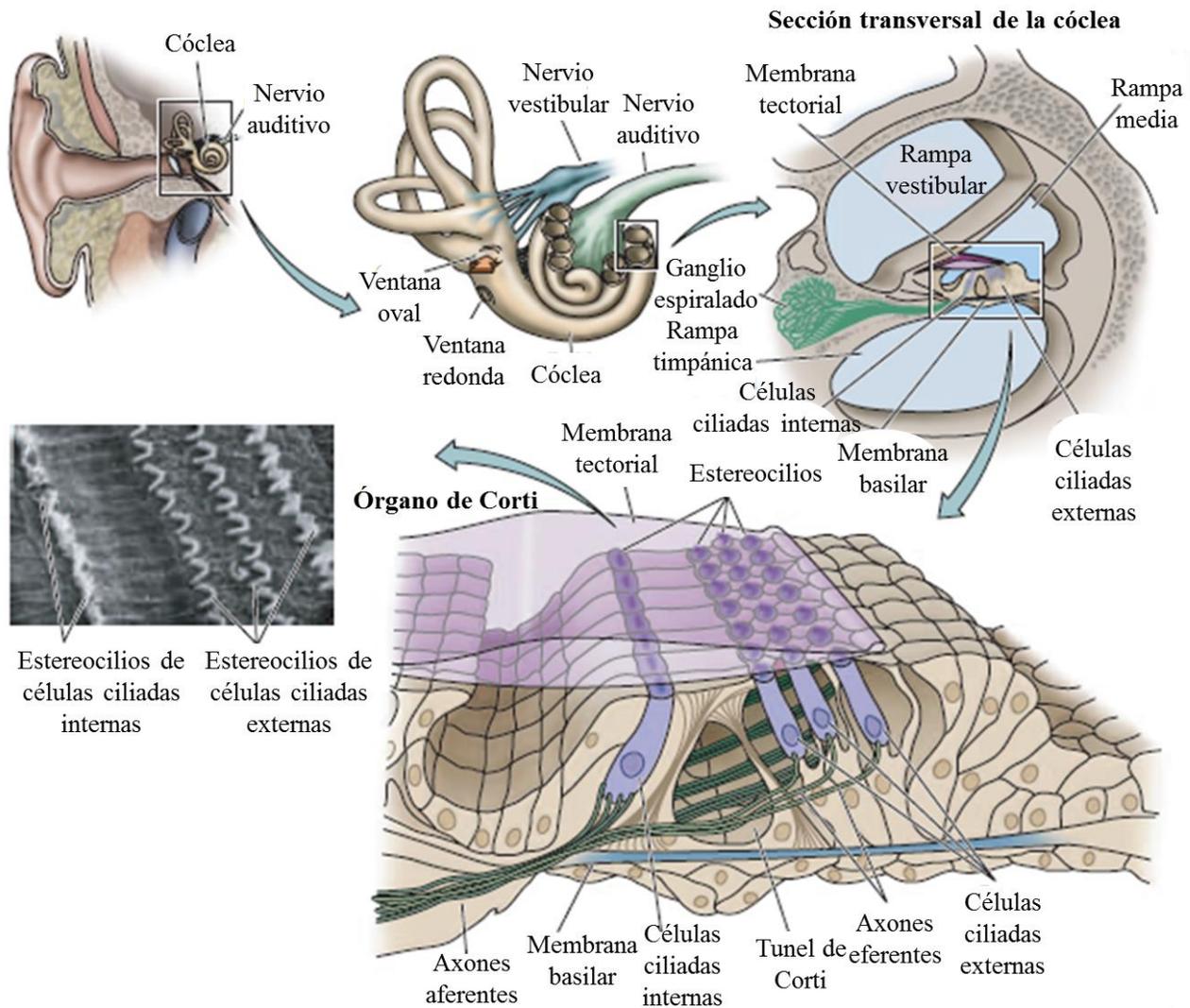


Figura 7: Cóclea. La imagen superior izquierda muestra la cóclea de frente, en las imágenes posteriores se presenta un corte transversal y una ampliación del órgano de Corti, así como una micrografía electrónica de barrido donde se observan los estereocilios de las células ciliadas. Modificado de Purves (2003).

De la cóclea al encéfalo: percepción espacial y temporal

El nervio auditivo (nervio craneal VIII) está formado por varias prolongaciones periféricas que hacen contacto con las células ciliadas internas de la cóclea, y prolongaciones centrales que inervan el núcleo coclear, en el tallo cerebral. La organización tonotópica de la cóclea se mantiene en las tres partes del núcleo coclear, ya que cada uno contiene distintas poblaciones de células con propiedades muy diferentes (Purves, 2003).

Posteriormente, la información es enviada de manera bilateral, desde el núcleo coclear anteroventral hacia la oliva superior lateral y medial, así como al núcleo medial del cuerpo trapezoide, donde se procesan las diferencias de tiempo e intensidad interaural. Sin embargo, también existe una vía monoaural que evita a la oliva superior y que asciende desde el núcleo coclear hasta el lemnisco lateral del tronco encefálico, de manera contralateral, y que se encarga de señalar el inicio y la duración del sonido (Purves, 2003).

La información de ambas vías asciende hasta el centro auditivo del mesencéfalo, es decir, hacia el colículo inferior, en donde se integra la información recibida y se forma una especie de mapa topográfico del espacio auditivo, además de tener la capacidad de procesar sonidos con patrones temporales y espectrales complejos, lo cual en el humano es relevante para la comprensión del habla (Purves, 2003).

Finalmente, el complejo geniculado medial es el último relevo de la información auditiva antes de llegar a la corteza cerebral (Fig. 8). La mayoría de sus eferencias son recibidas desde el colículo inferior, aunque algunas fibras lo evitan y provienen directamente desde el tronco del encéfalo inferior. Así, en algunos mamíferos, especialmente murciélagos, se ha visto que al ser el punto de convergencia de las vías auditivas, las células del complejo geniculado medial son selectivas tanto para combinaciones de frecuencias como para intervalos de tiempo específicos entre frecuencias. No se sabe si ocurre exactamente lo mismo en humanos, pero la detección de patrones espectrales y temporales del sonido son características especialmente importantes para la comunicación (Purves, 2003).

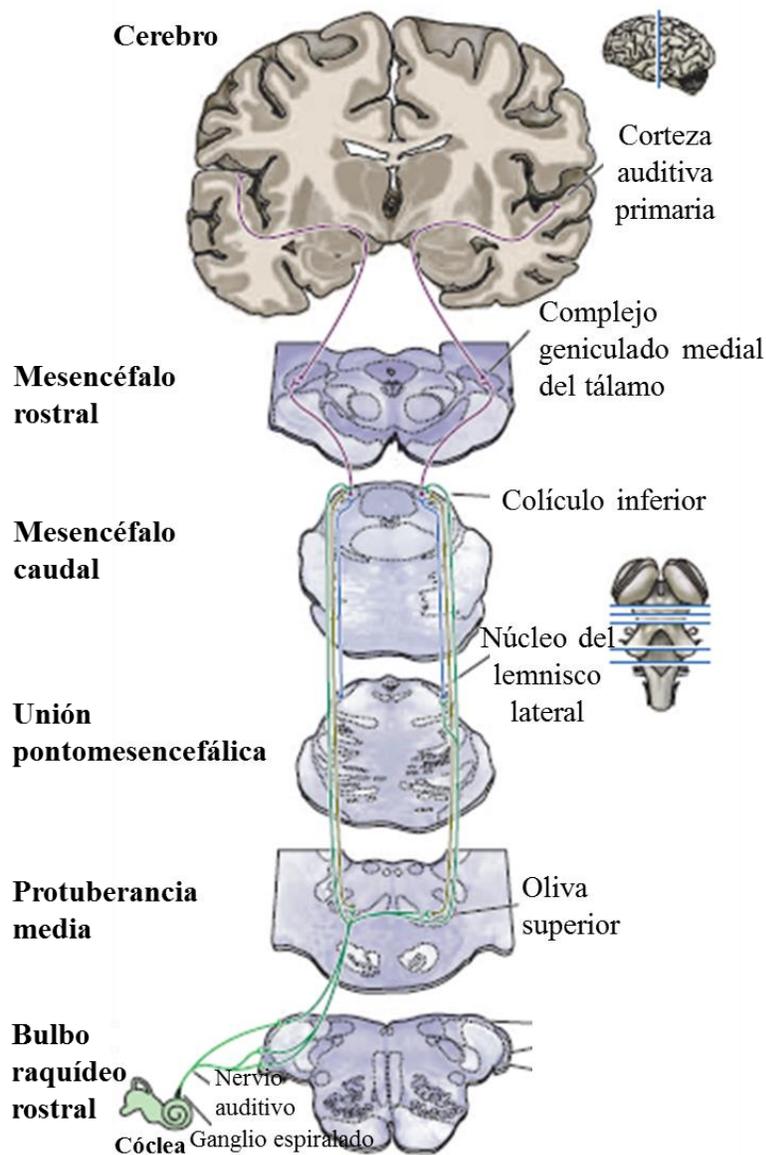
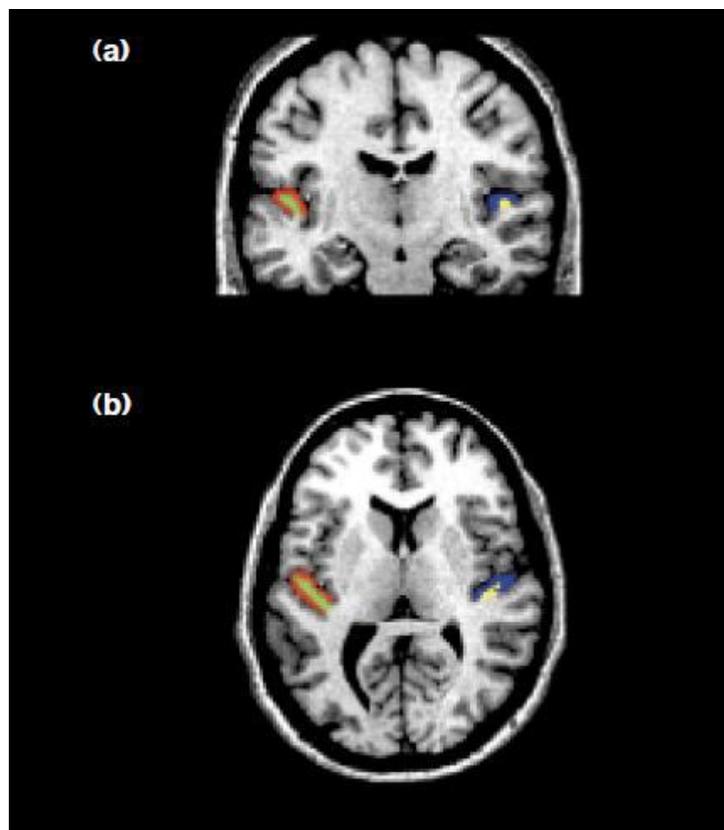


Figura 8: Vías auditivas principales. El nervio auditivo sale de la cóclea y lleva la información hasta la corteza auditiva, haciendo varios relevos a lo largo del tallo cerebral. La información proveniente de ambos oídos alcanza ambos lados del sistema. Modificado de Purves (2003).

Corteza auditiva y organización tonotópica

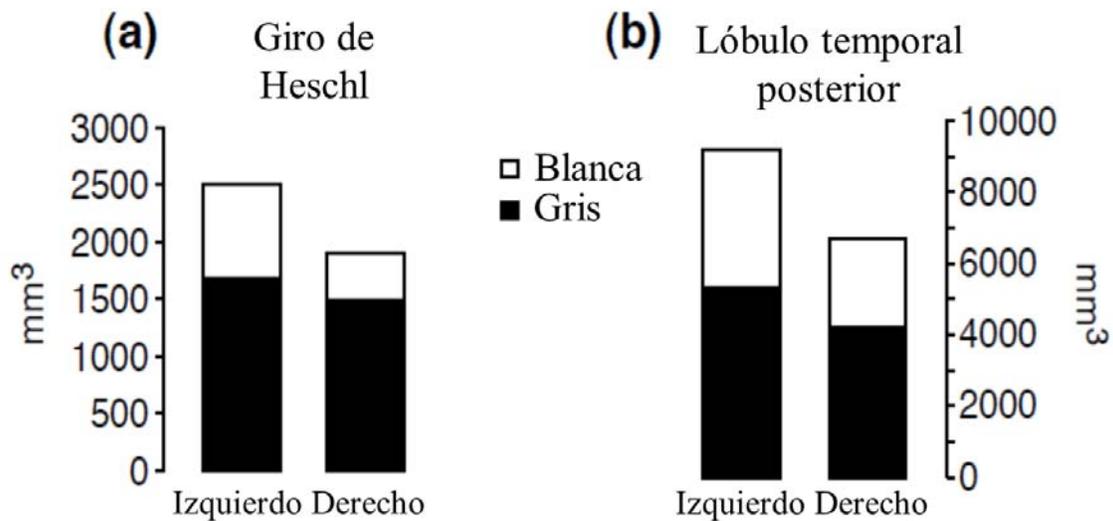
Como se ha venido mencionando, el sistema auditivo tiene una **organización tonotópica**, que se refiere a que diferentes células responden preferencialmente a diferentes frecuencias (altas o bajas), dependiendo de la distribución de sus receptores (Cansino, 1999; Humphries, *et al.*, 2010). Las técnicas de neuroimagen han podido determinar la organización tonotópica de la corteza auditiva en los seres humanos, así como sus implicaciones funcionales (Cansino, 1999).

En humanos, la corteza auditiva primaria (AB41) recibe aferencias directas del núcleo geniculado medial del tálamo y se localiza en el lóbulo temporal, en la superficie dorsal del **Giro Temporal Superior (GTS)**, cubierta por el opérculo frontoparietal (Angulo-Perkins & Concha, 2014), ocupando específicamente dos tercios de la parte anterior de la región conocida como **Giro de Heschl (HG)** (Morosan, *et al.*, 2001; Rademacher, *et al.*, 1993), el cual es más largo y ancho en el hemisferio izquierdo que en el derecho (von Economo & Horn, 1930) debido a que tiene mayor volumen de materia blanca (Penhune, *et al.*, 1996) (Figs. 9 y 10), sus células piramidales de la capa III son más largas que las de la derecha (Hutsler & Gazzaniga, 1996) y sus células columnares son más anchas, teniendo también más contactos aferentes (Seldon, 1981; Seldon, 1982).



TRENDS in Cognitive Sciences

Figura 9: Giro de Heschl en (a) sección coronal y (b) horizontal. La materia blanca tiene un volumen mayor en el hemisferio izquierdo (verde) en comparación con la materia blanca del hemisferio derecho (amarillo). Tomado de Penhune, *et al.* (1996).



TRENDS in Cognitive Sciences

Figura 10: Diferencias inter-hemisféricas; las gráficas de barras muestran el volumen de materia gris y blanca en los hemisferios izquierdo y derecho del (a) giro de Heschl y (b) el lóbulo temporal posterior. Modificado de Penhune, *et al.* (1996) y Anderson, *et al.* (1999).

En la corteza auditiva de primates no humanos existen tres divisiones que presentan un **gradiente tonotópico**: **A1 (corteza auditiva primaria)**, **R (campo rostral)** y **RT (campo rostrotemporal)**, A1 responde mejor a **tonos puros** (sonidos con una sola frecuencia) que los otros dos campos, mientras que RT responde mejor a sonidos no monotónicos que A1 y R (Bendor & Wang 2008). En conjunto, estas tres regiones son conocidas como **núcleo** (habitualmente referido como *core*), que a su vez está rodeado por regiones conocidas como **cinturón (*belt*)** (Kaas & Hackett 2000; Kaas, 2011) y **paracinturón (*parabelt*)** (Kaas, 2011), y representan las cortezas auditivas secundarias.

Los estudios de Humphries, *et al.*, (2010) muestran claras homologías entre la organización tonotópica de primates humanos y no humanos; en humanos el mapa tonotópico tiene un gradiente de distribución postero-anterior (de alto a bajo) y luego antero-posterior (de bajo a alto, como en espejo) a lo largo del giro de Heschl (Seldon, 1982). Por su parte, el cinturón (AB42) y el paracinturón (AB22) representan a las cortezas auditivas secundaria y terciaria, respectivamente, mostrando también claras homologías con los primates no humanos, en su organización funcional (Chevillet, *et al.*, 2011) (Fig. 11). Si bien A1 tiene casi la misma extensión en humanos y macacos, las regiones del cinturón y paracinturón son mucho mayores en el humano (9.6 veces más que en macacos), lo cual puede ser la causa o la consecuencia del desarrollo del lenguaje en humanos (Hall, *et al.*, 2002) y la razón por la cual es difícil utilizar modelos animales para el estudio de esta cualidad así como de la música (Angulo-Perkins & Concha, 2014).

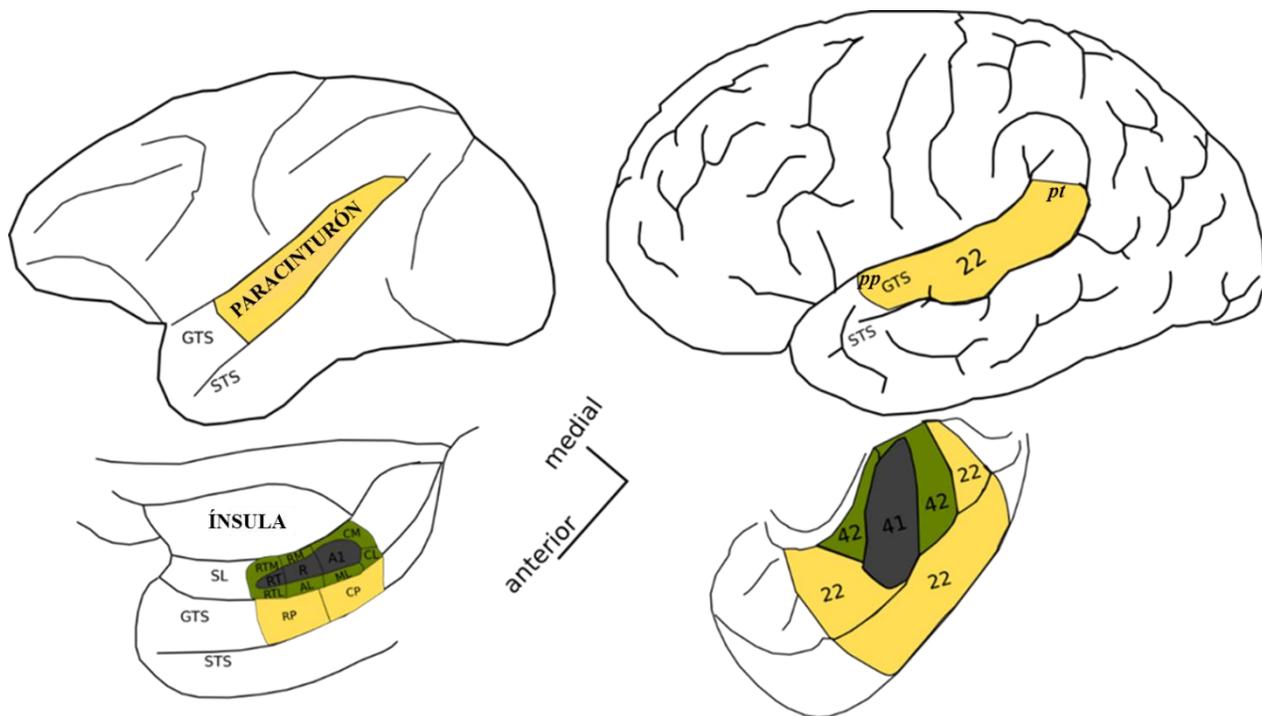


Figura 11: División de la corteza auditiva. Comparación entre las regiones auditivas de macacos (izquierda) y humanos (derecha); se muestran las divisiones del núcleo (gris), el cinturón (verde) y el paracinturón (amarillo). Tanto el *planum polare* (pp) como el *planum temporale* (pt) se ubican en la parte más anterior y más posterior del paracinturón (AB22), respectivamente, que son mucho más extensas en el humano que en macacos. Tomado de Angulo-Perkins & Concha (2014).

Las zonas del cinturón y paracinturón se encuentran también en el GTS, que tiene en su parte anterior (GTSa) al *planum polare* y en su parte posterior (GTSp) al *planum temporale*; este último se localiza en el **Área de Wernicke** y responde preferencialmente a tonos bajos (contrario a la parte anterior del GH, que responde a tonos altos) (Humphries, *et al.*, 2010) presentando las mismas asimetrías en materia blanca observadas en el GH, estando más mielinizados los axones del lado izquierdo (Anderson, *et al.*, 1999). Por su parte, el GTSa es un área más sensible a los cambios espectrales complejos, en contraste con A1 que responde primordialmente a tonos puros (Zatorre & Belin, 2001; Patterson, *et al.*, 2002; Woods, 2009). Asimismo, Seldon (1981) encontró que en el hemisferio izquierdo el *planum temporale* (Área de Wernicke) es más grande que en el derecho, además de que hay diferencias interhemisféricas en los tamaños e intervalos entre células, de las columnas neuronales, así como diferencias en el volumen fraccional de neurópilos.

De esta manera, toda la información acústica involucra al lóbulo temporal de la corteza cerebral, sin embargo, estímulos complejos como el lenguaje y la música involucran también a las áreas secundarias, formando cada una red neuronal diferente a pesar de sus similitudes en cuanto a su funcionalidad comunicativa, evolución y características espectro-temporales (Angulo-Perkins & Concha, 2014).

Corteza auditiva y codificación de estímulos complejos: efecto de la temporalidad en la lateralización funcional

La música se forma por sucesiones y superposiciones de tonos que se analizan en el cerebro. Cuando dos tonos diferentes se superponen, cada uno de ellos produce su propia multiplicidad de zonas de resonancia sobre la membrana basilar, y el cerebro es capaz de identificarlos por separado, sin embargo, no son las células receptoras quienes tienen esta capacidad, sino que se logra en regiones de alto nivel en el sistema nervioso auditivo, y la temporalidad es la clave para hacerlo (Roederer, 2009).

El comienzo o ataque de dos tonos “simultáneos” nunca está perfectamente sincronizado, y es precisamente este atributo el más importante para la percepción del timbre e identificación del tono (Iverson & Krumhansl, 1993). El cerebro es capaz de centrarse en los rasgos característicos del patrón vibratorio de cada instrumento aun cuando se distorsionan por la señal del otro instrumento; y, de la misma manera, las variaciones periódicas de altura e intensidad contribuyen a la discriminación del timbre. Sin embargo, lo más importante para la discriminación de tonos complejos es la información progresiva de superposiciones, es decir, la información de “orden más alto” o información secundaria, conocida como **mensaje musical**. Cuando se escucha una superposición de tonos en una sala muy reverberante, la primera llegada del sonido directo determina la sensación real del tono y su discriminación, es decir, el efecto temporal es primordial (Roederer, 2009).

Además, si se ponen dos estímulos diferentes con una separación de frecuencia muy larga, se percibirán como dos sonidos; si la separación es muy corta o se presentan simultáneamente, se percibirán como un sólo sonido; una intermedia dará como resultado cambios en la percepción a lo largo del tiempo (aunque luego se vuelve estable y se detectan dos). Estos resultados muestran una vez más que la temporalidad resulta ser un factor importante en la transmisión auditiva (Bizley & Cohen, 2013).

Aunado a esto, el ritmo es un componente fundamental de la música; la propagación a través del sistema nervioso auditivo de señales cíclicas y patrones sonoros rítmicos, genera cierta predicción de lo que se “escucha” en determinado momento y lo “escuchado” con anterioridad, para construir un modelo que probablemente ocurra en el siguiente estímulo (Roederer, 2009).

Por otro lado, ya se ha visto que existe una diferenciación anatómica entre los hemisferios, sin embargo, éstos están conectados entre sí por doscientos millones de fibras del cuerpo calloso y un millón de fibras

de la comisura blanca anterior. Existe una tendencia a pensar que el **hemisferio dominante** (usualmente el izquierdo) se ocupa de las funciones del lenguaje (análisis secuencial), mientras que el **hemisferio menor** (usualmente el derecho) quedó relegado a tareas holísticas y con patrones temporales de largo plazo (que en sí mismas tienen un valor holístico por sus contornos melódicos, como la Gestalt), como la percepción musical (integración espacial). Aunque se propone también que el hemisferio izquierdo también se encarga de procesar el ritmo musical (Roederer, 2009). Sin embargo, Bever & Chiarello (1974) demostraron que cuando los músicos ponen atención a la sucesión de sonidos de corto plazo en una melodía, la activación cerebral ocurre en el hemisferio dominante; lo contrario sucede cuando personas con afasia son capaces de cantar sin problemas canciones aprendidas antes de su enfermedad, sin poder hablar las mismas palabras de la canción (Roederer, 2009).

Un aspecto importante que comparten la música y el lenguaje es la sintaxis, que se refiere a aquellos principios en los que se basa la combinación de un número discreto de elementos (fonemas o notas) para formar una estructura significativa (palabras o melodías), resultando posteriormente en una organización jerárquica más compleja (oraciones o canciones) (Jackendoff, 2002, citado por Patel, 2003). Autores como Koelsch, *et al.*, (2002) y Patel (2003) han encontrado que las mismas zonas que se activan con estímulos lingüísticos también lo hacen con estímulos musicales; de hecho, con anterioridad, Patel, *et al.*, (1998) propusieron que la **prosodia** y la música comparten recursos neurales utilizados para mantener los patrones auditivos en la memoria de trabajo, por lo que, como encontraron Zatorre y colaboradores en su revisión de 2002, es frecuente la activación en el lóbulo frontal (especialmente del lado derecho); de la misma forma, Trehub, *et al.* (2000) consideran que los elementos musicales del lenguaje juegan un papel importante en la adquisición del mismo.

Sin embargo, el procesamiento de estímulos auditivos es complejo; Belin, *et al.* (2000) encontraron con resonancia magnética funcional que los estímulos vocales lingüísticos y no lingüísticos activan bilateralmente la parte anterior del surco temporal superior (STSa) en mayor grado que los estímulos no vocales, y particularmente, el análisis de la voz puede estar dissociado en distintas zonas de la corteza: mientras en una región se codifica la información conceptual del discurso (STS izquierdo), en otra (STS derecho) se codifica el reconocimiento de la persona que habla (reconocimiento afectivo) (Belin, *et al.*, 2002), tal como ocurre en el **giro fusiforme** (derecho) de la corteza visual, que se activa durante el reconocimiento de rostros (Kanwisher, *et al.*, 1997). De manera similar, las diferentes frecuencias y timbres musicales pueden ser percibidos por un área diferente a la que percibe el ritmo, por ejemplo.

Tanto la música como el lenguaje deben tener un ordenamiento temporal para poder ser comprendidos como tales, ya que de éste depende la percepción de características acústicas como el ritmo (Samson, *et al.*, 2001; Abrams, *et al.*, 2010; Rogalsky, *et al.*, 2011) y la métrica, sin embargo, la escala temporal a la que deben codificarse es muy diferente. Para comprender el lenguaje se necesita la capacidad de detectar categorías fonéticas en el orden de decenas de milisegundos (Shannon, *et al.*, 1995; Phillips & Farmer, 1990). Tallal (1993) por ejemplo, reportó evidencia de que la dificultad en la adquisición del lenguaje de algunos niños radica en la dificultad que tienen para procesar rápidamente cambios temporales de la información, y Efron (1963) menciona que la **afasia** se relaciona con la deficiencia en la percepción temporal, sobre todo la del lóbulo temporal izquierdo (Swisher, & Hirsh 1972).

Igualmente, la melodía musical se debe principalmente a las variaciones en las notas, pero estas son mucho más lentas que las de los cambios en las consonantes durante el lenguaje (Zatorre, *et al.*, 2002), ya que las notas musicales son normalmente más largas que los fonemas, y las melodías con notas de corta duración (160 ms) son muy difíciles de identificar (Warren, *et al.*, 1991; Fraisse, 1974). Al respecto, Poeppel (s.f.), observó que la corteza auditiva izquierda es más sensible a los eventos rápidos (20-50 ms) mientras que la corteza derecha lo es a rangos más lentos (150-250 ms) (ver lado derecho de la Tabla 1, en la sección: “¿Por qué estudiar el efecto de la música en el cerebro?”).

Utilizando PET, Belin y cols. (1998) encontraron activación bilateral en la corteza auditiva con cambios de frecuencia lentos (200 ms), notando reducción en la activación del lado derecho en respuesta a las transiciones de frecuencia rápidas (40 ms). Más adelante, con la misma técnica de imagen, Zatorre & Belin (2001) observaron que A1 (giro de Heschl) respondió más notoriamente en el lóbulo izquierdo a manipulaciones temporales de estímulos acústicos, lo cual resulta óptimo para la comprensión del lenguaje y en general los procesos temporales de corto plazo; en tanto que el GTS (corteza secundaria) se activó preferentemente en el lóbulo derecho ante manipulaciones espectrales de los mismos estímulos, lo cual resulta crucial para las tareas de integración espacial y representación temporal a largo plazo como la discriminación de frecuencias y percepción musical (Fig. 12). Años atrás, Robin, y cols. (1990) habían encontrado que los pacientes con lesiones temporo-parietales del hemisferio izquierdo no son capaces de percibir los cambios de información temporal, aunque su percepción espectral es normal, ocurriendo lo contrario en los pacientes con daño en el hemisferio derecho; Samson *et al.*, 2001, en un experimento similar, obtuvieron los mismos resultados en pacientes con daño en el hemisferio izquierdo.

