



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Música

Facultad de Música

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico

Instituto de Investigaciones Antropológicas

EFFECTOS DE UN ENTRENAMIENTO MUSICAL SOBRE LOS TRACTOS Y NÚCLEOS
CEREBRALES DE NIÑOS CIEGOS Y NORMO-VISUALES: UN ESTUDIO LONGITUDINAL

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

DOCTORA EN MÚSICA (Cognición Musical)

PRESENTA

M. en M. Coral Itálú Guerrero Arenas

TUTOR PRINCIPAL

†Dr. Eduardo Castro-Sierra, Facultad De Música, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Dra. Mercedes Luque Coqui, Hospital Infantil De México Federico Gómez

Dra. Silvia Hidalgo Tobón, Hospital Infantil De México Federico Gómez, UAM-I

CD. MX. SEPTIEMBRE, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

DEL DOLOR

Había sido escrito en el primer testamento del hombre:
no lo desprecies porque ha de enseñarte muchas cosas.

Hospédalo en tu corazón esta noche.
Al amanecer ha de irse. Pero no olvidarás
lo que te dijo desde la dura sombra.

JAIME SABINES

Con mi eterna gratitud

In Memoriam

Dr. Eduardo Castro-Sierra

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	10
1.1 DISCAPACIDAD VISUAL	10
1.2 RESONANCIA MAGNÉTICA FUNCIONAL E IMÁGENES POR TENSOR DE DIFUSIÓN	11
1.2.1 IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA (MRI).....	12
1.2.2 IMAGEN POR TENSOR DE DIFUSIÓN (DTI).....	13
1.2.3 RESONANCIA MAGNÉTICA FUNCIONAL (fMRI).....	15
CAPÍTULO 2	18
2.1 ENTRENAMIENTO MUSICAL.....	18
2.2 EDAD CRÍTICA EN EL ENTRENAMIENTO MUSICAL.....	29
2.3 SUBSTANCIA BLANCA: EL PROCESO DE MIELINIZACIÓN Y SU RELACIÓN EN EL APRENDIZAJE.....	36
2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS TRACTOS DE LA SUBSTANCIA BLANCA.....	41
2.4 SUBSTANCIA BLANCA Y CEGUERA.....	42
2.5 MÚSICA Y SUBSTANCIA BLANCA.....	51
CAPÍTULO 3	58
3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	58
3.2 JUSTIFICACIÓN.....	59
3.3 OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	61
3.4 METODOLOGÍA.....	62
Procesamiento de datos y especificaciones.....	67
3.5 PROCEDIMIENTO.....	69
3.6 RESULTADOS.....	72
3.6.1 RESULTADOS BASALES DE LAS IMÁGENES DE DTI: PRUEBA T PARA MEDIDAS INDEPENDIENTES.....	72
3.6.2 RESULTADOS BASALES DE LAS IMÁGENES DE RESONANCIA MAGNÉTICA FUNCIONAL (fMRI).....	78
3.6.3 ESTUDIOS DE CASO.....	86
3.6.4 RESULTADOS DE LA PRUEBA T PARA MEDIDAS PAREADAS.....	92
.....	95
3.6.5 RESULTADOS DE LA BATERÍA PSICOLÓGICA BATTELE, VERSIÓN SCREENING.....	96
DISCUSIÓN	99
CONCLUSIONES	104
REFERENCIAS	106
TABLA DE ABREVIATURAS	116

AGRADECIMIENTOS

Para llevar a cabo el proyecto de investigación que sustenta esta tesis, hubo varias personas e instituciones involucradas, mi más sincera gratitud a cada una de ellas.

GRACIAS...

A Conacyt, por brindarme la beca para terminar mis estudios en tiempo y forma.

A la UNAM, en especial a la Facultad de Música, por ser mi casa de estudios a lo largo de varios años.

Al Hospital Infantil de México Federico Gómez, por permitirme realizar los estudios correspondientes a esta tesis. Con especial atención al Departamento de Imagenología, al facilitar el equipo y tiempo para obtener las imágenes mostradas en este proyecto.

Al jardín de niños 'Benito Juárez', por permitirnos platicar con las madres de familia para así obtener la muestra de esta investigación.

A CADIVI, por abrirnos las puertas para que sus alumnos participaran en este proyecto, en especial a Alejandra García, pues siempre fue amable y estuvo dispuesta para apoyar el estudio. Gracias Ale.

A cada uno de los honorables miembros del jurado, Dra. Mercedes Luque, Dra. Silvia Hidalgo, Dr. Felipe Orduña, Dr. Rafael Ferrer y Dr. Guillermo Vargas. Gracias por sus observaciones y el tiempo dedicado a leer el escrito. Todas sus recomendaciones siempre fueron tomadas en cuenta.

A mi comité tutorial, Dra. Mercedes Luque y Dra. Silvia Hidalgo, por su guía y apoyo durante el tiempo que duró este doctorado. Aprendí cosas invaluable de cada una de ustedes.

El apoyo de las siguientes personas fue imprescindible para continuar con el trabajo durante todos estos años. Gracias a todas ellas, y a las que, aunque ausentes en el escrito, no lo están en mi mente.

Porfirio Lebañez, Manuel Obregón y Rafael de la Rosa, técnicos radiólogos del HIMFG, quienes me apoyaron en todo momento, y cada vez me recibieron con una sonrisa. Siempre les estaré agradecida.

Jasmín, gracias por tu apoyo siempre.

A las Dras. Patricia Regil y Citlali Lara, por su apoyo y valioso tiempo al inicio del protocolo.

A cada mamá y papá que llevó a sus hijos a todos los pasos que siguió este estudio. Espero que hayan tenido gratas experiencias, que el tiempo que compartieron con sus hijos haya sido inolvidable. Los admiro y los quiero.

A todos los niños del estudio. Siempre aprendí algo de ustedes; anhelo que lo que aprendieron les sirva para su vida, pero, sobre todo, espero que siempre sean felices y que conserven esa luz como ahora. Recuerdo a cada uno con mucho cariño y gratitud. Este tipo de proyectos es en beneficio de ustedes.

Meche, amiga. Siempre presente, con todas las ganas para que esto saliera adelante. Espero que sea el inicio para muchos proyectos juntas. Te admiro y te quiero.

Mirna, gracias por tu apoyo en cada etapa de esta tesis. Desde la parte académica, la cual te agradezco infinitamente, como en lo personal. Gracias por permitirme desahogarme en los momentos de frustración, por reír juntas y por todos los consejos. Es un honor contar con tu amistad.

Dr. Felipe Orduña, su apoyo durante estos últimos meses ha sido algo que no puedo agradecer. Es un ser excepcional, brillante y humano. Gracias siempre.

A mi familia.

Papá y mamá, esto es para ustedes. Son ejemplo para mí, de cosas buenas y no tan buenas, pero siempre aprendiendo. Papá, siempre fuerte ante nosotros, me enseñaste a ser responsable y trabajadora. Mamá, mi confidente y mi apoyo incondicional. Me hacen ser valiente, no me han permitido quebrarme ni un sólo día, los amo.

Tío Lalo, mi segundo papá. Te agradezco por el simple hecho de estar. Te quiero.

Rosa, gracias por tus consejos, por estar al pendiente siempre. Aunque estás lejos, mi amor por ti no cambia. Memo, mi manito, mi mejor consejero, tú sabes...te quiero. Los admiro y los amo.

Sebastián, por ti trato de esforzarme el doble cada día. Con pequeñas acciones, espero colaborar para dejarte un mundo más amable. Te amo.

Pili y Mau, fuentes de inspiración en todo momento, gracias por ser quienes son.

Anandi, contigo empezó todo. Gracias por las oportunidades, y más aún, por tu amistad y cariño.

Gracias a los amigos, por los consejos, un desahogo o sólo para estar juntos: Fer, Cynthia, Vania, Anubi, Lau, Alex. Incondicionales en todos los momentos.

Infinitas gracias a mi compañero de camino. Memo, nos hemos conocido en los momentos más oscuros, los más tristes y los más felices. Gracias por el abrazo en el momento exacto, por superar juntos nuestros miedos, por los litros de café, las pláticas intensas y por los días en que lloramos de risa. Te amo, y espero que sigamos creciendo en todos los sentidos.

Llega el momento que he pospuesto muchas veces. El simple hecho de agradecerle aquí, me hace ser consciente que ya no está.

Le agradezco profundamente el ser mi Maestro (*todavía*), mi guía por los intrincados enigmas del cerebro, de la música, y de tantos temas que quedaron incompletos. Agradezco a la vida y a Vd. el que hubiera aceptado, en primer lugar, ser mi tutor desde la maestría. Gracias por permitirme conocer su mente brillante y extraña, tan elocuente y tan inefable. Me siento verdaderamente honrada de ser presentada como su alumna, y de haber creado un lazo más allá del mundo académico. Gracias por compartir tantas cosas, incluso cuando ya no estaba. No cabe aquí todo lo que quiero decir, pero Vd. lo sabe. No tengo una palabra que pueda expresar mi gratitud por aquello que me enseñó y que siempre me recordaba: creer en lo que hago. Con toda la humildad, espero que sea un trabajo digno para hacerlo sentir orgulloso. Lo extraño siempre... gracias Dr. Castro.

INTRODUCCIÓN

Diferentes estudios han probado que existe un alto grado de plasticidad en el cerebro de los niños que han recibido determinados tipos de entrenamientos, por ejemplo, de alguna disciplina deportiva o un instrumento musical. La investigación que aquí se presenta, se ha orientado en un tipo de entrenamiento musical ofrecido a niños de entre 4 y 5 años de edad, por un periodo de 9 meses. Se hallaron cambios en la longitud del fórceps menor, el cual conecta ambos lóbulos frontales, después de haber recibido este tipo de estimulación. Este tracto de sustancia blanca está relacionado con el control cognitivo, así como con habilidades de fluidez verbal y de relaciones sociales. También se observó que, en la prueba psicológica aplicada a los pacientes, había un aumento en el puntaje de las áreas personal/social y de comunicación, lo cual puede correlacionarse al aumento en la longitud del fórceps menor.

El proyecto fue pensado y diseñado para una población de niños ciegos y su comparación posterior con pacientes normo-visuales. Por razones que se detallarán durante el escrito, la muestra de niños ciegos fue perdiéndose, mientras que el grupo control permaneció casi intacto, por lo cual los resultados más significativos son los que se observaron en este último grupo.

La razón inicial de proyectar un estudio en torno a niños ciegos, es que, de acuerdo con datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), las personas con baja visión o ceguera eran alrededor de 285 millones en el año 2010, de las cuales, 39 millones son ciegas totales. En la actualidad, organismos internacionales, entre ellos la propia OMS, han hecho varios esfuerzos para controlar y prevenir esta discapacidad. Diversos investigadores se han enfocado en este tema y han realizado cuantiosos estudios a nivel cerebral para conocer los aspectos de este padecimiento y la manera en que se manifiesta en sus diferentes niveles: cognitivo, conductual, motor, social e incluso, emocional.

Un acercamiento a esta discapacidad, desde los diversos ángulos de estudio, podría ser de vital importancia en el momento de planear estrategias de rehabilitación, aprendizaje y clínicas, todas ellas encaminadas hacia el beneficio de personas con ceguera y baja visión.

El proyecto que aquí se presenta forma parte del Posgrado en Música, especialidad en Cognición, la cual vincula la investigación científica con el aspecto artístico, en este caso, la música, por lo que, en este escrito, se describen algunos trabajos que han relacionado ambas disciplinas a nivel cerebral. La mayoría de estos estudios se han aplicado en niños regulares¹ o en adultos con algún tipo de experiencia musical. Múltiples investigaciones han corroborado la manera en que un entrenamiento de esta índole afecta la neuroanatomía del cerebro y sus consecuencias a nivel conductual y funcional.

En años recientes, la investigación en este campo se ha dirigido también hacia las diferentes discapacidades. Podemos suponer que, debido a razones que se expondrán posteriormente, como el desconocimiento sobre los beneficios que pueden conllevar ciertos tipos de entrenamiento o la lejanía entre los lugares donde se aplican los estudios, hay poca investigación relacionada con esta área.

Es necesario aclarar que, hasta el momento, y de acuerdo a nuestra revisión exhaustiva de la literatura, hay escasos estudios previos en los que se analice la relación de un entrenamiento musical en niños ciegos con una posterior modificación de sus tractos y núcleos encefálicos; de ahí la importancia de este proyecto en cuanto a su aportación al campo de la cognición musical. También se resalta el hecho de que pocas intervenciones pueden ser aplicadas en niños, como es el caso de la música, sin que tenga un efecto negativo, y que, por el contrario, lo reportado sea para beneficiar procesos cognitivos, conductuales e incluso, emocionales.

¹ En educación especial, se denominan regulares a aquellas personas que no tienen discapacidad.

CAPÍTULO 1

En este capítulo se explicarán de manera breve algunos conceptos referidos a la discapacidad visual, así como las técnicas imagenológicas que se emplearon durante el desarrollo de este estudio. Esto con el fin de ofrecer bases para un mayor entendimiento durante la revisión de la literatura que se presenta posteriormente, y para la mejor comprensión del desarrollo y los resultados de la investigación que sustentan este proyecto.

1.1 DISCAPACIDAD VISUAL

La ceguera y baja visión se clasifican dentro del grupo de las discapacidades sensoriales. En la actualidad se reconoce que una discapacidad no sólo tiene implicaciones médicas, sino que la persona que la padece está restringida también en otros ámbitos, ya sean educativos, laborales o sociales. En la actualidad hay una amplia cultura en pro de la discapacidad, a tal grado que instituciones y organizaciones sociales han promovido de manera satisfactoria la inclusión, la cual incluye esfuerzos desde la propia familia hasta las personas ajenas a los individuos con discapacidad. Uno de ellos es el declarado "Día Mundial de la Discapacidad" celebrado el 3 de diciembre, en un esfuerzo de la Asamblea de las Naciones Unidas para sensibilizar a la sociedad ante esta situación.

De acuerdo con la O.N.C.E (Organización Nacional de Ciegos de España) el 80% de la información nos llega a través del sentido de la vista. De esta manera se puede asumir que los elementos que conforman nuestro entorno son, en su mayoría, visuales. Así, los conocimientos que llevan al desarrollo del aprendizaje, habilidades y hábitos, se integran a través de la vista. Las personas que sufren baja visión o ceguera total tienen, de acuerdo con lo anterior, serias dificultades para incorporar este tipo de información, lo que puede producir alteraciones en su desarrollo psicomotor y cognitivo.

Se estima que hay alrededor de 285 millones de personas en el mundo que padecen discapacidad visual, 39 millones como consecuencia de ceguera y 246 millones por baja

visión. De ellas, 19 millones de personas son menores de 15 años, y 1.4 millones de ellos tienen ceguera irreversible.⁶

Datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) informan que, en el 2005, 467 mil personas padecían discapacidad visual en México.⁷ Para el 2010 había 5 millones 739 mil 270 personas con alguna discapacidad, esto es, el 5.1% de la población total, 27.2% de la cual es causada por algún problema visual en uno o ambos ojos.⁸

El 3 de diciembre de 2013, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) presentó datos que proyectaron que los problemas de la vista son la segunda causa de discapacidad en México, englobando en ellos a la ceguera, causada por diferentes situaciones, y la baja visión. El origen de la discapacidad, en este caso visual, en la población infantil, es generalmente antes o durante el nacimiento.

La ceguera se define como la falta total o parcial del sentido de la vista. En algunos casos es posible que la persona que la padezca pueda tener una ligera percepción de la luz, es decir, que sea capaz de distinguir entre luz y oscuridad, pero no así de distinguir las formas de los objetos.⁹ En México, el INEGI define la discapacidad visual como la pérdida total de la capacidad para ver, así como la debilidad visual irreversible de uno o ambos ojos.¹⁰

1.2 RESONANCIA MAGNÉTICA FUNCIONAL E IMÁGENES POR TENSOR DE DIFUSIÓN

En esta sección se puntualizará sobre la descripción de resonancia magnética funcional (fMRI) e imágenes por tensor de difusión (DTI), explicando sólo los conceptos básicos sobre cada una de las técnicas imagenológicas mencionadas, lo cual ayudará a un mejor entendimiento sobre los resultados obtenidos en el estudio. Como se mencionó en la introducción, hay diversas investigaciones en los que se observan cambios corticales debido

⁶ <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/es/index.html>

⁷ <http://www.jornada.unam.mx/2005/04/29/a03n1cie.php>

⁸ <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx?tema=P>

⁹ <http://www.once.es/home.cfm?id=189&nivel=3&orden=6>

¹⁰ Orozco-Gómez L, Ruíz-Morfin I, Lámbarry-Arroyo A, Morales-Cruz V. Prevalencia de retinopatía del prematuro. 12 años de detección en el Centro Médico 20 de noviembre. *Cir Ciruj* 2006; 74: 3-9.

a la exposición a un entrenamiento musical en niños. Dichos cambios se han medido por medio de técnicas de resonancia magnética, tales como el electroencefalograma, *resting-state* o imagen por tensor de difusión, lo cual ha permitido tener una visión más amplia sobre las patologías o el funcionamiento del cerebro.

En el caso de este proyecto, se decidió aplicar estudios de resonancia magnética funcional (fMRI), así como la obtención de imágenes por tensor de difusión (DTI) a los sujetos de estudio. De esta manera, este capítulo comenzará con la descripción básica de la técnica de resonancia magnética (MRI), para posteriormente introducir la resonancia magnética funcional (fMRI) y la imagen por tensor de difusión (DTI).

1.2.1 IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA (MRI)

La técnica de obtención de imágenes por Resonancia Magnética fue creada en 1976 por Félix Bloch y Edgard Purcell. La primera imagen que se obtuvo mediante esta técnica fue la de un dedo y, a partir de entonces, se ha aplicado a todas las partes del cuerpo, incluyendo el cerebro.¹¹

De manera simplificada, la obtención de imágenes por resonancia magnética se basa en la aplicación de un campo magnético que provoca que los núcleos de hidrógeno giren en una orientación determinada. Este efecto se logra al pasar una señal de radiofrecuencia que hace que los núcleos de átomos de hidrógeno varíen la dirección de sus ondas. La MRI detecta, específicamente, la radiación desprendida por los núcleos de hidrógeno, los cuales están presentes en distintas concentraciones en los diferentes tejidos (substancia gris y blanca, en el caso del cerebro). Para poder separar las señales de los distintos puntos del tejido, y así obtener imágenes específicas y no del cuerpo completo, es necesaria la aplicación de gradientes de campo magnético, los cuales son generados mediante el paso de una corriente eléctrica a través de bobinas.¹² En resumen, la imagen por MRI se consigue al aplicar un campo magnético diferente en cada punto, de manera que cada posición del

¹¹ <http://www.encuentros.uma.es/encuentros125/RMN.pdf>

¹² Gantes Cabrera R. Técnicas de reconstrucción de imagen en resonancia magnética. Tomado de <http://nuclear.fis.ucm.es/research/thesis/TM-Rosa-Gantes.pdf>

objeto experimente un campo único, y pueda diferenciarse de forma unívoca, a través del uso de gradientes, lo cuales codifican las señales de los tejidos en distintas fases y frecuencias.¹³

A partir de esta técnica se han desarrollado otras como la Resonancia Magnética funcional (*fMRI*) y la Resonancia Magnética por Difusión (*Diffusion MRI*). Esta última, mapea en el tejido biológico vivo, el proceso de difusión de las moléculas, principalmente, del agua. Esta técnica da lugar a la imagen por tensor de difusión, la cual permite observar *in vivo* las estructuras de la sustancia blanca.

1.2.2 IMAGEN POR TENSOR DE DIFUSIÓN (DTI)

Es una técnica de neuroimagen no invasiva, que permite ver, por medio de la difusión del agua, la dirección de las fibras de los axones de los tractos de la sustancia blanca *in vivo*.

En la sustancia blanca, la difusión de las moléculas del agua no sigue una misma dirección dentro de un espacio tridimensional (anisotropía). Esto se debe a que, en el proceso de difusión, las moléculas se mueven a causa de su propia energía térmica, chocando unas con otras y cambiando su trayectoria constantemente.

La difusión anisotrópica es causada principalmente por el desplazamiento molecular sobre las fibras de los axones de la materia blanca, y está afectada por características macro y micro-estructurales. Entre las características micro-estructurales están: la organización intra-axonal, la densidad de las fibras y la cubierta de las células neurogliales, así como el grado de mielinización y el diámetro individual de cada fibra.¹⁴ En una escala macroscópica, la variabilidad en la orientación de todos los tractos influye en el grado de anisotropía asignado a cada voxel (un punto tridimensional).

Las membranas axonales y las “fundas” mielinizadas presentan barreras al movimiento de las moléculas del agua en direcciones no paralelas a su propia orientación. Se ha

¹³ Ibid.

¹⁴ Melhem E, Mori S, Mukundan G, Kraut M, Pomper M, van Zijl P. Diffusion tensor MR imaging of the brain and white matter. Tractography. AJR, 2002: 178.

demostrado que la máxima difusión coincide con la orientación de los tractos de la sustancia blanca. En la DTI, las propiedades de difusión del agua son calculadas en un marco de referencia, usando las coordenadas espaciales X, Y, Z.¹⁵

El uso de mapas anisotrópicos incorpora información de auto-vectores (longitud) y auto-valores (dirección/orientación) que generan mapas de color de los tractos, en los cuales la intensidad representa anisotropía y el color representa dirección. Las proyecciones de la sustancia blanca en color son creadas con base en tres elementos de vectores con valores absolutos, los cuales se asignan de la siguiente manera:

- Rojo, el eje X, relacionado con fibras comisurales y dirección derecha-izquierda
- Verde, el eje Y, relacionado con fibras de asociación y dirección anterior-posterior
- Azul, el eje Z, relacionado con fibras de proyección y dirección superior-inferior

Uno de las proporciones que arroja la imagen tractográfica es el de anisotropía fraccional (FA, por sus siglas en inglés –Fractional Anisotropy–). Los umbrales de FA ayudan a excluir la materia gris y a segmentar los tractos de materia blanca. El conocimiento de las fibras, con relación a puntos de referencia anatómicos, define las regiones de interés (“regions of interest”, o ROI’s). Las fibras que pasan a través de una determinada ROI son retenidas, mostrando por medio de las diferentes mediciones, una mayor comprensión de la estructura del tracto. Cuanto mayor sea la FA, tanto mayor será la alineación de las fibras en una determinada dirección (Beaulieu, 2002).^{16 17} De acuerdo a los valores que se obtengan se puede definir si ese tracto está más alineado en comparación con otros, lo que indicaría un aumento en la mielinización, esto es, valores mayores a 0,2. Las imágenes obtenidas por DTI han mejorado la comprensión del cerebro humano en diferentes patologías, especialmente, en daños relacionados con la sustancia blanca. De igual forma, la DTI provee información acerca de la conectividad y el funcionamiento entre tractos cerebrales, así como componentes de otros tejidos del cuerpo.¹⁸

¹⁵ Contreras O. Secuencias funcionales en resonancia magnética (difusión, DT, espectroscopía). Arch Neurocienc, 2009; 14 (1): 58-68.

¹⁶ Beaulieu C. The basis of anisotropic water diffusion in the nervous system: A technical review. NMR Biomed. 2002 Nov-Dec; 15(7-8):435-55.

¹⁷ <http://ccn.ucla.edu/~jbrown/dti.html>

¹⁸ Op. Cit.

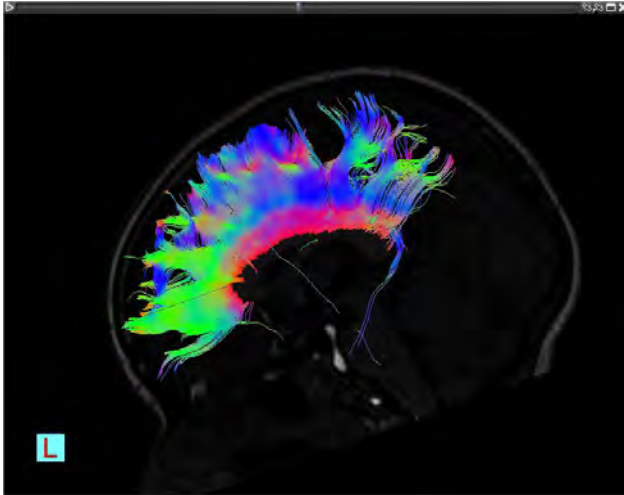


Figura 1. Ejemplo que muestra las diferentes conexiones del cerebro a través de una imagen obtenida por Tensor de Difusión (DTI).

1.2.3 RESONANCIA MAGNÉTICA FUNCIONAL (fMRI)

Es un estudio no invasivo con el cual se pretende realizar un mapeo cerebral de un proceso funcional, esto es, obtener localizaciones anatómicas de ese evento determinado. De esta manera la fMRI permite ver las señales obtenidas en momentos basales, y en las respuestas halladas durante una actividad neural.¹⁹ El cambio en la señal BOLD (Blood Oxygenation Level-Dependent), asociado a un proceso neural breve, es conocido como respuesta hemodinámica (RHD). La actividad neural está asociada a un incremento local en el flujo de sangre oxigenada (el cual es mayor al ser necesario para reponer el consumo de oxígeno por parte de las neuronas activas), dando lugar al componente principal de la RHD.²⁰

La fMRI permite observar estos cambios hemodinámicos cerebrales en las regiones involucradas en procesos cognitivos, sensoriales, emocionales o motores. La señal BOLD es una medida indirecta de la actividad neural que parte del supuesto de la existencia de un acoplamiento neurovascular ante una demanda funcional. El análisis de la naturaleza de la

¹⁹ Rosales M. Resonancia Magnética funcional: Una nueva herramienta para explorar la actividad cerebral y obtener un mapa de su corteza. *Revista Chilena de Radiología*. 2003; 9 (2): 86-91.

²⁰ Armony J, Trejo D, Hernández D. Resonancia Magnética Funcional (RMf): Principios y aplicaciones en Neuropsicología y Neurociencias Cognitivas. *Revista Neuropsicología Latinoamericana*, 2012; 4 (2): 36-50.

actividad neural a través de la señal BOLD es por tanto una inferencia a partir de la respuesta hemodinámica, no la de la respuesta neural en sí misma (Armony, 2012).

La fMRI busca la correlación topográfica-funcional de un evento de activación neural. Esto es, se estimula al paciente para que haya un incremento en la actividad neural y así se logre observar el contraste BOLD. Por esto, la señal BOLD se asocia a eventos únicos, lo cual difiere de la técnica del *resting-state* (estado de reposo), que no utiliza ninguna clase de estímulos.

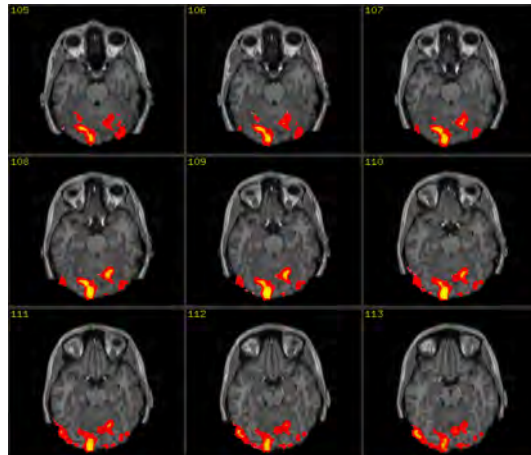


Figura 2. Ejemplo de una secuencia de imágenes obtenidas a través de la técnica de fMRI. Tomado de <http://www.csulb.edu/~cwallis/482/fmri/fmri.html>

Como se mencionó, uno de los objetivos de la fMRI es ubicar áreas cerebrales en relación a eventos mentales, por ejemplo, qué pasa cuando se imagina. Para este fin, se utilizan diferentes tipos de estimulación o paradigmas. Generalmente hay dos variantes: en bloque, llamado en inglés *block design*, y el diseño relacionado con eventos, *event-related design*.

El primer tipo de paradigma consiste en presentar dos tareas o bloques, de manera alternada y de una duración determinada. Lo fundamental de esta condición es que cada uno de los bloques consista en una sola tarea o condición. Por ejemplo, el diseño más sencillo consiste en presentar un bloque 'experimental' (activación), y uno control (de reposo). Este tipo de diseño es comúnmente el que se utiliza en el área clínica, pues es fácil de implementar, y en el que los pacientes cooperan de mejor manera.²² Este diseño debe

²² Armony J, Trejo D, Hernández D. Resonancia Magnética Funcional (RMf): Principios y aplicaciones en Neuropsicología y Neurociencias Cognitivas. Revista Neuropsicología Latinoamericana, 2012; 4 (2): 36-50

tener la duración suficiente para lograr una señal 'funcional', que permita obtener datos estadísticamente confiables.²³

El paradigma relacionado a eventos está basado en los estudios de potenciales relacionados con eventos, usados en la técnica de electroencefalografía.²⁴ En este tipo de paradigma, las distintas condiciones se presentan de forma aleatoria. Los estímulos que se muestran son muy cortos o de menor señal, en cuanto a duración, y se presentan en cualquier momento del estudio, lo cual es difícil de detectar. Para poder observarlos, se utilizan periodos de estimulación largos, de 10 a 12 segundos, con los cuales se puedan obtener la señal de activación cerebral.²⁵

²³ Rojas R. Introducción a la Resonancia Magnética Funcional Cerebral, 2010.
<http://smri.org.mx/memorias/rad2010/platicas/3.pdf>

²⁴ Op. Cit.

²⁵ Op. Cit.

