

Suma Psicológica, Vol. 19 N° 2
Diciembre 2012, 97-108
ISSN 0121-4381
ISSN-E 2145-9797

PLASTICIDAD CEREBRAL: PARTICIPACIÓN DEL ENTRENAMIENTO MUSICAL

BRAIN PLASTICITY: MUSICAL TRAINING INVOLVEMENT

Nadia Justel y Verónica Díaz Abrahan

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Universidad de Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

Palabras clave:

música, entrenamiento musical, procesamiento cerebral, percepción musical, producción musical, cognición.

A lo largo de este trabajo, se revisaron las principales investigaciones que dan cuenta del efecto del entrenamiento musical tanto del cerebro adulto como en desarrollo. La música realiza demandas únicas al sistema nervioso. Esto llamó la atención de muchos investigadores provocando, en los últimos años, un incremento en las investigaciones en relación a la temática. Este aumento se vio beneficiado por el surgimiento de nuevas técnicas de neuroimagen y que posiciona a la música como una herramienta de investigación de la cognición humana y los mecanismos cerebrales superiores. La percepción y la producción musical son funciones particulares del cerebro humano que dependen de una amplia red neural córtico-subcortical distribuida en ambos hemisferios cerebrales y cerebelo. Los hallazgos en relación al tema indicarían que se encuentran diferencias tanto en la estructura como en el funcionamiento de los cerebros de adultos y de niños debido al entrenamiento musical, y que esto tiene más relevancia que las propiedades innatas de los sujetos. Existe una plasticidad cerebral que se debe a procesos adaptativos fruto de la estimulación ambiental.

Recibido: octubre 26 de 2012

Aceptado: diciembre 3 de 2012

ABSTRACT

Key words: *music, musical training, cerebral processing, musical perception, musical production, cognition.*

The main research about the effect of musical training in adult and childhood brain was revised in this work. The music realizes unique demands to our nervous system. This call the attention of several researchers causing, in the past years, an enhancement of the exploration about this topic; this increment was benefit for the emergence of new neuroimaging techniques, the music positioned as an investigation tool of human cognition and superior brain mechanisms. The musical perception and production are specific functions of the human brain that depend of a wide cortical-subcortical neural net distributed across both hemispheres and cerebellum. The main findings in this area indicated structural and functional differences in the adult and child brain due to musical training, and this is more relevant that innate properties of the subject. There is brain plasticity due to adaptive processes product of the environmental stimulation.

Los mecanismos neurales involucrados en la percepción y producción de la música generan una gran cantidad de preguntas acerca de la neurociencia cognitiva, ya que la música realiza demandas únicas al sistema nervioso. El entendimiento de este fenómeno podría llevar a revelar aspectos particulares de nuestra función neuronal (Zatorre, Chen, & Penhune, 2007). Por ello, durante los últimos años la música ha sido cada vez más utilizada como una herramienta en la investigación de la cognición humana y los mecanismos cerebrales subyacentes. Ella se relaciona con varios dominios cerebrales y por ende, es una herramienta ideal para estudiar cómo el cerebro humano funciona (Pantev & Herholz, 2011).

El procesamiento neuronal de esta función cognitiva superior tiene diferencias y similitudes con el lenguaje verbal. La idea de que existen canales neuronales separados y una localización específica para la percepción de elementos temporales, melódicos, memoria y respuesta emocional a la música, ha logrado consolidarse con el surgimiento de nuevas técnicas de neuroimagen (Peretz & Coltheart, 2003). Por otra parte, los estudios recientes de casos particulares aportan información sobre cómo el cerebro procesa la música. Casos clínicos como el oído absoluto,

amusia congénita y adquirida, epilepsia musicogénica y alucinaciones musicales, así como también las particularidades y cambios anatómicos y funcionales que presenta el cerebro de un músico en contraposición con una persona sin adiestramiento musical, contribuyen al conocimiento del funcionamiento cognitivo musical (García-Casares, Bertier Torres, Froudish Walsh & González-Santos, 2011).

El objetivo general de este trabajo es revisar los estudios que dan cuenta de la plasticidad cerebral a la que puede llegar el encéfalo humano de acuerdo al entrenamiento musical. En una primera instancia, se describen los correlatos neuroanatómicos que permiten tanto la percepción como producción musical. Luego se desarrollarán aquellas investigaciones que estudiaron los efectos del adiestramiento musical, tanto en lo que atañe a los cambios en las estructuras cerebrales, como al funcionamiento de las mismas, en adultos y en niños.