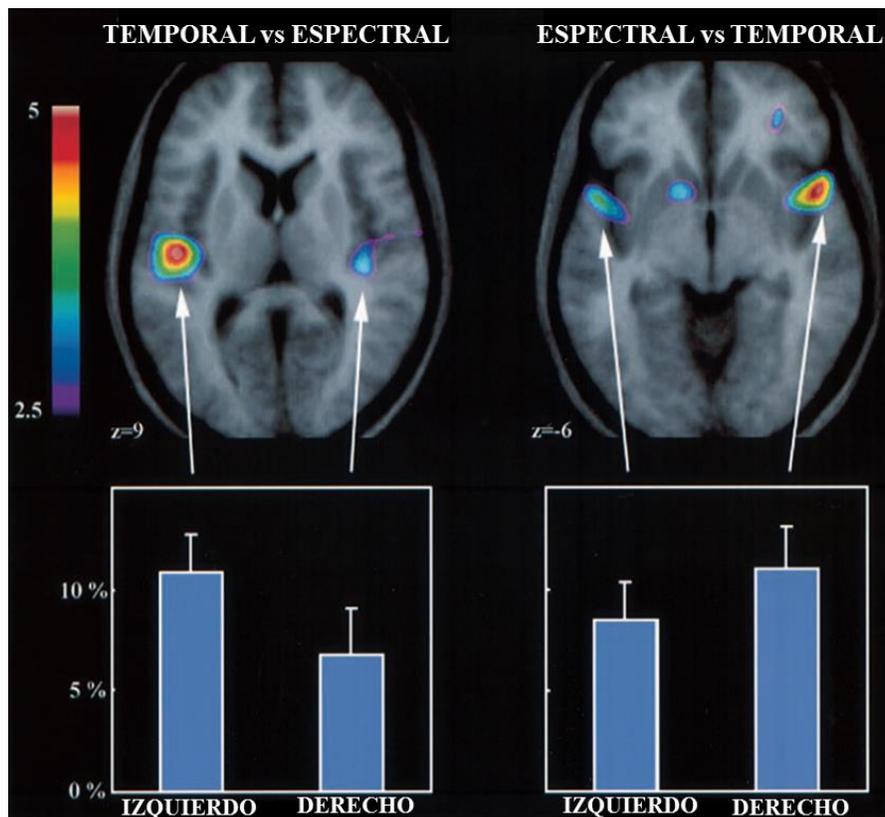


Figura 12: Diferenciación funcional inter-hemisférica; las gráficas de barras muestran la activación entre los hemisferios izquierdo y derecho en las regiones que se modulan preferentemente por cambios temporales (izquierda) o por cambios espectrales (derecha); nótese que en el hemisferio izquierdo se activó principalmente A1, mientras que en el derecho lo hicieron regiones más posteriores. Tomado de Zatorre & Belin (2001).

Recientemente, Lai y colaboradores (2012) encontraron con IRMf e imagenología por tensor de difusión (ITD) que las deficiencias en el lenguaje de los niños con autismo frecuentemente no se relacionan con discapacidades musicales. Notaron que la activación del giro frontal inferior izquierdo se reduce en niños autistas con respecto a los controles al escuchar estímulos lingüísticos, pero fue mayor que los controles durante la estimulación musical (canciones).

Zatorre, *et al.*, (2002) proponen entonces que la lateralización funcional de los hemisferios optimiza el procesamiento de los estímulos acústicos ambientales, aunque, al igual que Roederer (2009), sugieren que esta lateralización no se debe a fenómenos separados sino complementarios, en donde el lado derecho es importante para la percepción de aspectos musicales sólo como una consecuencia que complementa la especialización del lenguaje, mientras que Rogalsky y cols. (2011) consideran que además la codificación temporal, la comprensión del lenguaje depende más de las características gramaticales de las palabras, y que la comprensión musical está determinada por características acústicas (tono y melodía).

Al respecto, hay dos teorías; la primera (“cue-specific, hypothesis”) basada en que la asimetría interhemisférica se debe a las características acústicas de bajo nivel, en donde los patrones de tonalidad lingüísticamente relevantes se procesan en las redes del hemisferio derecho; y la segunda (“domain-specific model”) se basa en que las características de bajo nivel no determinan la lateralización, y entonces el análisis del discurso se procesa exclusivamente por las características abstractas de alto nivel y por lo tanto en el hemisferio izquierdo (revisado en Angulo-Perkins & Concha, 2014).

¿Existen regiones específicas para la percepción musical dentro de la corteza auditiva?

Peterson, *et al.*, (2002) analizaron la activación cortical al presentar secuencias de tonos variables (no monotónicos), encontrando activación en la parte lateral del GH, el GTSp y el *planum polare* derecho, es decir, estas estructuras presentan mayor actividad cuando se escuchan melodías que cuando se escuchan secuencias de tonos simples, lo cual es similar a lo hallado por Woods (2009), que encontró que el GTSa es más sensible a procesos complejos.

Más adelante, Tierney *et al.* (2013) mostraron que el *planum polare* responde preferencialmente a las frases percibidas como canciones (frase repetida constantemente) que a las frases en sí, sugiriendo que esta estructura es importante no sólo para la resolución espectro-temporal sino para la categorización de sonidos específicos, como la música. De la misma manera, Angulo-Perkins, *et al.* (2014), con estudios de resonancia magnética funcional encontraron que el *planum polare* resultó ser la estructura con mayor respuesta para la música (Figs. 13 y 14) tanto en personas con entrenamiento musical como en aquellas que no lo tienen, pero notando activación bilateral comúnmente en los músicos, que además presentan correlación positiva entre la activación del *planum polare* izquierdo y el número de horas que practican por semana; adicionalmente, encontraron activación en el *planum temporale* izquierdo de todos los sujetos, pero también actividad más fuerte en el *planum temporale* derecho de los músicos. Estas observaciones demuestran que los músicos tienen una distribución neural más amplia en el procesamiento de la música, analizando los componentes musicales de una manera más elaborada (bilateral), lo cual sugiere plasticidad funcional en respuesta al ambiente. Igualmente, Sheid y Eccles, desde 1974 plantearon que un *planum temporale* derecho agrandado podría ser indicio de una habilidad musical innata, fundamentando la transmisión hereditaria de la musicalidad (Roederer, 2009).

Por otro lado, Hyde & Peretz (2003) mostraron que los sujetos con amusia congénita tienen un déficit en

la percepción de cambios de tono en secuencias monótonicas, aunque sí pueden detectar los cambios de tiempo; sin embargo, Foxton *et al.* (2006) encontraron que estas personas pueden detectar las desviaciones temporales en ritmos simples, pero no lo pueden hacer con melodías, lo cual es evidencia de que los padecimientos de percepción auditiva están relacionados con un déficit en los procesamientos de estructuras auditivas secundarias, y no las de primer orden. Al respecto, Aubé, *et al.* (2015) extrajeron los parámetros acústicos de estímulos auditivos y reportaron una correlación positiva entre la señal BOLD del *planum polare* y la claridad rítmica y articulación, que son características relacionadas con procesos temporales a largo plazo del sonido, inherentes a la música (Angulo-Perkins, *et al.*, 2014).

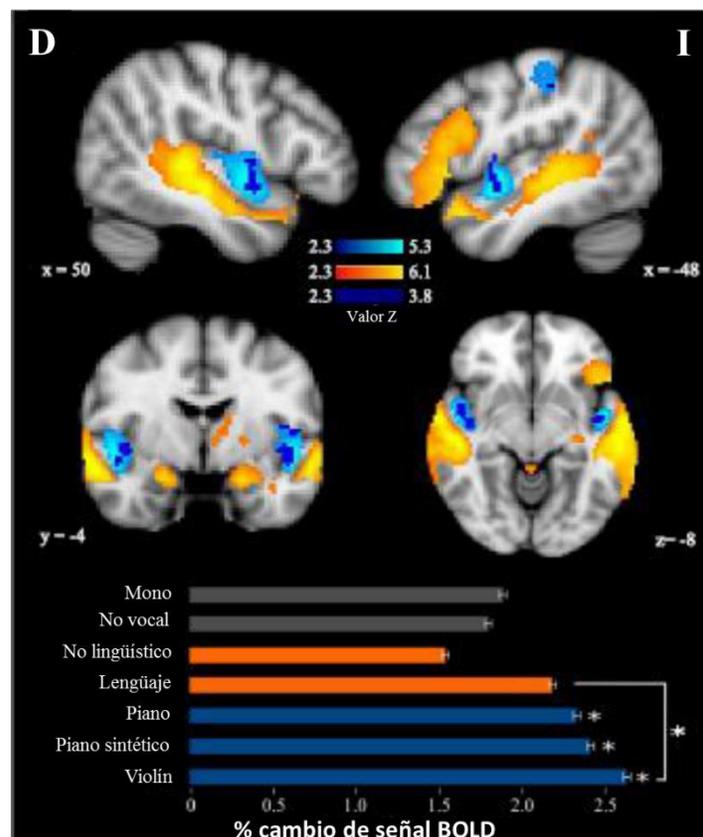


Figura 13: Activación diferencial entre estímulos musicales y vocalizaciones humanas; los grupos en azul claro muestran la música > vocalizaciones humanas, y en los grupos de azul oscuro se observa únicamente música > lenguaje; puede observarse que ninguno se sobrelapa con los grupos en colores cálidos que corresponden a vocalizaciones humanas > música. **En el panel inferior:** se muestran los promedios de los cambios de señal BOLD respecto a la línea base, en función de las categorías de estímulos, en el *planum polare* derecho; puede observarse que las diferencias significativas sólo se dieron con los estímulos musicales. Modificado de Angulo-Perkins *et al.*, (2014).

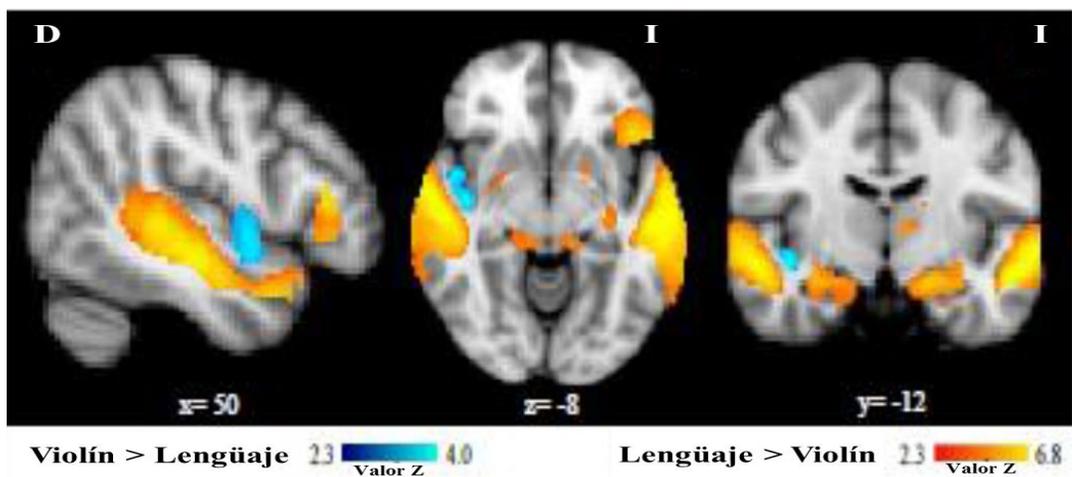


Figura 14: Violín vs lenguaje. El *planum polare* muestra activación significativa en respuesta al estímulo de violín vs el lenguaje (azul claro). El contraste opuesto se muestra en la escala de rojos y se observa que tiene una red neural más distribuida sobre los lóbulos temporal y frontal. Modificado de Angulo-Perkins *et al.*, (2014).

Así, el *planum polare* parece procesar características acústicas intrínsecas a la música, como la melodía, armonía, tonalidad (Woods, 2009), claridad rítmica y articulación (Aubé, *et al.*, 2015), es decir, tiene funciones de alto orden, diferentes a las de la corteza auditiva primaria.

Regiones activadas por la música, fuera de la corteza auditiva

Además las regiones temporales (área de Wernicke, giro de Heschl, *planum polare* y *planum temporale*), Koelsch y cols. (2002) encontraron que las zonas que se activan con estímulos lingüísticos o musicales son el **área de Broca (BA 44 y 45)** y las **cortezas insulares antero superiores**, mientras que Zatorre, *et al.* (2002) encontraron en su revisión que es frecuente la activación del **lóbulo frontal**, especialmente del lado **derecho**, por lo que deducen que la organización de los sonidos requiere la función de la memoria de trabajo.

De la misma manera, Abrams, *et al.* (2010) estudiaron el efecto de los estímulos musicales y lingüísticos en la activación de la corteza cerebral, así como el efecto de la revoltura (*scramble*) de los mismos, lo cual les provoca un cambio de sintaxis. La mayor activación por fMRI, en ambos estímulos, ocurrió en el lóbulo temporal: en el hemisferio izquierdo el giro temporal superior posterior (GTSp) y del hemisferio derecho el giro temporal superior anterior (GTSa) y el giro temporal medio anterior (GTMa). Sin embargo, al igual que los autores anteriores, encontraron una activación importante en el lóbulo frontal, sobre todo en el área de Broca.

Contrario a los resultados de Abrams y Koelsch, Rogalsky, *et al.*, 2011, al estudiar la activación cortical ante estímulos musicales y lingüísticos, encontraron, que los primeros fueron más significativos en el hemisferio derecho, y un análisis de voxeles muy selectivo indicó más activación de la parte posterior del lóbulo temporal izquierdo con los estímulos lingüísticos. En general, con los estímulos lingüísticos hubo más activación en la parte ventro-lateral, mientras que la parte dorso-medial fue más sensible para los estímulos musicales, extendiéndose incluso al **lóbulo parietal**.

Como se mencionó en secciones anteriores, Lai y cols. (2012) hallaron que las deficiencias lingüísticas en el lenguaje de los niños con autismo frecuentemente no se relacionan con discapacidades musicales. Notaron que la activación del **giro frontal inferior izquierdo** se reduce en niños autistas con respecto a los controles al escuchar estímulos lingüísticos, pero fue mayor que los controles durante la estimulación musical (canciones).

Igualmente, los resultados de Angulo-Perkins, *et al.* (2014), presentaron diferencias en la activación cortical como respuesta a estímulos musicales, en comparación con otro tipo de sonidos: lingüísticos, no lingüísticos y no vocales. El *planum polare* derecho resultó ser la estructura con mayor respuesta para la música (violín, piano y piano sintético), tanto en personas con entrenamiento musical como en ellas que no lo tienen, aunque en realidad la parte anterior del giro temporal superior (GTSa) (incluido el *planum polare* extendiéndose a través del polo temporal) respondió bilateralmente no sólo a la música, sino a los sonidos vocales humanos (lingüísticos y no lingüísticos) en comparación con los de mono y los no vocales. Sin embargo, contrario a los estudios anteriores (Koelsch, *et al.*, 2002; Abrams, *et al.*, 2010), sólo las vocalizaciones humanas (comparadas con la música), activaron la parte lateral del GTS, el giro medial temporal (GMT), el surco temporal superior (STS), el área de Broca, el giro frontal superior (GFS) y la amígdala. Mientras que, además de la corteza auditiva, la música activó la parte superior del **giro postcentral izquierdo**, correspondiente a la **corteza somatosensorial primaria**.

Por último, Bizley & Cohen (2013) revisaron estudios en donde se demuestra la participación de otras regiones en la transmisión auditiva, como los **lóbulos parietal y frontal**, además de la corteza auditiva. Incluso Pressnitzer *et al.* (2008) argumentaron que el análisis de las escenas auditivas comienza mucho antes de llegar a la corteza, requiriendo la interacción de las áreas subcorticales (como el núcleo coclear), lo cual es consistente con observaciones hechas en especies carentes de neocorteza. Por su parte, Stewart, *et al.* (2006) citan varias investigaciones en donde se demuestra la activación del cerebelo y los ganglios basales durante la presentación de estímulos rítmicos.

Procesamiento distribuido de tareas auditivas

Como puede verse, la representación neural de una categoría sonora en específico puede estar distribuida en redes, más que en una región cortical particular. Por ejemplo, la representación del “timbre” está distribuida en el núcleo y el cinturón: la información se origina en el giro de Heschl y luego se transmite al *planum temporale*. Por imagenología funcional se ha demostrado que las neuronas del *planum temporale* codifican la “envoltura espectral” (que determina el timbre); además, Bizley & Cohen (2013) suponen que el procesamiento de los tonos será independiente del contexto en la corteza auditiva primaria, mientras que será dependiente del contexto en las regiones circundantes (como el *planum temporale*).

Bizley & Cohen (2013) revisaron también que los correlatos neurales de la percepción categórica se han hallado en el núcleo (A1) y en el cinturón (región caudomedial de la corteza auditiva) de monos; la primera responde al incremento y decremento de la frecuencia, mientras que la segunda responde más bien a la respuesta conductual. Los autores también reportan estudios con monos en donde encontraron que la región anterolateral del cinturón (ALB, por sus siglas en inglés) y la corteza prefrontal ventral (VPFC, por sus siglas en inglés) responden categóricamente a los cambios de información (significado de las palabras o calidad de la comida, respectivamente), más que a los cambios espectro-temporales del sonido. A su vez, reportan estudios con jerbos, quienes inicialmente muestran activación de la corteza auditiva dependiendo de los cambios en la frecuencia de los estímulos, pero a lo largo del tiempo esta respuesta sólo se presenta ante las percepciones categóricas de los estímulos.

Existe además la teoría de la “**actividad relacionada con la elección**”, que se refiere a que la actividad neuronal está relacionada con el comportamiento (decisión) del animal, más que a la del estímulo (actividad sensorial). Algunos estudios muestran mayor actividad en el núcleo, mientras que otros la muestran más en regiones anteriores como la corteza premotora ventral y la corteza prefrontal ventrolateral, diferencias que pueden deberse a las abstractas estrategias particulares de cada sujeto para resolver una situación. De esta manera, la señal BOLD se debe más a la percepción del objeto audible que a las características espectro-temporales del estímulo en sí. Bizley & Cohen (2013) reportan estudios donde estímulos idénticos activan (BOLD) diferencialmente la corteza auditiva primaria de diferentes sujetos, dependiendo de si lo percibían como sonido continuo o discontinuo. Además, si se ponen dos estímulos diferentes con una separación de frecuencia muy larga, se percibirán como dos sonidos; si la separación es muy corta o se presentan simultáneamente, se percibirán como un sólo sonido; una intermedia dará como resultado cambios en la percepción a lo largo del tiempo (aunque luego se vuelve

estable y se detectan dos). Estos resultados muestran una vez más que la temporalidad resulta ser un factor importante en la transmisión auditiva (Bizley & Cohen, 2013).

Relacionado con la temporalidad, el sistema auditivo genera cierta predicción de lo que “escucha” en determinado momento y lo “escuchado” con anterioridad, para construir un modelo que probablemente ocurra en el siguiente estímulo; además, si un sonido es omitido de una serie de sonidos predecibles, la corteza auditiva de todas formas responde. Al respecto, la atención es una condición importante, y aunque no siempre es necesaria para la formación de objetos auditivos o para percibir cambios repentinos de un sonido, la conciencia de un objeto puede ser influenciada por ella, suprimiendo los sonidos “irrelevantes” y seleccionando aquellos que son importantes (efecto de la fiesta de coctel). La atención también cobra importancia cuando es necesario resolver ambigüedades (como cuando se presentan dos estímulos muy similares) y tomar una decisión. Petkov, *et al.* (2004) encontraron con IRMf que la corteza auditiva mesial medial procesa sonidos independientemente de la atención del sujeto de estudio, mostrando cambios topográficos en su activación que dependen de la frecuencia y localización de los sonidos, y una rápida adaptación a la repetición de los mismos; contrariamente, la región lateral de la corteza auditiva se activa sólo cuando las personas ponen atención, independientemente de la frecuencia y localización de los sonidos, analizando características de más alto nivel y mostrando un aumento de amplitud conforme aumentan las repeticiones.

Otro factor que influye en el proceso de la formación de objetos auditivos, es la experiencia, por ejemplo, los actores activan más el giro temporal superior anterior izquierdo que los músicos, ya que utilizan más el recurso del lenguaje, el cual se codifica preferencialmente en el hemisferio izquierdo (Bizley & Cohen, 2013).

Así, conforme se avanza en los estadios del procesamiento de información, se tornan más necesarias las acciones controladas por la motivación (atención, eliminación de información irrelevante), y la información previamente almacenada (aprendida) influirá más en el proceso; entonces el automatismo de los niveles inferiores de procesamiento, cede el control a la motivación de ejecutar o no una tarea. Por otro lado, los estados afectivos impulsan, refuerzan o modifican la motivación y atención perceptiva. Las funciones cognitivas del cerebro son manejadas principalmente por las cortezas asociativas y lóbulos frontales, mientras que las emociones se controlan por el **sistema límbico (SL: hipocampo, amígdala y varios núcleos del hipotálamo)**; aunque en realidad existen muchas conexiones nerviosas entre ellas. El SL es activado por señales somáticas, estímulos externos o por evocación de pensamientos. La

motivación de descubrir regularidades, inferir posibilidades, experimentar cambios repentinos o familiaridad y repeticiones, hacen de la música un estímulo afectivo, relacionado con el SL. Personas con amusia pueden escuchar todo lo que escuchan las personas sanas, como los cambios de tonalidad, pero no pueden interpretarlos y por lo tanto no experimentan ninguna respuesta afectiva (Roederer, 2009).

Vías auditivas ventral y dorsal

En realidad, el análisis de los sonidos se lleva a cabo en dos vías paralelas, una especializada en la extracción de información espacial (¿de dónde proviene el sonido?) y otra en la extracción de información no espacial (¿qué es el sonido?), estas dos rutas se conocen como vías dorsal y ventral, respectivamente, aunque sus funciones no son completamente excluyentes. Más bien parece ser que la mezcla de información espacial y no espacial es usada para crear representaciones perceptuales consistentes que puedan guiar el comportamiento. Por ejemplo, la información espacial puede ser importante para la formación de una “corriente” (*stream*), así, si una secuencia rítmica de sonidos idénticos son emitidos desde un mismo punto, el sujeto lo podrá percibir como una sola fuente de emisión (¿dónde?) (Bizley & Cohen, 2013) y catalogarlo (¿qué?), como los pasos de una persona en una caminadora.

Los cerebros del humano y monos del Viejo Mundo muestran fuertes relaciones anatómicas (Fig. 15). En ambos existen las vías mencionadas, aunque aún hay dudas sobre su similitud en el rol de la vía ventral en cuanto a la decodificación espectral de sonidos complejos, dado que los elementos neurales son más ricos en humanos, proporcionando así la habilidad de detectar diferencias más sutiles en la señal acústica y derivando en la capacidad de percibir el lenguaje y la música. Por su parte, la vía dorsal auditiva, (que es análoga a la del sistema visual), tiene un rol en la integración y control sensoriomotor, ya que las estructuras subcorticales como los ganglios basales están involucrados en los procesos asociativos del aprendizaje de secuencias de sonidos. Sin embargo, la distinción más notoria entre humanos y monos es en los humanos existe una convergencia e interacción de ambas vías en la corteza prefrontal (Rauschecker, 2012).

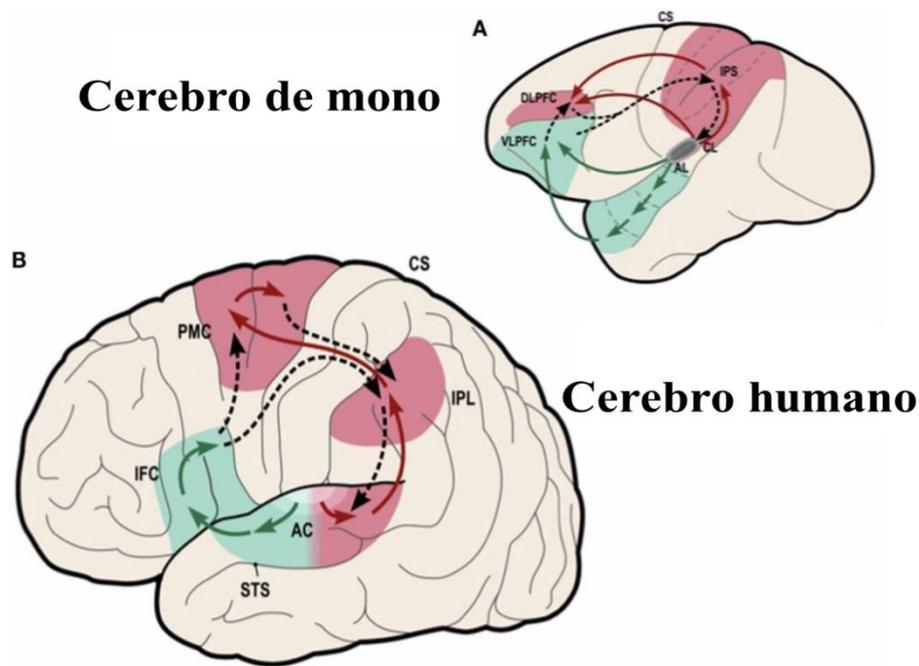


Figura 15: Vías ventral y dorsal en A) el mono Rhesus [modificado de Rauschecker & Tian (2000)] y B) el humano [simplificado de Rauschecker and Scott (2009)]. La vía ventral (verde) tiene un rol en el reconocimiento de objetos auditivos (música, lenguaje, etc.). La vía dorsal (rojo) es comparada con las eferencias motoras (líneas punteadas), mostrando que esta vía juega un papel en la integración y control sensoriomotor. Las activaciones frontales son transmitidas hacia el IPL y pST, donde se comparan con sensaciones auditivas y de otro tipo

Por sus siglas en inglés: AC, corteza auditiva; AL, región antero-lateral; CL, región caudo-lateral; STS, surco temporal superior; IFC, corteza frontal inferior; DLPFC, VLPFC, corteza dorsolateral y ventrolateral; PMC, corteza premotora; IPL, lóbulo parietal inferior; IPS, surco parietal inferior; CS, surco central; pST, región temporal superior posterior (modificado de Rauschecker, 2012).

A modo de resumen hemos revisado que la corteza cerebral humana tiene un área primaria (núcleo: A1 y R) que responde mejor a tonos puros, mientras que las áreas anterolaterales a ésta (cinturón) combinan esta información y responden a estímulos más complejos, independientemente de sus características de bajo nivel (Wessinger, *et al.*, 2001; Okada, *et al.*, 2010; Bizley & Cohen, 2013). Entre las áreas donde se “forman” los objetos auditivos están las regiones del giro temporal superior (Rauschecker, 2012). Como se mencionó con anterioridad, dentro de las regiones del GTS se encuentra el *planum polare* (GTSa), el cual se activa preferentemente con estímulos musicales (Tierney, *et al.*; Angulo-Perkins, *et al.*, 2014), por lo que forma parte de la vía ventral, encargada principalmente (aunque no exclusivamente) de la categorización de los sonidos.

Capítulo II: DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Recientemente se ha demostrado que el *planum polare*, que se localiza en la región anterior del giro temporal superior, se activa preferencialmente con estímulos musicales (Angulo-Perkins, *et al.*, 2014). A su vez, el ritmo es un atributo inherente a la musicalidad, por lo que es válido preguntarse si la actividad del *planum polare* y de aquellas estructuras que se relacionan con características temporales, es modulada por la percepción de estímulos musicales con modificaciones rítmicas.

JUSTIFICACIÓN

Dada la importancia del *planum polare* en la categorización de estímulos musicales, es importante ahondar en su estudio, particularmente en su actividad ante manipulaciones temporales de estímulos acústicos complejos. Esto permitirá comprender mejor su rol en el procesamiento de estímulos musicales.

HIPÓTESIS

Dado que el *planum polare* es especialmente sensible a los estímulos musicales, y que el ritmo, que es una característica psicoacústica correspondiente a la escala temporal macroscópica, es un componente fundamental en la música, entonces se observará una modulación de la señal BOLD en esta región ante la estimulación con fragmentos acústicos con diverso grado de ritmicidad, esperando mayor señal BOLD con estímulos rítmicos que con arrítmicos.

OBJETIVOS

General

Analizar la activación de las áreas de la corteza cerebral (específicamente el *planum polare*) implicadas en la percepción de estímulos acústicos, al utilizar fragmentos musicales rítmicos y arrítmicos.

Particulares

- * Observar y describir las regiones cerebrales que se activan con cada tipo de estímulo, en comparación con la línea base.
- * Comparar el grado de activación de cada zona registrada, entre cada uno de los estímulos modificados y el control.
- * Comparar el grado de activación entre ambos hemisferios, con cada tipo de estímulo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Procesamiento y selección de estímulos

Se utilizaron estímulos acústicos (piano) (Vieillard, *et al.*, 2008) basados en pasajes musicales largos que siguen las reglas de tonalidad de la música occidental, con la finalidad de que fueran estímulos novedosos pero con características musicales ampliamente reconocidas en la población de estudio. De los archivos originales se tomaron fragmentos con un intervalo de tiempo entre 3 ± 1 s cada uno y con 10 notas, que fueron manipulados en su partitura a través de una interfase MIDI (Musical Instrument Digital Interface) en Matlab (Mathworks, Natick, MA), con el fin de alterar su claridad rítmica. Esto se logró mediante la manipulación del inicio de cada una de las notas musicales (Fig. 16) lo cual tuvo la finalidad de que los estímulos, aunque tuvieran el mismo contenido (notas), no fueran identificados como rítmicos por los sujetos de estudio, pues Temperley & Bartlette (2002) propusieron que una de las características importantes para la percepción del ritmo es el hecho de que el “beat” (compás) coincide con el “onset” (inicio) del tono.

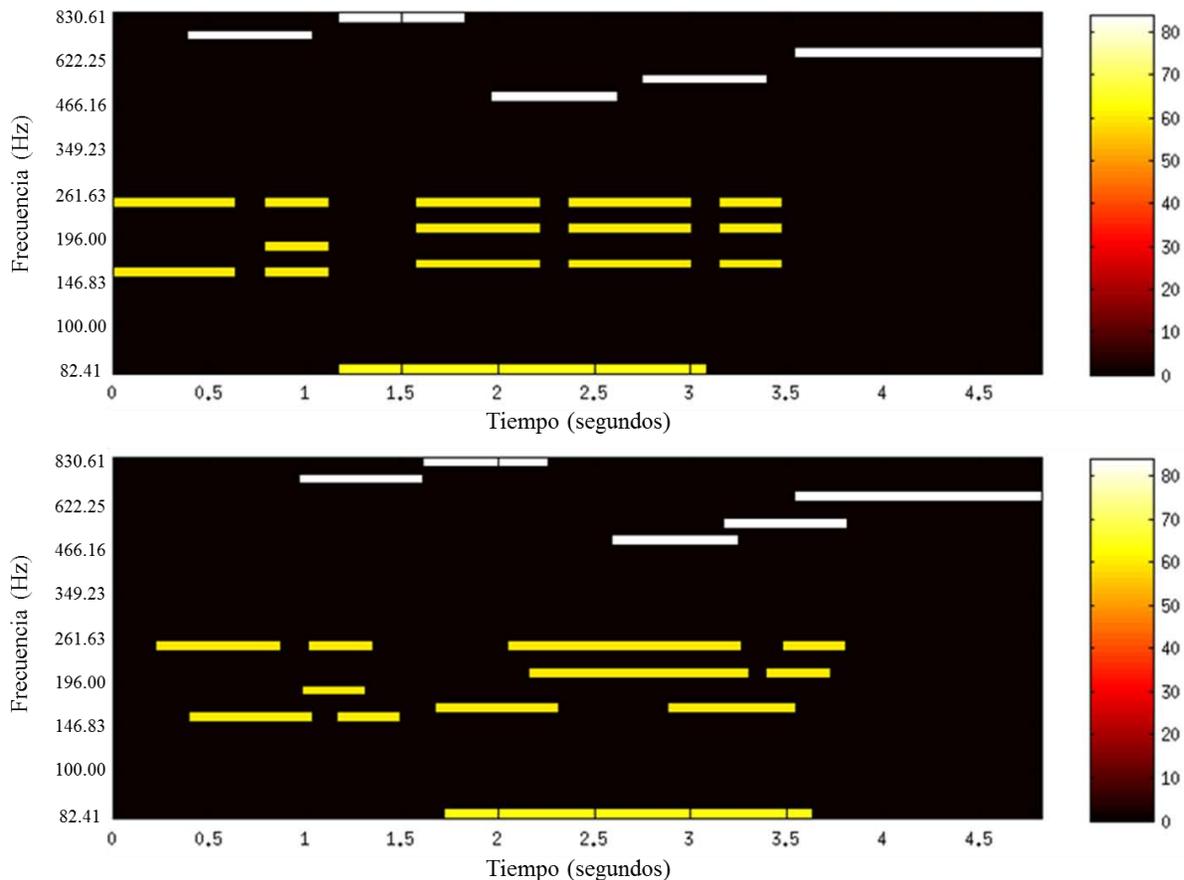


Figura 16: Modificación de la claridad rítmica. Espectrogramas de uno de los estímulos antes (panel superior) y después (panel inferior) de ser alterado. La modificación consistió en “mover” aleatoriamente el inicio de cada una de sus notas, en un rango que no sobrepasara al inicio de la nota anterior ni el final de la posterior. El gradiente de color ilustra la intensidad del sonido medida en decibeles.