CAPÍTULO 2

Este capítulo es una revisión sobre los estudios que han vinculado la disciplina artística y su posible impacto en la neuroanatomía de las personas. Como se ha reiterado en numerosas ocasiones, no se ha podido encontrar una investigación en niños que conjunte la discapacidad visual, la música y su efecto a nivel cerebral. De esta manera, una vez más se insiste en la importancia del presente proyecto como base para futuras observaciones dentro del campo de la cognición musical.

2.1 ENTRENAMIENTO MUSICAL

Diversos estudios (Yakovlev y Lecours, 1967; Schlaug, 2009; Bengtsson, 2005; Halwani, 2011) han considerado al entrenamiento musical como una experiencia que modula los mecanismos involucrados en la reorganización y/o la plasticidad cerebral, lo que da como resultado un beneficio en los procesos referentes al quehacer musical, así como las capacidades y las habilidades que no son exclusivas de la música.

Con el fin de aclarar estos conceptos, un entrenamiento musical comprende los siguientes procesos:

- 1) Auditivos, pues esencialmente la música ingresa a través de este canal;
- 2) Motores, al ejecutarse un instrumento, o en relación con la actividad corporal que se desarrolla a través de esta disciplina;
- 3) Cognitivos, tales como la memoria, la atención y, especialmente, el aprendizaje del lenguaje musical; y
- 4) Emocionales/sociales, cuando se interpreta la obra y al tener una interacción con los demás ejecutantes y/o el profesor.

Lo más destacable es que estos procesos no se dan de manera aislada, sino que interactúan conjuntamente al resultar en la ejecución de una obra musical, ya sea, cantada o instrumental.

Basándose en lo anterior, se ha tomado como referencia la arquitectura cerebral de personas con estudios musicales para explicar los mecanismos de plasticidad -a partir de dicha experiencia- que inducen cambios funcionales y anatómicos en la estructura cortical. Se ha demostrado que diversos núcleos y áreas cerebrales están altamente relacionados con la música, y que la activación y/o la anatomía de éstos difieren entre personas que han tomado clases de música y personas sin esta formación, como se verá en los estudios mostrados a continuación.

Grahn^{26 27} y Bengtsson²⁸ han analizado que durante la percepción del ritmo existe activación en el putamen, la corteza dorsal premotora, el área motora principal y motora suplementaria, y las cortezas prefrontal, frontal y parietal. Peretz y Zatorre²⁹ han observado activaciones en estas mismas áreas en músicos con quienes se realizan tareas de discriminación (cabe mencionar que la respuesta en áreas prefrontales presupone activación de procesos de memoria). Estos mismos autores describen una respuesta en la porción derecha anterolateral del giro de Heschl -centro cortical cerebral de la audición- durante el análisis de la información tonal.³⁰ Foster y Zatorre³¹ mostraron que la transposición de tonos, es decir, el transportar piezas a una tonalidad diferente a la original, está asociada a la actividad en el surco intraparietal.

²⁶ Grahn JA, Brett M. Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *J Cogn Neurosci* 2007; 19:893-906.

²⁷ Grahn JA, The role of the basal ganglia in beat perception: neuroimaging and neuropsychological investigation. *Ann NY Acad Sci* 2009; 1169: 35-45.

²⁸ Bengtsson SL, Ehrsson H, Hashimoto T, Kito T, Naito E, Forssberg H, Sadato N. Listening to rhythms activates motor and premotor cortices. *Cortex* 2009; 45: 62-71.

²⁹ Peretz I, Zatorre R. The cognitive neuroscience of music. Oxford University Press; Oxford, 2007.

³⁰ Peretz I, Zatorre R. Brain organization for music processing. *Ann Rev Psychol* 2005; 56: 89-114.

³¹ Foster N, Zatorre R. A role for the intraparietal sulcus in transforming musical pitch information. *Cereb Cortex* 2010; 20:1350-59.

Herdener³² y Groussard³³ observaron un aumento en la sustancia gris del hipocampo en personas con formación musical. Este núcleo está relacionado con procesos de memoria a largo plazo, la cual es fundamental para los músicos, de modo que la modificación de esta región puede deberse a la experiencia obtenida de dicha instrucción. En varios estudios, también se ha observado la activación del cerebelo, el cual está involucrado en la coordinación motora, el aprendizaje de las habilidades motrices y otros aspectos de discriminación cognitiva y sensorial. Varios estudios han corroborado que el aprendizaje musical, y también de otras índoles, exhiben un mayor efecto, conductuales y neuroanatómicos, cuando se inicia en etapas tempranas de la niñez.

Zatorre y Herholz³⁴ mencionan que un entrenamiento a largo plazo produce cambios en las zonas de actividad de la corteza auditiva, como resultado a la exposición de un estímulo, y que dichas modificaciones pueden ocurrir de diferentes maneras, dependiendo del paradigma y/o entrenamiento musical que se utilice. De acuerdo con los autores, estos cambios pueden verse afectados por el estado de madurez del sistema nervioso, de tal manera que son posibles mayores modificaciones cuando se comienza el entrenamiento en una etapa temprana del desarrollo. De igual manera, hay factores que pueden influir en la respuesta al entrenamiento, como la interacción entre los estímulos auditivos y la respuesta motriz requerida para producir dicha respuesta.

Los cambios que se han reportado en la corteza auditiva no sólo se estudian a nivel funcional, como en la respuesta BOLD, sino también a nivel anatómico, por ejemplo, en un aumento de volumen, en la concentración o en el grosor de dicha corteza. Respecto a esto, Foster y Zatorre³⁵ hallaron una alta concentración o engrosamiento cortical en la corteza auditiva derecha, así como en la región del surco intraparietal de manera bilateral, en

³² Herdener M, Esposito F, di Salle F, Boller C, Hilti C, Habermeyer B, Scheffler K, Wetzel S, Seifritz E, Cattapan-Ludwig K. Musical training induces functional plasticity in human hippocampus. *J Neurosci* 2010; 30: 1377-1384.

³³ Groussard M, La Joie R, Rauchs G, Landeau B, Chételat G, Viader F, Desgranges B, Eustache F, Platel H. When music and long-term memory interact: effects of musical expertise on functional and structural plasticity in the hippocampus. *PLoS One* 2010; 5 (10) pii: e13225

³⁴ Herholz S, Zatorre R. Musical training as a framework for brain plasticity: behavior, function and structure. *Neuron*, 2012; 76: 486-502.

³⁵ Foster N, Zatorre R. Cortical structure predicts success in performing musical transformation judgments. *Neuroimage*, 2010; 53: 26-36.

respuesta a un test de predicción en una trasposición musical. Dicho estudio se comentará de manera detallada más adelante.

Una revisión de estudios relacionados con el entrenamiento musical y la plasticidad cerebral³⁶ cuestiona las hipótesis de que realmente haya cambios significativos en los diversos aspectos que ya se han manifestado repetidamente durante el escrito, tales como sustancia blanca, volumen cerebral, conectividad, densidad, etc. Los autores hacen un análisis de las posibles variables que pueden afectar también dichos efectos en el cerebro, como la edad en que se inició el entrenamiento, el tiempo de duración de éste, el género, el tipo de instrucción musical que se recibió, si las personas poseen o no oído absoluto, e incluso el instrumento en el que se desempeñaron durante dichas clases.

Todo esto se genera a partir de la revisión de artículos relacionados con el tema y que parecen tener contradicciones entre sí. Una observación que los autores se hacen respecto a la duración del entrenamiento es que, si tomar clases de música por cerca de un año es realmente un entrenamiento musical o sólo un entrenamiento corto, es decir, ¿las personas que toman clases por ese periodo de tiempo ya se consideran 'músicos' para poder diferenciarse entre 'músicos' y 'no músicos'?

Se discute si los estudios transversales son realmente viables para obtener conclusiones significativas dado el alto número de variables que se mencionan en el artículo. Se recomienda, más bien, realizar estudios longitudinales en los cuales se puedan controlar más cercanamente todas las variables cuestionadas y así obtener datos fiables con respecto al posible efecto plástico obtenido a partir de este tipo de instrucción. Se afirma que esto no es más que una crítica constructiva para poder reconocer si una instrucción musical puede incidir en los cambios cerebrales que se han mencionado y en qué grado ocurrirían.

Un estudio realizado por Mehr³⁷ en el que expuso a niños de 4 años, a 6 semanas de música con sesiones de 45 minutos cada una, no arrojó resultados significativos en cuanto a mejoras en aspectos de lenguaje. No obstante, un grupo de niños que tomaron instrucción musical por 20 días mostraron un buen desempeño en la ejecución de tareas de inteligencia verbal

³⁶ Merret D, Peretz I, Wilson S. Moderating variables of music training-induced neuroplasticity: a review and discussion. *Frontiers in Psychology*. 2013; 606 (4);1-8.

³⁷ Mehr SA, Schachner A, Katz RC, Spelke ES. Two Randomized Trials Provide No Consistent Evidence for Nonmusical Cognitive Benefits of Brief Preschool Music Enrichment. *PLoS One* 2013; 8: e82007

y funciones ejecutivas, en comparación con otro grupo que tomó clases de pintura.³⁸ Los autores de este estudio expresan que en esta edad los niños tienen un menor desarrollo de las destrezas viso-motrices, en comparación con las auditivas, lo que podría explicar esta transferencia dirigida a las habilidades verbales, y no hacia las otras. Seguramente, si tomaran más tiempo de clases de pintura, se verían desarrolladas las prácticas y los mecanismos que interfieren en éstas.

A continuación, se presenta la mini-revisión realizada por Moore *et. al* (2014) en la cual se comparan algunos estudios de cinco años precedentes a la fecha de publicación, enfatizando los resultados más relevantes obtenidos a través de diferentes técnicas de imagenología.

³⁸ Moreno S, Bialystok E, Barac R, Schellenberg E, Cepeda NJ, Chau T. Short-term music training enhances verbal intelligence and executive function. *Psychol Sc* 2011; 22: 1425-1433.

Autores	Población	Análisis	Conclusiones
Schmithorst y Wilke 2002³⁹	5 músicos 6 no-músicos	Voxel- Based	Aumento significativo de FA en la rodilla del cuerpo calloso, y disminución de FA en la corona radiada y cápsula interna, en músicos comparados con no músicos.
Bengtsson <i>et. al.</i> 2005⁴⁰	8 pianistas 8 no-pianistas	Voxel -Based	Aumento significativo de FA en el limbo posterior derecho de la cápsula interna en los pianistas, comparados con los no pianistas. Aumento de FA en diferentes áreas cerebrales, lo cual está relacionado con el número de horas de práctica del instrumento durante la niñez, adolescencia o adultez.
Han <i>et. al.</i> 2009⁴¹	18 músicos 18 no-músicos	Voxel-Based	Aumento significativo de FA en el limbo posterior derecho de la cápsula interna en los pianistas, comparando músicos con no-músicos. No se encontró relación entre las horas de práctica en el instrumento y los cambios en la FA.

³⁹ Schmithorst V. Difference in White matter architecture between musicians and no musicians: a diffusion tensor imaging study. *Neuroscience Letters* 2002; 321: 57-60.

⁴⁰ Bengtsson, S. Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development. *Nature Neuroscience* 2005; 8: 1148-1150.

⁴¹ Han Y, Yang H, Lv YT, Zhu CZ, He Y, Tang HH, Gong QY, Luo YJ, Zang YF, Dong Q. Gray matter density and white matter integrity in pianist's brain: A combined structural and diffusion tensor MRI study. *Neurosc. Lett* 2009; 459: 3-6.

Halwani et. al. 2011 ⁴²	11 instrumentistas 11 cantantes 11 controles	ROI y Tractografía probabilística	El volumen del fascículo arqueado fue significativamente mayor en los cantantes, comparados con los instrumentistas y los no-músicos. La FA fue significativamente menor en los cantantes en la porción media del fascículo arqueado dorsal izquierdo comparado con los instrumentistas y los no-músicos.
Imfeld et. al. 2009 ⁴³	13 sujetos con entrenamiento temprano (ET) 13 sujetos con entrenamiento tardío (ET+) 13 no músicos.	ROI, Tractografía probabilística y Voxel- Based	Bajos valores en el tracto cortico-espinal en los músicos comparados con los no-músicos. Altos valores en la Difusión Media, en el TCE derecho e izquierdo en los ET comparados con los ET+. No se halló correlación entre la CAF en el TCE y la edad de inicio del entrenamiento musical. La MD en el TCE fue correlacionada negativamente con la edad de inicio del entrenamiento musical.
Oechslin et. al. 2010 ⁴⁴	13 músicos con oído absoluto (OA).	ROI, Tractografía probabilística	Se encontró correlación entre la habilidad de poseer oído absoluto y la FA en el Fascículo Longitudinal Superior.

⁴² Halwani GF, Rüber T, Schlaug G. Effects of practice and experience on the arcuate fasciculus: Comparing singers, instrumentalists and non-musicians. *Front Psychol* 2011; 2: 156.

⁴³ Imfeld A, Oechslin MS, Meyer M, Loenneker T, Jancke L. White matter plasticity in corticospinal tract of musicians: A diffusion tensor imaging study. *NeuroImage* 2009; 46: 600-607.

⁴⁴ Oechslin M, Imfeld A, Loenneker T, Meyer M, Jäncke L. The plasticity of the superior longitudinal fasciculus as a function of musical expertise: a diffusion tensor imaging study. *Front Hum Neurosci* 2009; 3: 76.

	13 músicos sin oído absoluto (-OA). 13 no-músicos.		Los músicos con OA mostraron gran asimetría izquierda en valores de la FA, en comparación con el lado derecho, dentro del FLS.
Loui et. al. 2011⁴⁵	12 músicos con oído absoluto (OA). 12 no-músicos.	ROI, Tractografía probabilística	Se halló mayor volumen y número de fibras en tractos que conectan el giro temporal superior posterior con el giro temporal medio en los OA comparados con los no músicos. Se encontró correlación en la exactitud para resolver test que evalúan las habilidades del oído absoluto y el volumen de las fibras que conectan el giro temporal superior izquierdo y el giro temporal medio, del mismo lado.
Abdul-Kareem, et. al 2011⁴⁶	10 músicos 10 no-músicos	ROI, Tractografía probabilística	Hay mayor volumen en el pedúnculo cerebral medio derecho. Lo mismo para el pedúnculo cerebral superior derecho, así como un mayor número de fibras en este último, comparando ambos grupos de estudio.

⁴⁵ Loui P, Li HC, Hohmann A, Schlaug G. Enhanced cortical connectivity in absolute pitch musicians: A model for local hyperconnectivity. *J Cogn Neurosc* 2011; 23: 1015-1026.

⁴⁶ Abdul -Kareem IA, Stancak A, Parkes LM, Al-Ameen M, AlGhamdi J, Aldhafeeri FM, Embleton K, Morris D, Sluming V. Plasticity of the superior and middle cerebellar peduncles in musicians revealed by quantitative analysis of volume and number of streamlines based on diffusion tensor tractography. *Cerebellum* 2011; 10: 611-623.

			No se halló correlación entre la edad de inicio de la instrucción musical y el volumen o número de fibras de la materia blanca.
Dohn, et. al. 2013⁴⁷	17 músicos con oído absoluto (OA). 18 músicos sin oído absoluto (-OA).	ROI, Tractografía probabilística	Mayor FA dentro de la trayectoria del Fascículo Fronto-Occipital Inferior, el Fascículo Uncinado, y el Fascículo Longitudinal Inferior en los OA comparados con los -OA. Correlación entre la habilidad para el OA asociada con asimetría en la FA del lado derecho.
Steele, et. al. 2013⁴⁸	18 músicos con entrenamiento temprano (ET). 18 músicos con entrenamiento tardío (ET+) 17 no-músicos	TBSS, ROI, Tractografía probabilística	Mayor significatividad de la FA en la parte media posterior del Cuerpo Calloso, así como en la porción anterior del istmo en los ET comparados con ET+ y los no músicos. Correlación entre la edad de inicio de la instrucción musical y la FA dentro de la parte media posterior del Cuerpo Calloso.

⁴⁷ Dohn A, Garza-Vollareal EA, Chakravarty MM, Hansen M, Lerch JP, Vuust P. Gray and White Matter Anatomy of Absolute Pitch Possessors. *Cereb Cortex* 2013; doi: 10.1093/cercor/bht334

⁴⁸ Steele CJ, Bailey JA, Zatorre RJ, Penhune VB. Early musical training and white matter in the corpus callosum. evidence for a sensitive period. *J Neurosci* 2013; 33: 1282-1290.

Rüber, et. al. 2013⁴⁹	10 pianistas 10 violinistas y chelistas 10 no –músicos	Tractografía probabilística y análisis de voxel dentro de los tractos.	Se halló mayor FA en los tractos piramidales del hemisferio derecho en los músicos de cuerdas, comparados con pianistas y no-músicos. Mayor FA en los tractos piramidales del hemisferio izquierdo de los pianistas. Valores de la FA en tractos piramidales y en fibras motoras alternas izquierdos y derechos, están altamente correlacionados con la velocidad de articulación del dedo índice contralateral.
Engel, et. al. 2014⁵⁰	18 no-músicos	TBSS	Se encontró que los valores de FA en los tractos cortico-espinales superiores bilaterales, y en el fascículo longitudinal superior están correlacionados con el aprendizaje de melodías rápidas en el piano, ejecutadas con la mano derecha.

⁴⁹ Rüber T, Linderberg R, Schlaug G. Differential adaptation of ascending motor tracts in musicians. *Cereb Cortex* 2013; doi: 10.1093/cecor/bht331

⁵⁰ Engel A, Hijmans BS, Cerliani L, Bangert M, Nanett IL, Keller PE, Keysers C. Inter-individual differences in audio-motor learning of piano melodies and white matter fiber tract architecture. *Hum Brain Mapp* 2014; 35: 2483-2497.

De acuerdo con los autores, el periodo de 5 años en los que se realizaron estos estudios, no es suficiente para lograr evidencias plenas y contundentes sobre si realmente pueden existir modificaciones cerebrales a nivel de conectividad, por medio de una enseñanza musical. Cabe mencionar que los estudios presentados en el cuadro comparativo son transversales, aunque los autores sugieren que un diseño longitudinal podría brindar mayor información sobre la posible eficacia del entrenamiento musical, ya que, como se ha mencionado anteriormente, una investigación de este tipo controla un mayor número de variables que un estudio transversal, aunque también hacen observaciones sobre las dificultades que conlleva realizar un estudio longitudinal.

Yang *et. al.* (2014),⁵¹ llevaron a cabo una investigación de este tipo de diseño, en el cual obtuvieron una muestra de 250 niños chinos para corroborar si, efectivamente, existía alguna relación entre la experiencia musical y la adquisición de ciertas habilidades académicas, concretamente en el área matemática y en el aprendizaje de una segunda lengua. Los resultados mostraron que el entrenamiento musical estaba asociado de manera cercana al aumento en el aprendizaje del segundo idioma, pero no hubo relaciones significativas entre la instrucción musical y las otras habilidades académicas. Los autores conjeturan que posiblemente la relación entre el proceso musical y la adquisición de una segunda lengua se deba a que ambas habilidades comparten mecanismos en común, especialmente auditivos.

Lo que Yang sí asegura es que el entrenamiento musical puede mejorar procesos de atención selectiva, memoria de trabajo y el aprendizaje de las reglas acústicas que se obtiene al escuchar los encadenamientos de sonidos musicales. Estas habilidades cognitivas son comunes para la adquisición del lenguaje.⁵²

La revisión anterior nos permite sentar bases sobre lo que podría esperarse al realizar un estudio como el que se presenta en este proyecto. Algo en común en muchas investigaciones, es la edad a la que los sujetos deberían iniciar un entrenamiento musical

⁵¹ Yang H, Weiyo Ma, Diankun G, Jiehui H, Dezhong Y. A Longitudinal Study on Children's Music Training Experience and Academic Development. *Scientific Reports* 2014; 4: 5854

⁵² Op. Cit.

para que haya cambios plásticos importantes. Parece ser que iniciar la práctica en edades tempranas es lo recomendable para registrar dichas modificaciones. En la siguiente sección, se presenta una revisión de estudios en los que se propone comenzar la instrucción musical en los inicios de la infancia y los resultados que se obtuvieron a partir de dichas observaciones.

Es importante destacar que, el desequilibrio resultante de la organización sináptica se pierde de forma importante a los 8 años de edad, y se alcanza, entre ambos tipos de sinapsis (excitatoria e inhibitoria) cerca de los 30 años. El resultado de un entrenamiento musical en niños entre los 5 y los 6 años, cuando aún no se presenta el desequilibrio resultante de la desorganización sináptica, puede facilitar el desarrollo de procesos cognitivos relacionados con la música, pero también con otros ámbitos (Castro-Sierra, 2012).⁵³

2.2 EDAD CRÍTICA EN EL ENTRENAMIENTO MUSICAL

A lo largo del desarrollo del ser humano, hay una fase de máxima reorganización sináptica denominada periodo crítico. En este momento, las redes neurales son más susceptibles a estímulos de diferentes naturalezas, por ejemplo, internos, tal como la privación de un sentido, o externos, como la práctica musical. El término de este periodo llega cuando los procesos anatómicos y funcionales están establecidos. Entre los factores estructurales, se observan la consolidación de redes neurales, la mielinización y los mecanismos de podado sináptico. Entre los cambios funcionales que regulan el final de la etapa crítica, se encuentran los cambios en la actividad de las sinapsis inhibitorias, que pueden volverse excitatorias, y, por el contrario, las sinapsis excitatorias pueden volverse inhibitorias. El periodo crítico se puede definir entonces, como aquél espacio de tiempo 'limitado' en el cual los efectos de una experiencia, una pérdida sensorial o física puede afectar de manera positiva o negativa la arquitectura cerebral. Nuevos estudios han demostrado que después de este periodo de maleabilidad puede seguir habiendo modificaciones, si el individuo está expuesto a un ambiente enriquecido, prolongando de esta manera el tiempo crítico.⁵⁴

⁵³ Castro-Sierra, E. Comunicación personal, 2012.

⁵⁴ Miendlarzewska E, Trost W. How musical training affects cognitive development: rhythm, reward and other modulating variables. *Frontiers in Neuroscience*. 2014; 279 (7): 1-18.

La música es una experiencia multisensorial que ofrece la posibilidad de adquirir nuevas habilidades y mejorar las pasadas. Esto es debido, en gran parte, a que entran en función diferentes tipos de percepción, además de que múltiples procesos actúan al mismo tiempo que se presentan las acciones requeridas para que suceda la música. En general, se activan sistemas a nivel motor (ejecución y dominio de un instrumento, incluida la voz); auditivo (discriminación de los diferentes sonidos; esencialmente, la música es regulada por la audición); cognitivo (procesos de atención, memoria, etc.); visual (lectura de las partituras, interacción con los otros músicos, observación del propio instrumento) y afectivos (interpretación de la música). Es de esperarse que este tipo de entrenamiento pueda modificar de manera importante la anatomía y el funcionamiento del cerebro al existir procesos de plasticidad causados por la complejidad involucrada en la experiencia musical y que, además, haya cambios que se vean reflejados de diferentes maneras en las personas que realizan esta actividad.

Ramón y Cajal, a principios del siglo XX, ya discutía la posibilidad de que el entrenamiento musical podía asociarse a cambios estructurales del cerebro. En palabras de él mismo: *cualquiera conoce la habilidad de un pianista, pero la adaptación a un nuevo trabajo requiere de muchos años de entrenamiento mental y gimnasia muscular. Para entender este importante fenómeno, es necesario aceptar que, además de las vías preestablecidas orgánicamente, otras vías son creadas por la ramificación y el crecimiento progresivo de dendritas y axones.*⁵⁵

Estudios posteriores, entre los años 70s y 80s, han referido mejoras en los niños que han recibido clases de música en aspectos de discriminación auditiva, sincronización para seguir el pulso y movimientos de psicomotricidad fina.^{56 57}

⁵⁵ Wan C, Schlaug G. Music making as a tool for promoting brain plasticity across the life span. *Neuroscientist* 2010; 16(5): 566-577.

⁵⁶ Hurwitz, I. et al (1975). Nonmusical effects of the Kodaly music curriculum in primary grade children. *J Learn Disabilities*, 8, 167-174.

⁵⁷ Flohr, J. Short-term music instruction and young children's developmental music aptitude. *J Res Music Ed* 1981; 29(3): 219-223.

También se han demostrado cambios estructurales a nivel cerebral, generalmente en áreas motoras y auditivas, después de un entrenamiento musical iniciado en la niñez.⁵⁸ Se informa de mejores resultados en la ejecución de tareas de sincronización óculo-motoras y auditivo-motoras en personas que han recibido un entrenamiento musical antes de los 7 años.^{59 60} Esto nos sugiere que la adquisición de la experiencia musical afecta de manera positiva los sistemas neurales involucrados en la integración sensorio-motora y de sincronización. De esta manera, se sustenta la hipótesis de que hay un periodo crítico en la niñez durante el cual un entrenamiento sensorio-motor, enriquecido a través de la práctica musical, puede traer beneficios a lo largo de la vida, aún en dominios no musicales.⁶¹

Se ha propuesto que, después de los 7 años de edad, el entrenamiento musical puede no tener efectos duraderos en las representaciones anatómicas, aunque recientemente se ha observado que el cerebro adulto conserva los cambios que se dieron a partir de un entrenamiento musical durante la niñez. Skoe y Kraus⁶² refieren que los cambios neurales producidos durante una etapa temprana llevan a una plasticidad de largo plazo, la cual pudo ser inducida por un ambiente enriquecido de experiencias sensoriales, tal y como ocurre cuando se aprende a tocar un instrumento. De esa manera, la práctica de una educación musical iniciada desde la niñez, puede influenciar de manera positiva la plasticidad cerebral, continuando así hasta la edad adulta.

Basándose en un método para desarrollar las habilidades musicales creado por Shinizi Suzuki, Fujioka, Kakigi, Pantev y Trainor,⁶³ se han realizado diferentes estudios por medio de magnetoencefalografía (MEG), para comprobar el efecto de dicha enseñanza en los niños.

⁵⁸ Penhune VB. Sensitive periods in human development: Evidence from musical training. *Cortex*, 2011; 47(9) DOI:10.1016/j.cortex. 2011.05.010.

⁵⁹ Bailey J and Penhune VB. A sensitive period for musical training: contributions of age of onset and cognitive abilities. *Ann NY Acad Sci*, 2012; 1252(1), 163-170. DOI:10.1111/j.1749-6632.2011.06434.x

⁶⁰ Watanabe T, Yagishita S, Kikyo H. Memory of music: roles of right hippocampus and left inferior frontal gyrus. *Neuroimage* 2008; 39: 483-491.

⁶¹ Habib M, Besson M. What do music training and musical experience teach us about brain plasticity? *Music Percep* 2008; 26 (3): 279-285.

⁶² Skoe E, Kraus N. A Little goes a long way: how the adult brain is shaped by musical training in childhood. *J Neurosci* 2012; 32 (34): 11507-11510.

⁶³ Fujiyota T, Ross B, Kakigi R, Pantev C, Trainor L. One year of musical training affects development of auditory cortical-evoked fields in young children. *Brain* 2006; 129:2593-2608.

Justamente estos autores han observado una respuesta significativa en el hemisferio izquierdo de alumnos que han tomado clases Suzuki.

Por su parte, Schlaug (2005) realizó una comparación entre dos grupos de estudio en dos momentos diferentes. La primera vez observó niños de 5 a 7 años de edad por un lapso de 14 meses durante los cuales, los sujetos tomaban clases de piano o de instrumentos de cuerda. Pasado ese tiempo, se halló que había diferencias en tareas de habilidades motrices finas y de discriminación auditiva, aunque no se encontró evidencia de que esos efectos se hayan transferido a otros dominios, por ejemplo, de habilidad verbal o espacial. Se concluyó que estos cambios estaban cercanamente relacionados con la práctica instrumental. Los análisis preliminares de fMRI sugieren que los cambios funcionales durante las tareas de discriminación rítmica y melódica ocurren después de un año de entrenamiento musical, los cuales son observados en ambos hemisferios, especialmente en las áreas de asociación auditiva en el lóbulo temporal, y en el cruce de este último con el lóbulo parietal. Con estos resultados, se pensó en comparar con otro grupo de niños, esta vez de 9 a 11 años, los cuales ya tenían 4 años de instrucción musical. En este grupo de estudio se observó un mayor volumen en la sustancia gris en la región sensorio-motora, y en ambos lóbulos occipitales. También se observó una fuerte activación en el giro temporal anterior, particularmente el derecho, así como en el giro posterior inferior y en el giro frontal medial, ambos bilaterales.

La activación de ambos giros en las tareas mencionadas desempeña un papel importante en la integración de eventos auditivos de grandes unidades (refiriéndose a la medida de tiempo) o en la ordenación secuencial de información auditiva relevante. En este estudio se concluyó que los sujetos con más tiempo de formación musical muestran una activación más fuerte en las áreas mencionadas, debido quizás al periodo de entrenamiento musical.⁶⁴ Al respecto, Hyde⁶⁵ comparó dos grupos de niños con edades que oscilaban alrededor de los 6 años. Un grupo tomó clases de música y piano durante 15 meses, mientras que el grupo control no recibió ningún tipo de clase. Después de este tiempo, se observó que los

⁶⁴ Schlaug G, Norton A, Overy K, Winner K. Effects of Music Training on the Child's Brain and Cognitive Development. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2005; 1060: 219-230.