Correlatos neuroanatómicos de la percepción, imaginación y producción musical

De modo resumido, puede decirse que en los sujetos con entrenamiento musical, el tono se

procesa primariamente en el hemisferio cerebral izquierdo, más específicamente en la corteza prefrontal dorsolateral; el ritmo, métrica y el tempo, en los ganglios de la base y cerebelo; el timbre, en el giro y surco temporal superior (de modo bi-lateral); tanto la melodía como el contorno melódico se procesan en el giro temporal superior derecho; los intervalos en el lóbulo temporal dorsal (bi-lateralmente); la sintaxis musical (es decir, el procesamiento estructural de la música) se procesa en los lóbulos frontales de ambos hemisferios y las áreas adyacentes a las regiones que procesan la sintaxis del habla, mientras que la semántica musical se procesa en áreas posteriores del lóbulo temporal, de modo bi-lateral. El análisis del procesamiento musical lleva a la conclusión de que éste depende de una amplia red neural cortical y subcortical distribuida en ambos hemisferios cerebrales y cerebelo, dando cuenta de que el cerebro del músico procesa más que nada con su hemisferio izquierdo, analítico (Arias-Gomez, 2007; Bermudez, Lerch, Evans, & Zatorre, 2009; García-Casares et al., 2011; Soria-Urios, Duque, & García-Moreno, 2011a, b).

Dado que la percepción y la acción se encuentran estrechamente relacionadas, es natural que cuando se escucha música comiencen a moverse ciertas partes del cuerpo en acompañamiento a aquello oído, por ejemplo, se demostró actividad en la corteza motora al escuchar una pieza musical grabada en el piano (Zatorre et al., 2007).

En relación con el tema, Chen, Penhune y Zatorre (2008) investigaron la conexión entre el sistema auditivo y el motor durante la percepción y producción de ritmos musicales, ya que suponían que debía existir un vínculo natural entre ambas regiones, mediado por la corteza premotora. Para investigar esto, realizaron un estudio que consistió en dos experimentos de percepción y producción rítmica, en los cuales los sujetos podían o no anticipar que luego de escuchar determinado ritmo debían o no realizar movimientos.

En los resultados se observaron activaciones del área motora suplementaria, corteza premotora medial y cerebelo durante la escucha pasiva, y la activación de la corteza premotora durante la percepción-producción rítmica. Es-

pecíficamente, los autores confirmaron que el procesamiento musical auditivo-motor involucra tres regiones premotoras asociadas a diferentes aspectos musicales: corteza premotora ventral, dorsal y medial izquierda. Por otra parte, el giro temporal superior de la región auditiva mostró actividad durante la percepción y sincronización de movimientos rítmicos, y el plano temporal derecho se denominó “centro de cómputos” donde los estímulos auditivos son analizados y transmitidos a otras regiones corticales para su procesamiento. Estos hallazgos arrojan luz acerca de la naturaleza implicada en los procesos de acción y percepción musical, sugiriendo una asociación inherente entre los sistemas auditivos y motores (Bangert et al., 2006; Chen et al., 2008; Sluming et al., 2002).

Los estudios neuropsicológicos sugieren que los procesos de imaginación cerebral podrían estar mediados por los mismos mecanismos neurales que son usados en la percepción. Para evaluar esta hipótesis y para poder explorar las bases neurales de la imaginación musical, Zatorre, Halpern, Perry, Meyer y Evans (1996) realizaron una investigación sobre el tema. Los autores sostenían que la imaginación está mediada por los mismos mecanismos que la percepción musical, presentando similitudes funcionales. Particularmente la percepción musical y la imaginación de canciones están asociadas con la actividad neuronal de la corteza auditiva secundaria, así como también con el lóbulo frontal derecho e izquierdo, lóbulo parietal izquierdo y área motora suplementaria. Los resultados del estudio determinaron la activación del área frontal bilateral, hipocampo y tálamo en la generación de imágenes auditivas. Con esto podría concluirse que la imaginación musical activa procesos neuronales similares a la percepción musical. En relación con el tema, Lotze, Scheler, Tan y Braun (2003) realizaron un estudio a violinistas profesionales y aficionados. Los resultados indicaron que existe una analogía entre procesos de imaginación y la ejecución real instrumental, pero que la imaginación es una técnica utilizada de modo deliberado y planificado por los profesionales y no tanto por los amateurs.