Para la adquisición de la claridad rítmica de los estímulos se usó MIRTtoolbox (Lartillot & Toivainen, 2007) implementado en Matlab, y se seleccionaron aquellos que redujeron más su porcentaje de claridad rítmica respecto a los originales.

Antes de tomar las imágenes en el resonador se realizó un estudio piloto a un grupo diferente del de estudio para seleccionar los estímulos que perdieron más ritmo según la percepción de los sujetos. Esta muestra constó de 40 voluntarios (20 músicos y 20 no músicos). La prueba consistió en presentar aleatoriamente 74 fragmentos musicales de los cuales la mitad eran originales y la mitad modificados. Después de escuchar cada sonido dos veces se les pidió que lo evaluaran en una escala del 0 al 3, siendo 0 nada rítmico, y 3 muy rítmico (Apéndice 1). Posteriormente se calculó el coeficiente de regresión para probar si los datos de percepción eran consistentes con los de claridad rítmica extraídos por el MIRTtoolbox (Figs. 19 y 20).

Al final, según las mediciones, se seleccionaron 38 estímulos: 19 rítmicos (originales) y 19 arrítmicos (pareados con los originales), que fueron mezclados y presentados de forma bi-auricular, por medio de audífonos compatibles con el resonador magnético, los cuales reducen la interferencia acústica generada por los gradientes. Se utilizaron eventos de silencio para establecer la línea base, donde la respuesta hemodinámica vuelve a estabilizarse; durante este período los sujetos debían contestar con unas botoneras si percibían el sonido como rítmico (dedo índice derecho) o arrítmico (dedo índice izquierdo).

Sujetos de estudio

La muestra comprendió 27 voluntarios, 11 músicos (7 hombres y 4 mujeres) y 16 no músicos (8 hombres y 8 mujeres), aunque en el análisis de las covariables se eliminaron algunos sujetos por falta de información. Como criterio de inclusión, todos ellos fueron diestros, sin problemas auditivos ni contraindicaciones para RM, y con un intervalo de edad entre 18 y 45 años. Antes de proceder se les dio información sobre el estudio, y al aceptarla firmaron una “carta de consentimiento informado” aprobada por el Comité de Bioética del Instituto de Neurobiología de la Universidad Nacional Autónoma de México, y en concordancia con la Declaración de Helsinki de 1964.

Dados los resultados de la prueba piloto, y para poner a prueba la eficiencia del paradigma de estudio, se realizaron resonancias a tres voluntarios (también como piloto) sin entrenamiento musical.

Diseño experimental

Las imágenes se tomaron con un resonador magnético de 3 Teslas General Electric MR750, (Waukesha, Wisconsin) y una antena de 32 canales; los estímulos se presentaron utilizando el programa E-prime. Dentro del resonador se utilizó un soporte para evitar el movimiento de la cabeza durante la toma de imágenes.

El diseño experimental fue por eventos (lo cual permite una mejor resolución temporal) (Fig. 17) presentando un total de 38 estímulos de entre 3-8 s (media de 5.15 s) cada uno, con silencios de 14 s entre ellos; el tiempo total fue de 14 minutos. Se tomaron 43 rebanadas con un espesor de 3 mm, con una resolución espacial de $2 \times 2 \times 3 \text{ mm}^3$ y resolución temporal de 3 s, pesados a T2* (que es sensible a la respuesta hemodinámica).

- Estímulos originales (rítmicos) comparados con la línea base.
- Estímulos modificados (arrítmicos) comparados con la línea base.
- Originales vs modificados.
- Modificados vs originales.

Para esto se utilizó el modelo lineal general implementado en el software FEAT (Functional Expert Analysis Tool, parte de las herramientas de FSL, FMRIB, Oxford), versión 4.1.9. Inicialmente se llevó a cabo el análisis de primer nivel, es decir, de cada sujeto de estudio, donde se proporcionan los parámetros con los que se tomaron las imágenes (como TR, total de volúmenes, tiempo de inicio y duración de cada ensayo), así como los parámetros que permiten reducir el ruido sin reducir la validez de la activación, como el “suavizado” (que debe ser 50% más grande que la medida del voxel) y la corrección de movimiento (Fig. 18). En este nivel se obtuvo la activación de las regiones cerebrales sensibles a cada tipo de estímulo presentado (rítmico y arrítmico), así como la suma de ambos (rítmico+arrítmico). A la par, se llevó a cabo un análisis de primer nivel para conocer las áreas corticales cuya activación correlaciona positiva o negativamente con la claridad rítmica de los estímulos presentados.

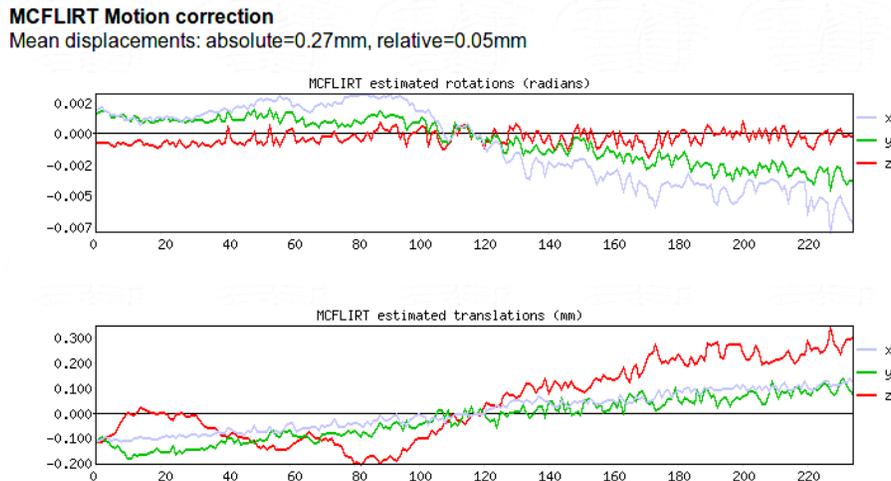


Figura 18: Movimiento neto de la cabeza de uno de los sujetos piloto, medido en radianes y en milímetros. Si el movimiento neto de la persona dentro del resonador es inferior al tamaño de los voxeles con los que se trabajó en el experimento, se deduce que las imágenes obtenidas son confiables.

Posteriormente se realizaron los análisis de segundo nivel, comenzando por los contrastes individuales, donde se compararon por efectos fijos los mapas estadísticos de cada sujeto obtenidos en el primer nivel, con la finalidad de conocer en cada uno de ellos las regiones cuya actividad fue mayor al escuchar estímulos rítmicos que al escuchar arrítmicos (Rítmico > Arrítmico), y viceversa. Después se llevó a cabo el análisis grupal, en donde se promediaron los resultados de los contrastes individuales, utilizando efectos mixtos, dándole el mismo peso estadístico a ambos grupos (músicos vs no-músicos) y, por otro lado, haciendo comparaciones entre ellos. De la misma manera se hizo un análisis de segundo nivel, promediando las regiones que a nivel individual presentaron correlación lineal con el grado de ritmicidad.

Una vez obtenidos los resultados de los contrastes, se probó el efecto que tuvieron las covariables (obtenidas del test de amusia y la encuesta pre-escáner) en estos resultados.

En todos los análisis se utilizó un umbral de $p \leq 0.05$ (probabilidad de que la activación de un voxel sea debida al azar), además de un análisis por *cluster*, con $Z \geq 2.3$ (“elimina” los voxeles con alta probabilidad de haberse activado al azar, y presenta aquellos que forman agrupaciones cuya probabilidad de haber ocurrido por azar sea muy baja), o $Z \geq 2.6$ para el caso del contraste Rítmico>Arrítmico.

Regiones de interés (ROIs)

Por último, utilizando como regiones de interés (ROIs, por sus siglas en inglés) los *clusters* reportados en la investigación de Angulo-Perkins, *et al.* (2014), se midió el porcentaje de cambio de señal BOLD del *planum polare* y *planum temporale* derechos e izquierdos, tanto al escuchar estímulos rítmicos como al escuchar estímulos arrítmicos. Posteriormente se probó con una prueba t de Student si existió diferencia de señal BOLD en cada región, debida a la presentación de cada tipo de estímulo, y si la actividad de cada área correlacionó positiva o negativamente con diversas covariables como la musicofilia, la edad de inicio de entrenamiento musical y las horas por semana que practican los músicos.

Capítulo III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS

Piloto

Para demostrar cuáles estructuras cerebrales juegan un rol importante en la percepción de estímulos acústicos con base en la temporalidad (ritmo) de los mismos, se modificó el tiempo de inicio (*onset*) de cada una de las notas de los fragmentos musicales seleccionados; la Fig. 14 (Material y Métodos) muestra los espectrogramas de uno de los estímulos antes y después de ser alterado.

Antes de comenzar las pruebas en el resonador, se analizaron los datos de la prueba piloto para corroborar la pérdida de ritmo de los estímulos originales al cambiar el tiempo de inicio de sus notas. Las Figs. 19 y 20 muestran las diferencias en cuanto a la apreciación rítmica de los estímulos originales vs los modificados, tanto en músicos como en no músicos. A través de la prueba t de Student se obtuvo que estas diferencias fueron significativas ($p \lll 0.001$).

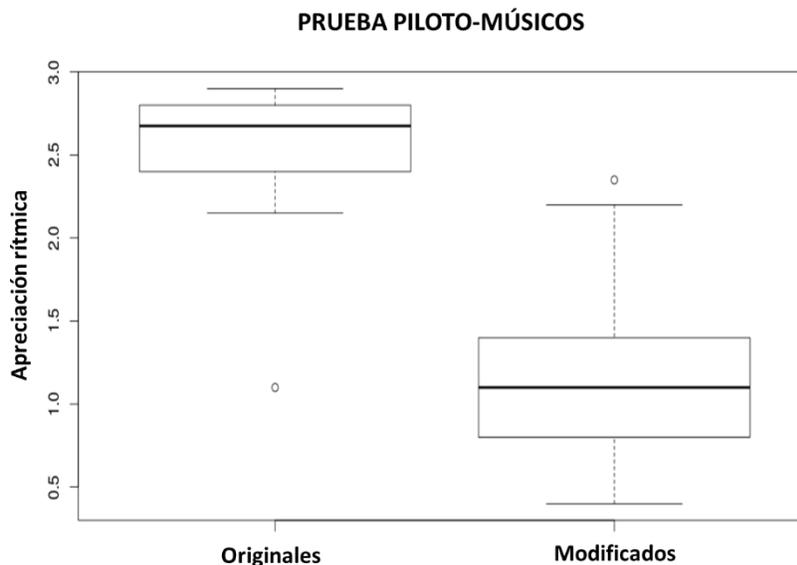


Figura 19: Prueba piloto; percepción del ritmo por parte de los músicos. Se muestran gráficamente las diferencias de apreciación rítmica entre los estímulos originales y los modificados, por parte de los 20 músicos de la prueba piloto. Los valores del 0 al 3 fueron asignados por los sujetos para reflejar su percepción del ritmo. La línea oscura dentro de las cajas muestra la mediana, y los límites de las mismas muestran la distribución de los datos, es decir, los cuartiles 1 y 3; los bigotes representan los valores máximos y mínimos, y los círculos muestran los valores atípicos de cada población.

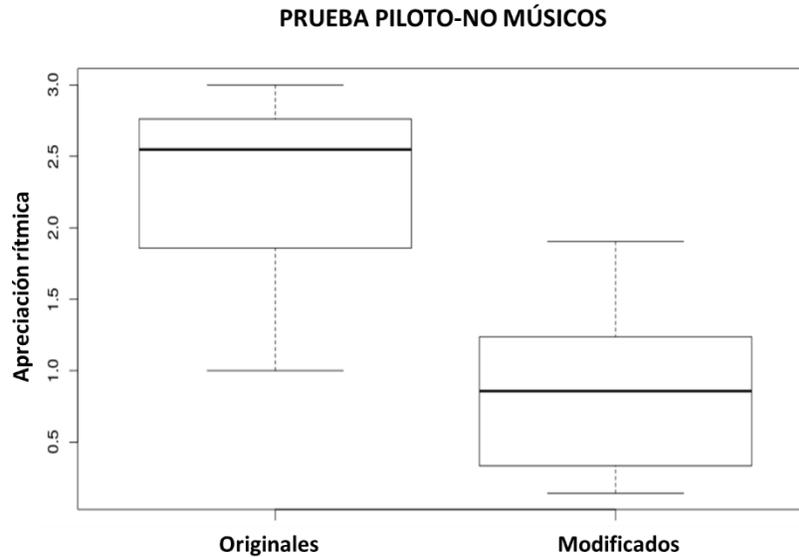


Figura 20: Prueba piloto; percepción del ritmo por parte de los no-músicos. Se muestran gráficamente las diferencias de apreciación rítmica entre los estímulos originales y los modificados, por parte de los 20 sujetos no músicos de la prueba piloto. Los valores del 0 al 3 fueron asignados por los sujetos para reflejar su percepción del ritmo. La línea oscura dentro de las cajas muestra la mediana, y los límites de las mismas muestran la distribución de los datos, es decir, los cuartiles 1 y 3; los bigotes representan los valores máximos y mínimos.

Por otro lado, no se encontraron diferencias significativas en la apreciación rítmica entre músicos y no músicos (Fig. 21), lo cual validó la utilización de los estímulos en cualquiera de las dos poblaciones.

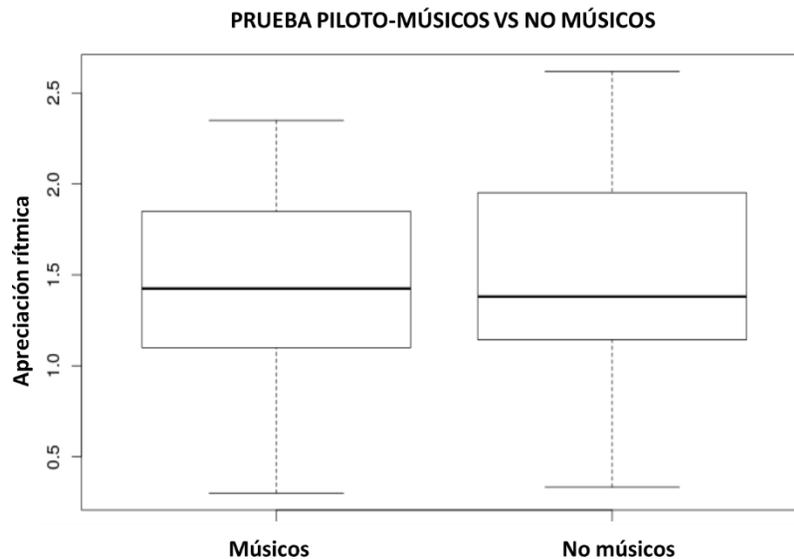


Figura 21: Prueba piloto; similitud entre músicos y no-músicos Se muestra gráficamente la similitud en la apreciación rítmica por parte de los músicos y no músicos de la prueba piloto. Los valores del 0 al 3 fueron asignados por los sujetos para reflejar su percepción del ritmo. La línea oscura dentro de las cajas muestra la mediana, y los límites de las mismas muestran la distribución de los datos, es decir, los cuartiles 1 y 3; los bigotes representan los valores máximos y mínimos.

Estos resultados son consistentes con los reportados con anterioridad por Grahn & Rowe (2013), quienes encontraron que independientemente de la novedad o velocidad de los estímulos, los sujetos de estudio (músicos y no músicos) pudieron diferenciar los rítmicos de los arrítmicos.

Las figuras 22 y 23 muestran el coeficiente de regresión entre los valores de claridad rítmica obtenidos con MIRToolbox y las pruebas de percepción, demostrando consistencia entre en ambos grupos (músicos: $r = 0.91$, $p < 0.001$; no músicos: $r = 0.87$, $p < 0.001$).

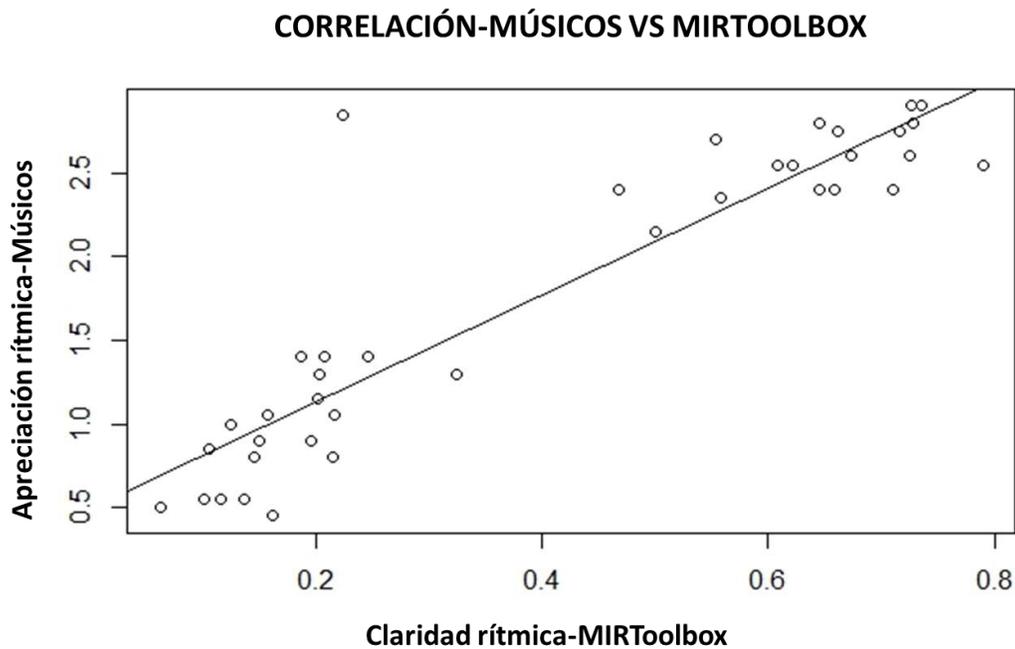


Figura 22: Correlación entre percepción de músicos y MIRToolbox. Se observó una correlación positiva entre los valores de claridad rítmica arrojados por MIRToolbox y la apreciación rítmica de los músicos de la prueba piloto; $r = 0.91$, $p < 0.001$.

CORRELACIÓN-NO MÚSICOS VS MIRTOOLBOX

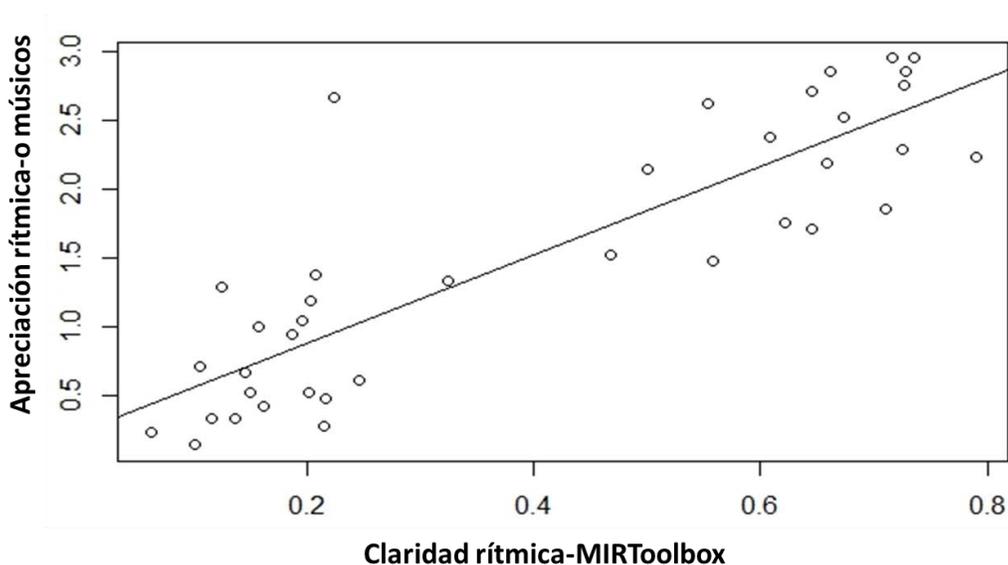


Figura 23: Correlación entre percepción de no-músicos y MIRToolbox. Se observó una correlación positiva entre los valores de claridad rítmica arrojados por MIRToolbox y la percepción rítmica de los sujetos no-músicos de la prueba piloto; $r = 0.87$, $p < 0.001$.

Dados los resultados de la prueba piloto, se realizaron las resonancias y análisis FEAT a tres voluntarios (también como piloto) sin entrenamiento musical, con lo cual se validó la eficacia del paradigma utilizado, ya que pudo observarse la activación de la corteza temporal (auditiva) en relación a los estímulos escuchados (imágenes no presentadas y una correlación entre la actividad hemodinámica y la presentación de los sonidos (Fig. 24), demostrando que son bien percibidos independientemente del ruido provocado por el resonador.

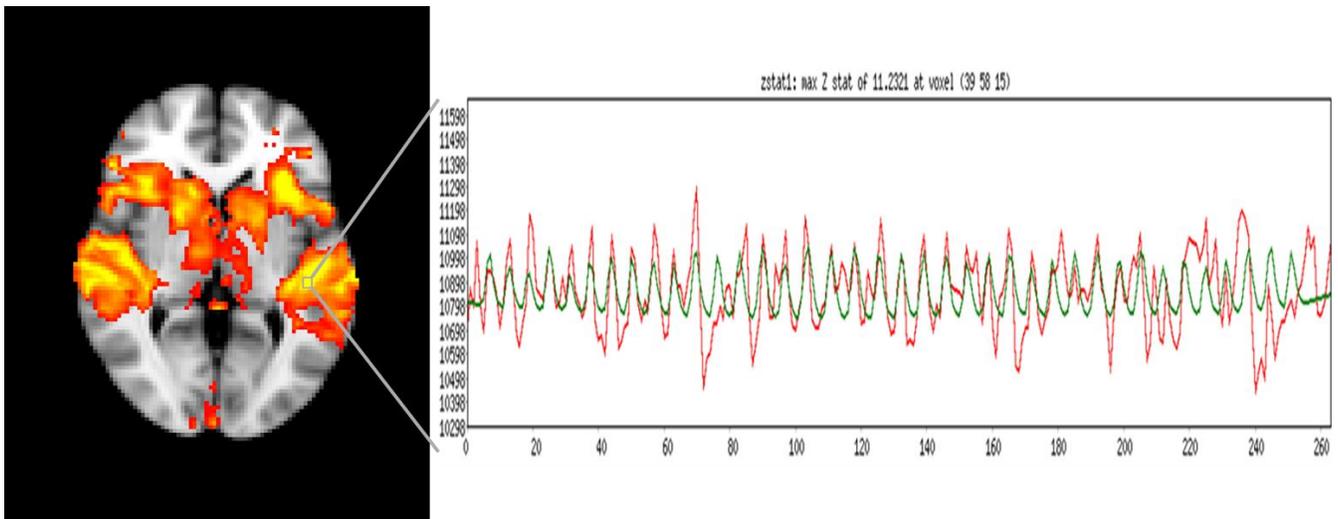


Figura 24: Prueba del diseño experimental. Del lado izquierdo se muestra el resultado de la prueba piloto ($n = 3$), donde puede observarse la activación de las cortezas auditivas al escuchar los estímulos de la investigación. En la gráfica del lado derecho, la línea verde indica el modelo de la señal BOLD resultante de convolucionar el paradigma de estimulación con la respuesta hemodinámica, mientras que la línea roja indica la señal BOLD medida en un voxel de la corteza auditiva a lo largo del tiempo. Puede observarse que sí hay correspondencia entre la actividad hemodinámica y la presentación de los estímulos acústicos en un sujeto piloto.

Análisis preliminares

Los resultados que a continuación se presentan son el resumen de la activación cerebral de 27 voluntarios entre 20 y 45 años de edad, 11 músicos (7 hombres y 4 mujeres) y 16 no músicos (8 hombres y 8 mujeres).

Una vez obtenidos los análisis de primer nivel de cada sujeto, se realizó una máscara binarizada, es decir, se hizo un mapa (promedio) que reflejara la actividad cerebral durante únicamente la presentación de los estímulos acústicos, sin importar su ritmicidad (Fig. 25).

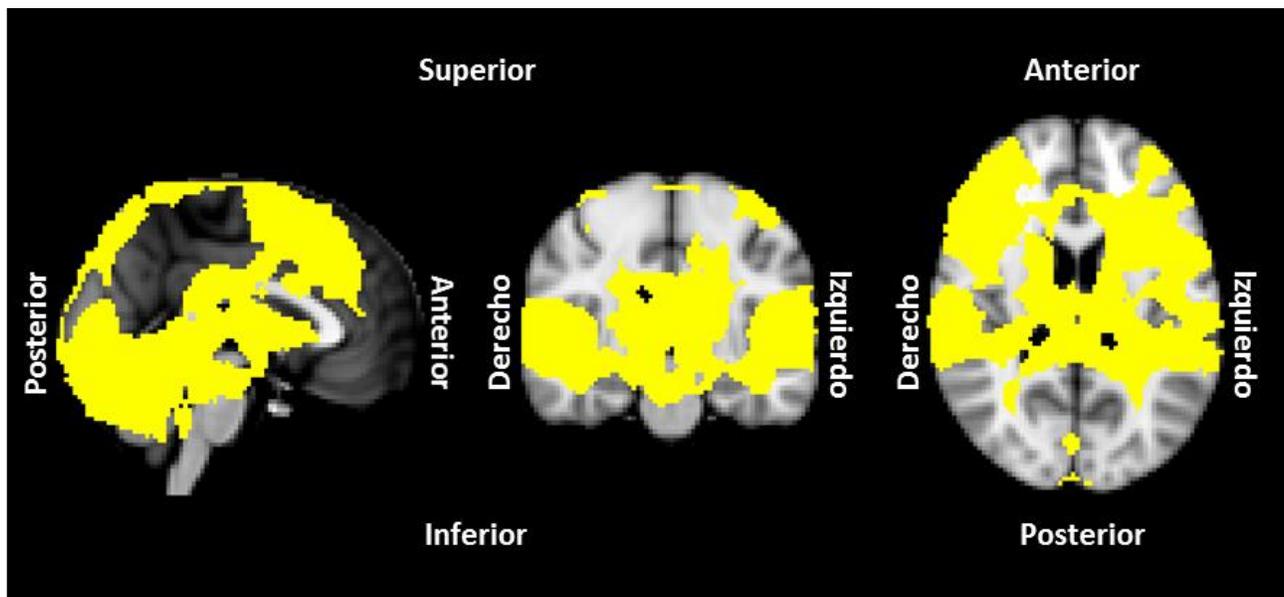


Figura 25: Máscara binarizada realizada al promediar la actividad cerebral de todos los sujetos al escuchar el total de los estímulos (R+A). Las posiciones anatómicas que se muestran en los planos sagital, coronal y transversal (de izquierda a derecha), son las mismas para el resto de las figuras anatómicas.

A través de una prueba estadística de efectos fijos, se procedió a hacer contrastes (Rítmico>Arrítmico, y viceversa) en cada sujeto, para luego promediar los resultados individuales a través de efectos mixtos, utilizando la máscara binarizada para restringir los análisis únicamente a aquellas regiones cerebrales en donde existe un cambio de señal BOLD (en promedio de todos los sujetos) ante cualquier estímulo acústico presentado.

Resultados a nivel de grupo

La corrección por *cluster* reflejó activación únicamente cuando se comparó la percepción de los sujetos al escuchar sonidos rítmicos, en contraste con los arrítmicos, mientras que no se encontró nada en el contraste opuesto. De los cinco *clusters* resultantes de la primera comparación, se observan tres en el hemisferio izquierdo, uno abarca parte de los giros post y precentrales o cortezas somatosensorial y motora primarias; otro se encuentra en el giro temporal superior posterior (GTSp), abarcando parte de la corteza auditiva primaria, giro de Heschl, el *planum temporale* y la corteza somatosensorial secundaria; y otro se ubica en el giro precentral, la corteza premotora y la corteza suplementaria motora. Los otros dos *clusters* se observaron en el hemisferio derecho, uno en el giro temporal superior, abarcando la corteza auditiva primaria y el giro de Heschl; y uno más correspondiente a los lóbulos V y VI del cerebelo. Las Figs. 26 y 27 muestran las regiones de activación anteriormente mencionadas, y la Tabla 2 describe

más detalladamente las áreas encontradas, presentando las analogías entre el “Juelich Histological Atlas” y el “Harvard-Oxford Cortical Structural Atlas”, para el caso de las regiones corticales; mientras que para el cerebelo se consultó el “Cerebellar Atlas in MNI152”. Por su parte, en el Apéndice 3 se presentan las máximas locales de cada *cluster* y la anatomía correspondiente.