⁶⁵ Hyde KL, Lerch J, Norton A, Forgeard M, Winner E, Evans AC, Schlaug G. The effects of musical training on structural brain development: a longitudinal study. *Ann NY Acad Sci* 2009; 1169: 182-186.

niños con educación musical mostraron cambios anatómicos en el cuerpo caloso, el giro precentral derecho y el giro de Heschl. Esto indica, desde un punto de vista funcional, que estas regiones están altamente involucradas en la ejecución musical y el procesamiento auditivo. Estos resultados se deben a que el área motora primaria está relacionada con la planeación, la ejecución y el control de secuencias de los movimientos de los dedos en ambas manos, así como el aprendizaje de acciones motrices. El entrenamiento 'bimanual' de los músicos juega un papel importante pues determina el tamaño y el grosor de las fibras del cuerpo caloso, el cual conecta a ambos hemisferios.

Schlaug⁶⁶ realizó un estudio en el que participaron niños alrededor de los 6 años de edad, y por el que se pudo observar que, después de un entrenamiento musical de aproximadamente 30 meses, hubo cambios en las áreas de las cortezas prefrontal, premotora y motora suplementaria, las cuales están involucradas en la planeación y la modulación de la ejecución motora. Schlaug arguyó que dichos efectos se debían, probablemente, al aumento de la mielinización en los tractos neurales, al tamaño de los axones, a la formación de nuevos axones o al podado de fibras interhemisféricas resultantes de la intervención de las actividades motoras bimanuales durante el desarrollo. Otro estudio del mismo autor (2013) compara una investigación transversal realizada por él mismo y otros autores en 2012, la cual complementa con un estudio longitudinal aplicado en niños de 5 a 7 años, con el objetivo de combinar la sensibilidad de un diseño transversal con la especificidad del estudio longitudinal. Se observó una asimetría izquierda en la actividad del giro ventral supramarginal durante tareas de discriminación rítmica y melódica, diseñadas para este estudio. Se sugiere una relación directa entre la cantidad de tiempo destinada para practicar un instrumento musical y el grado de compromiso de los mecanismos de memoria de trabajo, subrayando la importancia de esta región para dicho proceso.⁶⁷

Varias investigaciones concluyen que los cambios en el cerebro, incluida la sustancia blanca, son mayores cuando ocurren en una edad temprana, cuando los tractos están aún

⁶⁶ Schlaug G, Forgead M, Zhu L, Norton A, Winner H. Training-induced neuroplasticity in young children. *Ann NY Acad Sci* 2009; 1169: 205-208.

⁶⁷ Ellis R, Brujin B, Norton A, Winner E, Schlaug G. Training-mediated leftward asymmetries during music processing: A cross-sectional and longitudinal fMRI analysis. *Neuroimage* 2013; 75: 97-107.

en proceso de mielinización.⁶⁸ Es importante mencionar que esta plasticidad no está ausente en los adultos, aunque parece ser que se presenta en menor grado.

Con base en la información anterior, se tomó la decisión de realizar el presente estudio en niños de entre 4 y 5 años, los mismos que al finalizar el entrenamiento musical tuvieron, aproximadamente, entre 5 y 6 años, periodo en el cual, de acuerdo a estudios anteriores, se comienzan a producir cambios en sus tractos y núcleos encefálicos. Cabe destacar que los niños ciegos presentan retraso en el aspecto psicomotor, debido a la pérdida sensorial, por lo que ciertas etapas en su desarrollo se encuentran afectadas, y los periodos que se establecen para alcanzar ciertas metas, como la lateralidad o el equilibrio, varían en comparación con los de un niño normo-visual.

Llegado este punto podría cuestionarse *¿el entrenamiento musical por sí mismo puede modificar los aspectos neuroanatómicos y funcionales que ya se han descrito?*

Hay una creciente evidencia sobre los diversos factores que están involucrados en el modelado de la arquitectura cerebral, desde sus fases iniciales. Entre ellos se encuentra, por supuesto, la genética, factores medio-ambientales y las diversas experiencias. Muchos de los refinamientos en los procesos cerebrales de los adultos reflejan la arquitectura cerebral desarrollada a través de las experiencias tempranas.⁶⁹ Al respecto, este mismo estudio menciona que los refinamientos en los circuitos neurales que median los procesos sociales, emocionales y sensoriales están dirigidos por la experiencia, debido a que esta es esencial para que exista una regulación de las bases moleculares necesarias para la formación de sinapsis.

Los autores explican que los circuitos neurales de alto nivel que llevan a cabo funciones mentales complejas, dependen de la calidad de información que es proporcionada por los circuitos de bajo nivel, los cuales fueron modelados durante los primeros años de vida, a través de los diversos factores de los cuales ya se ha hecho mención. Las bases genéticas son esenciales para el desarrollo estructural, pero los detalles específicos son el resultado

⁶⁸ Bengtsson, S. Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development. *Nature Neurosci* 2005; 8: 1148-1150.

⁶⁹ Fox S, Levitt P, Nelson C. How the Timing and Quality of Early Experiences Influence the Development of Brain Architecture. *Child Dev*, 2010; 81 (1): 28-40.

de la actividad dependiente de los procesos influenciados por el ambiente.⁷⁰ Mientras que un entrenamiento (cualquiera que este sea) *modifica* en los adultos principalmente la arquitectura cerebral existente, en el caso de los niños, puede más bien, *influnciar* en la construcción de las redes neurales, lo que sugiere que los efectos de un entrenamiento pueden ser cualitativos o cuantitativos, en niños o adultos, según corresponda. La ganancia de un entrenamiento está limitada por el estado en que se encuentre el desarrollo cerebral (así como la edad y la experiencia temprana). Un niño no puede aprender y construir nuevas habilidades si los procesos más elementales no han madurado aún. Así, se sustenta la idea de que el aprendizaje temprano es esencial (aunque no suficiente) para el desarrollo de una óptima arquitectura cerebral.⁷¹

Se ha reportado que en niños de 4 a 6 años de edad hay una clara maduración de procesos cognitivos después de un entrenamiento dirigido a la ejecución de tareas de atención, en comparación con niños de la misma edad que no recibieron esta práctica.⁷² Específicamente, se observó que la actividad cerebral generada a partir del entrenamiento en los sujetos de 6 años, era muy parecida a la observada en adultos al ejecutar estas mismas tareas, comparada con los niños que no tomaron dicho entrenamiento. Por otro lado, se constató que en los pacientes de 4 años no hubo tal efecto, por lo que el entrenamiento podría estar limitado por la maduración cerebral para que ocurran cambios plásticos importantes, concluyendo así que el entrenamiento enfocado -en el caso de este estudio- en las funciones ejecutivas superiores, requiere de un estado cognitivo y de un desarrollo de las estructuras implicadas en ello.⁷³

Como se ha hecho mención, los estudios que se aplicaron a los sujetos participantes en este proyecto analiza, por un lado, la substancia blanca cerebral (DTI), y por otro, el número de píxeles activados en ciertas regiones cerebrales, al escuchar un estímulo musical específico. En los estudios revisados anteriormente se hace referencia a diferentes regiones activadas durante diversas tareas musicales, usando numerosas técnicas de imagenología. La

⁷⁰ Jolles D, Crone E. Training the developing brain: a neurocognitive perspective. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2012; 6 (76): 1-13.

⁷¹ Fox S, Levvit P, Nelson C. How the timing and Quality of Early Experiences Influence the Development of Brain Architecture. *Child Dev*, 2010; 81 (1): 28-40.

⁷² Rueda M, Rothbart M, Maccandliss B, Saccomanno L, Posner M. Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A*, 2005; 102: 14931-14936.

⁷³ Op. Cit.

investigación respecto a este tema es amplia y ofrece bastante conocimiento sobre el desarrollo cerebral en relación a la música. Sin embargo, los estudios con niños aplicando la técnica de tractografía no son tan frecuentes, de manera que, la investigación que presentamos puede contribuir a ampliar la comprensión de la manera en que se modifica la arquitectura cerebral como consecuencia de la práctica musical. Es por ello, que nos parece pertinente explicar de manera independiente qué es la materia blanca y su relación con el aprendizaje en general, y particularmente con la música.

2.3 SUBSTANCIA BLANCA: EL PROCESO DE MIELINIZACIÓN Y SU RELACIÓN EN EL APRENDIZAJE

La sustancia blanca está formada por millones de haces de axones o fibras nerviosas que conectan neuronas entre diferentes regiones cerebrales. Es llamada 'blanca' por el color que obtienen las fibras por la mielina, una lipoproteína que recubre al axón. Hay datos que indican que el desarrollo de la estructura de la sustancia blanca en los niños se correlaciona con un aumento en las habilidades motoras y de lectura, además de un incremento de las funciones cognitivas. Como ya se mencionó, Schmithorst⁷⁴ presenta imágenes de DTI que han mostrado una correlación entre el desarrollo de las fibras de dicha sustancia y las habilidades cognitivas en sujetos de los 5 a los 18 años. No todos los axones de la materia blanca están mielinizados, de hecho, son pocas las fibras que están completamente cubiertas de mielina. Por ejemplo, la proporción de axones mielinizados en el cuerpo calloso posterior es mayor que en el cuerpo calloso anterior.⁷⁵

La mielina es esencial para la transmisión efectiva y rápida de los impulsos eléctricos. Se ha observado que la velocidad de la conducción está determinada por el diámetro del axón y el grosor de la vaina de mielina; así, mientras mayores sean éstos, más rápida será la transmisión de los impulsos. La pérdida de mielina, o desmielinización, puede perturbar la conducción y, por lo tanto, provocar alteraciones importantes en las funciones sensoriales,

⁷⁴ Schmithorst VJ, Wilke M. Difference in White matter architecture between musicians and no musicians: a diffusion tensor imaging study. *Neurosci Lett* 2002; 321: 57-60.

⁷⁵ Walhovd K, Johansen-Berg H, Káradóttir R. Unraveling the secrets of white matter: Bridging the gap between cellular, animal and human imaging studies. *Neuroscience* 2014; 276: 2-13.

cognitivas y motrices. La conducción coordinada entre diferentes regiones corticales, por medio de los axones mielinizados, es crítica para las funciones cognitivas complejas. El proceso de mielinización en los humanos continúa hasta alrededor de la tercera década, siendo la corteza frontal la última en ser mielinizada.⁷⁶ No todas las regiones se mielinizan en las mismas etapas del desarrollo, las regiones sensoriales y motoras se desarrollan antes que las temporo-parietales, mientras que la corteza visual alcanza niveles altos de mielinización a los pocos meses de vida (Kinney citado en Miendiarzewska, 2014). La corteza auditiva no termina este proceso sino hasta los 4 o 5 años (Moore y Linthicum, 2007, citado en Miendiarzewska, 2014).⁷⁷ Geng⁷⁸ aporta más especificidad a estos datos mostrando que los tractos motores se desarrollan de manera posterior a los sensoriales, lo cual es consistente con el orden de la maduración funcional. Explica que la conectividad en regiones frontales obedece a una prolongada maduración, en comparación con otras regiones cerebrales. En su investigación, analiza que durante los primeros dos años de vida se observa un rápido desarrollo de la sustancia blanca, lo cual puede tener relación con el crecimiento y la maduración funcional de la sustancia gris, indicando un periodo de desarrollo neural crítico.

Una hipótesis del porqué el cerebro humano continúa mielinizándose durante un largo periodo, postula que la experiencia puede dirigir el desarrollo de los circuitos neurales en el cerebro para optimizar las funciones cerebrales, después de la etapa de la niñez. Short *et al.* realizaron un estudio para determinar diferencias en la microestructura de la materia blanca en niños en relación con la capacidad de la memoria de trabajo.⁷⁹ Encontraron que los mejores resultados en las pruebas que midieron esta variable estaban asociados de manera significativa con los altos niveles de anisotropía fraccional (FA). Esto sugiere que los niños con un mayor potencial hacia este tipo de memoria, tienen una maduración más avanzada de la materia blanca, lo cual se caracteriza por un incremento en el proceso de

⁷⁶ Fields D. Change in the brain's white matter: the role of the brain's white matter in active learning and memory may be underestimated. *Science* 2010; 330(6005):768-769.

⁷⁷ Miendiarzewska E, Trost W. How musical training affects cognitive development: rhythm, reward and other modulating variables. *Frontiers in neuroscience* 2014; 7(279): 1-18.

⁷⁸ Geng X, Gouttard S, Sharma A, Gu H, Styner M, Lin W, Gerig G, Gilmore J. Quantitative Tract-Based White Matter Development from Birth to Age Two Years. *Neuroimage* 2012; 61(3): 542-557.

⁷⁹ Short S, Elison J, Davis B, Styner M, Gu H, Connelly M, Maltbie E, Woolson S, Lin W, Gerig G, Steven J, Gilmore J. Associations Between White Matter Microstructure and Infants Working Memory. *Neuroimage* 2013; 1 (64): 1-27.

mielinización.⁸⁰ Dentro de este mismo estudio, se observaron también a sujetos de entre 9 y 16 años, nacidos en tiempo y algunos otros prematuros. La sustancia blanca se encontró alterada en éstos últimos, lo cual podría explicarse quizás a que dicho mecanismo se desarrolla a partir de la semana 24 a 32 de la gestación.

La sustancia blanca está conformada por células gliales únicas para ella, así como oligodendritos que conforman la mayor parte de la sustancia.⁸¹ Estas células de oligodendroglia están relacionadas con el proceso de mielinización en el sistema nervioso central. Los potenciales de acción (o impulsos eléctricos que viajan a través de la membrana celular) pueden estimular el desarrollo de este tipo de células y, por tanto, la mielinización. Este proceso sobre los tractos ocurre de manera central para avanzar periféricamente, comenzando desde el tronco cerebral y el tálamo, hasta las áreas sensoriales primarias, seguidas por las regiones corticales.⁸²

Algunos estudios⁸³ muestran que los oligodendrocitos, en cerebros de ratones adultos, se formaron no durante la etapa de desarrollo, sino después de la madurez sexual, lo que indica que hay una fuente de estas células en los cerebros de adultos que está disponibles para reparar o participar en procesos de aprendizaje. De igual manera, se han reportado incrementos en la mielinización del sistema nervioso debido a una extensa práctica del piano, mientras que otros experimentos en ratas han mostrado altos valores en la mielinización del cuerpo caloso, cuando estos animales están expuestos a ambientes enriquecidos por interacciones sociales y estímulos cognitivos. Hay datos que sugieren un incremento del 27% al 33% en el número de oligodendrocitos en la corteza occipital, y un incremento en el número de axones en el cuerpo caloso de ratas jóvenes que estuvieron expuestas a un ambiente enriquecido. Esto mismo se observó en monos *Rhesus*, en los que

⁸⁰ Op. Cit.

⁸¹ Matute C, Ransom B. Roles of white matter in central nervous system pathophysiology. *ASN Neuro*. 2012; 4 (2): 89-101.

⁸² O'Muircheartaigh J, C Dean III D, Ginestet C, Walker L, Waskiewicz N, Lehman K, Dirks H, Piryatinsky I, CL Deoni S. White matter development and early cognition in babies and toddlers. *Hum Brain Mapp* 2014; 35 (9): 4475-4487.

⁸³ Fields D. Myelination: An overlooked mechanism of synaptic plasticity? *Neuroscientist* 2005; 11 (6): 528-531.

se determinó un aumento de la sustancia blanca del cuerpo calloso, lo cual se reflejó en un mejor desempeño cognitivo al realizar pruebas de memoria y aprendizaje.^{84 85}

Bunge *et. al.* reportaron que las diferencias en la cognición durante la infancia, se asocian a variaciones en la estructura y la función cerebral.⁸⁶ Los autores comentan que la maduración de los tractos de la sustancia blanca participa de manera importante en el desarrollo de las funciones cognitivas, entre ellas, el propio control cognitivo. El control se puede definir como la habilidad de estar atentos, suprimir las distracciones, regir la conducta para lograr objetivos específicos, formular decisiones y controlar las acciones. Dicho control es primordial para lograr un aprendizaje exitoso durante la infancia.

Los autores de esta investigación⁸⁷ se enfocaron en los tractos siguientes: el cuerpo calloso, la corona radiada, el fascículo longitudinal superior, la radiación talámica posterior y los pedúnculos cerebrales. Los resultados correspondientes a este estudio concluyen que los niños con una mayor integridad de la sustancia blanca en los tractos especificados, son más precisos al momento de ejecutar tareas para medir el control cognitivo, la atención selectiva y la supresión de distracciones. Se sugiere que la radiación talámica posterior, la cual incluye axones que conectan la corteza cerebral, los ganglios basales, el tálamo y los pedúnculos cerebrales, los cuales poseen fibras que transmiten información motriz desde y en el cerebro hacia el resto del cuerpo, participan en conjunto para el control cognitivo y el control de las distracciones. La microestructura de la sustancia blanca del circuito conformado por las regiones frontal, parietal, estriatal y motora se asocia con la ejecución de la atención selectiva, la inhibición de las distracciones y la permanencia de la información en la memoria de trabajo.⁸⁸

Para concluir, los autores refieren el hecho de que el control de las habilidades en niños de 7 a 9 años está relacionado con los altos valores de anisotropía fraccional en la corona radiada, la radiación talámica posterior, y los pedúnculos cerebrales, expresamente, cuando

⁸⁴ Fields D. Imaging learning: the search for a memory trace. *Neuroscientist* 2011; 17 (2): 185-196.

⁸⁵ Afifi A, Bergman R. *Neuroanatomía funcional. Texto y atlas.* Mc Graw Hill. 2a edición: México, 2006.

⁸⁶ Bunge S, Crone E. Neural correlates of the development of cognitive control. En J. Rumsey, & M. Ernst (Eds.), *Neuroimaging in developmental clinical neuroscience* (pp. 27-37). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2009.

⁸⁷ Chaddock Heyman L, Erickson K, Voss M, Powers J, Knecht A, Pontifex M, Drollette E, Moore D, Raine L, Scudder M, Hilman C, Kramer A. White matter microstructure is associated with cognitive control in children. *Biological Psychology*, 2013; 94: 109-115.

⁸⁸ Op. cit.

hay un incremento en el control de la atención y al requerir el control de las distracciones, lo cual sugiere que estos tractos compactos y con fibras alineadas son importantes en el control cognitivo. De la misma manera, las estimaciones de la densidad de la membrana de los axones, particularmente en la radiación talámica posterior, así como el diámetro de los axones, en este caso del fascículo longitudinal superior, pueden tener un desempeño importante en la habilidad de los niños para prestar atención durante actividades cognitivas de mayor y menor demanda. Ya se ha mencionado que el calibre de los axones y el espesor de las vainas de mielina determinan la velocidad de conducción, así que la importancia del estudio anterior reside en que la mejor ejecución en las tareas cognitivas pueda deberse a que hay una conducción más rápida entre las regiones involucradas en la atención y el control motor.

Las funciones cognitivas complejas no se localizan en una sola área cortical, sino que hay varias regiones, algunas más lejanas que otras, involucradas en dichas funciones, por lo que se requiere de conexiones eficaces para transmitir la información hacia esas áreas.

El tiempo para que ocurran cambios en los tractos de sustancia blanca, esto es, que ocurran fenómenos plásticos que se puedan medir de alguna manera, ha sido controversial. Un estudio de Posner⁸⁹ muestra que puede haber cambios en la sustancia blanca con apenas unas horas de meditación. Dentro de dicho estudio menciona las observaciones de Liu⁹⁰ hechas en ratones, las cuales mostraron cambios en la cromatina, así como una disminución en el grosor de las vainas de mielina, después de un corto periodo de aislamiento (8 semanas), lo cual no produjo cambios en su comportamiento. Esto llevó a la conclusión de que la mielinización de la corteza prefrontal en los ratones, actúa como un tipo de plasticidad que persiste hasta la adultez.

Volviendo a los datos de Posner, se manifestó que después de dos semanas de ejercitar la meditación en los sujetos participantes del estudio, había cambios en la difusión axial (AD-axial diffusivity, por sus siglas en inglés), la cual está asociada con la densidad axonal, y que después de cuatro semanas se encontraron modificaciones en los valores de la difusión axial

⁸⁹ Posner M, Tang Y, Lynch G. Mechanisms of white matter change induced by meditation training. *Front Psychol* 2014; 5: 1220.

⁹⁰ Liu J, Dietz K, M DeLoyht J, Pedre X, Kelkar D, Kaur J, Vialou V, Kay Lobo M, Dietz D, Nestler E, Dupree J, Casaccia P. Impaired adult myelination in the prefrontal cortex of socially isolated mice. *Nat Neurosci* 2012; 15 (12): 1621-1623.

y radial, lo que sugiere que además de variar la densidad de los axones, también hubo cambios en la mielinización. Se reportó un aumento en la anisotropía fraccional, principalmente en la corteza cingulada anterior, la cual tiene participación en procesos de atención y emocionales.

2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS TRACTOS DE LA SUBSTANCIA BLANCA

Durante el desarrollo posnatal de los seres humanos hay una rápida expansión de la sustancia gris y blanca cerebral, la cual conlleva una eficaz coordinación entre ambos procesos y que establecen las bases de diferentes funciones cognitivas y motrices.⁹¹ Schmahmann⁹² explica que a pesar de que hay cantidad de tractos en el cerebro, estos se organizan bajo un esquema, según las áreas que conectan. Es importante decir que muchos tractos comparten orígenes y destinos corticales, esto es, desde dónde se origina y hacia dónde se dirigen.

Cada uno de estos paquetes de fibras son llamados haces o tractos, divididos a su vez en:

- *Fibras de asociación.* Son fibras largas o cortas que unen diferentes áreas corticales, ya sean cercanas o lejanas, dentro del mismo hemisferio. Su importancia radica en el interdominio de comunicación entre las áreas corticales, las cuales favorecen diferentes conductas y ameritan énfasis particulares (Schmahmann, 2008). En esta clasificación se encuentran: el fascículo longitudinal superior, el fascículo arqueado, el fascículo uncinado, el fascículo longitudinal inferior, y el tracto cingulado, así como también el fascículo fronto-occipital.
- *Fibras estriatales.* Son fibras que van al núcleo caudado, putamen y el claustró, principalmente al fascículo de Muratoff y a la cápsula externa.
- *Fibras de proyección.* Conectan regiones profundas del sistema nervioso central con la corteza cerebral, entre ellas, el cerebelo, el tronco cerebral, el diencefalo y la

⁹¹ Muircheartaigh J, Dean III D, Ginestet C, Walker L, Waskiewicz N, Lehman K, Dirks H, Piryatinsky I, Deoni S. White Matter Development and Early Cognition in Babies and Toddlers. *Human Brain Mapping*; 2014, 35:4475-4487.

⁹² Schmahmann J, Smith E, Eichler F, Filley C. Cerebral White Matter: Neuroanatomy, Clinical Neurology and Neurobehavioral Correlates. *Ann NY Acad Sci*. 2008; 1142:266-309.

médula. Dentro de estas fibras se clasifican la cápsula interna, el estrato sagital y los pedúnculos talámicos.

- *Fibras comisurales.* Conectan ambos hemisferios de manera transversal, de manera que pueden corresponderse o no, a su parte contralateral. El cuerpo caloso se clasifica como la mayor fibra comisural.

Una vez establecidos los conceptos de sustancia blanca y los estudios que muestran la importancia de ésta con los procesos cognitivos, se explicará cómo es que se encuentran afectados los tractos en las personas con discapacidad visual. Es importante primero el conocer o elucidar cómo están constituidos los tractos en personas regulares, esto es, sin ningún tipo de patología o discapacidad, para tener un mejor entendimiento en el momento en que este conocimiento se transfiera hacia otros dominios.

2.4 SUBSTANCIA BLANCA Y CEGUERA

Algunos estudios proponen que la experiencia de la ceguera puede alterar la organización estructural en las sustancias gris y blanca durante un periodo crítico del neurodesarrollo, pero también se sugiere que es en esta misma etapa cuando los mecanismos que hacen posible la plasticidad neuronal tienen mayor presencia. Investigaciones referentes a la sustancia blanca están orientadas a observar cambios o alteraciones de estos tractos en diferentes regiones cerebrales en las personas con una privación sensorial, como es el caso de la vista. Las áreas que han mostrado un cambio significativo son, generalmente, las regiones involucradas con el sistema motor. La explicación de porqué se da esta plasticidad puede ser que, debido a la ausencia de la vista, las personas ciegas potencian en gran medida los receptores táctiles, entre otros, para muchas de las actividades que realizan. Por ejemplo, leer en sistema braille requiere de una gran sensibilidad en las yemas de los dedos para discriminar los puntos, los que en general, una persona normo-visual no puede diferenciar, pues el espacio entre los puntos es muy reducido.

Durante el desarrollo del cerebro, particularmente durante el tercer mes de gestación, la sustancia blanca puede ser altamente vulnerable a sufrir algún daño, exponiendo a las

fibras tálamo-corticales, incluidas las radiaciones ópticas, a sufrir alguna lesión durante este período.

Algunos datos sugieren que pueden surgir modificaciones en las vías genículo-estriadas, apoyando a una reorganización funcional en el sistema visual. Se ha informado del caso de un niño con daño arterial izquierdo, comprometiendo a las radiaciones ópticas. Cuando el niño tenía 3 meses de edad, se hicieron estudios de fMRI y DTI. A través de la fMRI sólo se pudo observar activación en el hemisferio que no tenía daño, mientras que la DTI no mostró la imagen de las radiaciones ópticas del lado lesionado. Veinte meses después se aplicó el mismo protocolo, el que mostró, esta vez, una clara activación a través de la fMRI, la que estaba respaldada por modificaciones estructurales observables por medio de tractografías. Estos datos apoyan la existencia de un proceso de reorganización a nivel de las vías tálamo-corticales, el cual es capaz de restituir, al menos de manera parcial, las conexiones funcionales entre el cuerpo geniculado lateral y la corteza occipital.⁹³

En 2009, Shu *et. al.*⁹⁴ analizaron, por medio de estudios de DTI, a personas ciegas que perdieron la vista desde el nacimiento o antes de su primer año, y personas sin esta discapacidad. Se comparó la eficiencia global de las fibras, el grado de conectividad y la trayectoria de longitud, así como la longitud misma de los tractos. Los sujetos ciegos mostraron patrones globales de conexiones interrumpidas, así como poco grado de conectividad y baja eficiencia global, aunque sí había un aumento en la longitud de la trayectoria de las fibras. La baja eficiencia global y la longitud indican que las interacciones y la transmisión de información entre las diferentes regiones corticales fueron lentas y menos eficaces.

Las regiones cerebrales que mostraron mayores cambios topológicos están localizadas, principalmente, en la corteza visual. Cuando se compararon ambos grupos (ciegos y normo-visuales) no hubo diferencias significativas en cuanto a la longitud de la fibra, lo que sugiere que el nivel de eficiencia no está reducido por sí mismo, sino que el número de conexiones corticales disminuyó o se perdió debido a la ceguera temprana. Esto es, que los sujetos

⁹³ Guzzeta A, D'Acunto G, Rose S, Tinelli F, Boyd R, Cioni G. Plasticity of the visual system after early brain damage. *Dev Med Child Neurol* 2010; 52 (10): 891-900.

⁹⁴ Shu N, Liu Y, Li J, Yu C, Jiang T. Altered anatomical network in early blindness revealed by diffusion tensor tractography. *PLoS One* 2009; 4 (9) e7228.

ciegos pueden mostrar reducción de sus conexiones corticales a causa de un desarrollo anormal en la sustancia blanca, por la privación del sentido de la vista.

Las regiones corticales que muestran diferencias significativas en cuanto a un decreciente grado de eficiencia son los giros occipitales medio y superior, y el cúneo, lo que sugiere que estas áreas tienen conexiones reducidas en los ciegos en comparación con los sujetos normo-visuales. También se encontró una reducida FA en algunos tractos visuales, como la radiación óptica y el fascículo fronto-occipital inferior, el cual conecta el lóbulo frontal inferior con el lóbulo occipital. Al comparar estas fibras, se encontró que los sujetos ciegos mostraban una baja FA en estos tractos, lo que sugiere una interrupción en la anatomía de las fibras.

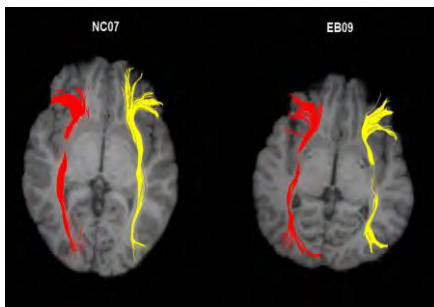


Figura 3. Representación del fascículo fronto-occipital inferior en un sujeto normal (NC07) y un sujeto ciego (EB09). Las fibras se interrumpen en el sujeto ciego.⁹⁵

En cambio, en estos mismos sujetos se observó que el giro precentral, que contiene el área motora, tiene más conexiones, lo que se traduce en un mejor desempeño en la transferencia de información entre estos tractos.

⁹⁵ Shu N, Liu Y, Li J, Yu C, Jiang T. Altered anatomical network in early blindness revealed by diffusion tensor tractography. PLoS One 2009; 4 (9) e7228

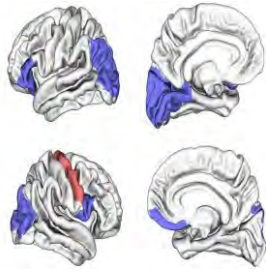


Figura 4. Regiones corticales con alteraciones topológicas en sujetos ciegos tempranos. Las regiones en azul muestran un escaso grado de conectividad y eficiencia global, pero un incremento en la longitud. Las áreas rojas muestran un incremento en la conectividad y la eficiencia global. Arriba se muestra el hemisferio izquierdo y abajo el hemisferio derecho. Tomada de Shu *et. al.* 2009.⁹⁶

Los autores de este estudio explican que, en ausencia de la experiencia visual, las personas ciegas necesitan más práctica para desempeñar ciertas actividades, lo que hace que aumente su habilidad somato-sensorial, como es el caso de la exploración táctil de objetos, el leer en braille o el tocar un instrumento (en el caso del estudio, algunos sujetos tocaban guitarra o piano). Dichas capacidades motrices parecen modificar el número de axones y el diámetro y la mielinización de los tractos, especialmente durante un periodo crítico del neurodesarrollo, lo cual produce un incremento significativo de la sustancia blanca en el sistema sensorio-motor en los sujetos ciegos, dándose así un proceso de plasticidad en las áreas motoras a partir de la privación de la vista.