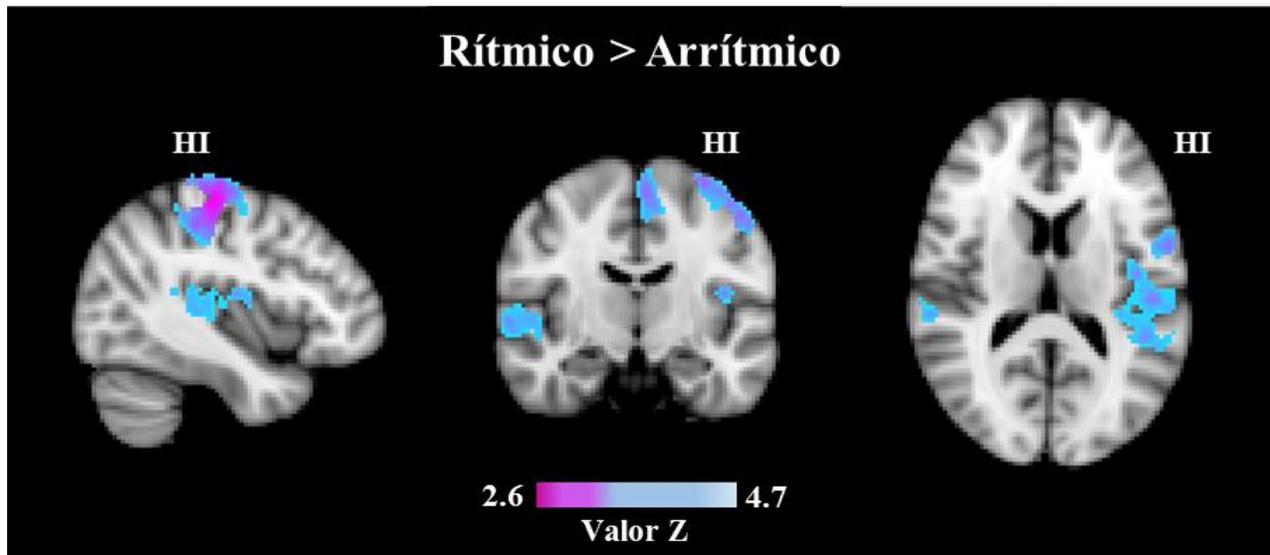


Figura 26: Mapa de activación cortical durante la percepción de estímulos rítmicos > arrítmicos. Se observan tres *clusters* en el hemisferio izquierdo (HI), uno abarca parte de los giros post y precentrales o cortezas somatosensorial y motora primarias; otro se encuentra en el giro temporal superior posterior (GTSp), abarcando parte de la corteza auditiva primaria, giro de Heschl, el *planum temporale* y la corteza somatosensorial secundaria; y otro se ubica en el giro precentral, la corteza premotora y la corteza suplementaria motora. También se observa un *cluster* en el hemisferio derecho, en el giro temporal superior, abarcando la corteza auditiva primaria y el giro de Heschl. Resolución anatómica de 2×2×3 mm³.

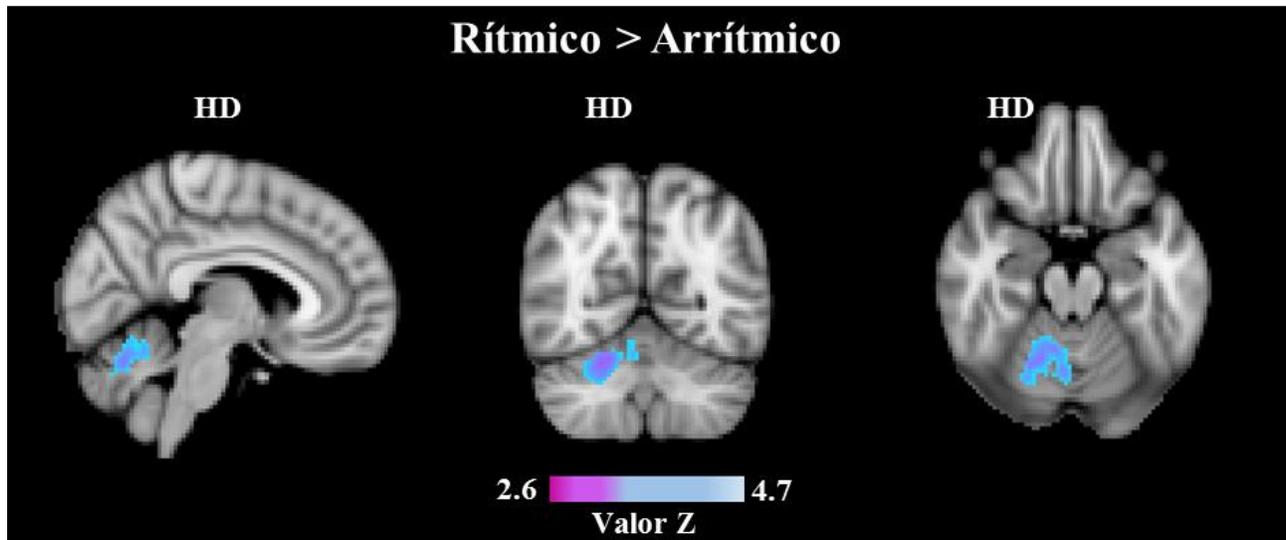


Figura 27: Mapa de activación cerebelar durante la percepción de estímulos rítmicos>arrítmicos. Se observa un *cluster* que abarca los lóbulos V y VI del lado derecho del cerebelo (HD). Resolución anatómica de 2×2×3 mm³.

Cluster	Voxeles	Z-MAX	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Juelich Histological Atlas	Harvard-Oxford Cortical Structural Atlas	Cerebellar Atlas in MNI152 space after normalization with FLIRT
5	1688	4.71	-40	-24	58	Hemisferio izquierdo: 40% corteza motora primaria (AB4a) , 30% corteza somatosensorial primaria (AB1).	34% giro postcentral, 28% giro precentral.	—
4	1148	3.88	-50	-24	10	Hemisferio izquierdo: 50% corteza auditiva primaria, 18%, corteza somatosensorial secundaria.	47% giro de Heschl (H1 y H2), 18% <i>planum temporale</i> .	—
3	730	3.85	16	-56	-22	—	—	Hemisferio derecho: 54% lóbulo V, 46% lóbulo VI.
2	616	3.35	56	-14	0	Hemisferio derecho: 4% corteza auditiva primaria.	9% <i>planum temporale</i> , 6% giro temporal superior.	—
1	480	3.86	-4	-8	60	Hemisferio izquierdo: 91% corteza premotora (AB6)	70% corteza suplementaria motora, 4% Giro precentral.	—

Tabla 2: Clusters, Rítmico>Arrítmico. Se muestran las regiones anatómicas encontradas en los cinco *clusters* con mayor respuesta hemodinámica ante la presencia de estímulos musicales rítmicos, al compararlos con los arrítmicos. Para cada *cluster*, ordenados de acuerdo a su volumen de manera descendente, se indican las coordenadas X,Y,Z (en espacio MNI152) del voxel con valor z más alto (Z-MAX).

Como puede observarse en los resultados anteriores, el *cluster* localizado en las cortezas primarias somatosensorial y motora izquierdas, se extiende ventralmente hasta el lóbulo parietal inferior, y posteriormente hasta el lóbulo parietal superior; mientras que de manera antero-superior, se extiende hasta la corteza premotora.

Por su parte, el *cluster* del hemisferio izquierdo ubicado en la corteza auditiva primaria y la corteza somatosensorial secundaria, se extiende posteriormente hasta el *planum temporale* y el lóbulo parietal inferior, y dorsalmente hasta la corteza parietal opercular; de forma antero-lateral alcanza la ínsula y el *planum polare*. El *cluster* análogo del hemisferio opuesto, que incluye también la corteza auditiva primaria, el giro de Heschl, el *planum temporale* y el *planum polare*, se extiende lateralmente (hacia la izquierda) hasta alcanzar la ínsula. Es importante recalcar que en ambos hemisferios el *planum polare* presentó actividad sólo en su división posterior, pero su extensión fue mayor en el hemisferio derecho.

A su vez, el *cluster* izquierdo que abarcó las cortezas premotora y suplementaria motora, se extiende de forma ínfero-posterior y lateral derecha, hasta el giro cingulado y la corteza motora primaria; y de manera antero-superior y lateral izquierda, hasta el giro frontal superior y el giro paracingulado.

El *cluster* localizado en el cerebelo, estuvo particularmente delimitado a los lóbulos derechos V y VI, extendiéndose un poco hacia el vermis y Crus I.

No se encontró un efecto de grupo (músicos vs. no músicos) en la diferencia de actividad BOLD entre estímulos rítmicos vs. no rítmicos.

Correlación entre señal BOLD y claridad rítmica

Se examinó si existen áreas cerebrales cuya señal BOLD correlacione con la claridad rítmica de los estímulos, ya sea de manera positiva o negativa, resultando interesante la correspondencia entre las regiones encontradas en el contraste Rítmico>Arrítmico y las que correlacionan positivamente con el ritmo.

Se encontraron cuatro *clusters* cuyas regiones anatómicas correlacionan positivamente (Fig. 28 y Tabla 3). El primero de ellos se localiza en el hemisferio izquierdo, en la corteza premotora y las cortezas

motora y somatosensorial primarias, extendiéndose posteriormente hasta el lóbulo parietal superior. El segundo *cluster* se encuentra delimitado a los lóbulos V y VI del cerebelo derecho, mientras que el tercero se ubica también en los lóbulos V y VI pero del hemisferio contrario, extendiéndose hasta la corteza temporal fusiforme posterior, la corteza fusiforme temporo-occipital, y el giro temporal inferior. El último *cluster* abarca las cortezas premotora, motora primaria, motora suplementaria y tracto corticoespinal, alcanzando el giro cingulado, el precuneus y el giro parietal superior, de manera ínfero-posterior, así como el giro paracingulado y el giro frontal superior, de forma antero-lateral (izquierda). Como ya se mencionó, las regiones de este análisis se corresponden con las halladas en el contraste Rítmico > Arrítmico, específicamente con las áreas sensorio-motoras (Fig. 29).

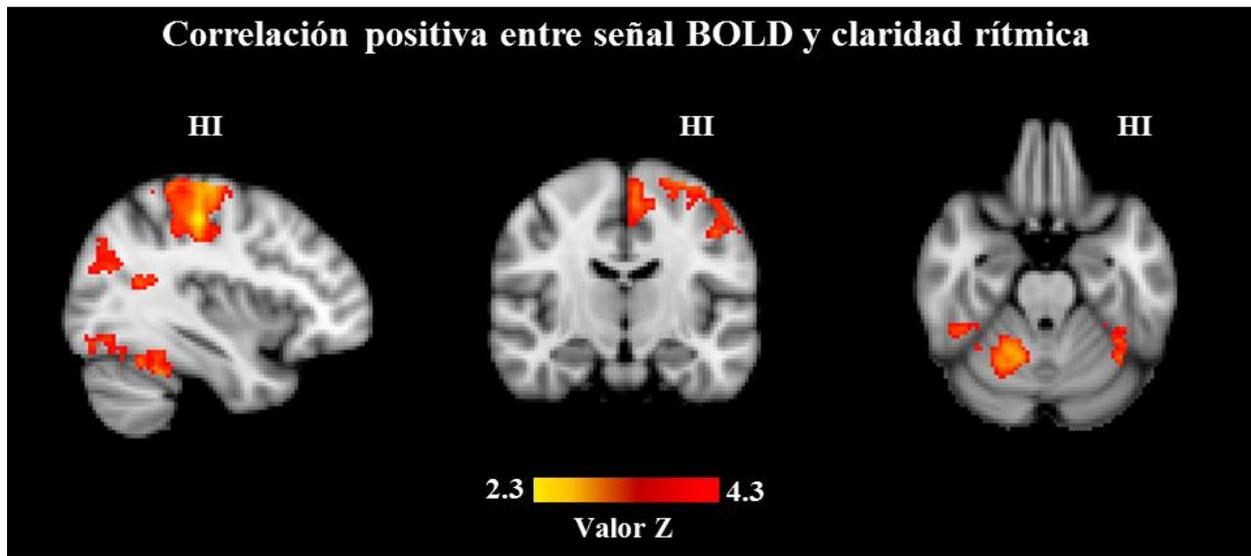


Figura 28: Mapa de activación de las regiones que presentan una correlación positiva entre la señal BOLD y la claridad rítmica. El *cluster* de mayor activación se ubica en las cortezas premotora, motora primaria y somatosensorial primaria, del hemisferio izquierdo (HI); el siguiente se delimita a los lóbulos V y VI del cerebelo derecho; uno más se encuentra en los lóbulos V y VI del hemisferio izquierdo, incluyendo también a la corteza temporal fusiforme y al giro temporal inferior; por último, se encontró un *cluster* que abarca las cortezas motoras primaria y suplementaria, también del hemisferio izquierdo. Resolución anatómica de $2 \times 2 \times 3$ mm³.

Por su parte, las regiones que correlacionan negativamente se agrupan en tres *clusters* (Fig. 30 y Tabla 4). El primero incluye al análogo derecho del área de Broca, la corteza opercular frontal, la corteza orbital frontal, el giro frontal inferior, pars triangularis y la corteza insular. El segundo, también ubicado en el hemisferio derecho, abarca al giro frontal superior, el giro paracingulado y la corteza motora suplementaria, extendiéndose ventralmente hasta el giro cingulado anterior. El tercero abarca la corteza insular y la corteza orbito-frontal izquierdas, extendiéndose infero-lateralmente hasta el polo temporal (hacia la izquierda) y al fascículo occipito-frontal inferior (hacia la derecha), y dorsalmente hasta las cortezas operculares central y frontal.

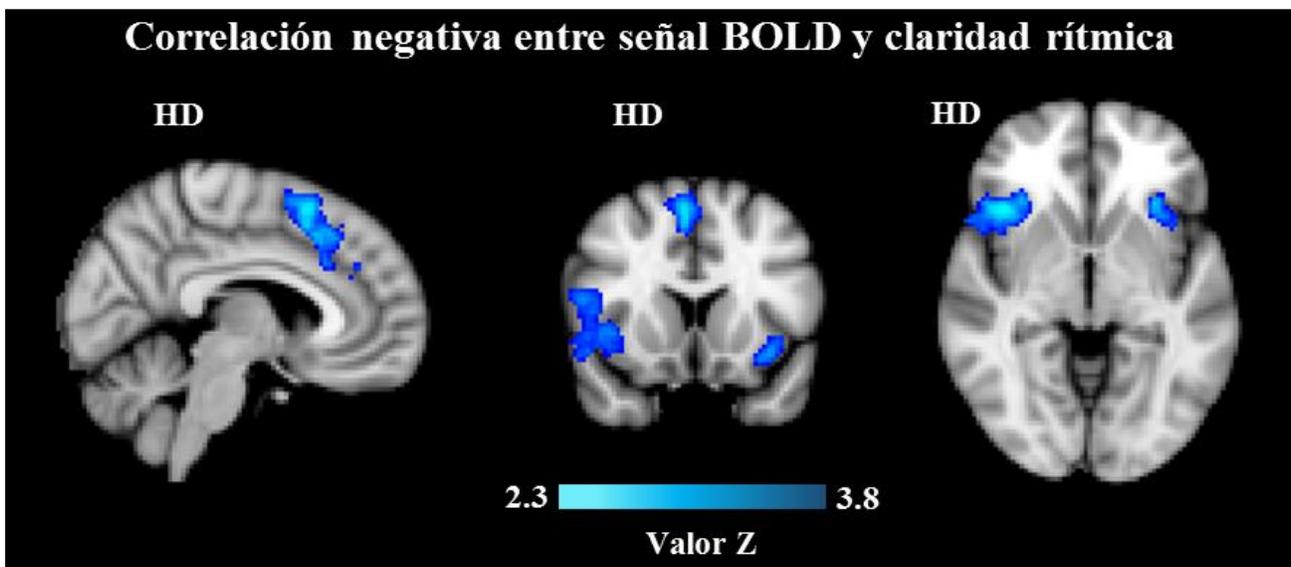


Figura 30: Mapa de activación de las regiones que presentan una correlación negativa entre la señal BOLD y la claridad rítmica. El *cluster* de mayor actividad incluye al análogo derecho del área de Broca, al giro frontal inferior y a la ínsula; otro más abarca al giro frontal superior, la corteza motora suplementaria y los giros cingulado y paracingulado derechos; en el tercer *cluster* se encuentra la corteza insular izquierda; HD = Hemisferio derecho. Resolución anatómica de 2×2×3 mm³.

CORRELACIÓN NEGATIVA ENTRE RITMICIDAD Y SEÑAL BOLD							
Cluster	Voxeles	Z-MAX	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Juelich Histological Atlas	Harvard-Oxford Cortical Structural Atlas
3	1289	3.87	44	22	-2	Hemisferio derecho: 6% área de Broca (BA45).	51% corteza opercular frontal, 18% corteza orbital frontal, 3% giro frontal inferior, pars triangularis, 2% corteza insular.
2	801	3.73	6	16	56	Hemisferio derecho: 51% corteza opercular frontal, 18% corteza orbital frontal, 3% giro frontal inferior, pars triangularis, 2% corteza insular.	48% giro frontal superior, 8% giro paracingulado, 4% corteza motora suplementaria.
1	318	3.65	-34	16	-12	—	Hemisferio derecho: 47% corteza insular, 23% corteza orbital frontal.

Tabla 4: Correlación negativa con la claridad rítmica. Se muestran las regiones anatómicas cuya respuesta hemodinámica correlaciona negativamente con el valor rítmico de los estímulos musicales.

Covariables

También se exploró si la actividad de las regiones encontradas en el contraste Rítmico > Arrítmico se relaciona con alguna de las covariables medidas en los test ya mencionados y en la percepción de los sujetos, encontrando relevancia únicamente en esta última característica, es decir, se observaron regiones cuya activación dependió esencialmente del número de “errores” (en base a los valores obtenidos por el MIRToolbox) al responder si percibían los sonidos como rítmicos o arrítmicos. Las Figs. 31-33 y las Tablas 5-7 muestran la localización de estas áreas anatómicas.

En los músicos, el rango de errores fue desde 1 hasta 17, con un promedio de 9.6, mientras que en los no músicos el rango fue de 4 a 17, con un promedio de 10.4, por lo que no hubo diferencia significativa entre los grupos. Sin embargo, sí se observaron diferencias dentro de cada grupo entre la percepción de los sonidos rítmicos y arrítmicos ($p < 0.05$), siendo que los músicos tuvieron un promedio de error de 2.5 y 7.5 para sonidos rítmicos y arrítmicos, respectivamente, y los no músicos de 3.9 y 6.5.

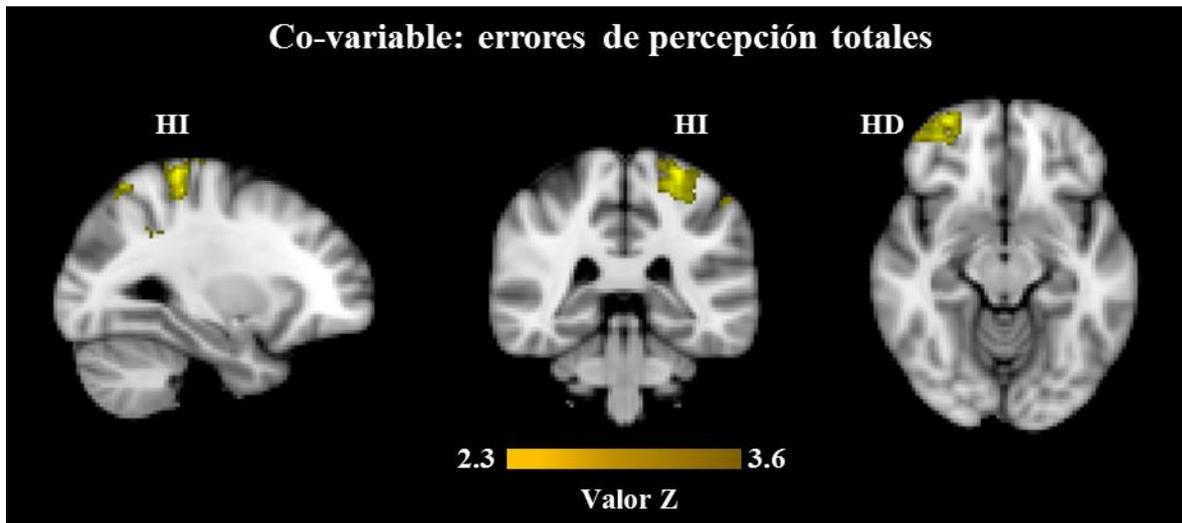


Figura 31: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción. Mapa de activación de las zonas cuya activación depende en gran medida del número total de errores de los sujetos al contestar si percibían los sonidos como rítmicos o arrítmicos. Se encontraron dos *clusters*, una que abarca las cortezas somatosensorial y motora primarias del hemisferio izquierdo (imagen izquierda y central), y otro correspondiente al polo frontal del hemisferio derecho (lado derecho; las coordenadas de la última imagen no coinciden con las otras dos presentadas en esta figura). HI = Hemisferio izquierdo; HD = Hemisferio derecho. Resolución anatómica de 2×2×3 mm³.

ACTIVACIÓN RELACIONADA CON EL NÚMERO TOTAL DE ERRORES AL PERCIBIR TODOS LOS SONIDOS						
Cluster	Voxeles	Z-MAX	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	
			Juelich Histological Atlas			Harvard-Oxford Cortical Structural Atlas
2	886	3.63	-28	-36	66	Hemisferio izquierdo: 42% corteza somatosensorial primaria (BA3b), 18% corteza motora primaria (BA4p), 12% lóbulo parietal superior.
1	303	3.52	30	58	-12	Hemisferio derecho: 75% polo frontal.

Tabla 5: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción. Regiones de activación relacionada con el número de errores de los sujetos al contestar si percibían los sonidos como rítmicos o arrítmicos.

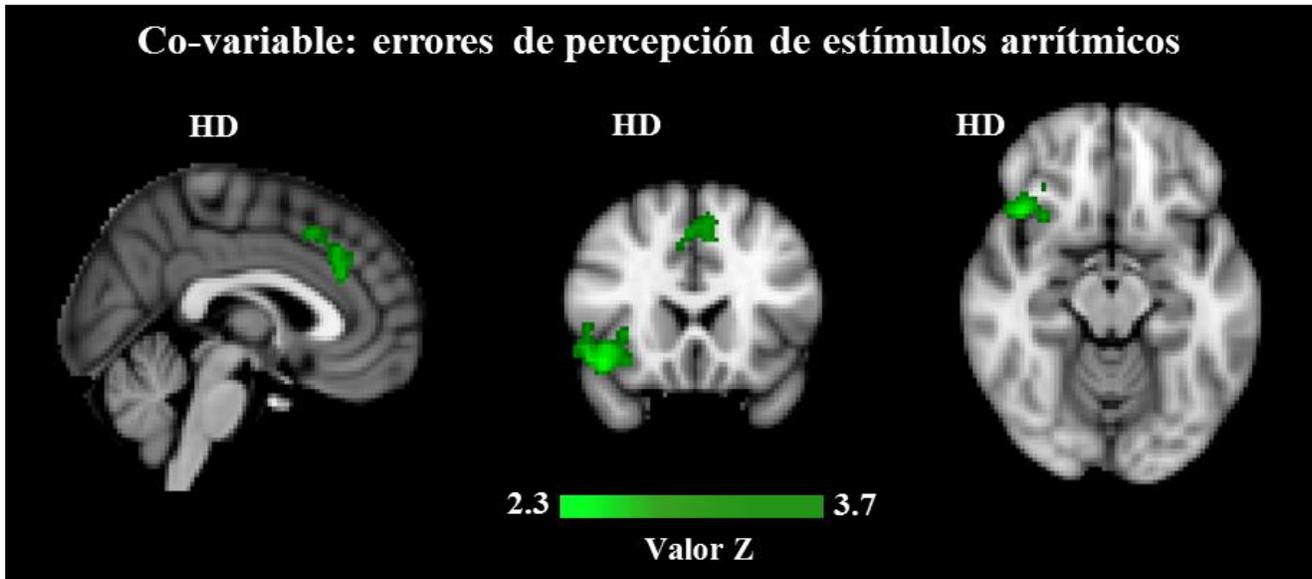


Figura 32: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción de sonidos arrítmicos. Mapa de activación de las regiones cuya activación depende en gran medida del número de errores de los sujetos al escuchar sonidos arrítmicos. Un *cluster* se ubica particularmente en la corteza premotora y otro abaraca a la corteza orbito-frontal, el polo temporal y la corteza insular. HD = Hemisferio derecho. Resolución anatómica de 2×2×3 mm³.

ACTIVACIÓN RELACIONADA CON EL NÚMERO DE ERRORES AL PERCIBIR SONIDOS ARRÍTMICOS							
Cluster	Voxeles	Z-MAX	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Juelich Histological Atlas	Harvard-Oxford Cortical Structural Atlas
2	576	3.33	6	28	40	Hemisferio derecho: 1% corteza premotora (BA6).	72% giro paracingulado, 5% giro frontal superior, 4% giro cingulado en su división anterior.
1	538	3.74	42	20	-14	-	48% corteza orbital frontal, 5% polo temporal, 2% corteza insular.

Tabla 6: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción de sonidos arrítmicos. Regiones de activación relacionada con el número de errores de los sujetos al escuchar sonidos arrítmicos.

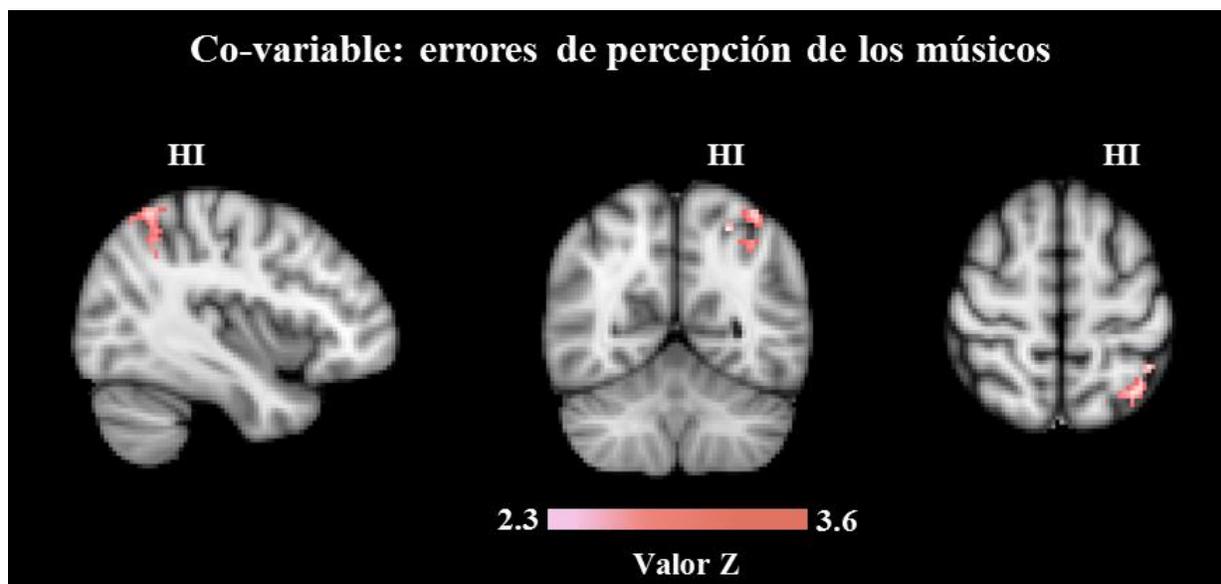


Figura 33: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción por parte de los músicos. Mapa de activación de las regiones cuya activación depende en gran medida del número de errores que tuvieron los músicos al responder si los fragmentos que escuchaban eran rítmicos o arrítmicos. HI = Hemisferio izquierdo. Resolución anatómica de $2 \times 2 \times 3$ mm³.

ACTIVACIÓN RELACIONADA CON EL NÚMERO TOTAL DE ERRORES AL PERCIBIR TODOS LOS SONIDOS, EN EL GRUPO DE LOS MÚSICOS							
Cluster	Voxeles	Z-MAX	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Juelich Histological Atlas	Harvard-Oxford Cortical Structural Atlas
1	433	3.2	-24	-58	52	Hemisferio izquierdo: 42% surco intraparietal anterior, 32% lóbulo parietal superior (7A).	27% lóbulo parietal superior, 19% corteza occipital lateral en su división superior, 1% giro supramarginal en su división posterior.

Tabla 7: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción por parte de los músicos. Regiones de activación relacionada con el número de errores de los músicos al contestar si percibían los sonidos como rítmicos o arrítmicos.

Regiones de interés

Por otro lado, utilizando como regiones de interés (ROIs) las áreas del *planum polare* y *planum temporale* reportadas por Angulo-Perkins *et al.* (2014), se encontró que hay diferencia significativa en el porcentaje de cambio de señal BOLD al escuchar sonidos rítmicos y sonidos arrítmicos, en ambas estructuras, y en ambos hemisferios ($p < 0.001$). Aunque en general se observa una tendencia a que los valores máximos de señal BOLD están en el *planum polare* derecho, sólo resultó significativo al compararlo con el *planum polare* izquierdo ($p < 0.001$), y no con el *planum temporale* de ningún hemisferio (Fig. 34). Sin embargo, como se verá más adelante, sólo la actividad del *planum polare* derecho correlacionó con la percepción de los sujetos de estudio.

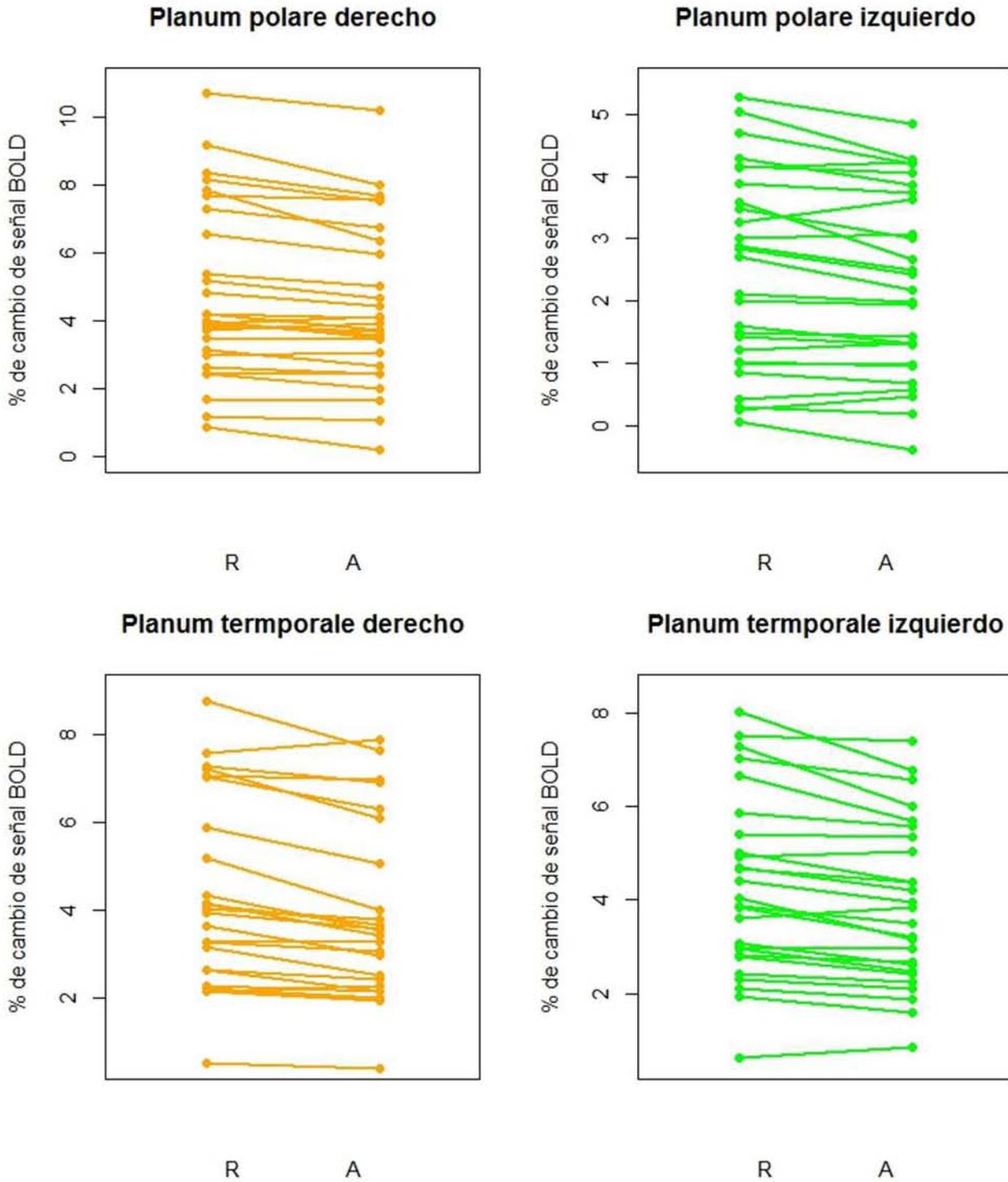
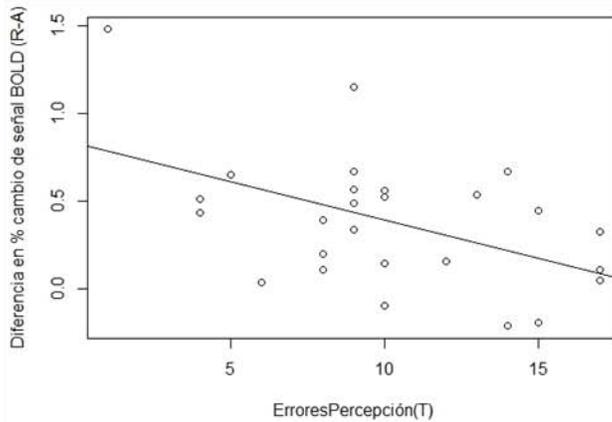


Figura 34: Porcentaje de cambio de señal BOLD. Se observa que tanto en el *planum polare* como en el *planum temporale* de ambos hemisferios, existe una diferencia significativa en el porcentaje de cambio de señal BOLD provocada por sonidos rítmicos en contraste con los arrítmicos ($p < 0.001$), pero con mayor actividad en el *planum polare* derecho, en relación al izquierdo ($p < 0.001$).

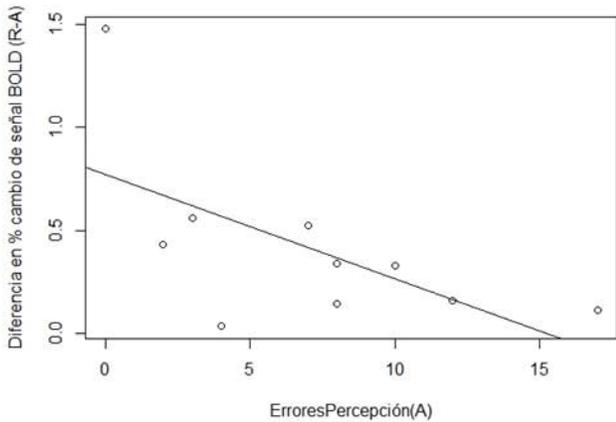
Como ya se mencionó, también se analizó si existe correlación lineal entre el porcentaje de cambio de señal BOLD y las diferentes covariables medidas con el test de amusia (n = 21: 10 M, 11 NM), la encuesta previa al escaneo de los sujetos y las respuestas de acuerdo a su percepción de rítmico y arrítmico (n = 26: 10 M, 16 NM) (Figs. 35-38).

Planum polare derecho

GRUPAL



MÚSICOS



NO MÚSICOS

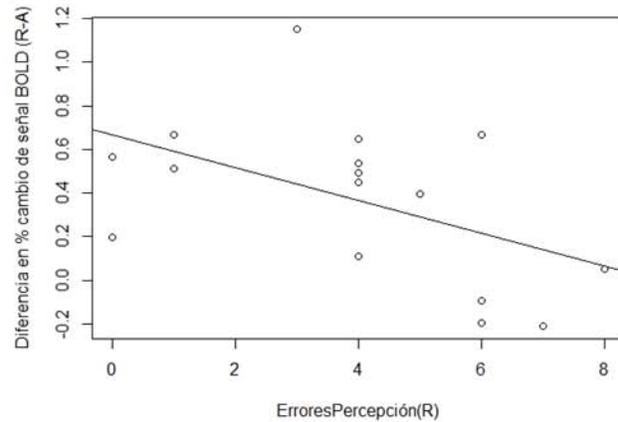


Figura 35: Correlación entre la diferencia del porcentaje de cambio de señal BOLD al escuchar sonidos rítmicos y arrítmicos, y los errores de percepción, en el *planum polare* derecho. En general se observa una correlación negativa; considerando a todos los sujetos como un grupo, la correlación se dio con el número total de errores ($T=R+A$) ($r = -0.5$; $p = 0.01$), mientras que en el grupo de músicos la diferencia de señal BOLD correlacionó únicamente con los errores en la percepción de sonidos arrítmicos (A) ($r = -0.6$; $p = 0.05$), y en el grupo de no-músicos correlacionó con el número de errores en la percepción de sonidos rítmicos (R) ($r = -0.5$; $p = 0.05$).

Planum polare izquierdo

MÚSICOS

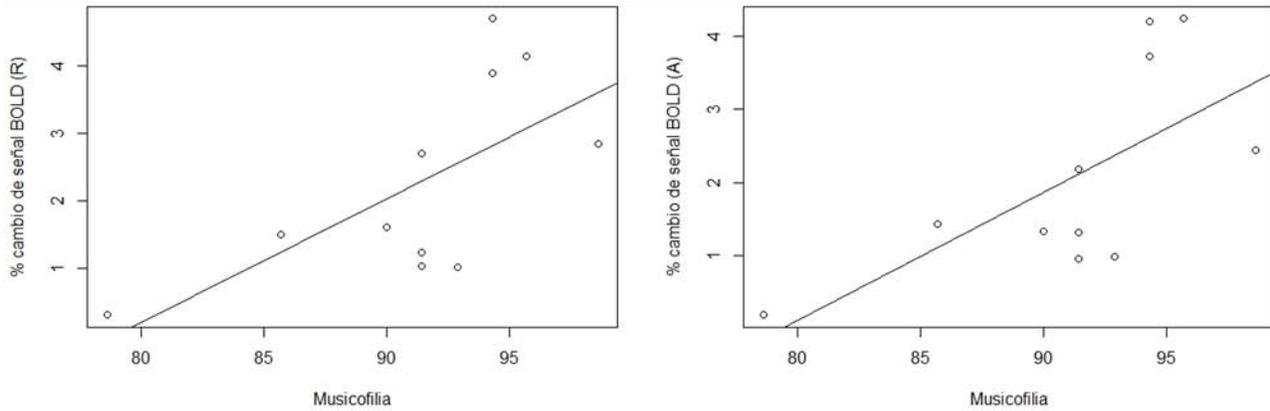
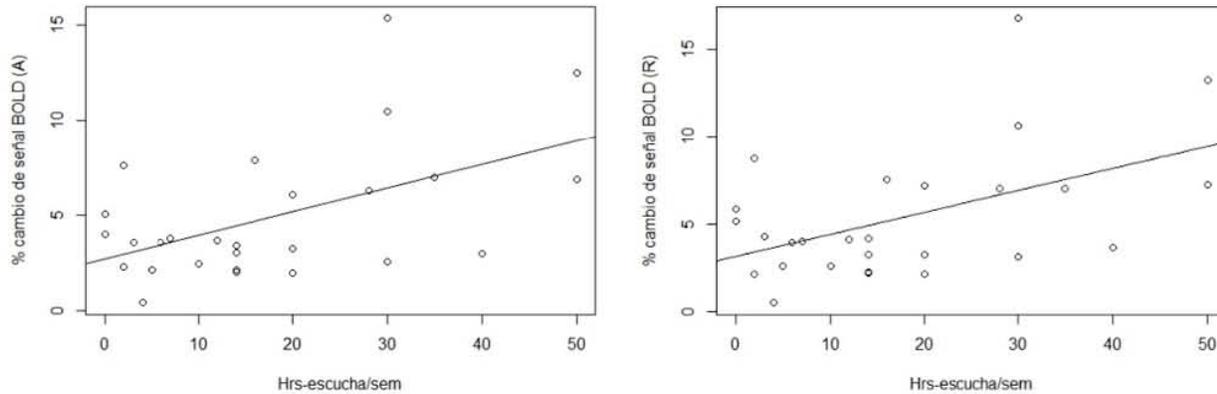


Figura 36: Correlación entre el porcentaje de cambio de señal BOLD al escuchar sonidos rítmicos (R) o arrítmicos (A), y el grado de musicofilia, en el *planum polare* izquierdo del grupo de músicos. El grado de musicofilia correlacionó positivamente tanto con la señal BOLD provocada al escuchar sonidos R, como al escuchar sonidos A, ambos con una $r = 0.7$ y una $p = 0.02$.

Planum temporale derecho

GRUPAL



MÚSICOS

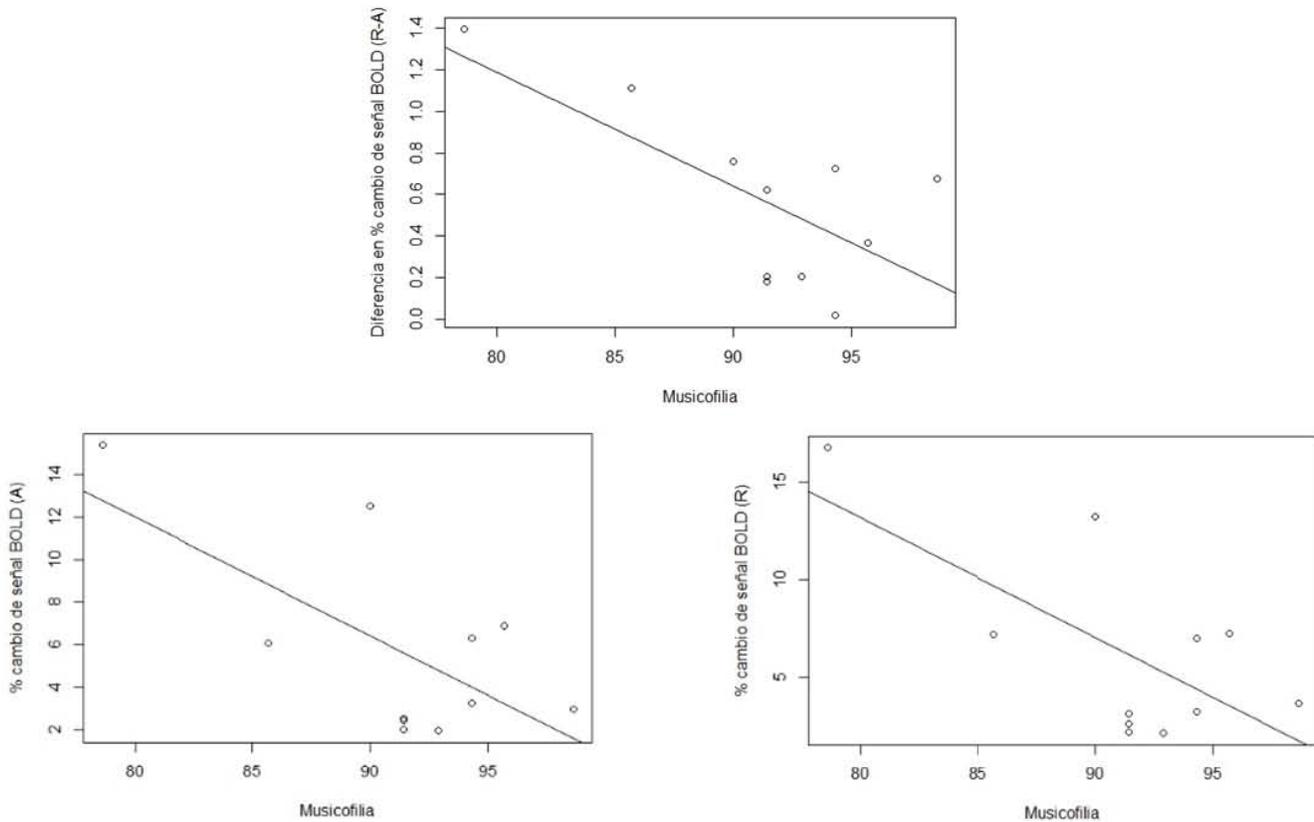


Figura 37a: Correlación de la señal BOLD y las covariables medidas, en el *planum temporale* derecho. En el panel superior se observa la correlación positiva entre el porcentaje de cambio de señal BOLD al escuchar sonidos rítmicos (R) o arrítmicos (A), y las horas por semana que los sujetos escuchan música (Hrs-escucha/sem) ($r = .05$, $p = .008$). En el panel medio se muestra la correlación negativa entre el grado de musicofilia y la diferencia de porcentaje de señal BOLD al escuchar sonidos rítmicos y arrítmicos, en el grupo de músicos ($r = -.07$, $p = .01$). La misma correlación se observa en el panel inferior, entre el porcentaje de señal BOLD al escuchar sonidos rítmicos o arrítmicos, y el grado de musicofilia ($r = -.07$, $p = .02$).

Planum temporale derecho

NO MÚSICOS

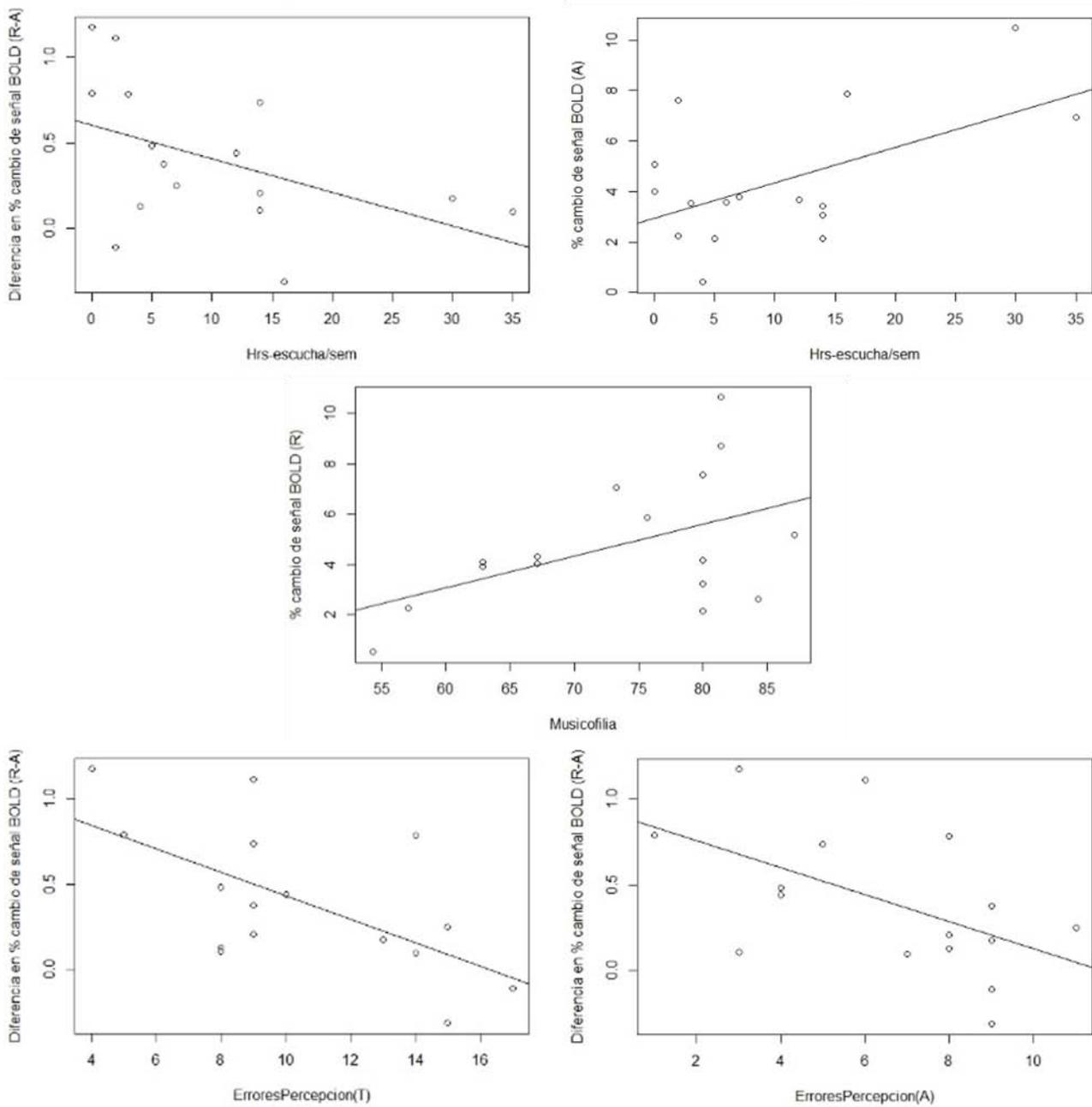
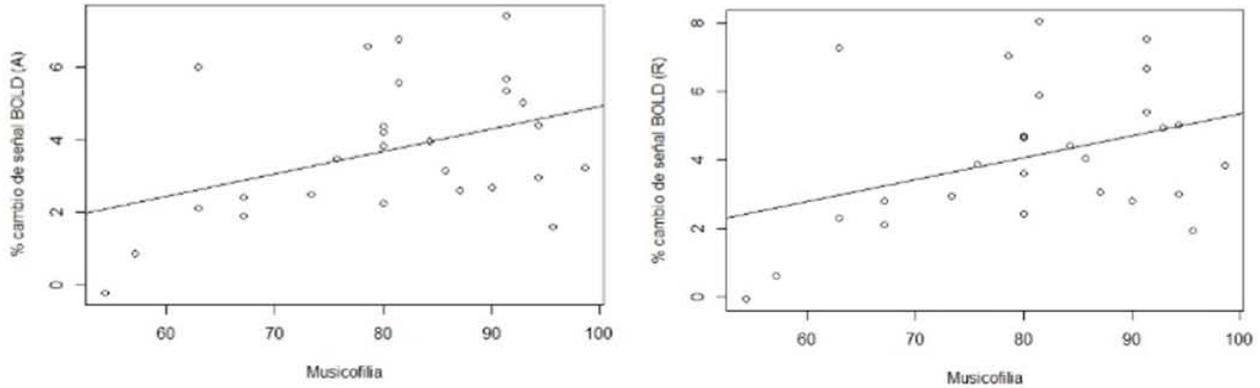


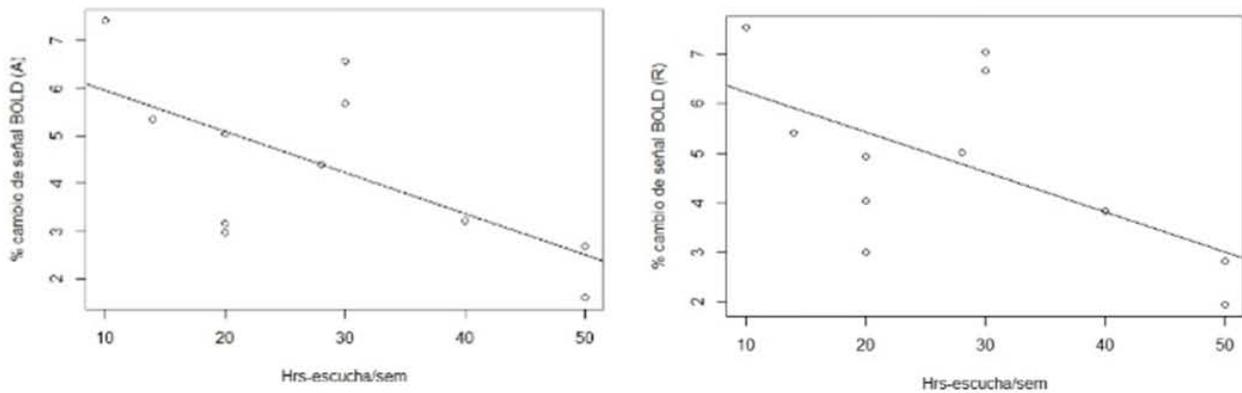
Figura 37b: Correlación de la señal BOLD y las covariables medidas, en el *planum temporale* derecho, del grupo de no-músicos. El porcentaje de cambio de señal BOLD al escuchar sonidos arrítmicos correlacionó positivamente con el número de horas por semana que escuchan música ($r = 0.5$, $p = 0.02$), lo mismo que el porcentaje de señal BOLD al escuchar sonidos rítmicos, con la musicofilia de los sujetos ($r = 0.5$, $p = 0.05$). Por otro lado, la diferencia de porcentaje de cambio de señal BOLD al escuchar ambos tipos de sonidos, correlacionó negativamente tanto con el número de errores de percepción totales y arrítmicos, como con el número de horas por semana que escuchan música ($r = -0.6$, -0.5 , -0.5 ; $p = 0.01$, 0.03 , 0.05 , respectivamente).

Planum temporale izquierdo

GRUPAL



MÚSICOS



NO MÚSICOS

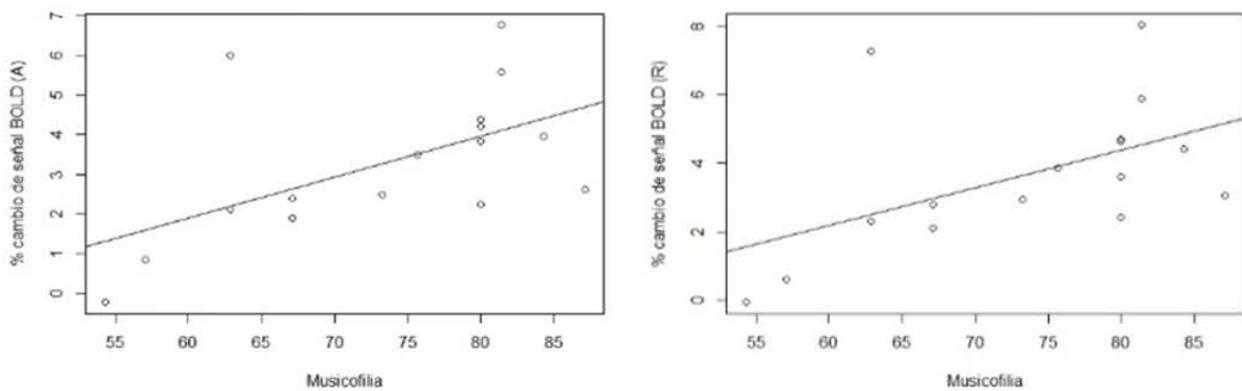


Figura 38: Correlación de la señal BOLD y las covariables medidas, en el *planum temporale* izquierdo. Considerando a todos los sujetos como un grupo (panel superior), se observó correlación positiva entre el grado de musicofilia y el porcentaje de señal BOLD tanto al escuchar sonidos arrítmicos como rítmicos ($r = 0.4$, $p = 0.03$ y $r = 0.4$, $p = 0.04$, respectivamente); el mismo efecto se encontró al separar al grupo de los no-músicos (panel inferior) ($r = 0.6$, $p = 0.02$ y $r = 0.5$, $p = 0.04$). Contrariamente, hubo correlación negativa entre la señal BOLD al escuchar sonidos arrítmicos y rítmicos, y el número de horas que los músicos escuchan por semana (panel intermedio) arrítmicos ($r = -0.6$, $p = 0.03$ y $r = -0.6$, $p = 0.05$, respectivamente).

De todo esto se puede deducir, en primer lugar, que la cantidad de “errores” en la percepción de las categorías de sonidos se relaciona con la actividad del *planum polare* derecho, ya que los sujetos tuvieron menos errores cuando la diferencia entre la señal BOLD provocada por cada sonido, fue mayor.

Por su parte, la actividad del *planum polare* izquierdo de los músicos aumenta conforme su musicofilia es mayor, independientemente de la categoría rítmica.

En cuanto al *planum temporale* derecho, presenta mayor actividad en todos los sujetos dependiendo de las horas por semana que escuchan música, independientemente de la condición rítmica, aunque al analizar por separado a los no-músicos, se observó que la diferencia de porcentaje de cambio de señal BOLD al escuchar ambas categorías sonoras, disminuye conforme más tiempo escuchan música por semana; aunado a esto, este grupo presentó menos errores de percepción conforme la diferencia de señal BOLD entre categorías auditivas, fue mayor. Particularmente en los músicos, el nivel de musicofilia correlacionó negativamente con la actividad de esta región, contrario a lo observado en los no-músicos.

Por último, el *planum temporale* izquierdo tuvo mayor señal BOLD tanto al escuchar sonidos rítmicos como arrítmicos, conforme el nivel de musicofilia fue mayor, lo cual se pudo observar en el grupo de los no músicos y en el análisis conjunto de todos los sujetos. Por el contrario, el grupo de músicos presenta menor actividad conforme más tiempo escuchan música.

Es decir, en los músicos, el *planum polare* izquierdo aumenta su actividad, mientras que *el planum temporale* bilateral la disminuye, según aumenta su nivel de musicofilia y el tiempo que escuchan música.

DISCUSIÓN

El análisis de sonidos musicales rítmicos reflejó señal BOLD en estructuras de la vía dorsal auditiva, especialmente de las regiones somato-motoras; en estudios anteriores se ha reportado que la percepción rítmica y la expectancia que ésta genera, están mediadas por la interacción entre las cortezas motoras y auditivas, en relación a las oscilaciones de ondas delta y beta (Fujioka, *et al.*, 2009; Fujioka, *et al.*, 2012). Por su parte, la percepción de sonidos arrítmicos involucró regiones prefrontales, cuya actividad del hemisferio izquierdo correlacionó positivamente con la claridad rítmica, mientras que el lado derecho, particularmente la región análoga al área de Broca, lo hizo de manera negativa. Además, la estimulación con sonidos no rítmicos activó la ínsula de manera bilateral, lo cual parece estar relacionado con la expectancia. Por otro lado, el lóbulo VI bilateral del cerebelo también participó en la percepción del ritmo, lo cual posiblemente esté relacionado con el “timing cognitivo” debido a su conexión con la oliva inferior (Xu, *et al.*, 2006).

En congruencia con la hipótesis de la investigación, se encontró que la discriminación de sonidos rítmicos y arrítmicos por parte de los sujetos de estudio correlacionó con la señal BOLD del *planum polare* derecho, poniendo en evidencia la importancia de esta estructura en el procesamiento del ritmo para la categorización musical. Por último, el análisis de las covariables mostró que los músicos utilizaron áreas de atención (surco intra-parietal) que no se observaron en las personas sin entrenamiento musical.

¿El ritmo activa “regiones del lenguaje”?

Una de las diferencias más importantes entre lenguaje y música, es el ritmo (Peretz, *et al.*, 2015), que es un atributo inherente a la musicalidad, por la cual, esta investigación se basó en el efecto de la modificación de la claridad rítmica de estímulos musicales, en las regiones anatómicas perceptivas a la música, ya que, tal como proponen Peretz y col., la manipulación acústica es una buena manera de probar las diferencias en la activación cerebral provocada por diferentes estímulos, que en este caso se clasificaron como rítmicos y arrítmicos.

Contrario a lo esperado, no se encontraron diferencias significativas entre los grupos de músicos y no músicos, y la activación cortical sólo se observó al contrastar los sonidos rítmicos con los arrítmicos,

siendo más pronunciada en el hemisferio izquierdo, en tres *clusters*: uno en la corteza auditiva primaria (giro de Heschl), abarcando posteriormente hasta el *planum temporale* (área de Wernicke) y la corteza somatosensorial secundaria, y anteriormente hasta el *planum polare* (posterior) y la ínsula; otro *cluster* en las cortezas somato-motoras primarias, extendiéndose hasta los giros parietales superior e inferior; y uno más en las cortezas premotora y suplementaria motora, alcanzando los giros cingulado, paracingulado y frontal superior. Sin embargo, también se presentó actividad importante en el hemisferio derecho, precisamente desde el GTSp (abarcando A1, GH, *planum temporale* y *planum polare* posterior) hasta la ínsula, así como en los lóbulos V, VI y parte del vermis del cerebelo.

Como ya se ha documentado (Koelsch *et al.*, 2002; Rogalsky, *et al.*, 2011), el hemisferio izquierdo se relaciona de manera preferencial con la percepción del lenguaje, sin embargo, en trabajos como los de Abrams, *et al.* (2010) se encontró que tanto estímulos musicales como lingüísticos activan precisamente el GTSp izquierdo. Aunque, por otro lado, la revisión de Peretz, *et al.* (2015) argumenta que la sobreposición anatómica no implica precisamente compartir los circuitos neurales, ya que la funcionalidad depende de las propiedades de cada población neuronal y la conectividad entre ellas; por ejemplo, existen neuronas espejo que se encuentran dispersas entre neuronas motoras en la corteza cerebral de macacos (Rizzolatti & Craighero, 2004). Y así como Peretz y colaboradores argumentan que puede haber neuronas responsables de la percepción musical en regiones anatómicas involucradas en el lenguaje, también pueden existir en la misma región anatómica, neuronas sensibles a los estímulos rítmicos, entre neuronas que son más sensibles al ritmo. Aunque, por otro lado, la utilización de espacios anatómicos normalizados puede crear traslapes artificiales de regiones anatómicas cercanas que responden a diferentes estímulos (Peretz, *et al.*, 2015), como en el caso de A1, el giro de Heschl y el *planum temporale*, cuyos mapas de activación varían mucho entre sujetos (Chevillet, *et al.*, 2011; Westbury, *et al.*, 1999; Schönwieser & Zatorre, 2008).