Coincidiendo con estos resultados, Noppeney *et. al.*⁹⁷ observaron por medio de MRI, que la privación de la vista en edades tempranas induce cambios en la sustancia blanca de los sujetos ciegos, quienes incorporan áreas occipitales cuando procesan señales táctiles y auditivas o al ejecutar tareas cognitivas complejas. Al igual que en el estudio anterior, hubo un incremento en el tamaño de los tractos de la sustancia blanca asociados con las cortezas motora y somato-sensorial primaria. Dicha plasticidad parece interactuar mayormente en los mecanismos del neurodesarrollo cuando la privación de la vista ha ocurrido desde el nacimiento o antes de los dos años de edad.

Además de los cambios registrados en la neuroanatomía de la sustancia blanca, hay modificaciones en otras áreas corticales a partir de la privación sensorial, asociadas con el periodo crítico del neurodesarrollo, las que tienen una importante relevancia para

⁹⁶ Op. Cit.

⁹⁷ Noppeney U, Friston K, Ashburner J, Frackowiak R, Price C. Early visual deprivation induces structural plasticity in gray and white matter. *Curr Biol* 2005; 15 (13): R488-90

comprender la funcionalidad de la plasticidad en las personas ciegas. En un estudio realizado por Bedny y colaboradores,⁹⁸ se observó el complejo temporal medio (MT/MST) el cual está relacionado con la percepción del movimiento a través de la vista. En este estudio se compararon tres grupos: ciegos congénitos, ciegos tardíos -que perdieron la vista alrededor de los 9 años- y personas con vista normal. Adicionalmente, se comparó el grupo de ciegos congénitos con una persona que perdió la vista antes de los dos años de edad. Los resultados mostraron que, en el grupo de normo-visuales y de ciegos tardíos, el MT/MST se activa al percibir movimiento, lo cual no ocurre en el grupo de ciegos congénitos. Aunque en este último caso, dicha región sí se activa por la audición de tonos, lo que podría corresponder a una respuesta multimodal en esta región. El sujeto que perdió la vista antes de los 2 años tampoco mostró activación alguna en respuesta a los tonos, pero sí al movimiento.

Al comparar las regiones que se activaban en respuesta al sonido que inducía al movimiento, se observó que en los sujetos ciegos congénitos había una activación en el MS/MST derecho, el cual comprende los giros laterales occipitales, medios temporales y superiores temporales. Por el contrario, en el grupo de normo-visuales se activó la corteza bilateral frontal, que involucra el giro frontal medio e inferior, el giro precentral y la ínsula, además del lóbulo parietal inferior derecho, el cerebelo y el putamen izquierdo. Este estudio confirma que el MT/MST responde a los tonos en las personas ciegas congénitas; que las regiones identificadas se superponen con áreas visuales y que, el MT/MST no se activa al escuchar los tonos en los participantes normo-visuales.

Dichos resultados pueden tener una explicación a causa de la edad en la que se perdió la vista. Parece ser que la privación de ésta, posterior al nacimiento determina si el MT/MST se vuelve multimodal o no. El perder la vista durante alguna etapa de la niñez implica que la persona ya adquirió cierta experiencia visual por lo que se mantiene o domina una respuesta 'visual' en los datos de este estudio. En ausencia de estímulos visuales, las estructuras no visuales influyen sobre la actividad del MT/MST, respondiendo así a estímulos provenientes de otras modalidades sensoriales. Dentro de este estudio, también se hallaron respuestas

⁹⁸ Bedny M, Konkie T, Pelphrey K, Saxe R, Pascual-Leone A. Sensitive period for a multi-modal response in human visual motion area MT/MST. *Curr Biol* 2010; 20 (21): 1900-1906.

asociadas a cambios en la conectividad a áreas pre-frontales. Así, hay mecanismos plásticos involucrados en la reorganización de vías corticales en las personas ciegas y, como se ha descrito en repetidas ocasiones, esto se puede deber a la privación sensorial, formándose nuevos canales de comunicación compensatorios a la pérdida, en este caso, de la vista.

Klinge *et. al.*⁹⁹ investigaron la existencia de posibles vías de información auditiva transferidas a la corteza visual primaria en sujetos ciegos de nacimiento. En este estudio, se observó un aumento en las conexiones de la corteza auditiva primaria hacia la corteza visual primaria en ambos hemisferios. Durante las actividades auditivas de discriminación, hubo una activación significativa en los núcleos geniculados mediales bilaterales, la corteza auditiva primaria y la corteza visual primaria. Dichos datos indican que, durante una estimulación auditiva, la corteza visual de los participantes ciegos incorporó conexiones corticales procedentes de la corteza visual primaria. Estos resultados respaldan la idea de que puede haber conexiones preexistentes las cuales, a través de un reforzamiento, pueden inducir cambios estructurales permanentes, como nuevas arborizaciones dendríticas o alteraciones en el podado de redes neurales.¹⁰⁰

Por su parte, Jiang¹⁰¹ observó por medio de MRI que la corteza visual de las personas ciegas de nacimiento tiene un mayor grosor, comparada con la de ciegos que perdieron la vista durante un periodo posterior. Los autores concluyen que esto se debe a que el ciego temprano o congénito carece de entradas de estímulos visuales, por lo que el proceso de podado se interrumpe dejando abundantes conexiones sinápticas, y resultando este incremento en un aumentado grosor cortical de la corteza visual en las personas ciegas.

También se ha expuesto la posibilidad de que otros factores influyan en los mecanismos plásticos del cerebro, aparte de la privación sensorial. Uno de estos factores es la manipulación de un ambiente enriquecido, como ya se ha mencionado, se define

⁹⁹ Klinge C, Eippert F, Röder B, Bücher. Corticocortical connections mediate primary visual cortex responses to auditory stimulation in the blind. *J Neurosci* 2010; 30 (38): 12798-12805.

¹⁰⁰ Pascual-Leone, Amedi A, Fregni F, Merabet L. The plastic human brain cortex. *Ann Rev Neurosci* 2005; 28: 377-401.

¹⁰¹ Jiang J, Zhu W, Shi F, Liu Y, Li J, Qin W, Li K, Yu C, Jiang T. Thick visual cortex in the early blind. *J Neurosci* 2009; 29: 2250-2211.

básicamente, como una combinación de diferentes estímulos, los cuales, de manera aislada no producen efecto alguno, pero juntos pueden desencadenar cambios en el sujeto.

Un ambiente enriquecido incrementa la estimulación de procesos sensoriales, cognitivos y motores, así como la activación de la plasticidad neural en todas las áreas corticales. Bengoetxea¹⁰² experimentó con ratas privadas de la vista para determinar si un ambiente enriquecido (AE) podía modificar de algún modo el neurodesarrollo de estos animales, y concluyó que el AE puede reactivar la plasticidad cortical en ausencia de la vista. Se genera, así, un tipo de plasticidad denominada plasticidad cruzada, la cual lleva a una regulación en los sentidos que no sufrieron cambios, y los cuales ocupan el espacio cortical del sentido que se perdió.

Observaciones en personas con ceguera congénita han mostrado, a través de un incremento en las señales BOLD, una activación en la corteza occipital como respuesta a estímulos sensoriales o auditivos. Así, la plasticidad cruzada ofrece una importante oportunidad para desarrollar mecanismos de sustitución sensorial, los cuales proveen a las personas ciegas de información a través de sus otros sentidos.

Otras revisiones que describen las alteraciones en la neuroanatomía de las personas con ceguera congénita mencionan estructuras que muestran reducciones, especialmente, en áreas visuales involucradas en el reconocimiento de objetos, tales como el giro temporal inferior y la corteza orbito-lateral. También se han encontrado reducciones en el hipocampo, el sistema motor extra-piramidal y la corteza prefrontal. La sustancia blanca presenta atrofia en los tractos y el quiasma óptico, las radiaciones ópticas, el esplenio del cuerpo calloso y el fascículo longitudinal inferior, una vía que conecta la corteza occipital con el lóbulo temporal. Por el contrario, se puede observar un aumento en el grosor del cúneo, debido probablemente a la reducción del podado durante la fase de maduración de la corteza.¹⁰³

¹⁰² Bengoetxea H, Ortuzar N, Bulnes S, Rico-Barrio I, Lafuente J, Argandoña E. Enriched and deprived sensory experience induces structural changes and rewires connectivity during the postnatal development of the brain. *Neural Plast* 2012; ID 305693, 10 pages, doi: 10.1155/2012/305693

¹⁰³ http://inf.ku.dk/english/research/labs/BRAINlab/research/kupers/research/blind_brain/3/

El conocimiento anatómico y funcional del cerebro en relación con la experticia musical es crucial para entender los procesos de aprendizaje. Colwell¹⁰⁴ destaca que, si hay representaciones musicales asociadas a redes neurales, entonces el aprendizaje debe estar relacionado a situaciones fisiológicas en el cerebro, tales como la actividad de las neuronas, la conectividad entre ellas, la plasticidad neuronal, el establecimiento, el crecimiento y la diferenciación de las representaciones musicales con respecto a su localización, extensión e intensidad en ambos hemisferios.

El aprendizaje está asociado con el crecimiento sináptico, de tal manera que la densidad sináptica, es decir, el número de sinapsis por neurona o por unidad de volumen del tejido cortical, cambia a lo largo de la vida y define los límites de la capacidad de procesamiento.¹⁰⁵ Huttenlocher¹⁰⁶ comparó el desarrollo en la corteza auditiva y la prefrontal. Encontró que la densidad sináptica se incrementa más rápidamente en el giro de Heschl de la corteza auditiva, ocurriendo alrededor de los 3 meses de edad, en comparación con el giro medio frontal, en el cual, la máxima densidad sináptica no ocurre sino hasta los 15 meses de edad. Este crecimiento sináptico ocurre al mismo tiempo que el desarrollo dendrítico y axónico y que la mielinización de la sustancia blanca subcortical. Este mismo autor menciona que la sobreproducción de conexiones neurales durante la infancia puede ser vista como un sustrato anatómico de la plasticidad neural, lo que tendría un enorme impacto para el aprendizaje en edades tempranas.¹⁰⁷

Con base en estudios previos y los que se deriven a partir de ellos, el conocimiento acerca de la funcionalidad cortical puede ser de utilidad para explicar los procesos neurobiológicos involucrados en el aprendizaje musical. En el ámbito de la educación musical, estos estudios pueden indicar nuevas maneras acerca de cómo enseñar, y así desarrollar procesos mentales, como la memoria, la percepción y, en general, la cognición, de forma más efectiva.¹⁰⁸

¹⁰⁴ Colwell. MENC Handbook of musical cognition and development. Oxford University Press: New York, 2006.

¹⁰⁵ Op. Cit.

¹⁰⁶ Huttenlocher PR, Dabholkar AS. Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. J Comp Neurol 1997; 387(2):167-78.

¹⁰⁷ Huttenlocher PR. Morphometric study of human cerebral cortex development. Neuropsychologia, 1990; 28: 517-527.

¹⁰⁸ Op. Cit.

Dietrich (2015)¹⁰⁹ compara personas ciegas tardías, personas con ceguera temprana y personas normo-visuales. Se utilizaron imágenes tractográficas para observar si había alteraciones, especialmente en la anisotropía fraccional (FA) en los grupos de estudio mencionados. Se concluyó que los sujetos ciegos tardíos (LB, late blind) mostraban una FA significativamente reducida en las radiaciones ópticas del hemisferio izquierdo, lo cual corresponde al fascículo longitudinal inferior, así como al fascículo fronto-occipital. De la misma manera, un área adyacente al tálamo dorsal del hemisferio derecho, que incorpora fibras de la radiación talámica anterior, así como los tractos cortico-espinales a nivel del mesencéfalo en sujetos con ceguera tardía, también muestran valores reducidos de FA. Se observó que la reducción de anisotropía fraccional es más pronunciada en las personas que perdieron la vista de manera tardía, en comparación con los sujetos ciegos tempranos, aunque ambos grupos de estudio parecen compartir el mismo patrón de cambios en la sustancia blanca, en cuanto a la reducción de FA. Se sugiere que los bajos valores de anisotropía fraccional indican una pérdida de mielina o bien, de organización axonal,¹¹⁰ aunque también se ha especulado que la reducción en estos valores pueda deberse a decrecimientos del diámetro de los axones.¹¹¹

En la sección posterior, se presenta un breve resumen que reúne algunos de los estudios que analizan los posibles cambios en relación a la sustancia blanca de personas con estudios musicales. Algunos de los autores ya han sido mencionados en secciones anteriores, pero nos parece importante reunir sólo los referentes a tractografías en este apartado. Cabe mencionar, una vez más, que dichos estudios son aplicados a adultos, y que en su mayoría se tratan de diseños transversales. A pesar de ello, el aporte que ofrecen es sumamente importante al proporcionar conocimiento sólido sobre los cambios en determinados tractos, vinculándolos a la instrucción musical.

¹⁰⁹ Dietrich S, Hertrich I, Kumar V, Ackermann V. Experience-Related Structural Changes of Degenerated Occipital White Matter in Late Blind Humans-A Diffusion Tensor Imaging Stud. PLOS ONE, 2015; 10 (4): 1-19

¹¹⁰ Op. Cit.

¹¹¹ Walhovd K, Johansen-Berg H, Káradóttir R. Unraveling the secrets of white matter: Bridging the gap between cellular, animal and human imagining studies. Neuroscience 2014; 276: 2-13.

2.5 MÚSICA Y SUBSTANCIA BLANCA

Como ya se ha expuesto de manera detallada, la música modula cambios estructurales y funcionales en el cerebro, lo cual favorece procesos cognitivos, motores, sensoriales, afectivos e, incluso, sociales. La maduración de los tractos y las conexiones entre áreas motoras, auditivas y de otras modalidades, permiten el desarrollo de funciones cognitivas durante el transcurso de la vida, incluyendo las habilidades musicales.

En años recientes, y gracias a nuevas técnicas que permiten ver *in vivo* la materia blanca del cerebro, se han podido observar cambios en la sustancia blanca inducidos por una adecuada instrucción musical. Específicamente, los tractos pertenecientes a conexiones motrices son más estructurados, en cuanto a su alineación e integridad, en personas que estudian música y que iniciaron su entrenamiento a una corta edad. Aunado a esto, las diferencias en la organización de los tractos también parecen estar influenciadas por el número de horas que se practica.

Así, hay investigaciones que refieren cambios en los tractos del esplenio del cuerpo caloso y el istmo en pianistas que comenzaron sus estudios desde la niñez.¹¹² De igual manera, otro estudio con pianistas ha mostrado un incremento en las fibras del tracto piramidal debido, posiblemente, a que este tipo de instrumentistas realizan movimientos más rápidos, complejos y precisos con ambas manos. También se puede observar, a través de DTI, una mayor mielinización en los tractos del limbo posterior de la cápsula interna. Una de las hipótesis más recurridas para explicar estas alteraciones en la vaina de mielina, es que puede haber una correlación entre el número de horas de práctica del instrumento y la edad en la que se están tomando las clases de música (ver figura 5).

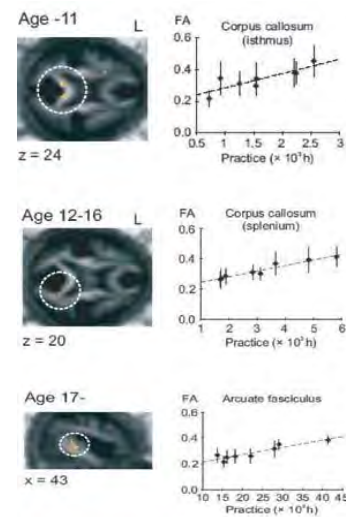
Yakovlev y Lecours¹¹³ realizaron una descripción que relaciona la edad en que se inicia la práctica musical y las áreas que exhiben mayor mielinización. De acuerdo a sus datos, si la práctica de piano comienza en la niñez, hay un incremento de la mielinización en el limbo posterior de la cápsula interna bilateral, el cuerpo caloso y las fibras del lóbulo frontal. Estas

¹¹² Op. Cit.

¹¹³ Yakovlev, PI, Lecours, A-R. The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain. Blackwell Scientific: Oxford, UK: 1967. pp. 3-70.

regiones llevan información sensorio-motora para el movimiento independiente de los dedos y tienen conexiones entre las regiones auditivas y la corteza premotora para la coordinación de movimientos bimanuales.

Figura 5. Imágenes obtenidas por tensor de difusión de MRI. Se muestra que diferentes tractos de la materia blanca en el cerebro se desarrollan como consecuencia de la práctica del piano en diferentes edades, y que el incremento es proporcional al número de horas que se practique.¹¹⁴



Si esta práctica comienza en la adolescencia, el aumento de mielina se verá reflejado en las fibras interhemisféricas de las cortezas temporal superior y occipital, las que procesan los estímulos auditivos y visuales. Por otro lado, si la práctica comienza en una edad adulta, la mielinización será mayor en el fascículo arqueado, el que conecta a las regiones temporales con las frontales. Las fibras de asociación del prosencéfalo también se incrementan si la práctica comienza en esta edad y continúan su maduración hasta el final de la tercera década de vida. En el caso de las personas con amusia congénita (la incapacidad para percibir tonos), se ha determinado, por medio de estudios de tractografía, que hay una disrupción en la conectividad en el fascículo arqueado (AF) (para evitar la confusión con *fractional anisotropy*), un haz de fibras que conecta las áreas de Broca y de Wernicke y que, se piensa, está relacionado con funciones del lenguaje. Este estudio prueba que esta alteración en la conectividad del AF afecta la percepción del sonido en otras áreas que no sólo competen al lenguaje sino también a otro tipo de sonidos.¹¹⁵

¹¹⁴ Fields D. Myelinization: An overlooked mechanism of synaptic plasticity? *Neuroscientist* 2005; 11 (6): 528-531.

¹¹⁵ Loui P, Schlaug G. Investigating musical disorders with diffusion tensor imaging. A comparison of imaging parameters. *Ann NY Acad Sci* 2009; 1169: 121-125.

Schmithorst y Wilke (2002)¹¹⁶ hallaron mayor densidad en las fibras de la región callosa anterior, resultante como hemos dicho, quizá, de la necesidad de una actividad de ambas manos al tocar un instrumento. En este mismo estudio, se observó un menor uso de los tractos corticoespinales, posiblemente debido a la automatización de las funciones. Aprender a tocar un instrumento implica la habilidad de dominar movimientos finos y una compleja coordinación. Esta habilidad involucra, además, aprender la técnica indicada para cada instrumento. Al principio, se requiere de una serie de repeticiones hasta lograr perfeccionar esta destreza, pero, a lo largo del entrenamiento musical, estos movimientos se vuelven casi automáticos. Anatómicamente, el cerebelo y el estriado están activos durante todo este proceso, especialmente porque están implicados en la memoria a largo plazo para la ejecución posterior de estos movimientos, lo que, según Schmithorst,¹¹⁷ llevaría a cambios en la anatomía de la sustancia blanca. A través de imágenes de tractografía, se ha visto un aumento en la anisotropía fraccional de los tractos de dichos núcleos, causada por los procesos cognitivos implicados en el entrenamiento musical. En cambio, hay una disminución en la FA en tractos de la corona radiada y la cápsula interna, debido, quizás, a la automatización de los movimientos.

Se ha comprobado que el cuerpo calloso de los músicos es mayor comparado con el de los que no son músicos. Posiblemente, esto sea porque se requiera el trabajo de ambos hemisferios por la complejidad y para la integración de los procesos que se requieren para aprender y ejecutar música, además de diferentes habilidades musicales, como tocar un instrumento, actividades que comprenden el uso de ambas manos, las cuales generalmente hacen acciones diferentes de manera simultánea. Hay imágenes de DTI que muestran proyecciones del cuerpo calloso hacia las cortezas prefrontal, motora y motora suplementaria, las cuales, como ya se ha dicho, participan en la planeación y la modulación de la ejecución motora. Las diferencias estructurales en las fibras del cuerpo calloso pueden deberse, como se ha comentado, al crecimiento de vainas de mielina en los axones, al tamaño de los axones, a la formación de axones colaterales o al número de fibras

¹¹⁶ Op. Cit.

¹¹⁷ Op. Cit.

transcallosales como resultado de la interferencia de actividades bimanuales durante el podado sináptico en ciertas fases del desarrollo de estas fibras interhemisféricas.¹¹⁸

Diversos estudios coinciden en que la corteza premotora y la motora primaria (M1) son particularmente importantes para el aprendizaje y el almacenamiento de la representación de secuencias motrices específicas, y que los ganglios basales están mayormente involucrados en los estímulos iniciales, mientras que, como se ha comentado en diversas ocasiones, la función del cerebelo es la de corregir mecanismos motores.

Las conexiones de materia blanca entre regiones auditivas y anteriores también se observan anatómicamente más organizadas en personas con entrenamiento musical.¹¹⁹ Específicamente en este estudio se observó el fascículo arqueado, que es una fibra de sustancia blanca que conecta las regiones cerebrales frontales y temporales, el cual comparte algunos componentes con el fascículo longitudinal superior. El fascículo arqueado contiene fibras que conectan directamente los giros superiores y medio temporales con las regiones frontales inferiores, aunque se ha observado que también posee algunas fibras de manera indirecta que conectan el lóbulo temporal con el lobulillo parietal inferior y el lóbulo parietal con regiones del lóbulo frontal.^{120 121}

Se especula que un aprendizaje en el cual haya una asociación de actividades motrices con auditivas (como en el caso de un entrenamiento musical) puede afectar a las fibras que conectan el lóbulo temporal con el frontal, modificando su tamaño, volumen y composición (Halwani, 2011). Los autores observaron que el giro medio temporal y el giro frontal inferior podían estar aumentados en los músicos como resultado de su entrenamiento, el cual integra ambos sistemas. El giro medio temporal posee destacadas conexiones con el giro frontal inferior. Por medio de estudios de DTI se observó que los músicos, especialmente cantantes, muestran un mayor volumen en el tracto derecho dorsal y ventral, comparado con los no músicos.

¹¹⁸ Op. Cit.

¹¹⁹ Halwani, GF, Loui P, Rüber T, Schlaug G. Effects of practice and experience on the arcuate fasciculus: comparing singers, instrumentalists, and non-musicians. *Front. Psychol.* 2011; 156: 1-9.

¹²⁰ Catani M, Jones DK, Ffytche, DH. Perisylvian language networks of the human brain. *Ann Neurol*, 2008; 57: 8-16.

¹²¹ Glasser M, Rilling J. DTI tractography of the human brain's language pathways. *Cereb Cortex*, 2008; 18: 2471-2482.

De esta manera, Halwani concluyó que el intenso entrenamiento vocal de los cantantes, lleva a un incremento en el volumen y la microestructura de los tractos de sustancia blanca de regiones involucradas en la percepción y la producción del sonido, así como en el control de la retroalimentación. Estos resultados concuerdan con los descritos en 2009 por Bermúdez,¹²² quien reportó interrelaciones en el grosor de las fibras entre la corteza frontal y temporal en personas con estudios musicales.

Algunos estudios han indicado que la plasticidad basada en estímulos simultáneos en redes corticales puede subyacer en los efectos de un entrenamiento multimodal, tal como es el caso de un entrenamiento musical. Dicha estimulación puede ser la esencia de algunos de los cambios reportados en las vías de sustancia blanca descritos en los estudios de Bengtsson (2005), Hyde (2009) y Schlaug (1995). La sincronización temporal en las regiones temporales más alejadas es esencial para poner en funcionamiento los procesos sensorio-motores necesarios al tocar un instrumento, y dicha sincronización puede mejorar cuando los tractos están más organizados o mielinizados.¹²³

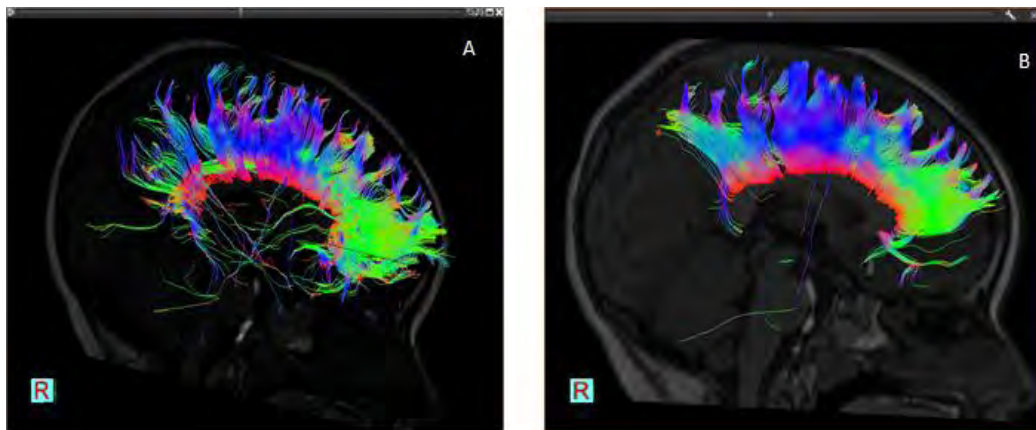


Figura 6. Ejemplo de una persona donde los tractos del cuerpo calloso parecen estar mayormente mielinizados y organizados (B) en comparación con otros tractos menos organizados (A).

¹²² Bermúdez, P. Lerch, JP, Evans AC, Zatorre R. Neuroanatomical correlates of musicianship as revealed by cortical thickness and voxel-morphometry. *Cereb. Cortex*, 2009; 19: 1583-1596.

¹²³ Op. Cit.

Paraskevopoulos¹²⁴ realizó un estudio para observar si un aprendizaje multisensorial afectaba regiones sensoriales, interconexiones entre las mismas, y/o áreas multisensoriales específicas. Los participantes tomaron clases de piano por dos semanas; las clases se basaron en actividades visuales, auditivas y sensorio-motrices. A través de estudios de MEG, se halló un incremento al momento de la integración de estímulos audiovisuales en la parte posterior del giro temporal superior (STG) derecho, en comparación con un entrenamiento o actividades basadas sólo en aspectos visuales y auditivos (esto es, sin tener la práctica en un instrumento musical), demostrando que el entrenamiento multimodal puede alterar la función de estructuras multisensoriales.

De acuerdo con Cuppini (2011) los estímulos multisensoriales que son recibidos durante el desarrollo son cruciales para la formación de las redes neurales correspondientes a este tipo de integración. Investigaciones en personas que han quedado ciegas o sordas han mostrado cómo la privación sensorial lleva a una reorganización funcional en las áreas corticales sensoriales, pero que estas áreas mantienen sus principios organizacionales en el proceso.¹²⁵ La práctica musical contribuye de manera importante al desarrollo del lenguaje el cual puede ser favorecido a través de la práctica musical, pues se provee la oportunidad de controlar la voz, lográndose así mayor expresividad y modulación. Una clase de música cuidadosamente planeada puede ayudar a identificar y resolver problemas auditivos que estén relacionados con la discriminación del timbre, la altura tonal, la duración y la intensidad del sonido, así como los esquemas rítmicos.¹²⁶

En cuanto al desarrollo físico, la música contribuye a este aspecto por medio de canciones de acción, juegos, ritmos o la práctica de algún instrumento que involucre acciones como soplar, percutir, sacudir o puntear un instrumento de una manera específica y a un determinado tiempo, desarrollándose así la coordinación psicomotriz del alumno. Por ejemplo, la práctica de un instrumento de aliento, como la flauta o el canto, desarrolla una buena postura e incrementa la capacidad pulmonar y el control del diafragma. También

¹²⁴ Paraskevopoulos E, Kuchenbuch A, Herholz SC, Pantev C. Evidence for training-induced plasticity in multisensory brain structures: an MEG study. *PLoS One*, 2012; 7: e 36534.

¹²⁵ Cuppini C, Magosso E, Ursino M. Organization, maturation, and plasticity of multisensory integration: insights from computational modeling studies. *Front. Psychol.*, 2011; 2: p. 77.

¹²⁶ Pugh A, Pugh L. *Music in the early years*. Taylor & Francis Group: London and New York, 1998.

ejercita los músculos de los labios, las mejillas y la lengua, lo que puede ayudar a corregir problemas de lenguaje.

De este modo, el resultado de un entrenamiento musical en niños ciegos podría coadyuvar en la ejecución de los procesos cognitivos relacionados tanto con la música como con otros ámbitos. Como se mencionó, también beneficia el desarrollo psicomotor del alumno y abre vías de comunicación a través de la expresión de sensaciones que se producen por medio del quehacer musical.

CAPÍTULO 3

En este capítulo se expondrá el desarrollo del estudio realizado, así como la metodología utilizada durante el proceso de éste. Se analizaron los resultados de los pacientes controles y, aunque no se contrastaron, también se muestran datos del grupo de niños ciegos, cuyos resultados se describen dentro del cuerpo del procedimiento, como estudios de caso.

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Este proyecto pretendió observar si existían cambios significativos en los núcleos y las fibras de los sistemas señalados después de un entrenamiento musical ofrecido a niños ciegos y niños sin esta discapacidad, así como comprobar si estos cambios producían modificaciones en cuanto al desarrollo de distintas habilidades y capacidades psicomotrices y cognitivas en los sujetos antes mencionados.