Así, existen centros de activación que pueden facilitar la convergencia de señales neuronales de diferentes modalidades sensoriales (ej. auditivo y motor) o dominios cognitivos (ej. música y lenguaje) (van den Heuvel & Sporns, 2013), que tienden a consumir recursos metabólicos más grandes (Collin, *et al.*, 2013), por lo que la respuesta hemodinámica también se ve incrementada y puede haber co-activación de las mismas regiones, en procesos diferentes (Peretz, *et al.*, 2015). Por ejemplo, aunque se ha encontrado en varios estudios que la región anterior del giro temporal superior derecho es más sensible a la música que al lenguaje (Leaver & Rauschecker, 2010; Rogalsky, *et al.*, 2011; Fedorenko, *et al.*, 2012, Tierney, *et al.*, 2013; Augulo-Perkins, *et al.* 2014), los mismos estudios reportaron activación similar

para ambos estímulos en otras regiones del GTS, encontrando activación significativa al escuchar lenguaje, en “zonas de música”, y, al igual que en la presente investigación, encontrando activación con estímulos musicales, en “zonas de lenguaje”, como el *planum temporale*, ubicado en el GTSp. Sin embargo, tal como plantean Peretz y colaboradores, no es posible determinar si la misma población de neuronas responde a ambos estímulos pero con diferente magnitud, o si son diferentes grupos neuronales compartiendo la misma región anatómica.

Al respecto de esta problemática, los estudios con IRMf que muestran adaptación “música-música” y no adaptación “lenguaje-música” en el GTSa (Armony, *et al.* s.f.), así como estudios de lesiones (Peretz, 2009) y patologías como el autismo (Lai, *et al.*, 2012) donde se ha visto que daños que involucran la habilidad musical no afectan el lenguaje, y viceversa, sugieren que sus sustratos neurales están separados. Igualmente, los estudios en donde una frase es repetida hasta que se percibe como canción (lo que se conoce como “song illusion”), demuestran que la población de neuronas perceptivas del lenguaje se adaptan a la repetición, mientras que el grupo neuronal que percibe la musicalidad, no lo hace, ya que, como plantea Margulis (2013), la repetición es una característica de la música, y no del lenguaje, y por lo tanto, el ritmo, que en sí mismo es repetitivo, es una característica exclusiva de la musicalidad.

De esta manera, aunque a primera vista parece que los resultados hallados en esta investigación activan regiones usualmente relacionadas a fenómenos lingüísticos, debe tomarse en cuenta que las redes neuronales pueden ser diferentes. Además, Rogalsky, *et al.* (2011) también reportaron que la parte dorso-medial izquierda del GTS fue más sensible a los estímulos musicales, extendiéndose hasta el lóbulo parietal, lo mismo que Angulo-Perkins, *et al.* (2014), que notaron que la música activó la parte superior del giro post-central izquierdo, correspondiente a la corteza somatosensorial primaria, tal como en este trabajo. Bizley & Cohen (2013) también observaron la participación de regiones parietales (y frontales) en la transmisión auditiva, al igual que Bever & Chiarello, desde 1974 demostraron a través de la percepción musical que el hemisferio izquierdo es más bien dominante para procesamientos analíticos, mientras que el derecho lo es para procesos holísticos, lo que coincide con los resultados aquí expuestos, ya que la tarea involucró el análisis de los estímulos para poder emitir una respuesta. Por su parte, Flores-Gutiérrez, *et al.* (2007) encontraron que al escuchar sonidos musicales placenteros, se reclutan regiones postero-temporales y parietales del hemisferio izquierdo, lo cual es coherente con la activación de estas estructuras al escuchar sonidos rítmicos, puesto que producen mayor placer que los arrítmicos.

Desde otro punto de vista, Alluri, *et al.* (2012) proponen que, aparte de las áreas relacionadas con las emociones, los giros post y pre-central están involucrados en la evaluación estética de la música a través del cumplimiento de expectativas, lo cual puede explicar por qué se activan estas regiones en estudios que trabajan con estímulos musicales (Angulo-Perkins, *et al.*, 2014). En particular, la presente investigación presentó activación en estas zonas preferentemente con estímulos rítmicos, lo cual es consistente con esta teoría, pues los estímulos rítmicos son estéticos, ya que cumplen las expectativas, al contrario de los arrítmicos.

Percepción del ritmo en la corteza auditiva primaria

Un aspecto importante a considerar es la activación significativa de la corteza auditiva primaria al realizar el contraste de Rítmico > Arrítmico, ya que se podría suponer que esta región presentaría la misma actividad tanto al escuchar sonidos rítmicos como arrítmicos, siendo que se trata de una región de procesamiento primario; sin embargo, se ha encontrado que A1 también es sensible a cambios espectrales, siendo mayor su activación con sonidos armónicos que con tonos puros (Da Costa, *et al.*, 2011), y al parecer, como lo indican los resultados obtenidos, también puede ser sensible a procesos temporales a largo plazo característicos del ritmo; aunque, contrariamente, en estudios de percepción rítmica con secuencias monotónicas (Grahn & Rowe, 2013) tampoco se ha encontrado activación de A1.

Desde otra perspectiva, la observación de activación en A1 también puede ser debida a sobreposiciones artificiales por la utilización de espacios anatómicos normalizados (Peretz, *et al.*, 2015), puesto que Chevillet, *et al.* (2011), en un estudio detallado de la regionalización funcional del núcleo, el cinturón y el paracinturón en humanos, encontraron mayor variación entre sujetos en las áreas de procesamiento primario (A1), disminuyendo gradualmente hacia las regiones de procesamiento secundario.

Ritmo y sintaxis

Por otro lado, Herdener *et al.* (2014) reportaron aumento en la señal BOLD al escuchar estructuras musicales con variaciones rítmicas, en regiones que usualmente se asocian con procesamiento sintáctico del lenguaje y la armonía musical, como el *planum temporale* y el análogo derecho del área de Broca, encontrados también en este estudio (el primero al comparar rítmico vs arrítmico, y el segundo

correlacionado negativamente con la claridad rítmica); Herdener y colaboradores tampoco encontraron diferencias entre músicos y no-músicos en estas regiones, aunque sí hallaron que exclusivamente en los músicos se activó el giro supramarginal (GSM) izquierdo, que a su vez está conectado con las áreas de Broca y Wernicke (Catani, *et al.*, 2005). De igual forma, Maes, *et al.*, (2001), utilizando magnetoencefalografía, encontraron respuesta ERAN (early right-anterior negativity) en el área de Broca y su análogo derecho, en sujetos que escucharon incongruencias sintácticas en la armonía musical, lo cual coincide con la correlación negativa encontrada en este estudio, al reducir la ritmicidad.

Al mismo tiempo, Abrams *et al.* (2000) estudiaron el efecto del reordenamiento (scramble) de estímulos musicales y lingüísticos, mientras que Sammler, *et al.* (2013), en un estudio con EEG, vieron similitudes en la actividad del GTS bilateral al violar la estructura sintáctica de sentencias y acordes. Ambos casos tienen similitudes con esta investigación en cuanto a que, de alguna manera, se violó la coherencia rítmica, situación análoga a violar la estructura sintáctica, aunque, contrario a sus resultados, aquí se evidenció mayor activación en regiones usualmente relacionadas con la sintaxis del lenguaje, como el área de Wernicke (donde se encuentra el *planum temporale*), pero en relación a los estímulos sin violación rítmica; sin embargo, sí se encontró coincidencia en la activación del giro frontal inferior (GFI) en respuesta a la violación sintáctica (en el caso de ellos) y rítmica (en este caso) de estímulos musicales.

De la misma manera, Merrill, *et al.* (2012) también encontraron actividad bilateral en el GTS al presentar estímulos musicales y lingüísticos, aunque más anteriormente para los musicales, lo cual no se observó en este trabajo; sin embargo, encontraron que el GFI derecho y el surco intraparietal (SIP) bilateral muestran predominancia por patrones melódicos como los de esta investigación; en particular, en el presente trabajo se observó activación del SIP anterior izquierdo en los músicos, en relación a su percepción (respuestas), además de que se sabe que esta estructura tiene funciones en el procesamiento espacial, integrando información visual, táctil, auditiva y/o motora (Grefkes & Fink, 2005), así como en procesos no espaciales como la memoria de trabajo y control de la atención (Husian & Nachev, 2007), lo cual puede indicar que los músicos utilizaron mayores recursos cognitivos para la resolución de la tarea.

Corteza insular: estímulos novedosos y expectativa

Koelsch, *et al.*, (2002), observaron que los acordes musicales inesperados provocan activación de las áreas de Broca y de Wernicke, el surco temporal superior, el giro de Heschl, el *planum polare* y el *planum temporale*, sin embargo, como ya se mencionó, la utilización de espacios anatómicos normalizados puede crear sobreposiciones artificiales de regiones anatómicas cercanas que responden a diferentes estímulos (Peretz, *et al.*, 2015), como en el caso del giro de Heschl y el *planum temporale*, cuyos mapas de activación varían mucho entre sujetos (Westbury, *et al.*, 1999; Schönwieser & Zatorre, 2008).

Koelsch y colaboradores observaron además, que al escuchar estímulos musicales inesperados se activa la corteza insular, región que también se encontró en esta investigación, en correlación negativa con los valores rítmicos. Downar, *et al.* (2001) también notaron que la ínsula es particularmente sensible a la percepción de estímulos novedosos (tal como los utilizados en este trabajo), concluyendo que esta región sirve para identificar eventos nuevos de diferentes modalidades (visual, táctil y auditiva), y así poder mediar la atención y formular un plan de respuesta, como en este caso, donde la tarea involucraba la discriminación de los estímulos. Por su parte, Platel, *et al.*, (1997) encontraron con un estudio de PET que la ínsula izquierda se activa durante tareas rítmicas de discriminación temporal (regular o irregular) de notas en secuencias musicales, atribuyendo su activación a procesamientos de memoria de trabajo o a la percepción de patrones temporales (secuencias musicales). Posiblemente, en este trabajo se encontró una correlación negativa entre la actividad de la ínsula y el grado de ritmicidad, porque los estímulos novedosos arrítmicos tienen una estructura temporal más complicada de comprender, requiriendo “mayor” memoria de trabajo para ser analizados. De hecho, Grahn & Rowe (2013) también encontraron mayor activación bilateral de la ínsula con estímulos monotónicos arrítmicos, en comparación con los rítmicos.

Desde otra perspectiva, se sabe que la ínsula está implicada en los impulsos adictivos conscientes y la toma de decisiones en procesos de riesgo (Naqvi & Bechara, 2009), a tal grado que una lesión en esta corteza puede abolir por completo comportamientos adictivos como el tabaquismo (Naqvi, *et al.*, 2007). Por esta razón puede pensarse que la ínsula está relacionada con la expectativa, cosa que es común en la percepción rítmica, dada su periodicidad, pero en los sonidos rítmicos esta expectativa se cumple, mientras que en los estímulos arrítmicos no sucede así, lo cual provoca que la ínsula siga activa mientras se encuentra en espera de que se cumpla la expectativa, explicando la correlación negativa que se encontró entre la respuesta de la ínsula y la claridad rítmica. Grahn & Rowe (2013), aunque no centraron su estudio en la ínsula, están de acuerdo con la idea de que al escuchar un sonido arrítmico, los

participantes pueden sentir que lo rítmico llegará después, y por lo tanto se mantienen atentos durante más tiempo; al contrario, los sonidos rítmicos se reconocen fácilmente y la decisión para responder la prueba es más rápida.

De hecho, las dos propuestas para la activación de la ínsula se relacionan, ya que las predicciones temporales que pueden hacerse en los estímulos rítmicos, permiten una mejor organización perceptual de las secuencias de sonidos y reducen la carga de memoria de trabajo, facilitando el procesamiento de los mismos (Jones, *et al.*, 2002), siendo entonces que la atención se incrementa con la expectancia (Jones & Pfordresher, 1997), y mientras esta no se cumpla, la atención permanece, por lo que la ínsula tiene más actividad entre más arrítmicos son los estímulos. Además, Flores-Gutiérrez, *et al.* (2007) también encontraron activación bilateral de la ínsula cuando los sujetos de estudio escuchaban fragmentos musicales no placenteros, en contraste con los placenteros, siendo que los primeros son sonidos disonantes que rompen con las reglas convencionales de la música, asemejándose a los fragmentos arrítmicos de esta investigación.

Asimismo, se ha visto que la ablación de la ínsula en gatos hace que pierdan la habilidad de detectar patrones temporales auditivos (Collavita, *et al.*, 1974); a su vez, Griffiths *et al.* (1997), reportaron que un paciente con lesión en la ínsula derecha, presentaba problemas de amusia, mientras que en otros casos se ha visto que el daño bilateral resulta en completa agnosia auditiva (Habib, *et al.*, 1995). En general, la revisión de Bomiou, *et al.* (2003) propone que la ínsula está involucrada en procesamientos fonológicos, rítmicos y memoria de corto plazo.

El ritmo y la vía dorsal auditiva

La mayoría de la gente puede reconocer y reproducir los sonidos rítmicos a través de movimientos corporales, lo cual sugiere inmediatamente la conectividad entre regiones de las cortezas auditiva y motora (Merchant, *et al.*, 2015). Al respecto, se ha demostrado (Belin, *et al.*, 2002; revisión de Angulo-Perkins & Concha, 2014) que existen áreas auditivas que reciben información de otros sistemas sensoriales además del propio auditivo, por ej. el STS recibe también información visual y somatosensorial, coincidiendo con lo encontrado en el presente estudio, donde se encontraron regiones involucradas en las vías dorsales auditivas y de atención, es decir, los lóbulos parietales pertenecientes a la corteza somatosensorial primaria (SM1), regiones motoras (M1, PMA y SMA) y la parte posterior del

giro temporal superior. La situación puede ser análoga a la observada en las vías de procesamiento visual, en donde la vía dorsal se relaciona con la conceptualización del “dónde” se encuentran los objetos, y su función principal es la codificación de la información espacial necesaria para guiar la acción, por lo que no sólo es la vía del “dónde” sino del “cómo”. Así, esta extracción de los parámetros relevantes para la acción, genera las correspondientes órdenes motoras, lo cual a su vez puede estar influenciado por el procesamiento semántico de la vía ventral (Goodale & Milner, 1992; Jeannerod, 1994; Jeannerod, *et al.*, 1995, citados por Roselló & Sánchez-Cabaco, 2014).

De hecho, el humano no necesita entrenamiento especial para percibir el “compás” de los ritmos musicales, siendo esta característica un comportamiento innato (Merchant, *et al.*, 2015) que depende de la interacción entre los sistemas auditivo y motor (Zatorre, *et al.*, 2007; Merchant & Honing, 2014), la cual, según la “hipótesis audio-motora gradual” ha ido evolucionando gradualmente en el orden de los primates (Merchant & Honing, 2014; Honing & Merchant, 2014) siendo que los monos sólo pueden percibir desviaciones en secuencias isocrónicas, mientras que los humanos lo pueden hacer aún en secuencias más complejas (Selezneva, *et al.*, 2013)

En tareas de sincronización se vio que las personas con entrenamiento musical presentan mayor conectividad entre las áreas auditivas y motoras, ocurriendo lo mismo en tareas pasivas (donde el movimiento no es requerido), siendo que los músicos tuvieron mayor bilateralidad en esta red (Chen, *et al.*, 2008); además, se ha visto que el entrenamiento musical produce cambios anatómicos y funcionales en cortezas motoras y somatosensoriales (revisado en Pantev & Herholz, 2011). Esta situación no fue reflejada en el presente estudio, pues no se encontraron diferencias significativas entre grupos (músicos y no músicos. Sin embargo, es interesante ahondar en la actividad de estructuras específicas como el *planum polare* y el *planum temporale*, pues se ha reportado que presentan plasticidad con el entrenamiento (Angulo-Perkins, *et al.*, 2014).

Por su parte, Popescu *et al.* (2004) estudiaron las redes encargadas de la percepción rítmica en la música, a través de un estudio de MEG. Ellos encontraron actividad dentro y alrededor de las cortezas auditivas primarias y secundarias, pero también en las cortezas somatomotoras primarias, el área motora suplementaria (SMA por sus siglas en inglés) y la corteza premotora (PMC por sus siglas en inglés), que son exactamente las regiones encontradas aquí, demostrando una vez más la importancia de las áreas motoras en la percepción musical, particularmente de los patrones temporales (como el ritmo).

De manera similar, otros investigadores (Fadiga, *et al.*, 2009) han concluido que existe una red de activación audiomotora que incluye a las cortezas motora, premotora y suplementaria motora, en asociación con el lóbulo parietal inferior y el giro temporal superior, concluyendo que la activación de estas regiones puede deberse a la representación motora requerida para la producción de esas melodías, similar a un mecanismo de neuronas espejo. Además, la percepción del “beat” incrementa la conectividad entre los sistemas motor y auditivo, y dentro del mismo sistema motor, sugiriendo que si bien la conectividad audiomotora es importante para la percepción auditiva con respuestas motoras (tapping) (Zatorre, *et al.*, 2007; Chen, *et al.*, 2008), también puede ocurrir cuando la respuesta no es ejecutada, como en el presente trabajo, en donde a pesar de que no hubo sincronización motora aunada a la percepción del ritmo, sí se observó gran activación de las cortezas motoras.

Además, en la revisión de Merchant, *et al.* (2015) se encuentra que la percepción del “beat” y la sincronización es consistente con la actividad del cerebelo, SMA, PMC, corteza auditiva, ínsula y la corteza parietal inferior, que como ya se dijo, son las regiones que presentaron activación durante la percepción rítmica en el presente trabajo. De la misma forma, Grahn & Rowe (2013), en un experimento similar al presentado en este reporte, observaron mayor actividad en SMA bilateral, así como en PMC y la unión temporoparietal izquierdas, al escuchar secuencias monotónicas rítmicas en comparación con las no rítmicas. Más aun, Flores-Gutiérrez, *et al.* (2007) encontraron activación posterotemporal-parietal mientras los sujetos de estudio escuchaban sonidos musicales placenteros, es decir, fragmentos consonantes con mayor seguimiento a las normas convencionales de estructura musical, y por lo tanto, con más ritmo que los fragmentos no placenteros. En estos trabajos también se menciona la participación de otras áreas que no se encontraron aquí, como los ganglios basales (especialmente el putamen), el tálamo y pre-SMA, al igual que otras regiones que se discutirán más adelante.

Al respecto, Grahn & Rowe (2013) proponen que el putamen está más involucrado en la percepción rítmica automática o implícita, mientras que la corteza premotora se relacionan más con la percepción mediada por la atención, induciendo representaciones motoras o imagería. Por el contrario, Coull & Nobre (2008) dicen que los ganglios basales sí se involucran en el “timing” explícito, que se relaciona con la comparación entre estímulos; mientras que el “timing” implícito, que puede ser motor (“timing” emergente) o perceptual (expectativa temporal), recluta áreas parietales y premotoras. En el presente estudio, la percepción estaba mediada por la atención, pero a su vez la decisión estaba basada en la expectativa temporal, lo cual puede explicar por qué sólo se hallaron cortezas somato-motoras pero no los ganglios basales, a pesar de estar interconectados. De hecho, Schubotz, *et al.* (2000) encontraron que

la parte ventral de PMC se activa cuando la predicción temporal es dirigida por la atención, pero no cuando existe periodicidad, sin ser atendida.

Schubotz & von Cramon (2003) revisaron que PMC derecha está más involucrada en tareas espaciales y en etapas de aprendizaje avanzadas, mientras que el lado izquierdo se recluta en tareas no espaciales y durante la adquisición de nuevas secuencias motoras; además, propusieron la existencia de un “mapa corporal” que sugiere que el cerebro no sólo es capaz de imaginar el movimiento de uno mismo, sino también de imaginar las características del ambiente (presentes o esperadas) en relación a nuestro cuerpo. Esto puede explicar la activación de las regiones premotoras izquierdas al escuchar secuencias rítmicas, en esta investigación.

Por lo tanto, es claro que los resultados encontrados en esta investigación involucran el reclutamiento de la vía dorsal auditiva, lo cual concuerda con la revisión de Rauschecker (2012) quien propuso que esta vía tiene un rol en la integración y control sensoriomotor, donde las cortezas premotoras y parietales participan en la codificación y representación temporal de los objetos auditivos (o secuencias de sonidos), así como en la predicción de los mismos, tal como se observa en estudios de imaginería musical (Leaver, *et al.*, 2009). Esto a su vez, se relaciona con la teoría motora de la percepción rítmica (Xu, *et al.*, 2006), que propone que la percepción del ritmo no puede dissociarse de los recursos motores. Además, la vía dorsal interacciona con la vía ventral en regiones fronto-parietales, lo cual puede explicar por qué el ritmo ayuda a la memoria de trabajo, en la que están implicadas estas áreas.

Por último, y reforzando la misma teoría, se ha visto que personas con amusia tienen problemas para seguir el compás de la música al bailar (revisado en Stewart, *et al.*, 2006), lo cual indica un déficit en el procesamiento de la métrica y el ritmo, no sólo en regiones auditivas, sino también motoras. Además, en el presente estudio se encontró que existe una correlación positiva entre la actividad de áreas motoras (no solo en la corteza, sino también en el cerebelo, como se verá en secciones posteriores) y el valor rítmico de los estímulos musicales; esta situación no sucedió con las cortezas auditivas, lo cual indica que si bien estas cortezas se encargan de la percepción de los sonidos, el análisis de los atributos temporales de los mismos, requiere precisamente de la participación de regiones motoras.

Expectancia: ondas delta y beta

Para que las personas puedan moverse al ritmo de la música, el cerebro debe ser capaz, en primer lugar, de extraer la regularidad en la información temporal del sonido escuchado; una vez que se detecta la periodicidad (ritmo), es decir, que se “descubre” el compás, el siguiente paso es la representación interna del mismo, para después poder predecir el momento en el que comienza el siguiente “beat” durante esa secuencia rítmica (Bartolo, *et al.*, 2014; Bartolo & Merchant, 2015; Merchant, *et al.*, 2015). Al respecto, se ha encontrado que el putamen y SMA están involucrados en el mantenimiento de esta representación interna del ritmo lo cual se nota cuando los sujetos de estudio “llevan el ritmo (tapping)” (Rao, *et al.*, 1997). Sin embargo, en la presente investigación sólo se observó actividad en SMA, y no del putamen; tal vez este último no se involucre en el procesamiento del “timing cognitivo”, pero, aunque no se “siga el ritmo (tapping)”, existe una representación motora del mismo.

Se piensa que las interacciones entre el sistema auditivo y motor están dadas por oscilaciones en las ondas delta (1-3 Hz) y beta (15-30 Hz) siendo que el rango ideal para la percepción del tempo musical es de 1-3 Hz, coincidiendo con las oscilaciones de la banda delta. En general se ha visto que el comportamiento oscilatorio es producido por influencia “top-down”, atención, expectancia y toma de decisiones (revisión de Merchant, *et al.*, 2014), siendo todas ellas características particulares de la tarea que se presentó a los sujetos en este estudio, por lo que de manera indirecta se puede presumir que las oscilaciones en el comportamiento de estas ondas son las que propiciaron la percepción del ritmo a través de las regiones auditivas (GTSp) y motoras (M1, PMC y SMA) que se encontraron activadas; aunque queda la duda de la manera en que interaccionan estos dos sistemas con las regiones somatosensoriales que también presentaron actividad durante la percepción de sonidos rítmicos.

Adicionalmente, las oscilaciones beta también son importantes en la predicción del tiempo (Fujioka, *et al.*, 2009; Fujioka, *et al.*, 2012); se ha visto que se encuentran asociadas a procesos motores, decreciendo en amplitud durante la planeación motora y el movimiento en sí, y recuperándose al finalizar el movimiento (revisión de Merchant, *et al.*, 2014), además de que también median la interacción entre regiones auditivas y motoras (Fujioka, K., 2009; Fujioka, *et al.*, 2012). En un estudio de la corteza auditiva a través de MEG, Fujioka *et al.* (2012) sometieron a los sujetos a escuchar secuencias de tonos isocrónicos con tempos diferentes, observando que las ondas beta decrecieron después del “onset” de cada tono y se recuperaron, alcanzando su máximo, justo antes del siguiente tono, independientemente del tempo.

Reforzando los resultados anteriores, en otro estudio (Fujioka, *et al.*, 2009) se encontró que si un “beat” es omitido de una secuencia, el poder de las ondas beta no disminuye, demostrando que estas oscilaciones dependen de la expectativa del siguiente “beat” y no de su producción en sí mismo, lo cual, una vez más, muestra de manera indirecta que la participación de las regiones auditivas y motoras encontradas en esta investigación, debe estar mediada también por las oscilaciones en las ondas beta, lo cual además puede explicar la falta de actividad en estas regiones al escuchar sonidos arrítmicos, puesto que, en estos estímulos, no se podía predecir el siguiente “onset” (el cual fue modificado, tal como se mencionó en el apartado de “Material y métodos”), contrario a los sonidos rítmicos, donde se permitió la internalización del “beat”, la predicción mediada por las ondas beta y, por tanto, la activación de las áreas auditivo-motoras.

Sin embargo, Fujioka y colaboradores encontraron que las fluctuaciones beta de las regiones motoras se encuentran en fase opuesta a las de las regiones auditivas, sugiriendo la existencia de un “loop” sensoriomotor, tal como en los ratones, donde M2 tiene efectos inhibitorios en la corteza y áreas subcorticales auditivas (Nelson, *et al.*, 2013).

Atención y percepción del ritmo

Respecto a la atención, Cusack, *et al.*, (2004) demostraron que ésta es importante para la formación de objetos auditivos, y por lo tanto, para la discriminación entre ellos; en este estudio, la respuesta emitida por los participantes funcionó a su vez como control de atención, además de que, para tener lo que Cusack y colaboradores llaman “atención selectiva”, los voluntarios escucharon previamente una prueba para conocer el tipo de estímulos que iban a presentarse durante el paradigma y poder discriminarlos del ruido que emite el resonador. Por lo tanto, no sorprende la activación del sistema de atención dorsal, que presenta mayor actividad cuando la atención se dirige al mundo exterior, y que incluye regiones parietales, como el surco intraparietal (Fox, 2006), encontradas en este trabajo, específicamente en el grupo de los músicos. Del mismo modo, la Teoría de Atención Dinámica (Large & Jones, 1999; Jones, 2004; Vuust, *et al.*, 2014), sugiere que la atención de los sujetos es captada por la periodicidad de los patrones rítmicos, y los silencios métricos dirigen la atención hacia cada evento rítmico, lo cual también explica por qué hubo mayor activación al percibir los sonidos rítmicos, en contraste a los arrítmicos. Además, Merchant, *et al.* (2015) han concluido que los ritmos con métrica sencilla inducen una clara percepción del compás (“beat”), mientras que los ritmos con métrica compleja o sin métrica, no lo hacen.

Por su parte, Petkov, *et al.* (2004) encontraron con IRMf que la región lateral de la corteza auditiva se activa sólo cuando las personas ponen atención, independientemente de la frecuencia y localización de los sonidos, analizando características de más alto nivel. A su vez, Bever & Chiarello (1974) demostraron que cuando los músicos ponen atención a la sucesión de sonidos de corto plazo en una melodía, la activación cerebral ocurre en el hemisferio dominante (usualmente el izquierdo) y no en el derecho, al que suelen atribuirse las funciones musicales.

Cerebelo y percepción del ritmo

Pressnitzer *et al.* (2008) argumentaron que el análisis de las escenas auditivas comienza mucho antes de llegar a la corteza, requiriendo la interacción de las áreas subcorticales, lo cual es coherente con la participación del cerebelo encontrada en este estudio, sin embargo, ellos utilizaron manipulaciones espectrales, mientras que en este trabajo se hicieron modificaciones temporales. Al respecto, Xu, *et al.* (2006) observaron activación cerebelar durante la percepción de secuencias temporales, sugiriendo la ya mencionada teoría motora de percepción rítmica, que propone que la percepción del ritmo depende de mecanismos motores; a la vez que Phillips-Silver & Trainor (2005) sugieren una influencia del movimiento del cuerpo en la percepción de sonidos rítmicos, iniciada desde temprana edad por la interacción entre los sistemas vestibular y auditivo, así como propioceptores; podría ser que, con el desarrollo del individuo, esta interacción se extienda hasta abarcar las áreas motoras.

De la misma manera, Griffiths *et al.* (1999), utilizando PET, encontraron una red de activación compartida para el análisis temporal y espectral del sonido, que abarca el lóbulo temporal superior posterior, la corteza frontal inferior y el cerebelo derechos, tal como en el presente estudio.

Más específicamente, Alluri, *et al.* (2012) encontraron que el lóbulo VI del cerebelo tiene funciones cognitivas en procesos relacionados con el timbre, y Merrill, *et al.* (2012) notaron activación bilateral de la misma estructura cuando se analizan patrones tonales y rítmicos; estas observaciones coinciden precisamente con la observación de uno de los lóbulos encontrados en esta investigación, cuya activación correlacionó positivamente con la claridad rítmica. El lóbulo VI forma parte del neocerebelo y por tanto de los hemisferios cerebelosos, que reciben aferencias de la corteza cerebral, de la médula oblonga (oliva inferior) y de los sistemas visual y acústico; debido a su gran conectividad, se ha designado que la función

del neocerebelo es la coordinación de los músculos encargados de movimientos finos y precisos, y la comparación de las órdenes motoras procedentes de la corteza, con su resultado motor (Delgado-García, 2001). Sin embargo, las aferencias que recibe el neocerebelo de la oliva inferior a través de las fibras trepadoras, ponen en evidencia el papel del sistema olivo-cerebelar en la percepción del ritmo, ya que se ha visto (Xu, *et al.*, 2006) que la oliva inferior se activa únicamente cuando los sujetos perciben secuencias temporales (visuales) sin realizar actividad motora (“timing cognitivo”), “desactivándose” cuando los sujetos comienzan a moverse para “llevar el ritmo”. Además, ya desde 1989, al sistema olivo-cerebelar se le han atribuido funciones de “reloj”, basándose en sus propiedades oscilatorias rítmicas (Llinas & Sasaki, 1989).

Contrariamente, Merchant, *et al.* (2015) refieren estudios de IRMf donde plantean que el cerebelo es importante para la percepción del tiempo absoluto, y no para el tiempo relativo, mientras que Grahn & Rowe (2013) han notado que el lóbulo VIII y Crus I del lado izquierdo del cerebelo se activan más con ritmos no métricos que con ritmos métricos, es decir, que esta estructura presenta mayor actividad conforme aumenta la complejidad métrica y el compás es difícil de percibir; además, Merchant y colaboradores revisaron que la disfunción cerebelar ya sea por enfermedad o por estimulación magnética transcraneal provoca déficits en la codificación de duraciones individuales pero no en la de secuencias métricas. Todo esto no concuerda con los resultados de esta investigación, en donde se encontró que la actividad bilateral del cerebelo correlacionó positivamente con la claridad rítmica; sin embargo, hay que tomar en cuenta que estos estudios se han realizado bajo la producción de movimiento (“tapping”), o que han encontrado diferentes lóbulos a los observados en este trabajo. Así, como ya se mencionó, el lóbulo VI del cerebelo está relacionado con la percepción del “timing cognitivo”, el cual implica la percepción rítmica sin producción motora.

Lateralización hemisférica para el procesamiento del ritmo

Se ha notado que la parte lateral de los hemisferios cerebelares median los aspectos perceptuales y cognitivos del tiempo a través de sus conexiones con la corteza de asociación frontoparietal (Middleton and Strick, 1994), resaltando que en el presente estudio se encontró correlación positiva entre la claridad rítmica y la activación izquierda del lóbulo parietal superior, el giro frontal superior y los giros cingulado anterior y paracingulado, similar a lo hallado por Grahn & Rowe (2013); así como una correlación negativa entre la claridad rítmica y la activación bilateral de las cortezas opercular frontal y orbitofrontal,

y los giros frontal superior, cíngulo anterior y paracingulado derechos. Esto demuestra que existe lateralización hemisférica de las regiones frontales para el procesamiento del ritmo, donde el lado izquierdo media la percepción de sonidos rítmicos y el derecho la percepción de sonidos no rítmicos, coincidiendo también con los resultados de Flores-Gutiérrez, *et al.* (2007), quienes descubrieron que el hemisferio izquierdo procesa prioritariamente música placentera (más rítmica), mientras que el hemisferio derecho lo hace con música no placentera (menos rítmica).

De hecho, en un estudio donde se utilizaron como estímulos frases de lenguas tonales (Hsieh, *et al.*, 2001), se encontraron variaciones en la activación en la región frontal inferior, notando activación izquierda en los parlantes nativos, y activación derecha en los extranjeros, es decir, existe lateralización del procesamiento prosódico, que a su vez está relacionado con el ritmo, al igual que en la presente investigación.

Particularmente, Zatorre, *et al.* (2002) encontraron en su revisión que la organización de los sonidos requiere la función de la memoria de trabajo, por lo que es frecuente la activación del lóbulo frontal, especialmente del lado derecho. Al igual que la ínsula, puede ser que la correlación negativa entre la actividad de las regiones frontales derechas y la claridad rítmica, se deba a que los estímulos novedosos arrítmicos tienen una estructura temporal más complicada de comprender, requiriendo “mayor” memoria de trabajo para ser analizados. Por lo tanto, no es posible reconocer si el reclutamiento de estas regiones se debe al grado de ritmicidad de los estímulos o al grado de atención requerido para analizarlos.

Actividad relacionada con la elección

Por otro lado, hay que tomar en cuenta la teoría de la “actividad relacionada con la elección”, que propone que la señal BOLD se debe más a la percepción del objeto audible que a las características espectro-temporales del estímulo en sí. Bizley & Cohen (2013) revisaron estudios donde estímulos idénticos activaron diferencialmente la corteza auditiva primaria de diferentes sujetos, dependiendo de si lo percibían como sonido continuo o discontinuo, y que la temporalidad resulta ser un factor importante en la transmisión auditiva. En otros estudios se encontró que las oscilaciones delta en la corteza auditiva reflejan la interpretación métrica de los sujetos, más que la periodicidad de los estímulos, es decir, cuando los voluntarios imaginaban un “beat” cada dos tonos, la actividad oscilatoria medida con EEG fue de 1.2 Hz, mientras que si percibían el “beat” cada tercer tono, las oscilaciones fueron de 0.8 y 1.6 Hz

(Nozaradan, *et al.*, 2011); igualmente, Iversen, *et al.* (2009) mostraron que las oscilaciones beta fueron afectadas dependiendo de si los sujetos imaginaban los tonos de una secuencia como un compás fuerte o como uno débil.

En el estudio ya mencionado de Hsieh, *et al.* (2001), donde se encontró que las variaciones tonales del mandarín provocaron activación en la región frontal inferior izquierda de los parlantes nativos del mandarín, en comparación con los parlantes de inglés, quienes activaron la región homóloga del lado derecho, se nota claramente la lateralización del procesamiento tonal dependiendo de si los patrones de tono tenían importancia fonológica o no para los sujetos de estudio, demostrando que la especialización hemisférica es sensible a la información de alto nivel, ya que las regiones de alto orden no representan fidedignamente las propiedades físicas del sonido, sino la relación entre estos sonidos y sus implicaciones en el comportamiento (revisión de Angulo-Perkins & Concha, 2014) así, las diferencias pueden deberse a las abstractas estrategias que cada sujeto utilice para resolver una situación (Bizley & Cohen, 2013).

Además, Drake & Ben El Heni (2003) observaron que la sincronización (tapping) es más lenta cuando los estímulos musicales son culturalmente familiares que cuando no lo son. Contrariamente, Abrams, *et al.* (2011) proponen que independientemente del contenido emocional, atención, memoria, intereses subjetivos, excitación o familiaridad, las diferencias de activación de patrones o intensidad de los mismos, se deben a las diferencias acústicas entre los estímulos probados. Al respecto, Woods, *et al.* (2009) encontraron que A1 es sensible sólo a las características del sonido (frecuencia y amplitud), pero que el cinturón se modula por los procesos de atención que requieren reconocimiento auditivo, y el paracinturón caudal y rostral se asocian con procesos verbales e integración semántica, correlacionando positivamente con la complejidad espectro-temporal de los sonidos; a su vez, las regiones del paracinturón son selectivas a elementos acústicos inherentes a la música, mostrando activación junto con regiones frontales, en tareas de discriminación de tonos y melodías (revisión de Angulo-Perkins & Concha, 2014).

Por su parte, Petkov, *et al.* (2004) encontraron con IRMf que la corteza auditiva mesial procesa sonidos independientemente de la atención del sujeto de estudio, mostrando cambios topográficos en su activación que dependen de la frecuencia y localización de los sonidos, y una rápida adaptación a la repetición de los mismos; contrariamente, la región lateral de la corteza auditiva se activa sólo cuando las personas ponen atención, independientemente de la frecuencia y localización de los sonidos, analizando características de más alto nivel y mostrando un aumento de amplitud conforme aumentan las repeticiones.

Por todo esto, es necesario ahondar en el estudio de la actividad relacionada con la elección, en contraposición a lo categorizado a través de mediciones físicas.

Planum polare: categorización de la música a través del ritmo

Si bien no se encontró al *planum polare* como una de las regiones con mayor activación, el análisis de ROIs demostró que esta región presentó mayor porcentaje de cambio de señal BOLD en el hemisferio derecho, y que el número de errores en la percepción depende de su actividad (entre mayor es la diferencia en el porcentaje de cambio de señal BOLD provocado por sonidos rítmicos y arrítmicos, menor es el número de errores cometidos). Estudios como el de Tierney *et al.* (2013) y Angulo-Perkins, *et al.*, (2014) demuestran que el *planum polare* (particularmente el derecho) tiene funciones de “categorización musical”, lo cual es coherente con los resultados obtenidos en esta investigación, ya que, a pesar de que se modificó el ritmo de los estímulos acústicos, estos cambios no sobrepasaron el límite de la musicalidad, es decir, independientemente de su nivel rítmico, todos los sonidos conservaron su esencia musical, por lo que no se activó mayoritariamente en ninguno de los contrastes.

Sin embargo, se debe considerar que el proceso de “categorización musical” debe realizarse bajo ciertos parámetros, entre ellos la claridad rítmica, que es una característica peculiar de la música, por lo que, según los resultados hallados, el *planum polare* derecho sí procesa el ritmo, y lo hace con mayor eficiencia que su análogo contralateral y que el *planum temporale*, aunque, en el caso particular de este experimento, las diferencias rítmicas no fueron suficientes para categorizar los sonidos arrítmicos como no musicales, por lo que no se encontró activación significativa en el *planum polare* bajo ninguno de los contrastes, salvo la parte posterior del mismo que, valga decir, fue ligeramente más extenso en el hemisferio derecho, lo cual corresponde otra vez, con lo encontrado en otras investigaciones.

Entonces, se recalca el hecho de que esta estructura analiza las características rítmicas para la categorización musical, ya que, como ya se mencionó, existe una correlación negativa entre el número de errores cometidos por los sujetos de estudio, y la diferencia entre el porcentaje de cambio de señal BOLD provocado por estímulos rítmicos y el provocado por estímulos arrítmicos. Es decir, si la activación del *planum polare* derecho cuando se escuchan sonidos rítmicos no es muy diferente a cuando se escuchan sonidos arrítmicos, entonces el sujeto no los puede diferenciar, pero si esta activación es muy diferente al escuchar cada tipo de estímulo, entonces las personas pueden “percibirlos

correctamente”.

Adicionalmente, es válido pensar que la categorización del ritmo (correcta o incorrecta), a pesar de ser una característica temporal de largo plazo, ocurre en un par de segundos, ya que, aunque no se midieron los tiempos de reacción, por observaciones directas durante la realización del paradigma se sabe que los sujetos podían calificar los estímulos mucho antes de que terminaran, lo cual es consistente con observaciones de estudios anteriores donde sugieren que la percepción del ritmo depende en gran medida de contextos previos (Grahn & Rowe, 2013), haciendo más fácil su internalización.

Por último, se ha visto una situación similar en el putamen izquierdo, cuya activación correlaciona positivamente con la eficacia en la discriminación temporal pero de sonidos monotónicos (hay que recordar que el *planum polare* es más sensible a sonidos complejos), presentando también co-activación con regiones prefrontales, premotoras y cerebelares (Coull & Nobre, 2008).

¿Plasticidad?

En estudios anteriores se ha visto que las personas con entrenamiento musical presentan plasticidad anatómica y funcional en las redes audio-somato-motoras (Chen, *et al.*, 2008; Pantev & Herholz, 2011, Grahn & Rowe, 2013; López, 2013). No obstante, en este trabajo no hubo diferencias significativas entre grupos de músicos y no músicos, sin embargo, tal como en otras investigaciones (Angulo-Perkins, *et al.* 2014) donde se encontró que el *planum polare* izquierdo y el *planum temporale* derecho de los músicos presentan diferencias de actividad entre los dos grupos, en este estudio también se observó que la actividad del *planum polare* izquierdo de los músicos correlacionó positivamente con el grado de musicofilia, aunque, contrariamente, su *planum temporale* bilateral disminuyó su actividad según aumenta su nivel de musicofilia y el tiempo que escuchan música. La disminución en la función y grosor cortical de ciertas estructuras en correlación con el grado de experticia se ha reportado en otros estudios (Grahn & Rowe, 2013; López, 2013), donde suponen que cuando se tiene menor entrenamiento musical, las tareas resultan más complicadas y por tanto hay más concentración y mayor respuesta en zonas sensorio-motoras.

Sin embargo, ya se había mencionado que los músicos activan el SIP anterior izquierdo mientras realizan la tarea de discriminación, indicando que utilizan mayores recursos cognitivos para la resolución de la

tarea, pues esta estructura participa en procesos de memoria de trabajo y atención (Husian & Nachev, 2007) y tiene funciones en el procesamiento espacial, integrando información visual, táctil, auditiva y/o motora (Grefkes & Fink, 2005). Tal vez la presión de realizar una tarea que involucra su habilidad musical, resultó en una mayor atención por parte del grupo de músicos.

Por último, independientemente de las habilidades musicales, puede decirse que la percepción del ritmo ocurre espontáneamente la mayoría de las personas (Grahn & Rowe, 2013), ya que no se observaron diferencias significativas entre grupos, en ninguno de los análisis principales.

CONCLUSIONES

El análisis de estructuras rítmicas requiere la actividad de la vía dorsal auditiva, especialmente de las regiones somato-motoras, lo cual se relaciona con la teoría motora de la percepción rítmica. Además, en base a la teoría de atención dinámica, podemos decir que los patrones rítmicos provocan mayor atención que los arrítmicos.

Existe evidencia indirecta de que la percepción rítmica y la expectancia que ésta genera, está mediada por la interacción entre las cortezas motoras y auditivas, en relación a las oscilaciones de ondas delta y beta; corroborando una vez más, la teoría motora de la percepción rítmica.

A su vez, la percepción de las violaciones rítmicas (arritmo) requiere de regiones prefrontales, particularmente la parte derecha análoga al área de Broca, cuya activación correlacionó negativamente con la claridad rítmica. Además, la estimulación con sonidos originales activa la ínsula de manera bilateral, siendo que entre más arrítmicos son los estímulos, no se cumple la expectancia y más necesaria se vuelve la memoria de trabajo.

Por otro lado, existe una lateralización hemisférica en las regiones frontales, siendo que el lado derecho correlaciona negativamente con la claridad rítmica, mientras que el lado izquierdo lo hace de manera positiva. Por su parte, el lóbulo VI bilateral del cerebelo participa en la percepción “cognitiva” (no motora) del ritmo, correlacionando positivamente con la ritmicidad.

La actividad del *planum polare* derecho juega un papel importante en la discriminación de sonidos musicales rítmicos vs arrítmicos, proceso importante para la categorización musical. Aunque los músicos en particular, utilizan áreas de atención (surco intra-parietal) que los sujetos no músicos no utilizan al mismo nivel, para la discriminación de estos sonidos; a su vez, los músicos presentan mayor activación del *planum polare* izquierdo en relación al grado de “musicofilia” que tengan.

LIMITACIONES

No todos los músicos utilizados en la investigación eran profesionales, muchos de ellos practican la música como actividad secundaria, lo cual puede ser el motivo de que no se pudieran discernir diferencias entre grupos.

Las respuestas motoras (constantes entre sujetos) no permiten dilucidar con precisión si la observación de la corteza premotora y el área suplementaria motora se relacionó con la planeación del movimiento ejecutado para emitir la respuesta sobre la percepción rítmica posterior a la estimulación auditiva, o con la percepción del ritmo *per se*, ya que la actividad de SMA derecha mostró correlación negativa con la claridad rítmica y, cuando al análisis se le aumentaron los datos de otros cinco músicos (datos no presentados), pudieron observarse regiones somato-motoras y premotoras con actividad significativa en el contraste Arrítmico > Rítmico, en el hemisferio derecho. Sin embargo, aún con este tamaño de muestra, no se observó actividad de SMA en dicho hemisferio al realizar el contraste A>R, dejando en duda el papel de esta región en la planeación del movimiento de la respuesta; tampoco se encontró activación del giro temporal superior posterior derecho, reforzando la hipótesis de la participación de la vía dorsal auditiva izquierda en la percepción rítmica, independientemente de la lateralidad de la respuesta emitida por los sujetos.

Por otro lado, se observó que el número de “errores de percepción” de ambos grupos de estudio fue alto, llegando a casi el 50% en algunos individuos, siendo que en la prueba piloto se mostró un alto grado de aciertos. Esto pudo ser debido a la diferencia del número de valores utilizados en la escala de Likert, ya que en la prueba piloto se establecieron cuatro posibilidades de respuesta (nada rítmico, poco rítmico, moderadamente rítmico y muy rítmico; ver apéndice 1), mientras que dentro del resonador sólo tenían dos opciones (rítmico o arrítmico).

PERSPECTIVAS

Se pueden realizar estudios de Análisis de Patrones Multi-Variados (MVPA, Haxby, *et al.*, 2001) para dilucidar diferencias entre grupos (músicos y no músicos) y categorías (rítmicos y arrítmicos); esto último puede ayudar a la predicción del tipo de sonido que se está escuchando, o al menos a cómo lo percibe el sujeto, sin necesidad de que emita una respuesta.

También se puede hacer el mismo análisis de la activación cerebral, pero dividiendo las categorías de estímulos dependiendo de la percepción de los sujetos, más que de los valores asignados por el MIRToolbox.

Por otro lado, se puede estudiar el efecto de otro tipo de modificaciones tanto temporales como espectrales, por ejemplo: modificar la duración y/o intensidad de las notas, modificar la métrica sin cambiar el ritmo, cambiar la frecuencia (nota) sin modificar la temporalidad (ritmo), etc.; esto con la finalidad de reconocer los parámetros que, aparte del ritmo, ayudan a la categorización de la música en el *planum polare*. A su vez, saber cuáles de estas modificaciones en conjunto son suficientes para la modulación de la señal BOLD de manera significativa dentro de esta estructura y el resto del cerebro.

Además pueden medirse los tiempos de reacción (TR) en la percepción rítmica y observar si hay alguna correlación entre ésta y el grado de ritmicidad. Estos TR también pueden compararse entre músicos y no músicos, así como medir el grado de dificultad en la categorización rítmica utilizando sonidos simples (monotónicos) y complejos (musicales), ya que, si bien se encontró que el ritmo es percibido por igual en todas las personas, los TR pueden variar significativamente dependiendo del entrenamiento musical y del tipo de estímulos utilizados.

Valdría la pena realizar un estudio en donde se pruebe si el *planum polare* está involucrado en los procesamientos de “descubrimiento” del ritmo, en la continuación del mismo, o en ambos, con un experimento similar al de Grahn & Rowe (2013), donde se compare la actividad de esta estructura cuando se oyen estímulos rítmicos o arrítmicos después de uno previamente rítmico, pero utilizando sonidos musicales en vez de secuencias monotónicas, pues se sabe que el GTSa es más sensible a procesos complejos (Woods, 2009). Los resultados presentados hasta ahora sugieren que está involucrado en el “descubrimiento” del ritmo, pues su señal BOLD al escuchar cada tipo de estímulo correlacionó negativamente con la respuesta (percepción) de los sujetos.

A su vez pueden hacerse mediciones en humanos de las ondas gama y beta en las regiones de la vía dorsal auditiva y el *planum polare*, utilizando los mismos estímulos de este estudio, tanto de manera pasiva como con “tapping” y comparar los resultados con lo reportado por Fujioka, *et al.* (2012), Bartolo, *et al.* (2014) y Bartolo & Merchant (2015).

Hasta ahora se ha visto que el ritmo se percibe en pocos segundos, ya sea con tonos monotónicos o armónicos, pero no se ha demostrado el tiempo mínimo requerido para la percepción de éste al escuchar sonidos musicales novedosos, y si sólo depende de características temporales o también de las espectrales, así como la influencia cultural, familiaridad y el estado individual.

Otra opción es hacer pruebas específicas en músicos con diferentes tipos de experticia musical (voz, guitarra, batería, etc.) para ver si ésta modula diferencialmente la vía dorsal auditiva o el *planum polare*; o al contrario, si diferentes tipos de música modulan en distintos grados estas estructuras, independientemente del nivel de entrenamiento.

Finalmente, es importante estudiar si el placer o familiaridad que generen las melodías influencia la percepción rítmica. O si el hecho de presentar estímulos similares provoca adaptación a lo largo del paradigma, afectando también las respuestas emitidas por los sujetos.

LITERATURA CITADA

- Abrams, D.A., Bhatara, A., Ryali, S., Balaban, E., Levitin, D.J., Menon, V. (2011). Decoding temporal structure in music and speech relies on shared brain resources but elicits different fine-scale spatial patterns. *Cerebral Cortex* 21, 1507–1518. doi:10.1093/cercor/bhq198
- Alluri, V., Toiviainen, P., Jääskeläinen, I.P., Glerean, E., Sams, M. and Brattico, E. (2012). Large-scale brain networks emerge from dynamic processing of musical timbre, key and rhythm. *Neuroimage* 59(4), 3677-89. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.11.019
- Anderson, B. *et al.* (1999). Anatomic asymmetries of the posterior superior temporal lobes: a postmortem study. *Neuropsychiatr. Neuropsychol. Behavioral Neurology* 12, 247–254.
- Angulo-Perkins, A., Aubé, W., Peretz, I., Barrios, F. A., Concha, L. (2014). Music listening engages specific cortical regions within the temporal lobes: Differences between musicians and non-musicians. *Cortex*.
- Angulo-Perkins, A. and Concha, L. (2014). Music perception: information flow within the human auditory cortices (pp 293-303). En: Merchant, H. and de Lafuente (eds.). *Neurobiology of interval timing, advances in experimental medicine and biology* 829. Springer: New York. doi: 10.1007/978-1-4939-1782-2_15
- Armony, J.L., Aubé, W., Angulo-Perkins, A., Peretz, I. and Concha, L. (s.f.). The specificity of neural responses to music and their relation to voice processing: an fMRI adaptation study. *Neurosci Letters*.
- Armony, J.L., Trejo-Martínez, D. and Hernández, D. (2012). Resonancia magnética funcional (RMf): principios y aplicaciones en neuropsicología y neurociencias cognitivas. *Revista Neuropsicología Latinoamericana* 4 (2), 36-50.
- Aubé, W., Angulo-Perkins, A., Peretz, I., Concha, L. and Armony, J.L. (2015). Fear across the senses: brain responses to music, vocalizations and facial expressions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience* 10(3), 399-407. doi: 10.1093/scan/nsu067
- Bartolo, R. and Merchant, H. (2015). β oscillations are linked to the initiation of sensory-cued movement sequences and the internal guidance of regular tapping in the monkey. *The Journal of Neuroscience* 35 (11), 4635– 4640. doi:10.1523/JNEUROSCI.4570-14.2015
- Bartolo, R., Prado, L. and Merchant, H. (2014). Information processing in the primate basal ganglia during sensory-guided and internally driven rhythmic tapping. *The Journal of Neuroscience* 34 (11), 3910 –3923. doi:10.1523/JNEUROSCI.2679-13.2014
- Belin, P., Zatorre, R.J., Ahad, P. (2002). Human temporal-lobe response to vocal sounds. *Brain Research. Cognitive brain research* 13, 17–26.
- Bendor, D. and Wang, X. (2008). Neural response properties of primary, rostral, and rostrottemporal core fields in the auditory cortex of marmoset monkeys. *Journal of Neurophysiology* 2, 888-906 doi: 10.1152/jn.00884.2007.
- Bever, T. G. and Chiarello R. J. (1974). Cerebral dominance in musicians and nonmusicians. *Science*, 185-537.
- Bizley, J. K. and Cohen, Y. E. (2013). The what, where and how of auditory-object perception. *Nature Reviews Neuroscience*, 14(10), 693–707. doi:10.1038/nrn3565.
- BrainVoyager QX User's Guide (2014). < <http://www.brainvoyager.com/bvqx/doc/UsersGuide/BrainVoyagerQXUsersGuide.html>>
- Brown, D. (1991). *Human Universals*: McGraw-Hill.
- Caicedo, M.O.H. and Aldana, R.C.A. (2010). Resonancia magnética funcional: evolución y avances en clínica. *Tecnura* 25, 91-106.
- Cansino, S. (1999). *El sistema auditivo y su organización tonotópica*.
- Catani, M., Jones, D.K., and ffytche, D.H. (2005). Perisylvian language networks of the human brain. *Annals of Neurology* 57, 8-16. doi: 10.1002/ana.20319

- Chen, J.L., Penhune, V.B. And Zatorre, R.J. (2008) Moving on time: brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and musical training. *Journal of Cognitive Neuroscience* 20, 226–239. doi:10.1162/jocn.2008.20018
- Chevillet, M., Riesenhuber, M. and Rauschecker1, J.P. (2011). Functional correlates of the anterolateral processing hierarchy in human auditory cortex. *Journal of Neuroscience* 31(25), 9345–9352. doi:10.1523/JNEUROSCI.1448-11.2011
- Collavita, F.B., Szeligo, F.V. and Zimmer, S.D. (1974). Temporal discrimination in cats with insular–temporal lesions. *Brain Research* 79, 153– 156.
- Collin, G., Sporns, O., Mandl, R.C.W. and van den Heuvel, M.P. (2013). Structural and functional aspects relating to cost an benefit of rich club organization in the human cerebral cortex. *Cerebral Cortex* 24, 2258 – 2267. doi:10.1093/cercor/bht064
- Coull, J.T. and Nobre, A.C. 2008. Dissociating explicit timing from temporal expectation with fMRI. *Current Opinion in Neurobiology* 18, 137-144. doi:10.1016/j.conb.2008.07.011
- Cusack, R., Deeks, J., Aikman, G. and Carlyon, R.P. (2004). Effects of location, frequency region, and time course of selective attention on auditory scene analysis. *Journal of Experimental Psychology: Hum Perception and Performance* 30 (4), 643–656. doi: 10.1037/0096-1523.30.4.643
- Da Costa, S., VAN DER Zwaag, W., Marques, J.P. Frackowiak, R.S.J. Clarke, S., and Saenz, M. (2011). Human primary auditory cortex follows the shape of Heschl’s gyrus. *Journal of Neurosciences* 31 (49), 14067-14075.
- Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial. Principios éticos para las investigaciones médicas en seres humanos. (Finlandia, 1964-Corea, 2008). 03.2009. [PDF en línea], 03.09. <http://www.wma.net/es/30publications/10policies/b3/17c_es.pdf>
- Delgado-García, J.M. (2001). Estructura y función del cerebelo. Sánchez-Andrés, J.V. (Ed.). *Revisiones en Neurociencia* 33, 635-642.
- Deutsch, D., Henthorn, T. and Lapidis, R. (2011). Illusory transformation from speech to song. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 129, 2245 – 2252. doi:10.1121/1.3562174
- Díaz, J.L. (2005). La identidad del dolor: ¿lesión, congoja, lamento o neuromatriz? *Salud Menta* 28 (2), 13-32.
- Drake, C. and Ben El Heni, J. (2003). Synchronizing with Music: Intercultural Differences. *Annals of the New York Academy of Sciences* 999, 429-37. doi: 10.1196/annals.1284.053
- Efron, R. (1963). Temporal perception, aphasia and déjà vu. *Brain* 86, 403–423.
- Fadiga, L., Craighero, L. and D’Ausilio. (2009). Broca’s área in language , action and music. *The Neurosciences and Music III—Disorders and Plasticity: Annals of de New York Academy of Sciences* 1169, 448-458. doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.04582.x
- Fedorenko, E., McDermott, J.H., Norman-Haignere, S. and Kanwisher, N. (2012) Sensitivity to musical structure in the human brain. *Journal of Neurophysiology* 108, 3289–3300. doi:10.1152/jn.00209.2012
- Flores-Gutiérrez, E.O., Díaz, J.L., Barrios, F.A., Favila-Humara, R., Guevara, M.A., del Río-Portilla, Y. and Corsi-Cabrera, M. (2007). Metabolic and electric brain patterns during pleasant and unpleasant emotions induced by music masterpieces. *International Journal of Psychophysiology* 65, 69-84. doi:10.1016/j.ijpsycho.2007.03.004
- Fraisse, P. (1974). *Psychologie du rythme*, Presses Universitaires de France.
- Fox, M.D., Corbetta, M., Snyder, A.Z., Vincent, J.L and Raichle, M.E. (2006). Spontaneous neuronal activity distinguishes human dorsal and ventral attention systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103 (26), 10046-10051. doi: 10.1073/pnas.0604187103
- Foxton, J.M, Nandy, R.K. and Griffiths, T.D. (2006). Rhythm deficits in 'tone deafness'. *Brain and Cognition* 62(1), 24-9. doi:10.1016/j.bandc.2006.03.005
- Fujioka, T., Trainor, .L.J., Large, E.W. and Ross, B. (2009). Beta and gamma rhythms in human auditory cortex during musical beat processing. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1169, 89–92. doi:10.1111/j.1749-6632.2009.04779.x

- Fujioka, T., Trainor, L.J., Large, E.W. and Ross, B. (2012). Internalized timing of isochronous sounds is represented in neuromagnetic beta oscillations. *The Journal of Neuroscience* 32, 1791–1802. doi:10.1523/JNEUROSCI.4107-11.2012
- Grefkes, C. & Fink, G.R. (2005). The functional organization of the intraparietal sulcus in humans and monkeys. *Journal of Anatomy* 207, 3-17.
- Griffiths, T.D., Johnsrude, I., Dean, J.L. and Green, G.G. (1999). A common neural substrate for the analysis of pitch and duration pattern in segmented sound?. *NeuroReport* 10 (18), 3825-3830.
- Griffiths, T.D., Rees, A., Witton, P.M., Cross, P.M., Shakir, R.A. and Green, G.G.R. (1997). Spatial and temporal auditory processing deficits following right hemisphere infarction. A psychophysical study, *Brain* 120 (1997) 785–794.
- Habib, M., Daquin, G., Milandre, L., Royere, M.L., Rey, M., Lanteri, A., Salamon, G. and Khalil, R. (1995). Mutism and auditory agnosia due to bilateral insular damage-role of the insula in human communication, *Neuropsychologia* 3 327–339.
- Hall, D.A., Johnsrude, I.S., Haggard, M.P., Palmer, A.R., Akeroyd, M.A. and Summerfield A.Q. (2002). Spectral and temporal processing in human auditory cortex. *Cerebral Cortex* 12 (2), 140-149.
- Haxby, J.V., Gobbini, M.I., Furey, M.L., Ishai, A., Schouten, J.L. and Pietrini, P. (2001). Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. *Science* 293, 2425-2430. doi: 10.1126/science.1063736, cited by: 1531
- Herdener, M., Humbel, T., Esposito, F., Habermeyer, B., Cattapan-Ludewig, K. and Seifritz, E. (2014). Jazz drummers recruit language-specific areas for the processing of rhythmic structure. *Cerebral Cortex* 24, 836-843. doi: 10.1093/cercor/bhs37
- Honing, H. and Merchant, H. (2014). Differences in auditory timing between human and non-human primates. *Behavioral and Brain Sciences* 37, 373–374.
- Hornak, J.P. (1996). The basics of MRI. [libro en línea] <<http://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/inside.htm>>
- Hsieh, L., Gandour, J., Wong, D. and Hutchins, G.D. (2002). Functional heterogeneity of inferior frontal gyrus is shaped by linguistic experience. *Brain and Language* 76 (3), 227-252.
- Huettel, S.A., Song, A.W. and McCarthy, G. (2009). *Functional Magnetic Resonance Imaging* (2nd ed.). Sunderland, Massachusetts, USA: Sinauer Associates, Inc. Publishers.
- Humphries, C., Liebenthal, E., and Binder, J.R. (2010). Tonotopic organization of human auditory cortex. *Neuroimage* 50, 1202–1211.
- Husain, M. and Nachev, P. (2007). Space and the parietal cortex. *Trends in Cognitive Sciences (Regul Ed.)* 11, 30-36.
- Hutsler, J. and Gazzaniga, M. (1996). Acetylcholinesterase staining in human auditory and language cortices: regional variation of structural features. *Cerebral Cortex* 6, 260–270.
- Hyde, K.L. and Peretz, I. (2003). "Out-of-pitch" but still "in-time". An auditory psychophysical study in congenital amusic adults. *Annals of the New York Academy of Sciences* 999,173-6. doi: 10.1196/annals.1284.023
- Iverson, P. and Krumhans C.L. (1993). Isolating the dynamic attributes of musical timbre. *The Journal of the Acoustical Society of America* 94 (5), 2595-2603.
- Iversen, J.R., Repp, B.H. and Patel, A.D. (2009). Top-down control of rhythm perception modulates early auditory responses. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1169, 58–73. doi:10.1111/j.1749-6632.2009.04579.x
- Jones, M.R. (2004). Attention and timing. In: Neuoff, J.G. (editor). *Ecological psychoacoustics* (pp. 49-85). Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- Jones, M.R., Moynihan, H., MacKenzie, N. and Puente, J. (2002). Temporal aspects of stimulus-driven attending in dynamic arrays. *Psychological Science* 13, 313--319.
- Jones, M.R. and Pfordresher, P.Q. (1997). Tracking musical patterns using joint accent structure. *Canadian Journal of Experimental Psychology* 51, 271--290.