Los resultados positivos de este proyecto podrían verse reflejados en el ámbito científico, así como en el terreno educativo. La aportación de nuevas evidencias respecto a la relación entre una pérdida sensorial, en este caso la vista, y sus consecuencias a nivel funcional y anatómico pueden generar conocimiento útil para la comprensión del funcionamiento del cerebro. Esencialmente, se pretende inducir la plasticidad neural y los mecanismos que intervienen en ella. Uno de ellos, el efecto neurotrófico, especialmente del factor neurotrófico derivado del cerebro ('brain-derived neurotrophic factor', o BDNF), el cual tiene participación en la plasticidad estimulando las conexiones sinápticas y la regeneración de axones, que, a largo plazo, supondría la base para la consolidación del aprendizaje y la memoria. Estos resultados podrían sustentar programas de rehabilitación, principalmente psicomotriz para niños con ceguera, ya sea congénita o adquirida.

La contribución de este proyecto al terreno educativo puede ir desde la aplicación de la propuesta metodológica; la creación de programas y espacios artísticos-educativos para la

población con esta discapacidad; la implementación de una educación musical integral en las escuelas destinadas a atender a niños ciegos y débiles visuales y, finalmente, pero no por ello menos importante, la sensibilización para que profesores de música incursionen en el área de la educación especial.

3.2 JUSTIFICACIÓN

La relevancia de este proyecto se planteó en función de los pocos estudios documentados que relacionen a la ceguera con la música, en comparación, por ejemplo, con los existentes en torno al entrenamiento musical, exclusivamente. De la misma manera, y como se mencionó en un inicio, no hay hasta el momento investigaciones en las que se relacione la práctica musical en niños con ceguera y su posible efecto a niveles neuroanatómico y neurofisiológico. De igual manera, los resultados obtenidos en los pacientes sanos son relevantes pues muestran datos sobre la modificación de los tractos cerebrales, pudiendo comparar a los pacientes consigo mismos, durante un lapso de tiempo. Un estudio de esta índole puede aportar un conocimiento significativo en cuanto al funcionamiento del cerebro en referencia a un fenómeno complejo al cual estamos expuestos constantemente: la música. Se ha informado de cambios en la neuroanatomía del cerebro a partir de diversos tipos de entrenamiento. En el caso de la música, hay muchos estudios que han dado como resultado beneficios en diversas áreas cognitivas y motrices. Algunos de estos estudios relacionan al déficit sensorial con dicha actividad, aunque éstos no son la mayoría.

La búsqueda de cambios neuroanatómicos y funcionales en personas en las cuales su mundo es totalmente sonoro puede resultar de gran valor para el campo de la cognición musical, un área que vincula a lo artístico con lo científico. El trabajo multidisciplinario puede llevar a obtener respuestas en cuanto a las modificaciones que puedan registrarse en el cerebro y así conocer más acerca de su funcionamiento, aplicando este conocimiento a campos como la rehabilitación a partir del entrenamiento musical y la explicación de mecanismos neurocientíficos, como la plasticidad neural.

Desde el punto de vista pedagógico, actualmente una gran parte de las escuelas en México incluyen la música como asignatura artística. Esto no garantiza que sea impartida una educación de calidad, pero es de gran valor asegurar su presencia dentro de los programas

de estudio de las escuelas del país. El problema es que las escuelas para niños con discapacidad visual son cada vez menos, pues se ven en la necesidad de cerrar por motivos económicos, tal es el caso de AMADIVI en la Ciudad de México, o bien, las instituciones educativas existentes integran a niños con otras discapacidades, lo cual reduce los espacios exclusivos para los alumnos ciegos o con baja visión. Este estudio puede justificar la importancia de la educación musical en la formación integral del niño y proponer programas artísticos dentro de sus clases regulares, así como espacios culturales en los que pueda desarrollarse y expresarse libremente a través del arte, esencialmente la música, la cual, como se verá más adelante, ayuda a estimular el crecimiento de las conexiones cerebrales, de manera específica en el fórceps menor, lo que se verá reflejado directamente en el proceso de aprendizaje.

3.3 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general del estudio

- Comprobar si las fibras de sustancia blanca y los núcleos que involucran los sistemas auditivo, motor, visual y límbico, muestran diferencias estructurales y funcionales después 9 meses de una experiencia multisensorial, como es el caso de la música, en niños ciegos y niños con visión normal.

Objetivos específicos

- Determinar si los tractos asociados a regiones auditivas, motrices, visuales y del sistema límbico muestran cambios anatómicos, estructurales y funcionales después de un entrenamiento musical con duración 9 meses, en sujetos con ceguera.
- Describir los datos encontrados para establecer un marco teórico que sirva de referente para estudios futuros.

Hipótesis

- Después de 9 meses de entrenamiento musical hay diferencias en los tractos asociados a procesos auditivos, visuales, motores y del sistema límbico de sujetos ciegos en comparación con aquellos de sujetos con visión normal.
- Después de 9 meses de entrenamiento musical hay diferencias de actividad en áreas asociadas a procesos auditivos, visuales, motores y límbicos, involucrados en la actividad musical, de sujetos ciegos comparados con aquellas de los sujetos con visión normal.

3.4 METODOLOGÍA

Participantes

12 niños en total participaron en este estudio. Los pacientes se dividieron en un grupo experimental y un grupo control.

El primer grupo se formó por niños ciegos en edad preescolar (4~5 años al inicio del estudio). La muestra experimental (n=3) se obtuvo de pacientes que hubieran perdido la vista desde el nacimiento o en una edad cercana a éste. Las causas de ceguera que se prefirieron fue por retinoblastoma bilateral, retinopatía del prematuro o glaucoma bilateral, esto para descartar alguna situación neurológica adicionada a la pérdida de la vista. Los pacientes ciegos fueron invitados a través de CADIVI (Centro de Atención Integral a la Discapacidad Visual) de la Fundación de Nuestra Señora de la Luz, en convenio con el Hospital Infantil de México Federico Gómez (HIMFG). También se invitaron a niños que provenían de la Escuela para Ciegos y Débiles Visuales. Se obtuvo respuesta de 8 padres y madres de familia, de los cuales se aceptaron a 7 de sus hijos pues se observó que una participante tenía otra alteración neurológica además de la ceguera, por lo que se descartó del estudio. Al final, sólo se aplicaron los estudios a 3 de los pacientes, debido a que hubo pérdida de la muestra.

Para el grupo control se requirieron niños con visión normal de entre 4 y 5 años de edad (H=6, M=2, todos diestros; n= 8), los cuales fueron elegidos de entre la población del jardín de niños 'Benito Juárez', cercano al Hospital Infantil de México Federico Gómez. Cerca de 20 madres se interesaron, y se aceptaron a 15 de ellas, quienes cumplieron con los criterios de inclusión. Finalmente, sólo se aplicó el estudio a 8 de los pacientes, quienes completaron el taller de música.

Los padres de familia de todos participantes de ambos estudios declararon que sus hijos no tenían ninguna enfermedad mental o situación neurológica. A los padres de familia de ambos grupos se les dio una plática informativa en la que se explicaban los puntos generales del estudio. Todas las madres y/o tutores firmaron las cartas de consentimiento. Los estudios de imagenología, así como la batería psicométrica fueron aprobados por el Comité de Bioética, Bioseguridad e Investigación del Hospital Infantil de México Federico Gómez, a través de la presentación de un protocolo el cual fue aprobado y registrado en dicha institución bajo el número HIM-2013-081.

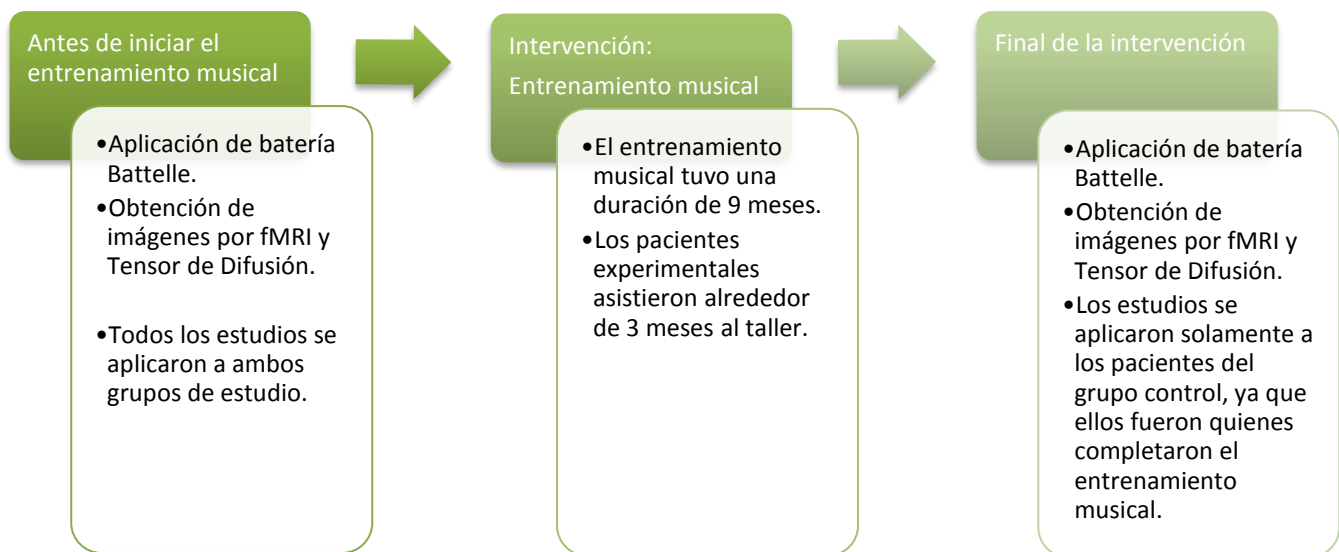
Criterios de Inclusión

Se aceptaron en el estudio a todos aquellos pacientes, con visión normal o ciegos, sin patologías neurológicas, o alguna situación médica que afectará su capacidad mental o motriz. Los pacientes debían tener 4~5 años al inicio del estudio.

Criterios de exclusión

No fueron incluidos en el estudio pacientes con otro déficit neurológico, psicológico o sensorial. Tampoco se aceptaron sujetos con estudios previos en cualquier disciplina artística, ya sea, danza, artes plásticas, música, o cualquier entrenamiento deportivo o de otra índole no especificada. De igual manera, se descartaron pacientes con prótesis dentales metálicas, marcapasos, o cualquier metal dentro del cuerpo, debido a las implicaciones de seguridad que se requieren para un estudio de resonancia magnética. Al funcionar el resonador por medio de imanes, podría haber un efecto magnético contraproducente en el paciente.

Diseño del estudio.



Se realizó un estudio longitudinal, tipo cohorte, con una duración de 9 meses, tiempo durante el cual los sujetos asistieron al taller de música impartido en el HIMFG.

Estímulo

Para el estudio de resonancia magnética funcional se diseñó un paradigma auditivo en bloque, el cual consistió en presentar diferentes series de sonidos, alternadas con periodos de silencio. Cada bloque o estímulo tenía una duración de 12 segundos, mientras que los bloques de silencio fueron de 9 segundos. En total, la secuencia tuvo una duración de 12'54 minutos.

El paradigma se presentó de la siguiente manera:

Estímulo 12 s.	Silencio 9 s.	Estímulo 12 s.	Silencio 9 s.	Estímulo 12 s.	Silencio 9 s.
---------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	--------------------------------

Se presentaron dos tipos de bloques de estímulos basados en series de sonidos tonales y atonales denominando el tonal como "estímulo 1", mientras que el formado por estímulos atonales, se nombró "estímulo 2". Ambos tipos de estímulos se presentaron de manera aleatoria, de tal forma que podía haber dos estímulos de tipo 1 de manera consecutiva (con su respectivo silencio entre ellos), o dos estímulos de tipo 2 consecutivos, o bien, alternando ambos.

El paradigma se diseñó considerando varios aspectos:

- Para las frases musicales se utilizaron valores rítmicos de octavos, dieciseisavos y cuartos. Una de las razones fue que estas figuras se estudiarían durante el taller de música, además de que proporcionan movimiento a la melodía, lo cual es importante para que fueran atractivos al oyente.
- A pesar de que los pacientes no tenían conocimiento musical previo a la intervención que se les daría, se optó por presentar los estímulos utilizando el sonido de piano, ya que, al ser un timbre conocido, aunque sea de manera indirecta (escuchándolo

en la escuela o mediante otros medios), no causaría algún efecto emocional negativo en los pacientes.

- La parte tonal se refiere, en términos perceptuales, a aquella cualidad en donde el oyente percibe que unas alturas son más estables que otras, y, contrariamente, lo atonal es cuando ello no sucede.¹²⁷

Las series de sonidos fueron creadas a partir de secuencias cortas, y no de sonidos aislados, pues se ha observado que las personas entienden mejor el rol de las palabras o tonos, en el contexto de una oración o melodía. Esto debido quizás a que, a partir de los 5 años de edad, hay estructuras de lenguaje establecidas, las cuales comparten sistemas neurales con la música.¹²⁸

El audio se creó en el software *Sibelius Professional 7*, por medio de un teclado MIDI.

Las secuencias musicales se realizaron en la tonalidad de Do Mayor, en compás de 4/4. En una de las secuencias de sonidos se ocultaron fragmentos de pequeñas melodías trabajadas en clase para observar si el paciente las reconocía dentro de las series melódicas. Esta secuencia de sonidos fue la primera programada en el resonador, para que los pacientes estuvieran atentos a ella, al final se les preguntaba qué era lo que habían escuchado.

Como dato adicional, se midieron los decibeles del resonador en estado de reposo y en la secuencia de la resonancia magnética funcional, donde se aplicó el estímulo auditivo a los pacientes. Las mediciones se realizaron en un lapso de tiempo de un minuto, con el resonador en reposo, y durante la secuencia de fMRI. Enseguida se muestra el promedio de ambas mediciones y la estimación del nivel máximo del nivel de presión sonora en ambos casos, durante ese periodo de tiempo. También se muestra la desviación estándar entre ambos grupos, la cual nos da una estimación de la variabilidad entre los dos niveles de presión, observando que esto ocurre en menor grado durante la secuencia de fMRI.

¹²⁷ Anta J. Claves perceptuales de la tonalidad y la atonalidad. *Arte e Integración*. 2012; 14 (8): 10-15.

¹²⁸ Kunert R, Willems RM, Casasanto D, Patel AD, Hagoort P. Music and Language Syntax Interact in Broca's Area: An fMRI Study. *Plos One*. 2015; 10 (11).

Estimación del promedio del nivel de presión sonora, con el resonador en reposo	Estimación del promedio del máximo nivel de presión sonora, con el resonador en reposo	Desviación estándar del nivel de presión sonora, con el resonador en reposo	Estimación del promedio del nivel de presión sonora, durante la secuencia de fMRI	Estimación del promedio del máximo nivel de presión sonora, durante la secuencia de fMRI	Desviación estándar del nivel de presión sonora, durante la secuencia de fMRI
52.25 db	54.9 db	1.01192885	99.27 db	99.8 db	0.43330546

Tabla 1. Promedio de los decibelios percibidos en el resonador magnético.

Debido a los altos niveles de ruido dentro del resonador, los pacientes debieron usar protectores auditivos, y de esta manera, evitar un daño en el oído, de manera temporal o permanente. Los protectores que se usan en el HIMFG, son de tipo diadema. No fue posible evaluar la atenuación de ruido en ese equipo, pero se hizo una revisión en otras fuentes, lo que se explica a continuación.

Price et. al, evaluaron el ruido producido durante una secuencia de MRI, reportando que el nivel de presión sonora se encontraba en un rango de 82.5 db hasta 118 db.¹²⁹ Estos datos coinciden con las mediciones que se realizaron en el resonador del HIMFG. Este nivel de presión sonora puede atenuarse al usar protectores auditivos, los cuales pueden reducir dicha presión de 10-30 db.¹³⁰ Estos mismos datos son corroborados por Shellock (2001), quien apunta que el uso adecuado de los protectores, puede proveer un atenuante para el

¹²⁹ Price D. L., De Wilde J. P., Papadaki A. M., Curran J.S., Kitney A. R. Investigation of acoustic noise on 15 MRI scanners from 0.2 T to 3 T. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2007; 13: 288-293.

¹³⁰ Brummett R. E., Talbot J.M., Charuhas P. Potential Hearing as resulting from MR imaging. *Radiology*, 1988; 169 (2): 539-540.

ruido capaz de prevenir la pérdida de audición temporal asociada con los procedimientos de la RM.¹³¹ Las orejeras, o protectores de diadema pueden aislar el sonido de 30 a 37 db.¹³² Basados en estos datos, se puede estimar que el nivel de presión sonora percibido por los pacientes es de 65 db, aproximadamente. La claridad óptima de audición se establece con un margen de 15 db, sobre el ruido de fondo, por lo que se estima que con 75 db, la secuencia de música que se aplicó a los pacientes, pudo ser percibida de manera correcta. Se recuerda que todos los datos obtenidos para estas mediciones son sólo estimaciones, por lo que cabría hacer otro tipo de evaluaciones con equipos especializados para este fin.

Procesamiento de datos y especificaciones

Imágenes de tractografía por DTI. Se utilizó una secuencia 'single-shot spin-echo, echo-planar sequence' (SS-SEPI) con 15 direcciones no co-lineales de gradientes de difusión con $b = 700 \text{ s/mm}^2$, TR = 7000ms y TE = 60ms. FOV = 224 x 224 x 120mm³, con un grosor de corte de 2mm. Se observó la anisotropía fraccional en las regiones de interés, así como los valores de ADC y de longitud. Matriz = 116 x 116. Parámetros 3D. TR = 25ms, TE = 3.8ms, Gradiente Eco = 1 antena para cabeza de 8 canales. Secuencia EPI-SPIN ECHO con supresión de grasa y excitación en el pico del agua.

Imágenes por fMRI. Se usó una secuencia gradiente ECHO-EPI, Matriz= 64x64 con supresión en grasa usando imagenología en paralelo SENSE. TR=2800ms, TE=50ms, dinámico=199, Tiempo Total= 12'54 minutos.

Contenido de las clases de música

La clase contenía elementos de cantos, ritmos percutidos en el cuerpo y con instrumentos de percusión. Con la finalidad de que los alumnos ejecutaran un instrumento melódico, se eligió que tocaran *boomwhackers*, tubos sonoros afinados de acuerdo a la escala diatónica o cromática. Para llegar a este punto, se les mostraba la melodía a ejecutar para que la cantaran primero, y posteriormente la tocaran con los *boomwhackers*. Dicho proceso requería de la mayor atención, pues cada alumno tocaba una nota diferente, si se

¹³¹ Shellock F. Magnetic Resonance Procedures: Health Effects and Safety. 2001, USA.

¹³² Ravicz M. Melcher J. Examination of Noise Conduction Through the Ear Canal, head and Body. Acoustic Society American, 2007; 109 (1): 215-231.

equivocaban o estaban distraídos, la canción no salía. Así, cada niño debía estar pendiente para tocar en el momento exacto.

Como cualquier otro instrumento, la ejecución de los *boomwhackers* requiere de coordinación óculo-manual, ya que suenan al percutir el tubo contra la mano (puede ser también contra cualquier otra superficie de cuerpo, o externa); a la vez, requiere de atención consigo mismo y para los demás alumnos, con el fin de tocar en el momento adecuado para conformar la melodía; el aspecto emocional y social estaba intrínseco, pues compartían una situación en la que todos debían participar para lograr un objetivo común, ejecutar una misma melodía. De esta manera, se cumplieron con los criterios establecidos que requiere un entrenamiento musical.

La elección de estos instrumentos se estableció por varias razones: el bajo costo del material, la facilidad para su movilidad, y por ser instrumentos que ninguno de los participantes conocía, por lo que fue novedoso y atractivo para ellos. Además de ser un instrumento el cual pudieron dominar durante el tiempo que permanecieron en el taller y ejecutar melodías sencillas. Durante las clases también se agregaron varios ejercicios rítmico-corporales, simples al inicio, y más complejos al final. Todos eran acompañados con rimas, por lo que se trabajaba a la par la parte vocal, motriz y auditiva.

3.5 PROCEDIMIENTO

Batería psicológica Battelle

Antes del entrenamiento musical, se aplicó la batería psicológica Battelle en su versión de *screening* para evaluar el desarrollo del paciente y su progreso en cinco áreas diferentes: personal/social, adaptativa, motora, de comunicación y cognitiva. Al momento de la primera aplicación, los pacientes tenían entre 4 y 5 años, y en la consecuente, las edades oscilaban entre los 5 y 6 años de edad. Cada batería se efectuó precedente a la toma de imágenes y siempre en presencia de las madres y/o tutores.

En esta prueba los pacientes debían contestar una serie de preguntas acordes a las áreas mencionadas, o bien, realizar las actividades motrices que se le indicaban. Tenían hasta 2 oportunidades para contestar cada ítem. La aplicación del estudio se realizó dentro de las instalaciones del HIMFG.

Proceso de fMRI y DTI

Se obtuvieron imágenes de fMRI y DTI para seguir el desarrollo de los pacientes a lo largo de 9 meses de entrenamiento musical. Estos estudios se aplicaron de manera basal y también al término de los 9 meses de instrucción. El procesamiento de datos se realizó en la plataforma médica de imágenes Medinria 2.2.1. Se obtuvieron valores de la anisotropía fraccional coeficiente de difusión aparente y longitudes de las fibras, así como los máximos y mínimos de los ya referidos, además de la desviación estándar y la media.

Para la toma de imágenes por resonancia magnética se pidió que los pacientes asistieran al estudio con el cabello seco, sin gel o spray, debido a que usar cualquiera de elementos interfiere en la imagen. Antes de la primera toma se platicó de manera individual con cada uno de los niños para explicarles en qué consistía el estudio y se les presentó una grabación de audio con los sonidos del resonador magnético para evitar que se asustaran cuando estuvieran dentro de éste. Los padres de familia estuvieron presentes todo el tiempo, tanto en la plática previa como dentro del cuarto de resonancia. Se le pedía que no tocaran o hablaran con el niño para no interferir con los datos obtenidos. Se les pidió a los

participantes que no se movieran durante el tiempo que durara el estudio y que permanecieran despiertos mientras escuchaban la secuencia musical.

Todos los pacientes tomaron el taller de música que se implementó en el HIMFG y que tuvo una duración de 9 meses, dos veces por semana con una duración de 45 minutos cada sesión.

Regiones de interés (ROI's)

Las regiones de interés se delimitaron de acuerdo al espacio por donde pasan las fibras que conectan los distintos puntos cerebrales, enfatizando en aquéllos que involucraban regiones auditivas, frontales y visuales. En el cuadro que se muestra a continuación, se observan las imágenes de las fibras que fueron analizadas en este estudio.

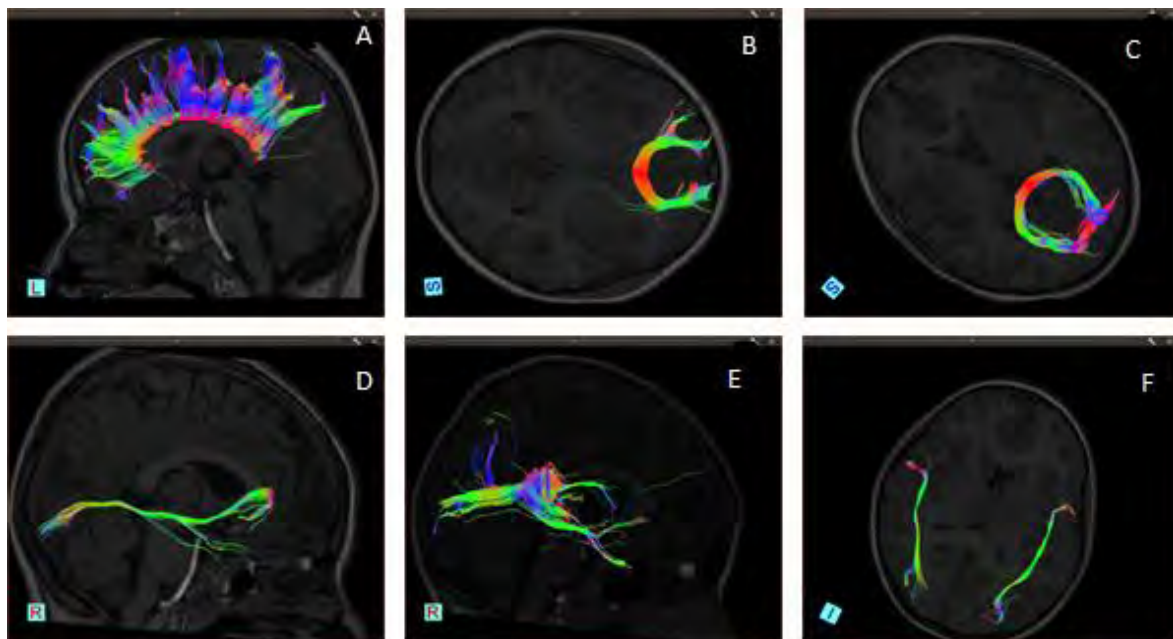


Figura 7. Las imágenes muestran los tractos analizados en el estudio y pertenecen a pacientes sanos del grupo control.

Las imágenes anteriores muestran, por orden de aparición:

- A. Cuerpo calloso: conecta ambos hemisferios.
- B. Fórceps menor: une ambos lóbulos frontales.
- C. Fórceps mayor: une los dos lóbulos occipitales.

- D. Fascículo fronto-occipital inferior: une regiones occipitales y frontales, pasando por áreas temporales.
- E. Fascículo fronto-occipital superior: une regiones occipitales, temporales, frontales y une ambos hemisferios a través del fórceps mayor.
- F. Fascículo longitudinal inferior: conecta el lóbulo occipital con el temporal.

3.6 RESULTADOS

A continuación, se expondrán los resultados alcanzados durante el tiempo que duró la intervención musical. Se presentarán primero los datos que comparan ambos grupos de estudio, esto es en el momento basal del proyecto. Enseguida, se describirán los estudios de caso pertenecientes al grupo experimental. Posteriormente, se mostrarán los resultados correspondientes al grupo control en dos tiempos del estudio, basal y después de 9 meses de instrucción musical.

3.6.1 RESULTADOS BASALES DE LAS IMÁGENES DE DTI: PRUEBA T PARA MEDIDAS INDEPENDIENTES

Las fibras examinadas en el presente estudio se analizaron de manera bilateral midiéndolas tres veces cada vez para evitar errores de marcaje. De esta manera, se obtuvieron varias mediciones de los valores correspondientes a cada fibra (anisotropía fraccional, coeficiente de difusión aparente, desviación estándar y valores mínimos y máximos de cada uno de ellos). Finalmente, se hizo un promedio de los resultados obtenidos para proceder con el análisis estadístico.

Todas las pruebas se llevaron a cabo usando el software PAWS 18. La normalidad y la varianza fueron verificadas usando las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y de Shapiro-Wilk. Ambas pruebas se realizaron con los datos obtenidos en los estudios basales y en los consecuentes para los dos grupos de estudio.

Para los datos logrados en este primer momento del estudio se compararon los resultados de las variables de las fibras de cada grupo de estudio a través de una Prueba t para muestras independientes, lo que arrojó resultados sobre la diferencia de medias en cada una de las fibras analizadas. A continuación, se presentan los cuadros con las medias de cada fibra para cada grupo. Enseguida se muestran los cuadros con la significancia y las diferencias de medias obtenida al comparar ambos grupos.

Tabla 2

Grupo		Media
FM_FA	1	0.483
	2	0.528
FM_ADC	1	2.414
	2	2.190
FM_LARGO	1	118.666
	2	133.507

Tabla 3

Grupo		Media
fm_FA	1	0.468
	2	0.494
fm_ADC	1	2.115
	2	2.145
fm_LARGO	1	97.263
	2	93.571

Tabla 4

Grupo		Media
FLI_FA	1	0.353
	2	0.407
FLI_ADC	1	2.180
	2	2.137
FLI_LARGO	1	78.680
	2	98.547

Tabla 5

Grupo	Media
FFOI_FA	1 0.397
	2 0.435
FFOI_ADC	1 2.226
	2 2.167
FFOI_LARGO	1 120.332
	2 131.334

Tabla 6

Grupo	Media
FFOS_FA	1 0.458
	2 0.486
FFOS_ADC	1 2.361
	2 2.286
FFOS_LARGO	1 135.874
	2 142.455

Tabla 7

Grupo	Media
CC_FA	1 0.460
	2 0.464
CC_ADC	1 2.109
	2 2.126
CC_LARGO	1 96.422
	2 101.078

Tabla 2-7. Se muestran las medias obtenidas de las fibras analizadas, para cada una de las variables: anisotropía fraccional (FA), coeficiente de difusión aparente (ADC) y longitud (largo). En amarillo se señala la dirección de la media correspondiente con los valores más altos, esto es, en el grupo control. Grupo 1= experimental, grupo 2= control.

Tabla 8

Fibra	Significancia Bilateral	Diferencia de medias	Intervalo de confianza	
			Inferior	Superior
Fórceps mayor	0.025	-0.045	-0.083	-0.006
Fórceps menor	0.134	-0.025	-0.060	-0.009
Cuerpo Calloso	0.846	-0.003	-0.042	0.035
FLI	0.006	-0.054	-0.089	-0.019
FFOS	0.024	-0.028	-0.052	-0.004
FFOI	0.142	-0.317	-0.756	0.122

Tabla 9

Fibra	Significancia Bilateral	Diferencia de medias	Intervalo de confianza	
			Inferior	Superior
Fórceps mayor	0.255	0.224	-0.227	-0.130
Fórceps menor	0.688	-0.030	-0.191	-0.130
Cuerpo Calloso	0.794	-0.017	-0.156	0.122
FLI	0.460	-0.042	-0.079	-0.164
FFOS	0.339	-0.074	-0.089	-0.238
FFOI	0.236	-0.586	-1.609	0.437

Tabla 10

Fibra	Significancia Bilateral	Diferencia de medias	Intervalo de confianza	
			Inferior	Superior
Fórceps mayor	0.036	-14.840	-28.493	-1.187
Fórceps menor	0.515	3.692	-8.301	15.685
Cuerpo Calloso	0.152	-4.656	-11.294	1.981
FLI	0.043	-19.867	-38.999	-0.734
FFOS	0.201	-6.581	-17.187	4.024
FFOI	0.079	-35.268	-75.230	4.693

En las tablas anteriores (8, 9 y 10) se muestran los valores obtenidos a través de la Prueba t para medidas independientes de la anisotropía fraccional, coeficiente de difusión aparente y longitud de las fibras, respectivamente. En amarillo se resaltan los valores significativos donde $p > 0.05$. Basándonos en las tablas de diferencia de medias (tablas 2-7), podemos concluir que los valores significativos son mayores en el grupo control, en comparación con el grupo experimental.