- Kaas, J. H. (2011). The evolution of auditory cortex: The core areas. Winer, J. A. and Schreiner, C. E. (Eds.). *The auditory cortex*. (pp. 407-428). California: Springer
- Kaas, J.H. and Hackett, T.A. (2000). Subdivisions of auditory cortex and processing streams in primates. *Colloquium 22*, 11793–11799.
- Kanwisher, N., McDermott, J. and Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of Neuroscience*. 17, 4302-4311.
- Koelsch, S., Gunter, T.C., V Cramon, D.Y., Zysset, S., Lohmann, G., and Friederici, A.D. (2002). Bach speaks: a cortical “language-network” serves the processing of music. *Neuroimage 17*, 956–966. doi:10.1006/nimg.2002.1154
- Lai, G., Pantazatos, S.P., Schneider, H., and Hirsch, J. (2012). Neural systems for speech and song in autism. *Brain 135*, 961–975. doi: 10.1093/brain/awr335
- Large, E.W. and Jones, M.R. (1999). The dynamics of attending: how people track time-varying events. *Psychological Review 106*, 119-159. doi:10.1037/0033-295X.106.1.119
- Lartillot, O and Toivainen, P. (2007). A Toolbox for Musical Feature Extraction From Audio. In *Proceedings of 8th International Conference on Music Information Retrieval*.
- Leaver, A., van Lare, J. E., Zielinski, B. A., Halpern, A. and Rauschecker, J. P. (2009). Brain activation during anticipation of sound sequences. *Journal of Neurosciences 29*, 2477–2485. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4921-08.2009
- Leaver, A.M. and Rauschecker, J.P. (2010). Cortical representation of natural complex sounds: effects of acoustic features and auditory object category. *Journal of Neuroscience 30*, 7604– 7612. doi:10.1523/jneurosci. 0296-10.2010
- Liégeois-Chauvel, de Graaf, J.B., Laguitton, V., and Chauvel, P. (1999). Specialization on left auditory cortex for speech perception in man depends on temporal coding. *Cerebral Cortex 9*, 484-496.
- Llinas, R. and Sasaki, K. (1989) The functional organization of the olivo-cerebellar system as examined by multiple Purkinje cell recordings. *European Journal of Neuroscience 1*:587–602. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0038-06.2006
- López, C.E. (2013). *Correlación entre el grosor cortical y las habilidades musicales en adultos*. (Tesis de maestría). Instituto de Neurobiología de la Universidad Nacional Autónoma de Puebla. Querétaro.
- Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T. and Friederici, A. (2001). Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. *Nature Neuroscience 4*, 540 – 545. doi:10.1038/87502
- Margulis, E. (2013). Repetition and emotive communication in music versus speech. *Frontiers in Psychology 4*, 167. doi:10.3389/fpsyg.2013. 00167
- Mendoza G. and Merchant, H. (2014). Motor system evolution and the emergence of high cognitive functions. *Progress in Neurobiology 122*, 73-93.
- Merchant1, H., Grahn, J., Trainor, L., Rohrmeier, M. and Fitch, W.T. Finding the beat: a neural perspective across humans and non-human primates. *Philosophical Transactions, Royal Society B 370*. doi: 10.1098/rstb.2014.0093
- Merchant, H. and Honing, H. (2014). Are non-human primates capable of rhythmic entrainment? Evidence for the gradual audiomotor evolution hypothesis. *Frontiers in Neuroscience 7*, 274. doi:10.3389/fnins.2013.00274
- Merrill J, Sammler D, Bangert M, Goldhahn D, Lohmann G, Turner R, Friederici AD. (2012). Perception of words and pitch patterns in song and speech. *Frontiers of Psychology 3*, 76. doi:10.3389/fpsyg.2012.00076
- Middleton, F.A., Strick, P.L. (1994). Anatomical evidence for cerebellar and basal ganglia involvement in higher cognitive function. *Science 266*:458–461.
- Morosan, P. et al. (2001). Human primary auditory cortex: cytoarchitectonic subdivisions and mapping into a spatial reference system. *NeuroImage 13*, 684–701.
- Naqvi, N.H., Rudrauf, D., Damasio, H. and Becharal, A. (2007). Damage to the insula disrupts Addiction to cigarette smoking. *Science 315 (5811)*, 531-534. doi: 10.1126/science.1135926

- Naqvi, N.H. and Bechara A. (2009). The hidden island of addiction: the insula. *Trends in Neurosciences* 32 (1), 56-67. doi:10.1016/j.tins.2008.09.009
- Nelson, A., Schneider, D.M., Takatoh, J. Sakurai, K., Wang, F. and Mooney, R. (2013). A circuit for motor cortical modulation of auditory cortical activity. *The Journal of Neuroscience* 33, 14 342–14 353. doi:10.1523/JNEUROSCI.2275-13.2013
- Nozaradan, S., Peretz, I., Missal, M. and Mouraux, A. (2011) Tagging the neuronal entrainment to beat and meter. *The Journal of Neuroscience* 31, 10234–10240. doi:10.1523/JNEUROSCI.0411-11.2011
- Okada1, K., Rong, F., Venezia, J., Matchin, W., Hsieh, I.W., Saberi, K., Serences, J.T. and Hickok, G. (2010). Hierarchical Organization of human auditory cortex: evidence from acoustic invariance in the response to intelligible speech. *Cerebral Cortex* 20, 2486–2495.
- Pantev, C. and Herholz, S.C. (2011). Plasticity of the human auditory cortex related to musical training. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 35 (10), 2140–2154. doi:10.1016/j.neubiorev.2011.06.010
- Patel, A.D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature Neuroscience* 6, 674–681.
- Patel, A., Peretz, I., Tramo, M., and Labrecque, R. (1998) Processing prosodic and musical patterns: A neuropsychological investigation. *Brain Language* 61, 123–144.
- Patterson, R.D., Uppenkamp, S., Johnsrude, I.S. and Griffiths, T.D. (2002). The processing of temporal pitch and melody information in auditory cortex. *Neuron* 36, 767–776.
- Penhune, V.B. *et al.* (1996). Interhemispheric anatomical differences in human primary auditory cortex: probabilistic mapping and volume measurement from magnetic resonance scans. *Cerebral Cortex* 6, 661–672.
- Peretz, I., Kolinsky, R., Tramo, M., Labrecque, R., Hublet, C., Demeurisse, G. and Belleville, S. (1994) Functional dissociations following bilateral lesions of auditory cortex. *Brain* 117, 1283–1301.
- Peretz, I. (2009). Music, language and modularity framed in action. *Psychologica Belgica* 49, 157– 175.
- Peretz, I., Gosselin, N., Tillmann, B., Cuddy, L.L., Gagnon, B., Trimmer, C.G., Paquette, S. and Bouchard, B. (2008). On-line identification of congenital amusia. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal* 25 (4), 331-343. doi:10.1525/MP.2008.25.4.331
- Peretz, I., Vuvan, D., Lagrois, M.E. and Armony, J.L. (2015). Neural overlap in processing music and speech. *Philosophical Transactions, Royal Society B* 370. doi: 10.1098/rstb.2014.0090.
- Petkov, C.I, Kang, X., Alho, K., Bertrand, O., Yund, E.W., and Woods, D.L. (2004). Attentional modulation of human auditory cortex. *Nature Neuroscience* 6 (7), 658-663.
- Phillips, D.P. and Farmer, M.E. (1990) Acquired word deafness and the temporal grain of sound representation in the primary auditory cortex. *Behavioural Brain Research* 40, 84–90.
- Phillips-Silver, J. & Trainor, L.J. (2005). Feeling the Beat: Movement Influences Infant Rhythm Perception . *Science (BREVIA)* 308 (5727), 1430 . doi: 10.1126/science.1110922
- Picciuto, E. and Caruthers, P. (s.f). The Origins of Creativity.
- Platel, H., Baron, J.C, Wise, R. , Lambert, J., Frackowiak, R.S.J., Lechevalier, B. and. Eustache, F. (1997). The structural components of music perception. A functional anatomical study, *Brain* 120, 229–243.
- Poeppel, D. (s.f). Pure word deafness and the bilateral processing of the speech code. *Cognitive Science*.
- Popescu, M., Otsuka, A. and Ioannides, A.A. (2004). Dynamics of brain activity in motor and frontal cortical areas during music listening: a magnetoencephalographic study. *NeuroImage* 21 (4), 1622–1638. doi:10.1016/j.neuroimage.2003.11.002
- Pressnitzer, D., Sayles, M., Micheyl, C. and Winter, I.M. (2008). Perceptual Organization of sound Begins in the auditory periphery. *Current Biology* 18, 1124–1128. doi: 10.1016/j.cub.2008.06.053
- Purves, D., Augustine, G.J., Fitzpatrick, D., Hall, W.,C., La Mantia, A.S., McNamara, J.O. and Williams, S.M. (2004). *Neuroscience* (3ra. ed.). (pp. 283-314). Sunderland: Sinauer Associates, Inc.

- Rademacher, J. *et al.* (1993) Topographical variation of the human primary cortices: implications for neuroimaging, brain mapping and neurobiology. *Cerebral Cortex* 3, 313–329.
- Rao, S.M., Harrington, D.L., Haaland, K.T., Bobholz, J.A., Cox, R.W. and, Binder, .JR. (1997). Distributed neural systems underlying the timing of movements. *The Journal of Neuroscience*. 17, 5528–5535.
- Rauschecker, J.P. (2012). Ventral and dorsal streams in the evolution of speech and language. *Frontiers in Evolutionary Neuroscience* 4, 1-4. doi: 10.3389/fnevo.2012.00007
- Rizzolatti, G and Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience* 27, 169– 192. doi:10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230)
- Robin, D.A., Tranel, D., and Damasio, H. (1990). Auditory perception of temporal and spectral events in patients with focal left and right cerebral lesions. *Brain Lang* 39 (4), 539-555.
- Roederer, J.G. (2009). *Acustica y psicoacústica de la música*. Buenos Aires: Melos.
- Rogalsky, C., Rong, F., Saber, i K. and Hickok, G. (2011). Functional anatomy of language and music perception: temporal and structural factors investigated using functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience* 31, 3843–3852.
- Roselló, J. y Sánchez-Cabaco, A. (coords.). (2014). Atención y percepción. Selección para la percepción, selección para la acción (pp.125-127). Psicología y Educación Alianza Editorial: Madrid. [Libro en línea] <https://books.google.com.mx/books?id=cEKUBQAAQBAJ&pg=PA126&lpg=PA126&dq=v%C3%ADa+dorsal+de+atenci%C3%B3n&source=bl&ots=ZP3VXV33c9&sig=8Vv-YxH8Iddwnn5qJfyM89vy1U&hl=es-419&sa=X&ei=Gsv0VOThGaS_sQSG5oGYBw&ved=0CC0Q6AEwAg#v=onepage&q=v%C3%ADa%20dorsal%20de%20atenci%C3%B3n&f=false>
- Sammler, D., Koelsch, S., Ball, T., Bandt, A., Grigutch, M., Huppertz, H.J., Knösche, T.R., Wellmer, J., Wikdman, G., Elger, C.E., Friederici, A.D. and Schulze-Bonhage, A. (2013). Co-localizing linguistic and musical syntax with intracranial EEG. *NeuroImage* 64, 134-146.
- Samson, S., Ehrlé, N., and Baulac, M. (2001). Cerebral substrates for musical temporal processes. *Ann NY aCAD. Sci*, 166-178.
- Samson, S. and Zatorre, R.J. (1994) Contribution of the right temporal lobe to musical timbre discrimination. *Neuropsychologia*.
- Schönwiesner, M and Zatorre, R.J. (2008). Depth electrode recordings show double dissociation between pitch processing in lateral Heschl’s gyrus and sound onset processing in medial Heschl’s gyrus. *Experimental Brain Research* 187, 97 – 105. doi:10.1007/s00221-008- 1286-z
- Schubotz, R.I, Friederici, A.D. and von Cramon, D.Y. (2000). Time perception and motor timing: a common cortical and subcortical basis revealed by fMRI. *Neuroimage* 11, 1-12. doi:10.1006/nimg.1999.0514
- Schubotz, R.I. and von Cramon, D.Y. (2003). Functional-anatomical concepts of human premotor cortex: evidence from fMRI and PET studies. *Neuroimage* 20 (Suppl 1), S120-S131.
- Seldon, H. (1981). Structure of human auditory cortex: II. Axon distributions and morphological correlates of speech perception. *Brain Research* 229, 295–310.
- Seldon, H. (1982). Structure of human auditory cortex: III. Statistical analysis of dendritic trees. *Brain Research* 249, 211–221.
- Selezneva, E., Deike, S., Knyazeva, S., Scheich, H., Brechmann, A. and Brosch, M. (2013). Rhythm sensitivity in macaque monkeys. *Frontiers in Systems Neuroscience* 7, 49. doi:10.3389/fnsys.2013.00049
- Shannon, R.V., Zeng, F.G., Kamath, V., Wygonski, J. and Ekelid, M. (1995) Speech recognition with primarily temporal cues. *Science* 5234, 303–304.
- Smith, S. M. (2002). Fast robust automated brain extraction. *Human Brain Mapping*, 17(3), 143-155.
- Stewart, L., von Kriegstein, K., Warren J.K. and Griffiths, T.D. (2006). Music and the brain: disorders of musical listening. *Brain* 129, 2533-2553.
- Swisher, L. and Hirsh, I.J. (1972). Brain damage and the ordering of two temporally successive stimuli. *Neuropsychologia* 10, 137–152.

- Tallal, P., Miller, S., and Fitch, R.H. (1993). Neurobiological basis of speech: A case for the preeminence of temporal processing. *Annals of the New York Academy of Sciences* 682, 27–47.
- Temperley, D. and Bartlette, C. (2002). Anatomy of a performance: sources of musical expression. *Music Perception* 20, 117–149.
- Tierney, A., Dick, F., Deutsch, D. and Sereno, M. (2013). Speech versus song: multiple pitch-sensitive areas revealed by a naturally occurring musical illusion. *Cerebral Cortex* 23, 249–254.
- Trehub, S., Schellenberg, G., and Hill, D. (2000). The origins of music: Perception and cognition: A developmental perspective. In Wallin, N. L., Merker, B., and Brown, S. (Eds.) *The Origins of Music*. MIT Press, Cambridge, MA.
- van den Heuvel, M.P. and Sporns, O. (2013). Network hubs in the human brain. *Trends in Cognitive Sciences* 17, 683– 696. doi:10.1016/j.tics.2013.09.012
- Vieillard, S., Peretz, I., Gosselin, N., Khalfa, S., Gagnon, L. and Bouchard, B. (2008). Happy, sad, scary and peaceful musical excerpts for research on emotions. *Cognition & Emotion* 22, 720. doi: 10.1080/02699930701503567
- von Economo, C. and Horn, L. (1930) Über Windungsrelief, Maße und Rindenarchitektonik der Supratemporalfläche, ihre individuellen und ihre Seitenunterschiede. *Z. Neurol. Psychiat.* 130, 678–757.
- Vuust P., Gebauer, L. K., and Witek M. A. G. (2014). Neural underpinnings of music: the polyrhythmic brain (pp 339-356). En: Merchant, H. and de Lafuente (eds.). *Neurobiology of interval timing, advances in experimental medicine and biology* 829. DOI 10.1007/978-1-4939-1782-2_15, Springer: New York.
- Warren, R. M., Gardner, D. A., Brubaker, B. S., and Bashford, J. A. (1991). Melodic and nonmelodic sequences of tones: effects of duration on perception. *Music Percept.* 8, 277–289
- Wessinger, C.M, VanMeter, J., Tian, B., Van Lare, J., Pekar, J. and Rauschecker, J.P. (2001). Hierarchical organization of the human auditory cortex revealed by functional magnetic resonance imaging. *Journal of Cognitive Neuroscience* 13 (1), 1-7.
- Westbury, C, Zatorre, R. and Evans, A. (1999). Quantifying variability in the planum temporale: a probability map. *Cerebral Cortex* 9, 392– 405. doi:10.1093/ cercor/9.4.392
- Woods, D.L, Stecker, G.C, Rinne, T, Herron, T.J, Cate, A.D, Yund, E.W, Liao, I., and Kang, X. (2009). Functional maps of human auditory cortex: effects of acoustic features and attention. *PLOS ONE* 4, e5183,. doi:10.1371/journal.pone.0005183
- Xu, D, Liu, T, Ashe, J. and Bushara, K. (2006). Roll of the olivo-cerebellar system in timing. *Journal of Neuroscience* 26 (22), 5990-5995.
- Zatorre, R. J. and Belin, P. (2001). Spectral and temporal processing in human auditory cortex. *Cerebral Cortex* 11, 946-953.
- Zatorre, R.J, Belin, P., and Penhune, V.B. (2002). Structure and function of auditory cortex: music and speech. *Trends in Cognitive Sciences* 6, 37–46.
- Zatorre, R.J., Chen, J.L. and Penhune V.B. (2007). When the brain plays music. Auditory-motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews Neuroscience.* 8, 547–558. doi:10.1038/nrn2152

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Similitudes y diferencias entre música y lenguaje

Tabla 2: *Clusters*, Rítmico>Arrítmico

Tabla 3: Correlación positiva con la claridad rítmica

Tabla 4: Correlación negativa con la claridad rítmica

Tabla 5: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción

Tabla 6: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción de sonidos arrítmicos

Tabla 7: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción por parte de los músicos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: “Proceso de relajación longitudinal o T1

Figura 2: “Proceso de relajación transversal o T2

Figura 3: Respuesta hemodinámica

Figura 4: Modelo Lineal General

Figura 5: Áreas de Brodmann

Figura 6: Límites del lóbulo temporal

Figura 7: Cóclea

Figura 8: Vías auditivas principales

Figura 9: Giro de Heschl

Figura 10: Diferencias inter-hemisféricas

Figura 11: División de la corteza auditiva

Figura 12: Diferenciación funcional inter-hemisférica

Figura 13: Activación diferencial entre estímulos musicales y vocalizaciones humanas

Figura 14: Violín vs lenguaje

Figura 15: Vías ventral y dorsal

Figura 16: Modificación de la claridad rítmica

Figura 17: Diseño experimental por eventos

Figura 18: Movimiento neto de la cabeza de uno de los sujetos piloto

Figura 19: Prueba piloto; percepción del ritmo por parte de los músicos

Figura 20: Prueba piloto; percepción del ritmo por parte de los no-músicos

Figura 21: Prueba piloto; similitud entre músicos y no-músicos

Figura 22: Correlación entre percepción de no-músicos y MIRToolbox.

Figura 23: Correlación entre percepción de no-músicos y MIRToolbox.

Figura 24: Prueba del diseño experimental

Figura 25: Máscara binarizada

Figura 26: Mapa de activación cortical durante la percepción de estímulos rítmicos>arrítmicos

Figura 27: Mapa de activación cerebelar durante la percepción de estímulos rítmicos>arrítmicos

Figura 28: Mapa de activación de las regiones que presentan una correlación positiva entre la señal BOLD y la claridad rítmica

Figura 29: Similitudes entre el contraste Rítmico>Arrítmico y la Correlación Positiva

Figura 30: Mapa de activación de las regiones que presentan una correlación negativa entre la señal BOLD y el la claridad rítmica

Figura 31: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción

Figura 32: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción de sonidos arrítmicos

Figura 33: Áreas relacionadas con el número de errores en la percepción por parte de los músicos

Figura 34: Porcentaje de cambio de señal BOLD

Figura 35: Correlación entre la diferencia del porcentaje de cambio de señal BOLD al escuchar sonidos rítmicos y arrítmicos, y los errores de percepción, en el *planum polare* derecho

Figura 36: Correlación entre el porcentaje de cambio de señal BOLD al escuchar sonidos rítmicos (R) o arrítmicos (A), y el grado de musicofilia, en el *planum polare* izquierdo del grupo de músicos

Figura 37a: Correlación de la señal BOLD y las covariables medidas, en el *planum temporale* derecho

Figura 37b: Correlación de la señal BOLD y las covariables medidas, en el *planum temporale* derecho, del grupo de no-músicos

Figura 38: Correlación de la señal BOLD y las covariables medidas, en el *planum temporale* izquierdo

APÉNDICES

Apéndice 1: Encuesta piloto

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE NEURBIOLÓGÍA
LABORATORIO DE CONECTIVIDAD CEREBRAL

Datos personales:

Nombre: _____

Teléfono y/o correo electrónico: _____

Sexo: _____ Edad: _____

Formación musical:

1) ¿Ha recibido educación musical además de la impartida obligatoriamente en la secundaria?

NO ____ SI ____

¿Aún lo practica?

NO ____ SI ____

¿Durante cuánto tiempo lo ha practicado? _____

¿Qué tipo de actividad realiza? _____

Instrucciones:

1) Escuche con atención los ejemplos que se le muestren de sonidos rítmicos y arrítmicos.

2) El resto de los sonidos se presentarán dos veces cada uno.

3) Evalúe en una escala del 0 al 3 la ritmicidad de cada uno, siendo:

0 = NADA rítmico

1 = POCO rítmico

2 = MODERADAMENTE rítmico

3 = MUY rítmico.

SONIDO	ESCALA				SONIDO	ESCALA				SONIDO	ESCALA			
	0	1	2	3		0	1	2	3		0	1	2	3
1					26					51				
2					27					52				
3					28					53				
4					29					54				
5					30					55				
6					31					56				
7					32					57				
8					33					58				
9					34					59				
10					35					60				
11					36					61				
12					37					62				
13					38					63				
14					39					64				
15					40					65				
16					41					66				
17					42					67				
18					43					68				
19					44					69				
20					45					70				
21					46					71				
22					47					72				
23					48					73				
24					49					74				
25					50									

Apéndice 2: Cuestionario de musicofilia y experiencia musical

DATOS PERSONALES

Nombre completo: _____

Fecha de nacimiento: ___/___/___ Edad: _____ Peso: _____

Lateralidad manual: diestro zurdo

Número de teléfono: _____

Correo electrónico: _____

Formación académica:

Primaria Secundaria Preparatoria Licenciatura Posgrado Otro(s): _____

Profesión/Ocupación (ahora): _____

CUESTIONARIO GENERAL

1. ¿Qué tipo de música le gusta escuchar (pueden ser varias opciones)?

Clásica Rock Jazz Popular Tradicional Otro(s): _____

2. ¿Con qué frecuencia escucha música voluntariamente (es decir, excluyendo la que oye en el camión, centros comerciales, etc.)?

- Nunca
- 1-2 veces por semana
- 3-5 veces por semana
- 6-7 veces por semana

3. En total, ¿cuántas horas a la semana escucha música? _____

4. ¿Es capaz de detectar cuando un músico tocando en vivo, se equivoca?

- Siempre
- Nunca
- Sólo si conoce bien la pieza que el músico está tocando
- Si se le hace "raro" (fuera de lugar, desafinado, sin ritmo, etc.)
- Ninguna de las anteriores

DEL UNO AL DIEZ EVALÚE LAS SIGUIENTES PREGUNTAS:

5. ¿Qué tanto le gusta escuchar música mientras realiza otras actividades (estudiar, trabajar, etc.)?

Nada 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Mucho

6. ¿Qué tanto le gusta escuchar música de manera exclusiva, es decir, sin realizar otras actividades al mismo tiempo?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Nada Mucho

7. ¿Qué tanto disfruta ir a conciertos?

Nada 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Mucho

8. ¿Qué tanta atención pone a los detalles de las piezas musicales que escucha?

Nada 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Mucho

9. ¿Qué tan bueno es para distinguir entre diferentes intérpretes que tocan la misma pieza musical?

Nada 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Mucho

10. ¿Con qué facilidad puede distinguir los instrumentos que se escuchan en una pieza musical?

Nada 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Mucha

11. ¿Qué tanto influye la música su estado de ánimo?

Nada 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Mucho

12. ¿Qué tan familiares le parecieron los fragmentos de música que escuchó en el experimento

Nada 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Mucho

13. En caso de que su respuesta anterior sea mayor a 5, describa por qué se le hizo familiar:

CUESTIONARIO DE EDUCACIÓN MUSICAL

14. ¿Qué entrenamiento musical ha tenido?

- a) Nada
- b) Cursos en la escuela (obligatorio)
- c) Cursos en la escuela (opcional)
- d) Clases particulares/ con sus padres
- e) Conservatorio
- f) Aprendí por mi cuenta

Si su respuesta es "a" o "b", NO responda a las siguientes preguntas:

15. ¿A qué edad inició sus primeras clases de música?

16. ¿Cuál o cuáles son los instrumentos que sabe tocar?

17. ¿Cuál o cuáles instrumentos toca cotidianamente?

18. ¿Cuántas horas por semana toca ese (o esos) instrumento (s) (contando la escuela, trabajo, casa, recreación, etc.)?

19. En caso de que ya no toque cotidianamente ¿hace cuántos años dejó de hacerlo?

20. Describe otras actividades musicales que realices (compositor, arreglista, solfeo, etc.):

21. Dentro de la siguiente escala, ¿qué nivel cómo ejecutante de música considera que tiene?

Nada 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Mucho

22. ¿Tiene usted habilidades de lectura musical?

- a) nula
- b) limitada
- c) moderada
- d) Ejecución a primera vista

Apéndice 3: Máximas locales, contraste Rítmico>Arritmico

MÁXIMAS LOCALES					REGIONES ANATÓMICAS		
Cluster	Z-MAX	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Juelich Histological Atlas	Harvard-Oxford Cortical Structural Atlas	Cerebellar Atlas in MNI152 space after normalization with FLIRT
5	4.71	-40	-24	58	HI: 40% corteza motora primaria (BA 4a), 30% corteza somatosensorial primaria (BA 1).	34% giro postcentral, 28% giro precentral.	—
5	4.54	-34	-22	66	HI: 78% corteza motora primaria (BA 6), 24% tracto corticoespinal.	40% giro precentral, 15% giro postcentral.	—
5	4.48	-36	-26	48	HI: 47% corteza somatosensorial primaria (BA 3a), 36% corteza motora primaria (BA 4p).	26% giro postcentral, 21% giro precentral.	—
5	4.46	-38	-26	52	HI: 38% corteza somatosensorial primaria (BA 3b), 34% corteza motora primaria (BA 4a).	35% giro postcentral, 22% giro precentral.	—
5	4.31	-50	-30	52	HI: 73% corteza somatosensorial primaria (BA 2), 31% lóbulo parietal inferior.	45% giro postcentral, 13% giro supramarginal en su división anterior, 9% lóbulo parietal superior.	—
5	4.18	-48	-22	52	HI: 54% corteza somatosensorial primaria (BA 1).	49% giro postcentral, 1% giro supramarginal en su división anterior.	—
4	3.88	-50	-24	10	HI: 50% corteza auditiva primaria, 18% corteza somatosensorial secundaria.	47% giro de Heschl (H1 y H2), 18% <i>planum temporale</i>	—
4	3.43	-46	-44	16	HI: 10% lóbulo parietal inferior.	9% <i>planum temporale</i> , 9% giro supramarginal en su división posterior.	—
4	3.4	-42	-12	14	HI: 52% corteza somatosensorial secundaria (opérculo parietal 3), Insula (Ig2).	78% corteza central opercular, 3% corteza insular, 1% corteza parietal opercular.	—
4	3.31	-42	-6	10	HI: 22% corteza somatosensorial secundaria (opérculo parietal 4), 1% GM Insula (Ig2).	49% corteza central opercular, 18% corteza insular.	—
4	3.3	-48	-36	10	HI: 17% corteza somatosensorial secundaria (opérculo parietal 1), 6% corteza auditiva primaria.	30% <i>planum temporale</i> , 4% giro supramarginal en su división posterior.	—
4	3.12	-44	-20	14	HI: 62% corteza somatosensorial secundaria (opérculo parietal 1), 6% corteza auditiva primaria, 19% (Insula Ig2).	59% corteza central opercular, 21% giro de Heschl H1 y H2), 6% corteza parietal opercular.	—
3	3.85	16	-56	-22	—	—	HD: 54% lóbulo V, 46% lóbulo VI.
3	3.81	22	-60	-24	—	—	HD: 85% lóbulo VI, 5% lóbulo V.

3	3.55	12	-52	-18	-	-	HD: 85% lóbulo V, 15% lóbulo I-IV.
3	3.55	6	-66	-24	-	-	HD: 51% Vermis VI, 29% lóbulo VI, 15% lóbulo V.
3	3.37	30	-52	-30	-	-	HD: 85% lóbulo VI.
3	3.21	24	-68	-22	-	-	HD: 95% lóbulo VI.
2	3.35	56	-14	0	HD: 4% corteza auditiva primaria.	9% <i>planum temporale</i> , 6% giro temporal superior.	-
2	3.33	64	-12	0	-	HD: 30% giro temporal superior en su división posterior, 10% giro temporal superior en su división anterior 8% <i>planum temporale</i> , 2% giro temporal medio en su división posterior, 1% giro de Heschl (H1 y H2).	-
2	3.31	66	-28	8	HD: 20% lóbulo parietal inferior.	50% giro temporal superior en su división posterior 5% <i>planum temporale</i> .	-
2	3.21	62	-22	8	HD: 1% corteza auditiva primaria.	40% <i>Planum temporale</i> , 8% giro temporal superior en su división posterior, 2% corteza parietal opercular, 1% giro de Heschl (H1 y H2).	-
2	3.2	58	-30	10	HD: 3% lóbulo parietal inferior.	18% giro temporal superior en su división posterior, 17% <i>planum temporale</i> .	-
2	2.88	52	-6	-8	HD: 48% corteza somatosensorial secundaria (opérculo parietal 4), 21% corteza auditiva primaria.	72% corteza central opercular, 9% <i>planum polare</i> , 3% giro de Heschl (H1 y H2), 1% giro postcentral.	-
1	3.86	-4	-8	60	HI: 91% corteza premotora (BA6).	70% corteza suplementaria motora, 4% giro precentral.	-
1	3.58	-6	-4	54	HI: 70% corteza premotora (BA6)	67% corteza motora suplementaria, 2% giro cingulado en su división anterior.	-
1	3.42	-6	-2	48	HI: 59% corteza premotora (BA6)	44% corteza suplementaria motora, 28% giro cingulado en su división anterior.	-
1	3.21	-4	-12	70	HI: 86% corteza premotora (BA6), 5% corteza motora primaria (BA4a).	38% corteza motora suplementaria, 21% giro precentral, 2% giro frontal superior.	-
1	3.07	-10	-8	46	HI: 18% corteza premotora (BA6).	40% corteza motora suplementaria, 17% giro cingulado en su división anterior, 1% giro precentral.	-