En los datos basales obtenidos en la prueba de medias, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos de estudio en los valores de anisotropía fraccional, coeficiente de difusión y longitud del fórceps menor y el cuerpo calloso tampoco se hallaron diferencias en el ADC del FFOS, FFOI y FLI, ni en la longitud del FFOS. Esto datos pueden indicarnos que entre ambos grupos de estudio no existían diferencias significativas en las medias de las fibras mencionadas. Se recuerda que en este momento del estudio ninguno de los pacientes, ya sean controles o experimentales, habían tomado algún tipo de entrenamiento.

En los valores obtenidos para la media de la anisotropía fraccional del fórceps mayor ($p=0.025$), el fascículo longitudinal inferior ($p= 0.006$) y el fascículo fronto-occipital superior ($p= 0.024$), sí se observaron valores $p<0.05$, por lo cual se interpreta que en esos casos sí existía una diferencia de medias en favor del grupo control en los tres casos.

Los resultados de las medias de longitudes mostraron que había diferencias significativas para el fórceps mayor ($p= 0.036$), el fascículo longitudinal inferior ($p= 0.043$). Las diferencias, al igual que en el caso de la anisotropía fraccional son mayores en el grupo control. Como se había mencionado en la revisión de la literatura, Shu *et. al.*¹³³ ya habían reportado que los tractos visuales de personas adultas con ceguera, expresamente, las radiaciones ópticas y el fascículo fronto-occipital inferior, mostraban alteraciones en su microestructura, aunque no en su longitud. Esto puede explicarse debido a que, en esta edad, los niños con ceguera aún no tienen la estimulación necesaria para que ocurriera un proceso de mielinización tan pronunciado en sus tractos, en contraposición de los sujetos adultos que se reportaron anteriormente, pues cabe recordar que estos últimos ya tenían experiencia al tocar algún instrumento, y la mayoría escribía y leía en braille.

El fórceps mayor es un haz de fibras que une ambos hemisferios a través del lóbulo occipital, y el cual se especializa en el procesamiento visual; esto puede ser una explicación por la cual haya una diferencia significativa entre ambos grupos, mostrando los valores más altos en la media del grupo control.

En el caso del fascículo longitudinal inferior y del fascículo fronto-occipital inferior, cuya función es proyectar fibras de manera occipito-temporal, y occipito-frontal, respectivamente, también se observa una diferencia significativa entre ambos grupos, nuevamente especulando que se trata de fibras que involucran áreas occipitales, las cuales se especializan en la función visual, pues los valores más altos se observan nuevamente en el grupo control.

Se puede discutir que, a pesar de la privación del sentido de la vista en el grupo experimental, la mayor parte de las fibras de sustancia blanca analizadas en este trabajo son estructuralmente parecidas en ambos grupos en este momento basal. Específicamente,

¹³³ Shu N, Liu Y, Li J, Yu C, Jiang T. Altered anatomical network in early blindness revealed by diffusion tensor tractography. PLoS One 2009; 4 (9) e7228.

parece ser que ambos grupos comparten características similares en cuanto al largo y ADC de las fibras examinadas en este estudio.

3.6.2 RESULTADOS BASALES DE LAS IMÁGENES DE RESONANCIA MAGNÉTICA FUNCIONAL (fMRI)

Los resultados que aquí se describen corresponden a los estudios basales, debido a la pérdida de la muestra durante el proceso del estudio. A pesar de que se realizaron los estudios después de 9 meses, no se reportaron resultados significativos.

Para el estudio de fMRI, se pudieron comparar los datos basales de ambos grupos de estudio, los cuales se detallarán a continuación.

Una parte del análisis se enfocó en las posibles combinaciones entre el tipo de estímulo y ambos grupos de estudio. Éstas se resumen en el siguiente cuadro, con las indicaciones de: estímulo tonal (T) o atonal (A); grupo experimental (E) o control (C).

Grupo	Estímulo
E	T
E	A
C	T
C	A

Un segundo análisis se enfocó en las siguientes posibilidades:

Grupo	Estímulo
E	T vs. A
C	T vs. A
E vs. C	T
E vs. C	A

Los resultados se dividen en dos partes. En la primera, se muestran las conclusiones del análisis BOLD para las diferentes posibilidades que se mostraron en los cuadros. En la segunda parte, se analiza una correlación de las conexiones entre las diferentes regiones corticales. A continuación, se detalla lo obtenido.

1er Análisis

Estímulo tonal vs. atonal, para el grupo experimental:

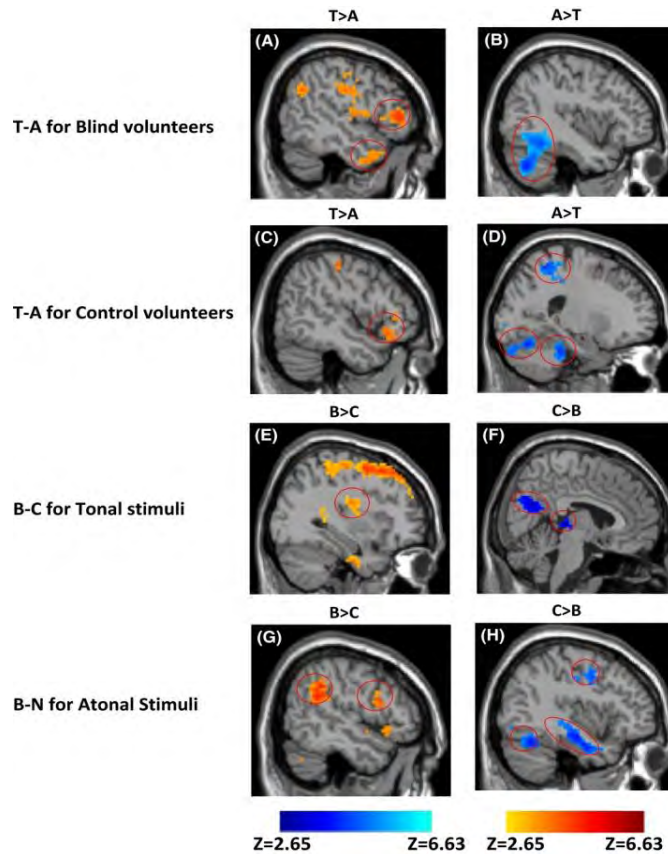
- Se observaron activaciones en el lóbulo temporal inferior, y en el lóbulo frontal durante el estímulo T.
- Se halló mayor activación en el cerebelo durante el estímulo A.
- El estímulo T activa un área mayor, en el grupo experimental, en la corteza motora, el giro pre y postcentral, el opérculo rolándico, el cíngulo anterior y medial, y la corteza supramarginal.
- El estímulo A provoca mayor actividad en este grupo en el precúneo y en la corteza occipital.

Estímulo tonal vs. atonal, para el grupo control:

- Para el grupo C, el estímulo T activa de manera importante la ínsula, la corteza motora superior y el lóbulo parietal.
- El estímulo A, provoca actividad en el precúneo y el giro postcentral, en este mismo grupo.

Estímulo tonal vs. atonal, independientemente del grupo de estudio:

- Se hallaron mayores activaciones para el estímulo A en el cerebelo y en las áreas fusiformes (127 voxels vs. 0 para el cerebelo, y 36 voxeles vs. 0 para las áreas fusiformes).
- El estímulo T induce más actividad en el lóbulo frontal que el estímulo A (123 voxeles vs. 20 voxeles).
- Ambos estímulos activan el lóbulo temporal, pero hay mayor actividad durante el estímulo A (129 voxeles vs. 33 voxeles).



En la figura 8 aparecen algunos ejemplos de las imágenes BOLD, en un corte sagital. En la columna izquierda se muestra el tipo de contraste que se está analizando: T-A para grupo experimental, T-A para grupo control, grupo control vs. ciegos con estímulo tonal, y control vs. ciegos con estímulo atonal. (A) Se muestra la activación en el lóbulo frontal y temporal inferior. También se observa una tendencia de actividad en el opérculo y en el giro supramarginal. (B) Se observa actividad en las estructuras fusiformes izquierdas y en estructuras cerebelosas. (C) Se muestran activaciones en la corteza frontal inferior derecha. (D) Se muestra activación en el cerebelo, así como en la región precentral del cortex, en el hemisferio izquierdo. (E) Se observa activación en la ínsula y en la corteza frontal y regiones fusiformes. (F) Se muestra la activación BOLD en el cúneo y el tálamo derecho. (G) Se observan representaciones en el lóbulo temporal superior, y en el opérculo frontal inferior. (H) Se muestra la actividad en el cerebelo, regiones fusiformes y precentrales izquierdas. Imagen tomada de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/brb3.450/epdf>¹³⁴

¹³⁴ Guerrero A. C, Tobón H. S, Dies S. P, Barragán P. E, Castro S. E, García J, Celis A. B. Strategies for tonal and atonal music interpretation in blind and normally sighted children: an fMRI study. *Brain and Behavior*, 2016; 6(4): e00450, doi: 10.1002/bhr3.450

Tabla 11. Grupo Experimental

Tonal	Atonal
Lóbulo temporal inferior	Precúneo
Lóbulo frontal	Corteza occipital
Corteza motora	Cerebelo
Giro pre y post-central	
Opérculo Rolándico	
Cíngulo anterior y medial	
Corteza supramarginal	

Tabla 12. Grupo Control

Tonal	Atonal
Ínsula	Precúneo
Corteza motora superior	Giro post-central
Lóbulo Parietal	

Tabla 13. Ambos tipos de estímulo, independientemente del grupo de estudio.

Tonal	Atonal
Lóbulo frontal	Cerebelo
Lóbulo temporal	Regiones fusiformes
	Lóbulo temporal (mayor activación)

Las tablas anteriores (11, 12, 13), resumen el análisis de los contrastes entre ambos grupos de estudio, y los diferentes estímulos a los que fueron expuestos.

Se observó también que, el tipo de estímulo no afectaba la lateralidad de las regiones involucradas en el procesamiento de las secuencias musicales. Los pacientes ciegos no sabían escritura braille al momento de realizar este estudio, lo cual puede ser una razón para que no se presentara una preferencia en este aspecto.

Se halló una hiperactividad en el grupo de pacientes ciegos en la ínsula derecha, el lóbulo frontal derecho y en el lóbulo temporal superior derecho, lo cual es contrastante con las activaciones encontradas en el lóbulo frontal medial izquierdo, el lóbulo frontal superior izquierdo, las áreas fusiformes derechas y del cúneo izquierdo, hallado en el grupo control. La lateralidad derecha que se encuentra mayormente marcada en el grupo experimental, sugiere quizás, un proceso extra emocional o una entrada perceptiva desde la ínsula.

Tabla 14

Regiones	Estímulo 1	Estímulo 2
Cerebelo	0	127
Giro fusiforme	0	36
Lóbulo frontal	123	20
Lóbulo temporal	33	129

Tabla 15

Hemisferio izquierdo	16
Hemisferio derecho	17

Tabla 16

Regiones	Ciegos	Control
Cerebelo	93	4
Giro fusiforme	10	4
Lóbulo frontal	33	35
Lóbulo temporal	33	56

Las tablas 14, 15 y 16 muestran el número de voxeles activados al escuchar el estímulo musical durante la fMRI. En el caso del cuadro 12, en el que se contrastan los dos tipos de estímulos, se refiere al estímulo tonal vs. el estímulo atonal, independientemente de si el grupo era experimental o control. En el cuadro 11 se muestra la lateralidad activada, y al igual que en el cuadro anterior, es independiente del grupo de estudio. En el cuadro 13 se comparan ambos grupos de estudio, observando que en el grupo experimental hay una mayor activación en el cerebelo y el giro fusiforme, mientras que el grupo control muestra una mayor activación en el lóbulo temporal y frontal en comparación con el grupo control, aunque no es significativa.

2do Análisis

El segundo análisis se centró en la correlación de la conectividad entre diferentes regiones corticales.

En general, se observó una conectividad similar para ambos tipos de estímulos, en los dos grupos de estudio. La única excepción fue una correlación entre el área somatosensorial primaria y el giro angular, que se observó durante el estímulo atonal en el grupo control.

También se halló una fuerte correlación entre la corteza prefrontal anterior y el giro superior, en el grupo control durante ambos tipos de estímulos.

Esto se contrapone con lo observado en el grupo de niños ciegos, donde la corteza prefrontal anterior se relaciona a la corteza somatosensorial y a la motora, así como a la corteza premotora y a la corteza prefrontal dorso-lateral. Esta misma conexión se halló limitada a la corteza somatosensorial.

Los pacientes que integraban el grupo experimental, mostraron una correlación de la corteza asociativa hacia el giro angular y el giro supramarginal.

Se halló una correlación en el grupo de niños ciegos para el estímulo atonal, del giro temporal inferior al área temporopolar, y hacia la corteza entorrinal posterior. En el grupo control, hubo una correlación en la corteza dorsal cingulada posterior hacia la corteza dorsolateral prefrontal y la corteza somatosensorial primaria y motora.

Adicional a lo ya descrito, se halló una fuerte correlación entre el lóbulo temporal superior derecho y la corteza orbito-frontal.

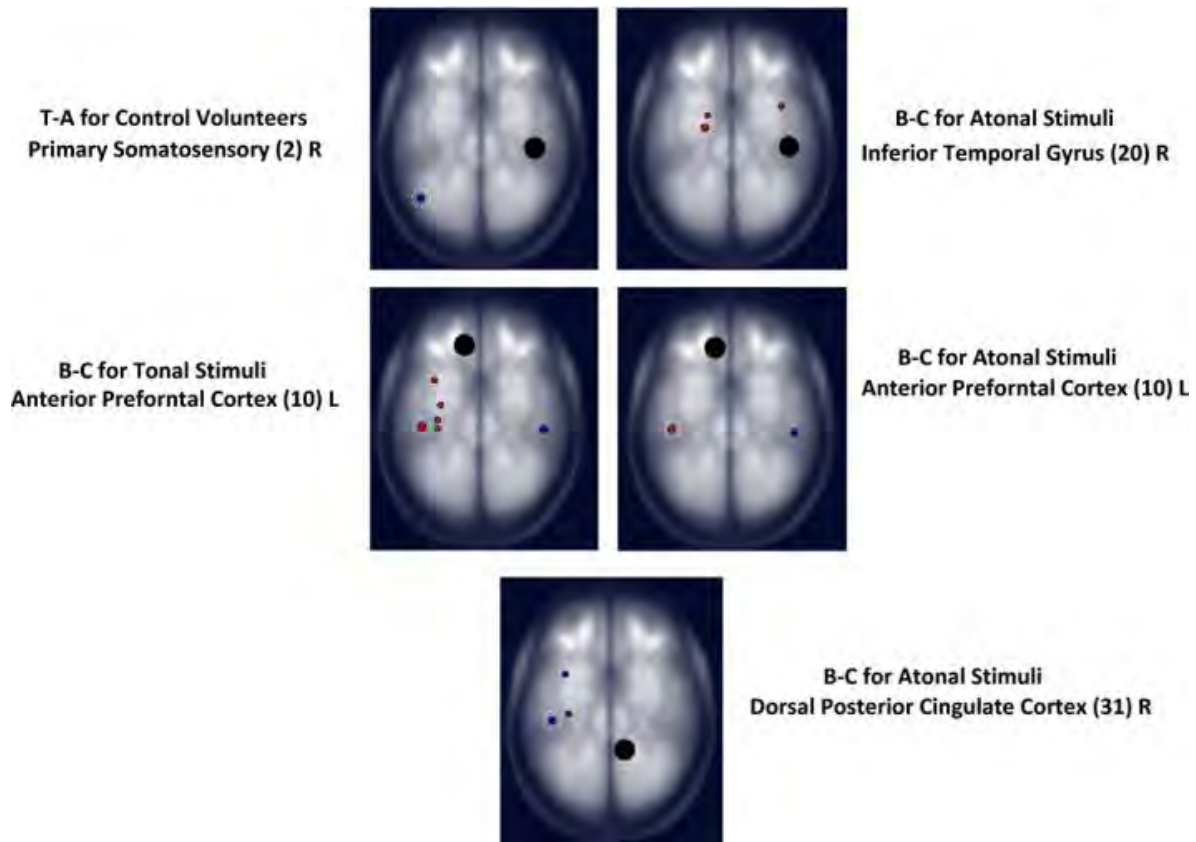


Figura 9. Se muestran ejemplos del análisis de conectividad. Los puntos negros representan las referencias a las áreas de Brodmann. Los puntos rojos indican correlaciones más fuertes para el primer grupo del contraste, mientras que el color azul, indica el efecto contrario.

Como conclusión, en el estudio BOLD, se hallaron grandes activaciones en ambos grupos, en el cerebelo y las regiones fusiformes, especialmente durante la audición del estímulo tonal en el grupo control. Las activaciones del lóbulo frontal estuvieron fuertemente asociadas a ambos estímulos musicales en los dos grupos de estudio, aunque fueron especialmente más significativas en el grupo control, al escuchar el estímulo atonal.

Con respecto al estudio de correlación, sí se encontraron diferencias entre ambos grupos de estudio. Las regiones que corresponden a procesos de percepción, fueron más usadas en los pacientes experimentales para interpretar el estímulo tonal. Algo similar sucedió en los pacientes controles al escuchar el estímulo A. En el grupo E, se presentaron dos tipos de correlaciones diferentes e independientes al escuchar el estímulo A, lo cual no se presentó en los pacientes del grupo control.

Los resultados nos muestran que, en un primer momento, esto es, antes de que los grupos fueran expuestos a la instrucción musical, en los integrantes del grupo control se observó una habilidad 'estándar' para incorporar áreas, que ya han sido establecidas, para el procesamiento de la audición, mientras que los pacientes ciegos parecen usar otro tipo de mecanismos y estrategias para procesar los estímulos auditivos. Se detectó mayor actividad en el lóbulo frontal con el estímulo tonal, lo que puede ser un indicador de una actividad extra neural que puede corresponder a alguna asociación emocional hacia este estímulo, y que parece estar relacionado, también, con la actividad hallada en áreas del sistema límbico (cíngulo anterior y medial).

En cuanto a las correlaciones, la primera de ellas, la corteza prefrontal anterior y la corteza somatosensorial primaria izquierda, fue hallada para ambos estímulos. Esta correlación se extendió a la corteza motora primaria y a la pre-motora, así como a la corteza DLPF, al escuchar el estímulo tonal.

Se encontró que los pacientes ciegos usaban una porción de esta red para procesar el estímulo atonal. Las redes 2 y 3 aparecen como un posible complemento para la percepción. La red 2 presenta dos correlaciones entre el área de Wernicke y áreas de asociación de la corteza visual (correspondientes a las regiones V3, V4 y V5 de Brodmann). Esto puede ser un indicador del involucramiento de la corteza visual en personas ciegas, como ejemplo para observar el fenómeno de plasticidad cortical.

3.6.3 ESTUDIOS DE CASO

En esta sección se ofrece la descripción de los pacientes del grupo experimental, presentadas como estudios de caso. La relevancia de abordar el tema de esta forma es ofrecer las observaciones que se pudieron obtener durante el tiempo que los sujetos asistieron al taller de música. Los datos que se presentan son puramente cualitativos, ya que no se realizaron análisis estadísticos en este apartado, debido a la reducida muestra.

Descripción de pacientes

Sujeto A. Paciente de sexo masculino. Perdió la vista a los dos meses de edad a causa de desprendimiento de retina, por ser prematuro. Al inicio del estudio tenía 48 meses de edad. No asistía al preescolar, no sabía leer ni escribir braille. Los resultados de la prueba Battelle en su versión de *screening*, arrojaron que tenía un desarrollo promedio en las áreas personal/social, adaptativa, comunicativa y cognitiva. Sin embargo, la calificación en el área motriz, gruesa y fina, fue nula. Pertenece a una familia nuclear.

Sujeto B. Paciente de sexo femenino. Perdió la vista a los 4 años, a causa de retinoblastoma bilateral. Al inicio del estudio tenía 72 meses de edad. Iniciaba la práctica de lectura y escritura en sistema braille y asistía a una escuela regular. No presentaba ninguna otra patología. Su puntuación en la batería Battelle fue buena en las áreas personal/social, adaptativa, comunicativa y cognitiva. Sin embargo, la calificación en el área motriz, gruesa y fina, fue baja. Pertenece a familia nuclear.

Sujeto C. Paciente de sexo femenino, perdió la vista cuando tenía un año de edad a causa de desprendimiento de retina. Al inicio de estudio tenía 72 meses de edad. cursaba el primer grado de primaria en una escuela regular. Iniciaba con lecto-escritura en sistema braille. Su puntuación en el Battelle fue buena en las áreas personal/social, adaptativa, comunicativa y cognitiva. Sin embargo, la calificación en el área motriz, gruesa y fina, fue baja, así como en la parte de comunicación. Asistió sólo a dos sesiones del taller, sin embargo, se pudieron tomar las imágenes de DTI y fMRI, para obtener datos basales. Pertenece a familia reconstituida.

Sujeto D. Paciente de sexo femenino, ciega de nacimiento debido a malformación congénita. Al inicio del estudio tenía 72 meses de edad. Sin conocimiento de lecto-escritura Braille.

Pertenece a familia nuclear. Contestó todos los ítems de la batería Battelle, pero no obtuvo calificación debido al bajo puntaje en cada uno de los reactivos. Abandonó el estudio después de asistir a tres clases. Se obtuvieron imágenes basales antes de ello.

Sujeto E. Paciente de sexo femenino con ceguera de nacimiento a causa de retinopatía del prematuro. Al inicio del estudio contaba con 52 meses de edad. Pertenece a familia nuclear. No presentaba ninguna otra patología. No asistía al preescolar. Sin proceso de lecto-escritura Braille. Su puntuación en la batería Battelle fue baja, especialmente en áreas motrices, sociales y adaptativas.

Los pacientes A, B y E, asistieron de manera regular al taller de música por alrededor de 25 clases. Después de ese tiempo, y por diversas causas, dejaron de ir al HIMFG. Es por ello, que se decidió comparar estas pruebas con pacientes que cumplieran los mismos criterios, pero que hubieran tenido más tiempo de educación musical a pesar de no haber asistido al taller. A continuación, se describirán esos casos.

Sujeto F: Paciente de sexo femenino de 9 años de edad. Perdió la vista al mes de edad a causa de retinopatía del prematuro. No presenta alguna otra patología o alteración neurológica. Ha tenido un desarrollo normal, asiste a clases en una escuela regular; sabe leer y escribir braille. Ha tenido preferencia hacia la música desde que tenía 2 años de edad, por lo que ingresa a la entonces Escuela Nacional de Música a los 6 años, para tomar clases de solfeo y coro. Actualmente tiene 2 años tomando clases formales de piano, además de iniciar un proceso de lecto-escritura de musicografía (sistema de notación musical en braille).

Sujeto G: Paciente de 9 años. Perdió la vista a los 6 años de edad por retinoblastoma bilateral. No presenta alguna otra patología o alteración neurológica. Ha tenido un desarrollo normal. Asiste a una escuela regular, sabe leer y escribir braille. Comenzó sus estudios de piano posterior a la pérdida de la vista. Actualmente toma clases de piano en la Facultad de Música de la UNAM.

Se tomaron los primeros casos (sujetos A, B, C, D, E) como fuente de datos para tener información basal y se compararon con los pacientes que han tenido más tiempo con instrucción musical (F, G). Si bien, el número de muestra es reducido, y no se pueden obtener

datos estadísticos de relevancia, los datos que arroja este estudio podrían ser de utilidad y sentar bases para un estudio posterior.

Los resultados podrían manejarse de manera prospectiva, pues la muestra fue tomada a conveniencia, cuidando que los criterios de inclusión para el estudio fueran similares para todos los participantes.

Como se comentó anteriormente, los sujetos A, B y E fueron los que asistieron al taller de música con más regularidad. El diseño de clases estuvo basado en actividades psicomotrices, las que posteriormente, se ligarían al quehacer musical. Se requirió que los padres estuvieran presentes en el taller para apoyar las actividades que los alumnos harían. Los alumnos estuvieron integrados a la misma clase que los pacientes control, esto para beneficiar el contacto social al tener interacción con otros alumnos de su misma edad.

Es importante hacer notar que a pesar de que al inicio hubo resistencia por parte de los padres de familia para que sus hijos participaran en ciertas actividades, los mismos pacientes del grupo control trataban de interactuar con ellos para integrarlos a las actividades. Por otra parte, los pacientes experimentales y controles realizaron las mismas actividades, las cuales estaban planeadas originalmente para el grupo experimental.

En general, el desempeño del grupo experimental fue limitado con respecto a las actividades motrices, a pesar de que el espacio asignado para el taller era amplio, con el objetivo de que pudieran desplazarse sin peligro de tropezarse o pegarse con algo que estorbara su paso.

Enseguida se presentarán imágenes de algunos pacientes del grupo experimental en su estado basal y algunas otras imágenes de los alumnos que ya tenían un tiempo de estudiar música.

Si bien se ha aclarado que no se pudo obtener un comparativo estadístico sobre este grupo de estudio debido a la pérdida de la muestra, las imágenes que aquí se presentan pueden evidenciar diferencias entre ambos tipos de pacientes. Los tractos de los niños que han tomado instrucción musical por mayor tiempo se notan mayormente definidos, lo que posiblemente sea a causa de un mayor proceso de mielinización en determinadas fibras en comparación con pacientes que tuvieron sólo algunas clases de entrenamiento musical.

Estas imágenes basales de sujetos ciegos que han recibido instrucción musical, pueden ser útiles como una referencia en posteriores estudios.

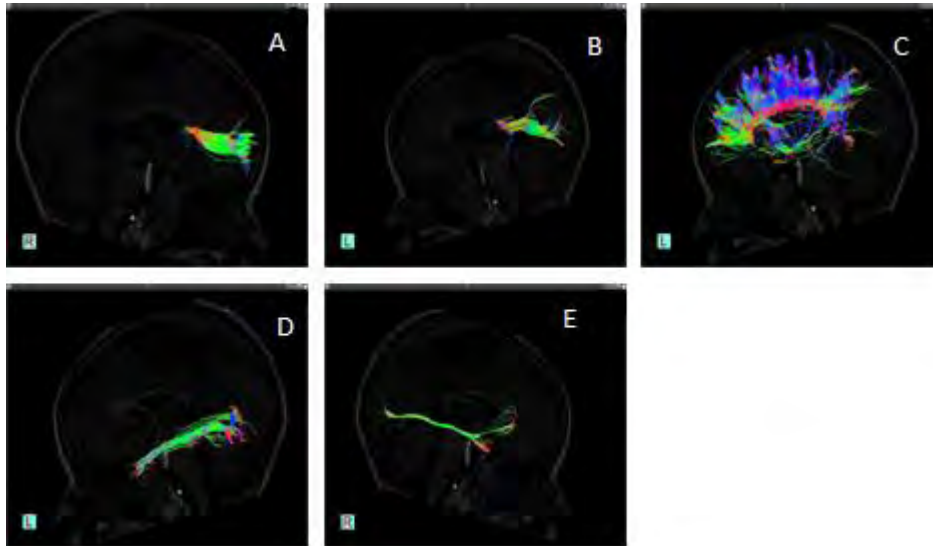


Figura 10. Imágenes sagitales de los tractos cerebrales de paciente ciego. De izquierda a derecha se muestra el A. fórceps menor; B. fórceps mayor; C. cuerpo calloso; D. fascículo-fronto occipital inferior y E. fascículo longitudinal inferior.

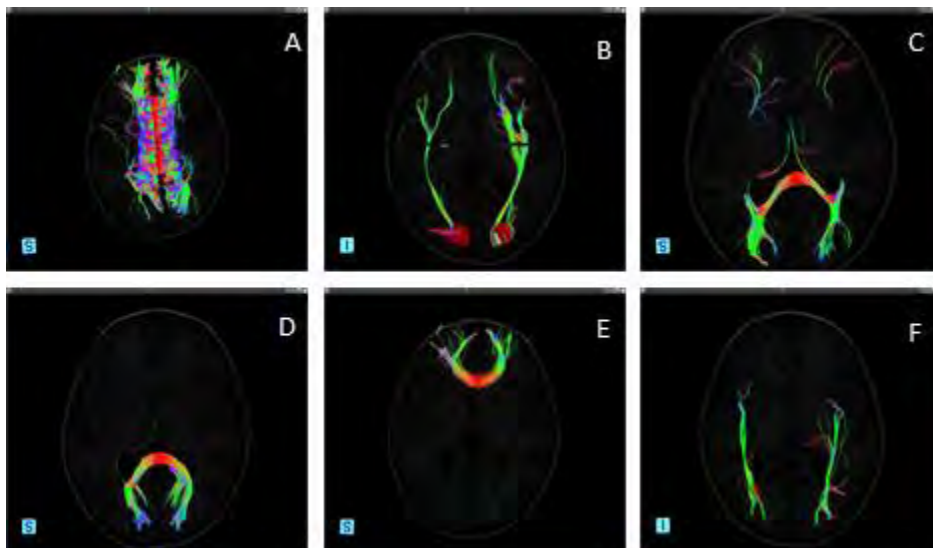


Figura 11. Imagen de un paciente ciego que muestra los cortes axiales de los siguientes tractos, de izquierda a derecha: A. cuerpo calloso; B. fascículo fronto-occipital inferior; C. fascículo fronto-occipital superior; D. fórceps mayor; E. fórceps menor y F. fascículo longitudinal inferior

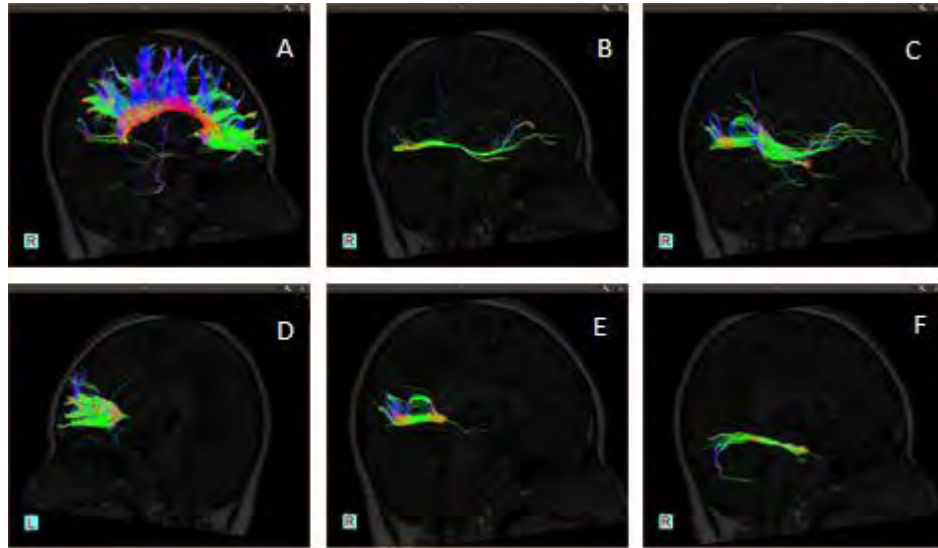


Figura 12. Imagen sagital de paciente ciego que muestra los siguientes tractos en el momento basal, de izquierda a derecha: A. cuerpo calloso; B. fascículo fronto-occipital inferior; C. fascículo fronto-occipital superior; D. fórceps menor; E. fórceps mayor y F. fascículo longitudinal inferior.

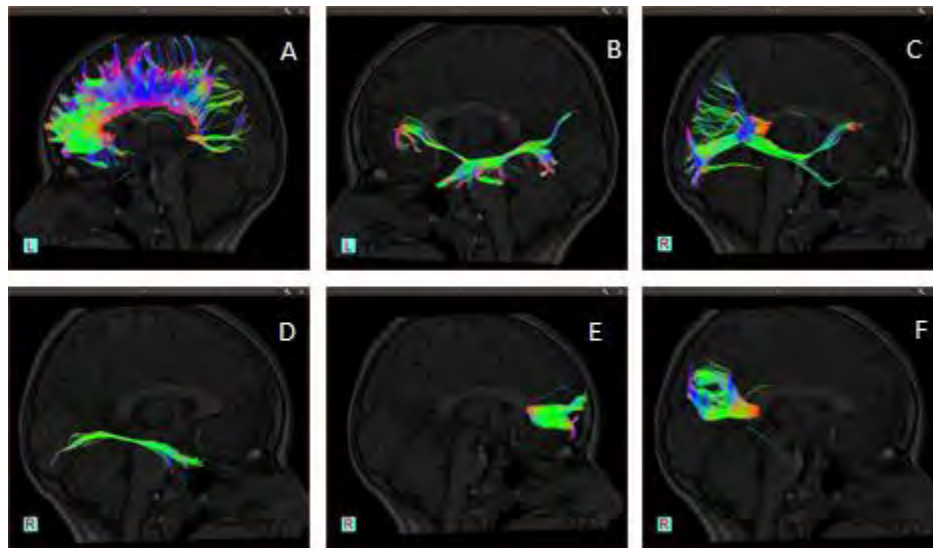


Figura 13. Imagen sagital de paciente ciego después de un entrenamiento musical. Se pueden observar los tractos más definidos, lo cual posiblemente se deba quizás, a un proceso de mielinización. De izquierda a derecha: A. cuerpo calloso; B. fascículo fronto-occipital inferior; C. fascículo fronto-occipital superior; D. fascículo longitudinal inferior; E. fórceps menor y F. fórceps mayor.

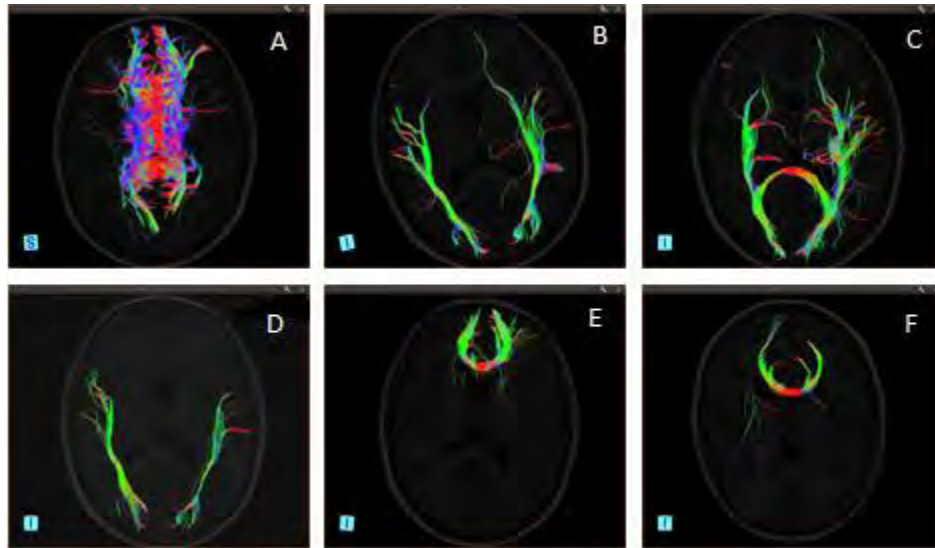


Figura 14. Imágenes axiales de un paciente ciego después del entrenamiento musical, se muestran de izquierda a derecha: cuerpo calloso, fascículo fronto-occipital inferior, fascículo fronto-occipital superior, fascículo longitudinal inferior, fórceps menor y fórceps mayor.

3.6.4 RESULTADOS DE LA PRUEBA T PARA MEDIDAS PAREADAS

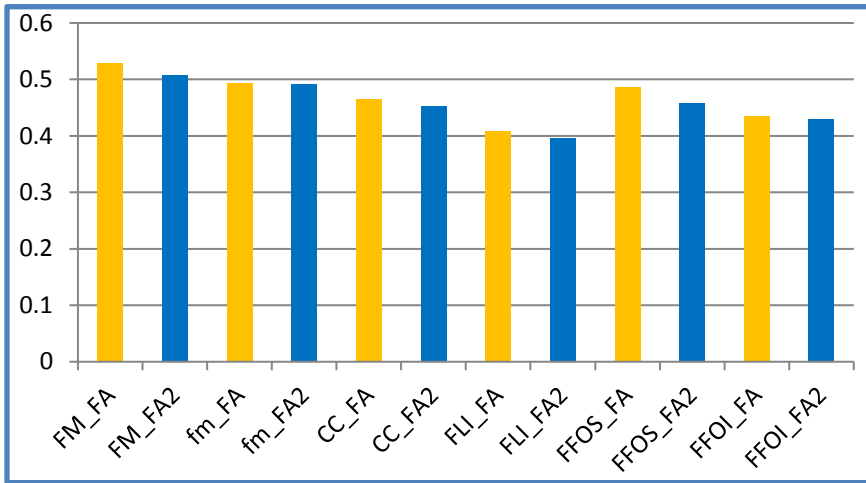
Esta prueba se aplicó a los datos obtenidos para el grupo control, donde hubo más permanencia de pacientes durante el tiempo que duró el taller de música.

Después de verificar la normalidad y varianza de los resultados obtenidos, se realizó una *Prueba t* de medidas repetidas para evaluar si existía algún cambio entre las fibras que se han indicado, antes y después de recibir el entrenamiento musical. Se comparó cada una de las fibras consigo misma al inicio y al término de 9 meses de instrucción musical. Se obtuvieron datos para cada uno de los valores que se promediaron de las fibras: Anisotropía Fraccional -FA-, Coeficiente de Difusión Aparente -ADC- y Largo -Length-.

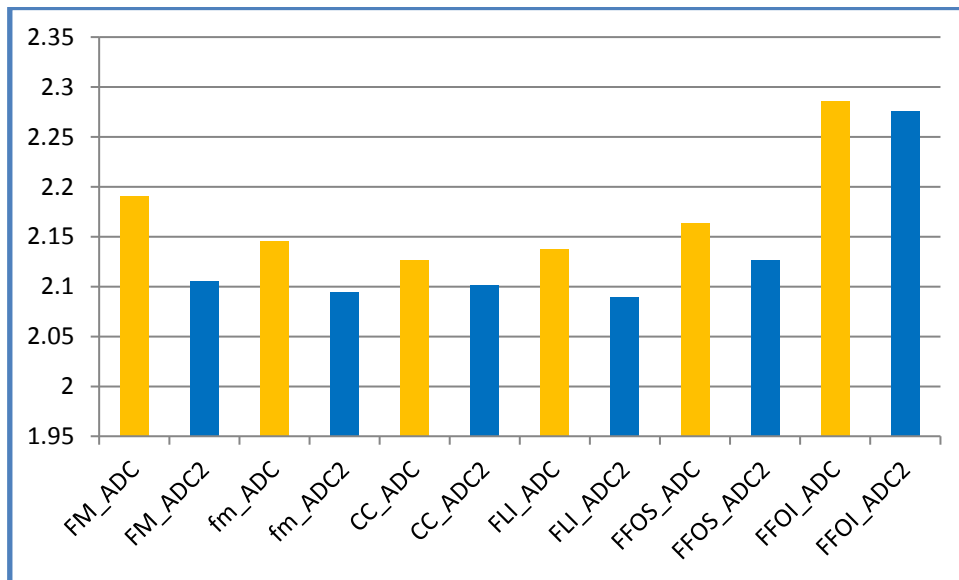
La *Prueba t* para muestras pareadas, indicó que hubo cambios significativos en la longitud de las fibras del fórceps menor (0.005). El valor de p se definió como $p < 0.05$, con un intervalo de confianza del 95%. Contrario a nuestra hipótesis, los otros tractos, FFOS, FLI, FFOI, FM y CC no mostraron diferencias que pudieran ser estadísticamente significativas, obteniendo resultados $p > 0.05$, después de 9 meses de entrenamiento musical (ver tabla 17).

FIBRA	ANISOTROPÍA FRACCIONAL	COEFICIENTE DE DIFUSIÓN APARENTE	LONGITUD
Fórceps Mayor	0.155	0.184	0.488
Fórceps Menor	0.943	0.802	0.005
Cuerpo Caloso	0.254	0.411	0.922
Fascículo Longitudinal Inferior	0.391	0.143	0.612
Fascículo Fronto-Occipital Superior	0.007	0.894	0.005
Fascículo-Fronto-Occipital Inferior	0.910	0.364	0.845

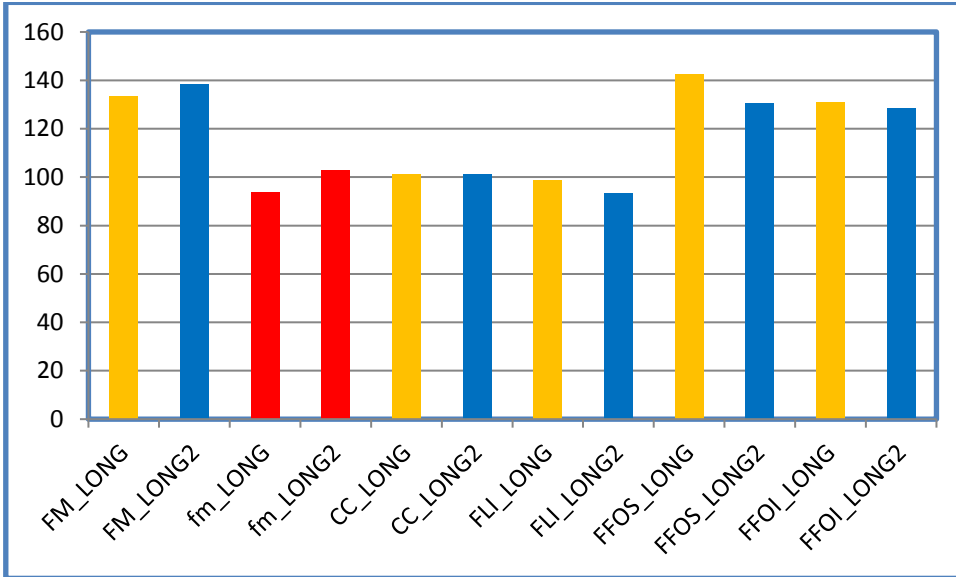
Tabla 17. Resumen que muestra los valores de p , obtenidos al comparar las fibras de manera basal y después de 9 meses de entrenamiento musical. Se observa que hay valor de $p < 0.05$ en la longitud del fórceps menor donde $p = 0.005$, por lo cual se concluye que en esta fibra sí hubo una diferencia estadísticamente significativa después del entrenamiento musical.



Gráfica 1. En la gráfica anterior se muestran en amarillo los valores de la anisotropía fraccional del momento basal, en cada una de las fibras. En azul, se muestran los valores del momento final.



Gráfica 2. Al igual que en la gráfica anterior, en amarillo se señala el momento basal, mientras que en azul se observa los valores finales del coeficiente de difusión aparente.



Gráfica 3. En la gráfica se observan los valores de longitud de las fibras ya mencionadas. Cabe resaltar que en rojo se aprecia la comparación del fórceps menor antes y después del entrenamiento musical, y del cual fue donde se halló una diferencia significativa.

Enseguida, se presentan una serie de imágenes que corresponden a los pacientes en el momento basal y posterior a los 9 meses del entrenamiento musical. Se puede observar el crecimiento de las fibras pertenecientes al fórceps menor, después de la intervención musical.

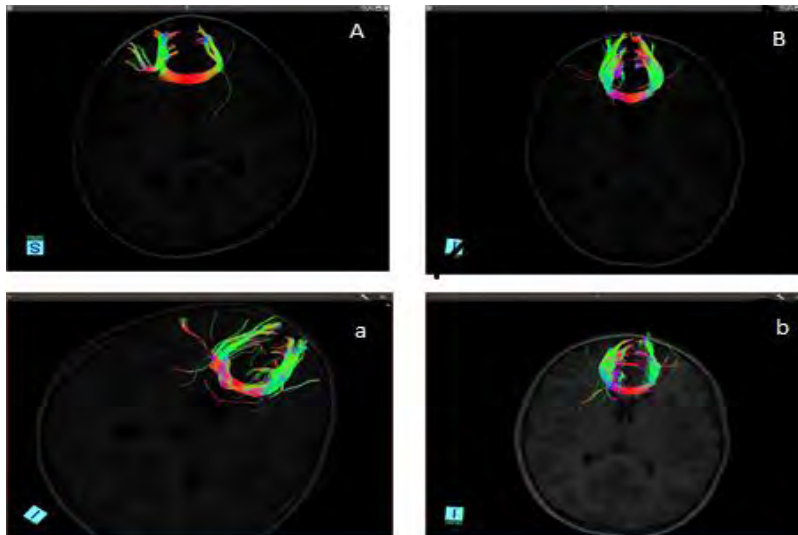


Imagen 15. Se muestra el fórceps menor en un corte axial, donde A, B corresponden al momento basal del estudio. En a, b, se presentan imágenes del mismo paciente, posteriores a los 9 meses.

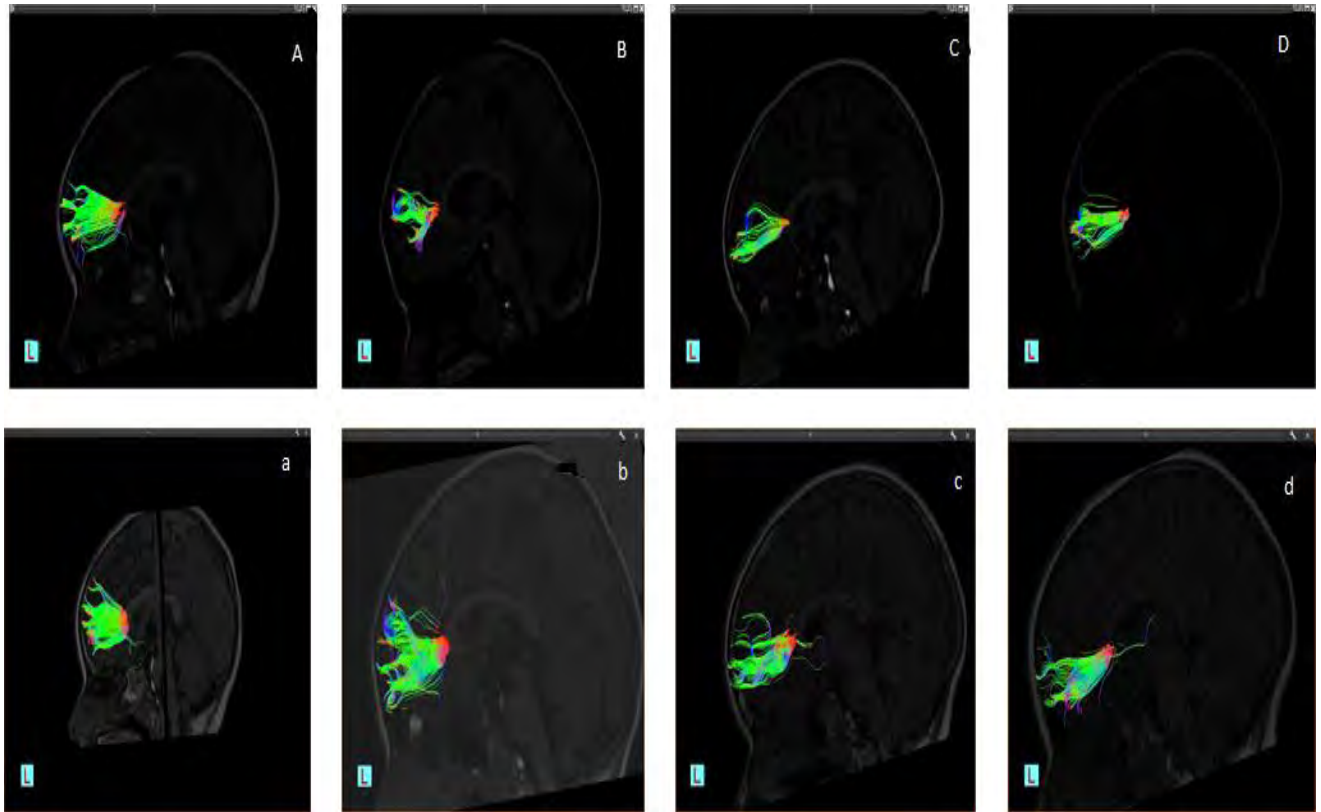


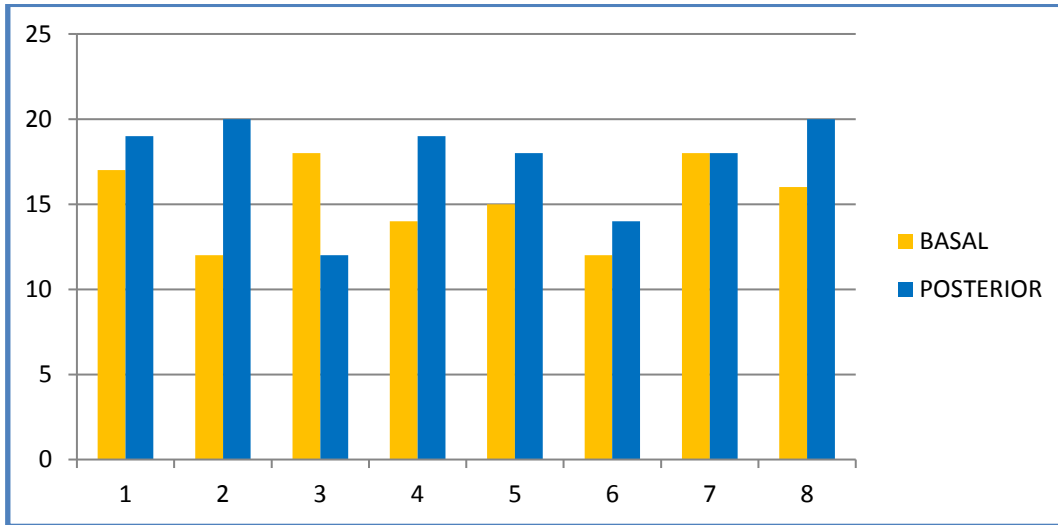
Imagen 16. Se observan las fibras pertenecientes al fórceps menor en el momento basal del estudio (A, B, C y D), y, en el cual, no había habido estimulación alguna. En a, b, c y d, se exponen las imágenes pertenecientes a los mismos pacientes, después de los 9 meses de entrenamiento musical.

3.6.5 RESULTADOS DE LA BATERÍA PSICOLÓGICA BATTELLE, VERSIÓN SCREENING

Respecto a los resultados de la batería Battelle, se observó que la mayoría de los pacientes del grupo control mostraron un puntaje mayor en las áreas personal/social y de comunicación en la prueba realizada después de los 9 meses de entrenamiento musical, mientras que, en el área motora, cognitiva y de adaptación, los puntajes permanecieron similares a los obtenidos en el momento basal. A continuación, se muestra una tabla con los resultados de cada ítem valorado, de acuerdo a la batería aplicada.

Personal/ social Basal	Post.	Adaptativa Basal	Post.	Motora Basal	Post.	Comunicación	Post.	Cognitiva	Post.
2	4	4	4	4	4	4	3	3	4
2	4	4	4	2	4	0	4	4	4
4	2	4	4	4	2	2	0	4	4
2	4	4	4	4	3	0	4	4	4
4	4	4	4	2	3	1	3	4	4
2	4	2	3	3	2	2	3	3	2
4	4	4	4	3	2	2	4	4	4
2	4	4	4	3	4	4	4	3	4

Tabla 18. Se muestran en amarillo los puntajes de las áreas que aumentaron después del entrenamiento musical. Post= posterior (a los 9 meses de entrenamiento musical).



Gráfica 4. En la gráfica se muestran los resultados globales de cada paciente de la batería de desarrollo Battelle, en su modalidad de *screening*. Como se muestra en azul, la mayoría de los niños reflejaron un incremento en el puntaje total de la batería después del entrenamiento musical.

El aumento en los puntajes de las áreas comunicativas y sociales, ya se había reportado en estudios anteriores (Duffy, 2000; Perry, 2003) en los que, intervenciones basadas en música ayudaron al incremento de las habilidades comunicativas y sociales en niños con discapacidad, especialmente, cognitivas.^{135, 136} Duffy et. al., reportaron que, después de 8 semanas de intervención musical dirigidas al desarrollo de habilidades sociales en niños con discapacidad moderada, se observó un aumento en términos de toma de turnos, imitación y vocalización.

Los resultados de estos estudios, asociados al nuestro, podrían correlacionarse con el incremento en la longitud del fórceps menor, pues se ha documentado que este tracto está relacionado en la fluidez verbal,¹³⁷ y que hay una fuerte asociación entre las habilidades sociales y la integridad de la sustancia blanca en la parte anterior del cuerpo calloso,¹³⁸ la cual proyecta fibras, como se ha mencionado en repetidas ocasiones, hacia la corteza

¹³⁵ Duffy B, Fuller R. Role of Music Therapy in Social Skills Development in Children with Moderate Intellectual Disability. *JARID*. 2000; 13 (2): 77-89

¹³⁶ Perry R. Relating Improvisational Music Therapy with Severely and Multiply Disabled Children to Communication Development. *J Music Ther*. 2003; 40 (3): 227-246

¹³⁷ Bauer I, Ouyang A, Mwangi B, Sanches M, Zunta-Soares G, Keefe R, Huang H, Soares J. Reduced white matter integrity and verbal fluency impairment in young adults with bipolar disorder: A diffusion tensor imaging study. *J Psychiatr Res*, 2015; 62: 115-22.

¹³⁸ Molesworth T, Sheu L, Cohen S, Gianaron P, Verstynen T. Social network diversity and white matter microstructural integrity in humans. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2015; 10(9): 1169-76.

prefrontal. A pesar de que puede ser muy aventurado el obtener conclusiones con una muestra tan pequeña, los resultados alcanzados parecen mostrar una correlación con la experiencia musical, el desarrollo del niño y la estimulación del fórceps menor.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en los estudios basales de fMRI, no nos proporcionan mucha información sobre los posibles efectos del entrenamiento musical en ambos grupos. Esto debido a la pérdida de muestra durante el proceso, pues no hubo un punto de comparación entre los dos tipos de pacientes. Es por ello que no nos atrevemos a exponer algún tipo de resultado sobre esta parte del estudio, ya que no tenemos los datos suficientes para obtener una conclusión fidedigna. Sin embargo, los resultados basales de las imágenes de DTI nos mostraron que, en este momento del estudio, existían algunas diferencias significativas entre ambos grupos de estudio, específicamente en aquellos tractos que comprometen las regiones occipitales, observando los mayores valores en los pacientes del grupo control. Lamentablemente, no se pudieron hacer observaciones posteriores y, por lo tanto, no fue posible concluir de manera contundente si estas diferencias permanecieron en el tiempo o si existieron posibles modificaciones debido al entrenamiento musical o al desarrollo natural de los pacientes ciegos.

En la parte correspondiente a las imágenes tractográficas del grupo control sí se pudieron contrastar a los pacientes en dos momentos diferentes del estudio, lo cual nos permite dar a conocer los resultados que a continuación se exponen:

Al analizar los resultados de las imágenes de DTI, se observó que hubo un aumento en el largo de las fibras del fórceps menor, el cual involucra fibras que interconectan las regiones frontales, así como algunos axones de la corteza cingulada rostral anterior, y la corteza prefrontal medial y ventral, vía la rodilla y el rostro del cuerpo caloso,¹³⁹ lo cual pudo ser causado por la instrucción musical y la demanda requerida para realizar ciertas actividades que están dentro del entrenamiento, tales como imitar movimientos coordinados.

Los resultados de nuestro estudio coinciden con lo descrito por Yakovlev y Lecours (1967), Schmithorst y Wilke (2002), y Schlaugh (2008) quienes observaron que había una mayor mielinización en tractos del cuerpo caloso anterior, en especial en fibras que se proyectan hacia las regiones prefrontales, debido quizás a la necesidad de coordinar los movimientos

¹³⁹ Thomas C, Humphreys K, Jung K, Minshew N, Behrmann M. The anatomy of the callosal and visual association pathways in high-functioning autism. *Cortex*, 2011; 47 (7):863-873.

de ambas manos durante la instrucción musical. Una de las hipótesis que se manejaba para las conclusiones es que el fórceps mayor, que une ambos lóbulos occipitales, aumentaría sus niveles de AF y de longitud, posiblemente debido a que la corteza occipital tiene una maduración más rápida comparada con la rodilla del cuerpo calloso, debido al orden funcional del desarrollo.¹⁴⁰ En los resultados preliminares se podía observar que había una diferencia entre ambos momentos del estudio en esta fibra, en específico dentro del grupo control, sin embargo, al realizar los análisis estadísticos no se logró obtener un dato que fuera significativo sobre esta fibra. A pesar de ello, no se descarta la posibilidad de que efectivamente pueda incrementar sus valores en las variables que se han referido anteriormente, al tener más tiempo de instrucción musical.

El fórceps menor ha sido estudiado en los últimos años debido a su implicación en trastornos y/o patologías referidas a la corteza frontal. Por ejemplo, investigaciones referentes al Trastorno del Espectro Autista, (TEA, por sus siglas) han observado que hay una disminución en el número de fibras de este tracto, en personas con autismo, además de que el volumen de las mismas está reducido.¹⁴¹ Dicho estudio expone que la reducción en el volumen del fórceps menor confirma la relación entre las anormalidades en la organización de la sustancia blanca, en este caso, el fórceps menor, y el incremento de las conductas repetitivas en las personas con TEA. Sahyoun *et. al.* (2010), obtienen resultados similares en personas con TEA, al observar una disminución de la anisotropía fraccional en el fórceps menor, sugiriendo que las conexiones involucradas en la corteza frontal están afectadas en este trastorno, lo cual es consistente con la baja conectividad en estas áreas, involucradas en procesos cognitivos complejos.¹⁴²

Por otro lado, se ha observado que el fórceps menor también está involucrado en el Trastorno de Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH). Un estudio realizado por Lawrence *et. al.* (2013), mostró cambios en el fórceps menor en pacientes con esta condición. Ellos midieron la difusión media (MD), además de la ya mencionada anisotropía fraccional. Se encontró que los sujetos con TDAH mostraban altos valores relativos a la MD, lo cual significa que puede haber ruptura de la mielina o una disminución en la densidad celular.

¹⁴⁰ Geng X, Gouttard S, Sharma A, Gu H, Styner M, Lin W, Gerig G, Gilmore J. Quantitative Tract-Based White Matter Development from Birth to Age Two Years. *Neuroimage*, 2012; 61 (3): 542-557.

¹⁴¹ Op. Cit.

¹⁴² Sahyoun CP, Belliveau JM, Mody M. White Matter Integrity and Pictorial Reasoning in High Functioning Children With Autism. *Brain Cogn* 2010; 73(3): 180-8.

Esto quiere decir que los sujetos con TDAH probablemente tienen deteriorada la conectividad en los tractos que están relacionados con procesos de atención y funciones ejecutivas.¹⁴³ El estudio concluye que los pacientes que mostraban altos valores de MD en el fórceps menor, fueron aquellos que mostraban una menor capacidad de atención, así como funciones ejecutivas pobres. También se ha observado que pacientes con síndrome de Gilles de la Tourette muestran altos valores de la MD en el fórceps menor, lo que sustenta la hipótesis de que este tracto es sumamente importante para el control de la atención, pues en el caso de estos pacientes, se observa una pobre conectividad entre los hemisferios, lo que parece reducir el paso de información, así como la inhibición del control motor.¹⁴⁴

Nuestros resultados pueden ser relevantes desde el punto de vista de los efectos plásticos que puede brindar la instrucción musical al alargar los axones de las fibras, especialmente en el fórceps menor. Esto posiblemente ocurrió debido a la necesidad de crear más conexión entre ambos hemisferios para ejecutar de manera más eficiente las tareas requeridas para el entrenamiento musical. De esta manera, el entrenamiento musical podría ser una opción de intervención para tratar los desórdenes que se han mencionado anteriormente, pues si bien, se sabe que la música puede ayudar a pacientes con TEA y TDAH, con los resultados mostrados en este trabajo, se podrían crear estrategias dirigidas especialmente a estas patologías.

Respecto a la estimulación en la corteza prefrontal ha surgido una nueva hipótesis relacionada con el trabajo de Schalug (2005),¹⁴⁵ quien observó que regiones frontales inferiores y mediales se activan con tareas de discriminación rítmica y melódicas, por lo que dichas regiones pueden estar involucradas en la integración de eventos auditivos largos y secuenciales. En especial, las activaciones relacionadas a estas áreas sugieren la presencia de las llamadas neuronas en espejo, las cuales inicialmente se pensaba que estaban relacionadas con la 'imitación' de acciones vistas en otras personas, aunque también se ha estudiado que, en primates, están relacionadas con la imitación de estímulos auditivos. Estas

¹⁴³ Lawrence K, Levitt J, Loo S, Ly R, Yee V, O'Neil J, Alger J, Narr K. White Matter Microstructure in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Subjects and their Siblings. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry* 2013; 52 (4): 431-440.

¹⁴⁴ Liu Y, Miao W, Wang J, Gao P, Yin G, Zhang L, Lv C, Ji Z, Yu T, Sabel B, He H, Peng H. Structural Abnormalities in Early Tourette Syndrome Children: A Combined Voxel-Based Morphometry and Tract -Based Spatial Statistics. *Plos One* 2013; 8 (9): e76105.

¹⁴⁵ Schlaugh G, Norton A, Overy K, Winner E. Effects of Music Training on the Child's Brain and Cognitive Development. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2005; 1060: 219-230.

neuronas 'auditivas-visuales' pueden ejemplificar un alto nivel de abstracción en la representación de la acción. Así, sugiere Schlaug, es seguro que las neuronas en espejo desempeñen un rol significativo en el aprendizaje de un instrumento musical, lo cual también sustentaría nuestros resultados en los niños controles, al estimular las fibras del fórceps menor.

Debido al alto grado de demanda que requiere el entrenamiento musical, se esperaban mayores cambios en las fibras que se mencionaron durante el estudio. Sin embargo, es importante resaltar que los cambios observados en el largo de fibras del fórceps menor, sucedieron en sólo 9 meses de la instrucción musical, por lo que podemos esperar que se necesite un tiempo mayor para que ocurran cambios en el resto de las fibras, quizás más de un año de entrenamiento musical, tal como se ha reportado en otros estudios (Hyde 2009; Schlaug 2005).

No se descarta la posibilidad de que en otras fibras ocurran cambios en el proceso de mielinización, medida por la anisotropía fraccional, así como en la longitud de éstas, lo cual puede ser proyectado en investigaciones futuras que puedan durar más de un año y medio de entrenamiento, tiempo promedio en el que se han observado los mayores cambios en tractos y áreas cerebrales, en estudios realizados con adultos y niños. De igual manera, la implementación de este proyecto en un grupo control que no tenga la intervención musical y que pudiera ser medido al mismo tiempo que los grupos que han tomado la estimulación, podría aportarnos datos más claros sobre el proceso que se ha observado en lo ya descrito.

Por último, los resultados obtenidos en la batería Battelle, concuerdan con los estudios de Duffy (2001) y Perry (2003), los cuales hacen referencia al aumento de habilidades sociales y comunicativas a partir de una intervención musical. De acuerdo con Drake (2014), las actividades musicales ofrecen al paciente oportunidades estimulantes y confortables para desarrollar y trabajar las habilidades de comunicación y lenguaje. El practicar habilidades de comunicación dentro de un ambiente auto-regulado lleva a los alumnos a minimizar la frecuencia de sobrecarga sensorial mientras aprenden cómo comunicarse,¹⁴⁶ especialmente si se aplica a niños con autismo. A partir de esta premisa, se puede reforzar la praxis para que la intervención musical sea una opción terapéutica dirigida a personas con discapacidad

¹⁴⁶ Drake J. Music Therapy and Communication Disabilities Singing, Speech and the Brain. Virtual Commons Bridgewater State University, 2014.

que presenten desórdenes en las habilidades de comunicación y socialización, y a través de la instrucción musical, reforzar estos procesos en las personas que lo requieran.

CONCLUSIONES

La neurociencia y su relación con la música han ido paulatinamente de la mano, mostrándonos cómo la práctica de esta disciplina artística puede modificar la arquitectura cerebral, y con ello, procesos asociados a esta. Los avances en las técnicas de imagenología nos han permitido ver el cómo se producen estos cambios, lo que no significa que aún se sepa la totalidad del funcionamiento de este órgano del cuerpo. Evidentemente, algo sucede a nivel cerebral al exponerse a un determinado tipo de estimulación musical, y el que no se hayan reportado mayores cambios en este estudio, no significa que estos no ocurrieran, sino que no fueron estadísticamente significativos para que se pudieran reportar.

Los resultados obtenidos en el momento basal entre ambos grupos, arrojó resultados favorables acerca de las diferencias en algunos tractos que conectan áreas occipitales y que, evidentemente, estaban orientadas hacia el grupo control, lo cual se había esperado, pues en investigaciones hechas en adultos ciegos se ha corroborado que algunas fibras que involucran estas regiones, están estructuralmente afectadas debido a la propia ceguera. El seguimiento de estos pacientes hubiera aportado conocimiento útil en cuanto a sus posibles cambios, o no, en el tiempo.

Como varias investigaciones han reportado, la experiencia musical en una edad temprana, puede contribuir a un mejor desarrollo cerebral, optimizando la conformación y el establecimiento de redes neurales, y como se puede observar en el presente escrito: la mielinización y estimulación de tractos comprometidos en las regiones frontales. Por otro lado, se pone de manifiesto una posible actividad en áreas visuales durante el procesamiento de un estímulo auditivo en niños ciegos, lo cual ya se había observado en estudios previos, cuando pacientes con estas características incorporaban áreas visuales mientras leían en braille, o escuchaban ciertos tipos de estímulos, sobre todo, correspondientes a lenguaje (Burton, 2003). Esto da un indicador sobre un efecto plástico al incorporar regiones 'especializadas' en otro tipo de procesos.

Los datos que obtuvimos a partir de este estudio pueden servir como base para futuras investigaciones referidas al área de Cognición Musical. Los resultados que se describen en

relación a los pacientes controles, de hecho, son de suma utilidad en cuanto al conocimiento sobre la plasticidad cerebral y la experiencia temprana.

Sobre el fórceps menor hay mayores datos sobre su funcionalidad e importancia en diversos procesos cognitivos. Como se mencionó, la integridad de este tracto– visto desde su fisiología– parece ser fundamental en las personas con TDAH o TEA. Así, el aprendizaje musical puede ser un área de oportunidad para inducir efectos plásticos en los tractos expuestos ya anteriormente, y esto podría tener como consecuencia la disminución de algunas de las estereotipias en las personas con autismo, y, que pacientes con TDAH, pudieran aumentar su capacidad de atención.

Cabe resaltar que de ninguna manera se considera que los sujetos de este estudio pueden compararse como músicos y no músicos, pues para ello debiesen dominar un instrumento y los conocimientos musicales más profundos, lo cual difícilmente se alcanza en el tiempo que duró el taller; aun así, los contenidos que se realizaron durante los 9 meses de clases, parecen ser los mínimos para que se registraran cambios en el fórceps menor. Como ya se comentó en varias ocasiones, los mayores resultados fueron observados en los pacientes control, de hecho, ellos asistían con mayor frecuencia que los pacientes experimentales, al parecer esta es la causa de los cambios registrados en estos pacientes.

Falta mucho trabajo por realizar con los niños ciegos, los cuales podrían beneficiarse con actividades artísticas, como lo suponíamos al inicio de este proyecto. Lamentablemente las condiciones de vida, tanto socio-económicas, como de salud, e inclusive en cuestión de percepción de los padres de familia, no siempre son las idóneas para realizar este tipo de proyectos. Se espera que en un futuro se pueda lograr un estudio con una muestra mayor y en mejores condiciones de investigación, con la prioridad de aportar al conocimiento sobre el funcionamiento del cerebro y sus posibles aplicaciones clínicas y terapéuticas. En este sentido, este estudio podría significar una base de datos útil para investigaciones posteriores, en las que se pueda estudiar una muestra mayor, tanto de pacientes controles, como de pacientes ciegos.

REFERENCIAS

- Abdul Kareem I, Stancak A, Parkes L, Al-Ameen M, Al Ghamdi J, Aldhafeeri F, Embleton K, Morris D, Sluming V. Plasticity of the superior and middle cerebellar peduncles in musicians revealed by quantitative analysis of volume and number of streamlines based on diffusion tensor tractography. *Cerebellum* 2011; 10: 611-623.
- Afifi A, Bergman R. *Neuroanatomía funcional. Texto y atlas.* Mc Graw Hill. 2a edición: México, 2006.
- Armony J, Trejo D, Hernández D. Resonancia Magnética Funcional (RMf): Principios y aplicaciones en Neuropsicología y Neurociencias Cognitivas. *Revista Neuropsicología Latinoamericana*, 2012; 4 (2): 36-50.
- Bailey J, Penhune V. A sensitive period for musical training: contributions of age of onset and cognitive abilities. *Ann NY Acad Sci.* 2012: 1252(1); 163-170. DOI:10.1111/j.1749-6632.2011.06434.x
- Bauer I, Ouyang A, Mwangi B, Sanches M, Zunta-Soares G, Keefe R, Huang H, Soares J. Reduced white matter integrity and verbal fluency impairment in young adults with bipolar disorder: A diffusion tensor imaging study. *J Psychiatr Res*, 2015: 62; 115-22.
- Beaulieu C. The basis of anisotropic water diffusion in the nervous system: a technical review. *NMR Biomed* 2002;15 (7-8):435-55.
- Bedny M, Konkie T, Pelphrey K, Saxe R, Pascual-Leone A. Sensitive period for a multi-modal response in human visual motion area MT/MST. *Curr Biol* 2010; 20 (21): 1900-1906
- Bengoetxea H, Ortuzar N, Bulnes S, Rico-Barrio I, Lafuente J, Argandoña E. Enriched and deprived sensory experience induces structural changes and rewires connectivity during the postnatal development of the brain. *Neural Plast* 2012; ID 305693, doi:10.1155/2012/305693
- Bengtsson S, Ehrsson H, Hashimoto T, Kito T, Naito E, Forssberg H, Sadato N. Listening to rhythms activates motor and premotor cortices. *Cortex* 2009; 45: 62-71.

- Bengtsson, S. Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development. *Nature Neuroscience* 2005; 8: 1148-1150.
- Bermúdez, P, Lerch, JP, Evans AC, Zatorre R. Neuroanatomical correlates of musicianship as revealed by cortical thickness and voxel-morphometry. *Cereb. Cortex* 2009; 19: 1583-1596.
- Bunge S, Crone E. Neural correlates of the development of cognitive control. En J. Rumsey, & M. Ernst (Eds.), *Neuroimaging in developmental clinical neuroscience* (pp. 27-37). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2009.
- Burton H. Visual Cortex Activity in Early and Late Blind People. *The Journal of Neuroscience*, 2003; 23 (10): 4005-4011.
- Catani M, Jones DK, Ffytche, DH. Perisylvian language networks of the human brain. *Ann Neurol*, 2008; 57: 8-16.
- Chaddock Heyman L, Erickson K, Voss M, Powers J, Knecht A, Pontifex M, Drollette E, Moore D, Raine L, Scudder M, Hilman C, Kramer A. White matter microstructure is associated with cognitive control in children. *Biological Psychology* 2013; 94: 109-115.
- Colwell. *MENC Handbook of musical cognition and development*. Oxford University Press: New York, 2006.
- Cuppini C, Magosso E, Ursino M. Organization, maturation, and plasticity of multisensory integration: insights from computational modeling studies. *Front. Psychol.*, 2011: 2; 77.
- Dietrich S, Hertrich I, Kumar V, Ackermann V. Experience-Related Structural Changes of Degenerated Occipital White Matter in Late Blind Humans-A Diffusion Tensor Imaging Stud. *PLOS ONE* 2015; 10(4): 1-19.
- Dohn A, Garza-Vollareal EA, Chakravarty MM, Hansen M, Lerch JP, Vuust P. Gray and White Matter Anatomy of Absolute Pitch Possessors. *Cereb Cortex* 2013; doi: 10.1093/cercor/bht334.

Drake J. Music Therapy and Communication Disabilities Singing, Speech and the Brain. Virtual Commons Bridgewater State University, 2014.

Duffy B, Fuller R. Role of Music Therapy in Social Skills Development in Children with Moderate Intellectual Disability. *JARID*. 2000; 13 (2): 77-89.

Ellis R, Brujin B, Norton A, Winner E, Schlaug G. Training-mediated leftward asymmetries during music processing: A cross-sectional and longitudinal fMRI analysis. *Neuroimage* 2013; 75: 97-107.

Engel A, Hijmans BS, Cerliani L, Bangert M, Nanett IL, Keller PE, Keysers C. Inter-individual differences in audio-motor learning of piano melodies and white matter fiber tract architecture. *Hum Brain Mapp* 2014; 35: 2483-2497.

Fields D. Change in the brain's white matter: the role of the brain's white matter in active learning and memory may be underestimated. *Science* 2010; 330(6005):768-769.

Fields D. Imaging learning: the search for a memory trace. *Neuroscientist* 2011; 17 (2): 185-196.

Fields D. Myelination: An overlooked mechanism of synaptic plasticity? *Neuroscientist* 2005; 11 (6): 528-531.

Flohr, J. Short-term music instruction and young children's developmental music aptitude. *J Res Music Ed* 1981; 29(3): 219-223.

Foster N, Zatorre R. A role for the intraparietal sulcus in transforming musical pitch information. *Cereb Cortex* 2010; 20:1350-59.

Foster N, Zatorre R. Cortical structure predicts success in performing musical transformation judgments. *Neuroimage*, 2010; 53: 26-36.

Fox S, Levvit P, Nelson C. How the timing and Quality of Early Experiences Influence the Development of Brain Architecture. *Child Dev*, 2010; 81 (1): 28-40.

- Fujiiyota T, Ross B, Kakigi R, Pantev C, Trainor L. One year of musical training affects development of auditory cortical-evoked fields in young children. *Brain* 2006; 129:2593-2608.
- Geng X, Gouttard S, Sharma A, Gu H, Styner M, Lin W, Gerig G, Gilmore J. Quantitative Tract-Based White Matter Development from Birth to Age Two Years. *Neuroimage* 2012; 61(3): 542-557.
- Glasser M, Rilling J. DTI tractography of the human brain's language pathways. *Cereb Cortex*, 2008; 18: 2471-2482.
- Grahn JA, Brett M. Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *J Cogn Neurosci* 2007; 19:893-906.
- Grahn JA. The role of the basal ganglia in beat perception: neuroimaging and neuropsychological investigation. *Ann NY Acad Sci* 2009; 1169: 35-45.
- Groussard M, La Joie R, Rauchs G, Landeau B, Chételat G, Viader F, Desgranges B, Eustache F, Platel H. When music and long-term memory interact: effects of musical expertise on functional and structural plasticity in the hippocampus. *PLoS One* 2010; 5 (10) pii: e13225.
- Guerrero A, Hidalgo S, Dies P, Barragán E, Castro-Sierra E, García J, Celis B. Strategies for tonal and atonal musical interpretation in blind and normally sighted children: an fMRI study. *Brain and Behavior*, 2016; 6 (4): 1-11.
- Guzzeta A, D'Acunzio G, Rose S, Tinelli F, Boyd R, Cioni G. Plasticity of the visual system after early brain damage. *Dev Med Child Neurol* 2010; 52 (10): 891-900.
- Habib M, Besson M. What do music training and musical experience teach us about brain plasticity? *Music Percep* 2008; 26 (3): 279-285.
- Halwani GF, Rüber T, Schlaug G. Effects of practice and experience on the arcuate fasciculus: Comparing singers, instrumentalists and non-musicians. *Front Psychol* 2011; 2: 156.

- Han Y, Yang H, Lv YT, Zhu CZ, He Y, Tang HH, Gong QY, Luo YJ, Zang YF, Dong Q. Grey matter density and white matter integrity in pianist's brain: A combined structural and diffusion tensor MRI study. *Neurosc. Lett* 2009; 459: 3-6.
- Herdener M, Esposito F, di Salle F, Boller C, Hilti C, Habermeyer B, Scheffler K, Wetzel S, Seifritz E, Cattapan-Ludwig K. Musical training induces functional plasticity in human hippocampus. *J Neurosci* 2010; 30: 1377-1384.
- Herholz S, Zatorre R. Musical training as a framework for brain plasticity: behavior, function and structure. *Neuron*, 2012; 76: 486-502.
- Hurwitz, I. Nonmusical effects of the Kodaly music curriculum in primary grade children. *J Learn Disabilities* 1975; 8: 167-174.
- Huttenlocher P, Dabholkar A. Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *J Comp Neurol* 1997; 387(2):167-78.
- Huttenlocher P. Morphometric study of human cerebral cortex development. *Neuropsychologia*. 1990; 28: 517-527.
- Hyde KL, Lerch J, Norton A, Forgeard M, Winner E, Evans AC, Schlaug G. The effects of musical training on structural brain development: a longitudinal study. *Ann NY Acad Sci* 2009; 1169: 182-186.
- Imfeld A, Oechslin MS, Meyer M, Loenneker T, Jancke L. White matter plasticity in corticospinal tract of musicians: A diffusion tensor imaging study. *NeuroImage* 2009; 46: 600-607.
- Jiang J, Zhu W, Shi F, Liu Y, Li J, Qin W, Li K, Yu C, Jiang T. Thick visual cortex in the early blind. *J Neurosci* 2009; 29: 2250-2211.
- Jolles D, Crone E. Training the developing brain: a neurocognitive perspective. *Frontiers in Human Neuroscience* 2012; 6 (76): 1-13.
- Klinge C, Eippert F, Röder B, Bücher. Corticocortical connections mediate primary visual cortex responses to auditory stimulation in the blind. *J Neurosci* 2010; 30 (38): 12798-12805.

- Krtezer FL, Menta R, Johnson A. Vitamin E protects against retinopathy of prematurity through action on spindle cells. *Nature* 1984; 309: 793-795.
- Lawrence K, Levitt J, Loo S, Ly R, Yee V, O'Neil J, Alger J, Narr K. White Matter Microstructure in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Subjects and their Siblings. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry* 2013; 52 (4): 431-440.
- Liu J, Dietz K, M DeLoyht J, Pedre X, Kelkar D, Kaur J, Vialou V, Kay Lobo M, Dietz D, Nestler E, Dupree J, Casaccia P. Impaired adult myelination in the prefrontal cortex of socially isolated mice. *Nat Neurosc* 2012; 15 (12): 1621-1623.
- Liu Y, Miao W, Wang J, Gao P, Yin G, Zhang L, Lv C, Ji Z, Yu T, Sabel B, He H, Peng H. Structural Abnormalities in Early Tourette Syndrome Children: A Combined Voxel-Based Morphometry and Tract -Based Spatial Statistics. *Plos One* 2013; 8 (9): e76105.
- Lobera G. Discapacidad visual. Guía didáctica para la inclusión en educación inicial y básica. CONAFE, México, 2010.
- Loui P, Li HC, Hohmann A, Schlaug G. Enhanced cortical connectivity in absolute pitch musicians: A model for local hyperconnectivity. *J Cogn Neurosc* 2011; 23: 1015-1026.
- Loui P, Schlaug G. Investigating musical disorders with diffusion tensor imaging. A comparison of imaging parameters. *Ann NY Acad Sci* 2009; 1169: 121-125.
- Matute C, Ransom B. Roles of white matter in central nervous system pathophysiologies. *ASN Neuro* 2012; 4 (2): 89-101.
- Mehr SA, Schachner A, Katz RC, Spelke ES. Two Randomized Trials Provide No Consistent Evidence for Nonmusical Cognitive Benefits of Briefpreschool Music Enrichment. *PLoS One* 2013; 8: e82007.
- Melhem E, Mori S, Mukundan G, Kraut M, Pomper M, van Zijl P. Diffusion tensor MR imaging of the brain and white matter. *Tractography AJR* 2002: 178.
- Merret D, Peretz I, Wilson S. Moderating variables of music training-induced neuroplasticity: a review and discussion. *Frontiers in Psychology* 2013: 606 (4);1-8.

- Miendarzewska E, Trost W. How musical training affects cognitive development: rhythm, reward and other modulating variables. *Frontiers in neuroscience* 2014; 7(279): 1-18.
- Molesworth T, Sheu L, Cohen S, Gianaron P, Verstynen T. Social network diversity and white matter microstructural integrity in humans. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2015: 10(9):1169-76.
- Moore, E, Schaefer R, Bastin M, Roberts N, Overy K. Can Musical Training Influence Brain Connectivity? Evidence from Diffusion Tensor MRI. *Brain Sciences* 2014; 4: 405-427.
- Moreno S, Bialystok E, Barac R, Schellenberg E, Cepeda NJ, Chau T. Short-term music training enhances verbal intelligence and executive function. *Psychol Sc* 2011; 22: 1425-1433.
- Noppeney U, Friston K, Ashburner J, Frackowiak R, Price C. Early visual deprivation induces structural plasticity in gray and white matter. *Curr Biol* 2005; 15 (13): R488-90.
- Oechslin M, Imfeld A, Loenneker T, Meyer M, Jäncke L. The plasticity of the superior longitudinal fasciculus as a function of musical expertise: a diffusion tensor imaging study. *Front Hum Neurosci* 2009; 3: 76.
- O'Muircheartaigh J, C Dean III D, Ginestet C, Walker L, Waskiewicz N, Lehman K, Dirks H, Piryatinsky I, CL Deoni S. White matter development and early cognition in babies and toddlers. *Hum Brain Mapp* 2014; 35 (9): 4475-4487.
- Orozco-Gómez L, Ruíz-Morfín I, Lámbarry-Arroyo A, Morales-Cruz V. Prevalencia de retinopatía del prematuro. 12 años de detección en el Centro Médico 20 de Noviembre. *Cir Ciruj* 2006; 74: 3-9.
- Paraskevopoulos E, Kuchenbuch A, Herholz SC, Pantev C. Evidence for training-induced plasticity in multisensory brain structures: an MEG study. *PLoS One*, 2012; 7: e36534.
- Pascual-Leone, Amedi A, Fregni F, Merabet L. The plastic human brain cortex. *Ann Rev Neurosci* 2005; 28: 377-401.

- Penhune VB. Sensitive periods in human development: Evidence from musical training. *Cortex*, 2011; 47(9) DOI:10.1016/j.cortex. 2011.05.010
- Peretz I, Zatorre R. Brain organization for music processing. *Ann Rev Psychol* 2005; 56: 89-114.
- Peretz I, Zatorre R. *The cognitive neuroscience of music*. Oxford University Press; Oxford, 2007.
- Perry R. Relating Improvisational Music Therapy with Severely and Multiply Disabled Children to Communication Development. *J Music Ther.* 2003; 40 (3): 227-246
- Posner M, Tang Y, Lynch G. Mechanisms of white matter change induced by meditation training. *Front Psychol* 2014; 5: 1220.
- Pugh A, Pugh L. *Music in the early years*. Taylor & Francis Group: London and New York, 1998.
- Rüber T, Linderberg R, Schlaug G. Differential adaptation of ascending motor tracts in musicians. *Cereb Cortex* 2013; doi: 10.1093/cecor/bht331.
- Rueda M, Rothbart M, Maccandliss B, Saccomanno L, Posner M. Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A* 2005; 102: 14931-14936.
- Sahyoun CP, Belliveau JM, Mody M. White Matter Integrity and Pictorial Reasoning in High Functioning Children With Autism. *Brain Cogn* 2010; 73(3): 180-8.
- Schlaug G, Forgead M, Zhu L, Norton A, Norton A, Winner H. Training-induced neuroplasticity in young children. *Ann NY Acad Sci* 2009; 1169: 205-208.
- Schlaug G, Norton A, Overy K, Winner E. Effects of music training on the child's brain and cognitive development. *Ann NY Acad Sci* 2005; 1060: 219-230.
- Schmahmann J, Smith E, Eichler F, Filley C. Cerebral White Matter: Neuroanatomy, Clinical Neurology and Neurobehavioral Correlates. *Ann NY Acad Sci* 2008; 1142:266-309.
- Schmithorst VJ, Wilke M. Difference in White matter architecture between musicians and no musicians: a diffusion tensor imaging study. *Neurosci Lett* 2002; 321: 57-60.

- Short S, Ellison J, Davis B, Styner M, Gu H, Connelly M, Maltbie E, Woolson S, Lin W, Gerig G, Steven J, Gilmore J. Associations Between White Matter Microstructure and Infants Working Memory. *Neuroimage* 2013; 1 (64): 1-27.
- Shu N, Liu Y, Li J, Yu C, Jiang T. Altered anatomical network in early blindness revealed by diffusion tensor tractography. *PLoS One* 2009; 4 (9) e7228.
- Skoe E, Kraus N. A Little goes a long way: how the adult brain is shaped by musical training in childhood. *J Neurosci* 2012; 32 (34): 11507-11510.
- Steele CJ, Bailey JA, Zatorre RJ, Penhune VB. Early musical training and white matter in the corpus callosum. Evidence for a sensitive period. *J Neurosci* 2013; 33: 1282-1290.
- The Committee for the Classification of Retinopathy of Prematurity. An international classification for the retinopathy of prematurity. *Arch Ophthalmol.* 1984; 102:1130-1134.
- Thomas C, Humphreys K, Jung K, Minshew N, Behrmann M. The anatomy of the callosal and visual association pathways in high-functioning autism. *Cortex*, 2011; 47(7):863-873.
- Walhovd K, Johansen-Berg H, Káradóttir R. Unraveling the secrets of white matter-Bringing the gap between cellular, animal and human imaging studies. *Neuroscience* 2014; 276: 2-13.
- Wan C, Schlaug G. Music making as a tool for promoting brain plasticity across the life span. *Neuroscientist* 2010; 16(5): 566-577.
- Watanabe T, Yagishita S, Kikyo H. Memory of music: roles of right hippocampus and left inferior frontal gyrus. *Neuroimage* 2008; 39:483-491.
- Yakovlev, PI, Lecours, A-R. The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain. Blackwell Scientific: Oxford, UK: 1967. pp. 3-70.
- Yang H, Weiyo Ma, Diankun G, Jiehui H, Dezhong Y. A Longitudinal Study on Children's Music Training Experience and Academic Development. *Scientific Reports* 2014; 4: 5854

REFERENCIAS DE INTERNET

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/es/index.html>

<http://www.jornada.unam.mx/2005/04/29/a03n1cie.php>

<http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx?tema=P>

<http://www.once.es/home.cfm?id=189&nivel=3&orden=6>

<http://ccn.ucla.edu/~jbrown/dti.html>

<http://www.cmrr.umn.edu/research/neuro-11.shtml>

<http://www.csulb.edu/~cwallis/482/fmri/fmri.html>

http://inf.ku.dk/english/research/labs/BRAINlab/research/kupers/research/blind_brain/3/

http://vc.bridgew.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1073&context=honors_proj

<http://nuclear.fis.ucm.es/research/thesis/TM-Rosa-Gantes.pdf>

<http://smri.org.mx/memorias/rad2010/platicas/3.pdf>

TABLA DE ABREVIATURAS

MRI	Imagen por Resonancia Magnética
fMRI	Imagen por Resonancia Magnética funcional
DTI	Imagen por Tensor de Difusión
ROI	Regiones de Interés
BOLD	Blood Oxygenation Level Dependent. Nivel dependiente de la oxigenación sanguínea
MD	Difusión Media
FA	Anisotropía Fraccional
ADC	Coefficiente de Difusión Aparente
OA	Oído Absoluto
MEG	Magnetoencefalograma
AD	Difusión Axial
FFOS	Fascículo Fronto-Occipital Superior
FFOI	Fascículo Fronto-Occipital Inferior
FLI	Fascículo Longitudinal Inferior
CC	Cuerpo Calloso
FM	Fórceps Mayor
Fm	Fórceps Menor
TCE	Tracto Cortico Espinal