La creatividad es un proceso original y novedoso que requiere de pensamiento divergente. La

improvisación musical es un ejemplo de conducta creativa compleja que requiere un alto grado de experiencia e involucra la generación novedosa y contextualmente significativa de contenidos musicales (Bengtsson, Csikszentmihalyi & Ullen, 2007; Manzano & Ullen, 2012). Las funciones cognitivas que se encuentran implicadas en la improvisación son: atención, memoria de trabajo, inhibición de respuestas estereotipadas y selección per se (Bengtsson et al., 2007). Hay un gran cúmulo de estudios que investigaron los sustratos neuronales implicados en la improvisación musical. Los resultados revelaron una amplia actividad neuronal en la generación de estructuras musicales nuevas, entre las que se incluyeron regiones de la corteza prefrontal dorsolateral y dorsomedial, giro frontal inferior, corteza cingular anterior, áreas de asociación parietal, áreas motoras suplementarias y región premotora lateral. Por otra parte, las regiones auditivas, como la conjunción temporoparietal, se relacionaron con el recuerdo de estructuras musicales durante la improvisación, es decir, la memoria de trabajo (Bengtsson et al., 2007; Berkowitz & Ansari, 2008, 2010; Brown, Martinez & Parsons, 2006; Limb & Braun, 2008).

Diferencias cerebrales surgidas gracias al adiestramiento musical

Las investigaciones que compararon las diferencias cerebrales entre músicos y no músicos adultos revelaron diferencias estructurales y funcionales en áreas cerebrales relevantes desde el punto de vista musical, por ejemplo, áreas sensoriomotoras (Elbert, Pantev, Wienbruch, Rockstroh, & Taub, 1995; Gaser & Schlaug, 2003; Groussard et al., 2012; Hund-Georgiadis & von-Cramon, 1999; Schlaug, 2001), áreas auditivas (Bermúdez & Zatorre, 2005; Gaab & Schlaug, 2003; Lappe, Herholz, Trainor, & Pantev, 2008; Pantev et al., 1998; Schneider et al., 2002; Zatorre, 1998) y áreas de integración multimodal (Bangert & Schlaug, 2006; Gaser & Schlaug, 2003; Lotze et al., 2003; Munte, Kohlmetz, Nager, & Altenmüller, 2001; Sluming et al., 2002; Sluming, Brooks, Howard, Downes, & Roberts, 2007; Zatorre et al., 2007). Estas

diferencias se observaron debido a que convertirse en un músico habilidoso requiere de un gran entrenamiento, y el tipo de aprendizaje que conlleva implica desarrollar una gran cantidad de facultades (por ejemplo, percepción, memoria y destrezas motoras). Estas habilidades desarrolladas por los músicos inducen conexiones e interacciones entre diferentes áreas cerebrales.

Las diferencias estructurales observadas entre los cerebros de músicos y no músicos se hacen evidentes en el engrosamiento de diversas áreas en aquellos sujetos con entrenamiento musical, por ejemplo, la porción anteromedial del giro de Heschl, el cuerpo calloso, el plano temporal, además de cambios en materia gris que implican una mayor plasticidad (Bermúdez et al., 2009; Luders, Gaser, Jancke, & Schlaug, 2004).

A continuación, a modo de ejemplificación, se describirán algunos de los artículos que demuestran que existen diferencias entre sujetos con y sin entrenamiento musical, tanto en lo que atañe a la estructura como al funcionamiento del cerebro. Posteriormente, se hará una breve descripción de qué es lo que sucede en el cerebro en desarrollo.

Divergencias en la estructura del cerebro debido al entrenamiento musical

Los músicos son expertos en la realización de operaciones físicas y mentales complejas, como la traducción de símbolos musicales presentados visualmente, movimientos y secuencias de dedos complejos, improvisación, memorización de largas frases musicales e identificación de tonos sin una referencia. La ejecución instrumental requiere de la integración simultánea de información multimodal sensorial y motora con mecanismos de retroalimentación sensorial para la supervisión del rendimiento. Gase y Schlaug (2003) estudiaron las diferencias estructurales entre músicos y no-músicos mediante la evaluación de tres grupos de sujetos: músicos profesionales, músicos aficionados y no-músicos. Los resultados de este estudio indicaron que las diferencias más significativas entre los tres grupos se presentaron en el aumento y distribución de la materia gris del área motora y somato sensorial, área premotora, área parietal superior y

giro temporal inferior. En este caso, se evidenció mayor volumen en los músicos profesionales, intermedio en los aficionados y normal en los no-músicos. Específicamente la corteza premotora y cerebelo mostraron un papel fundamental en la planificación, preparación, ejecución y control de los movimientos secuenciales bimanuales de los dedos. La región parietal superior se destacó para la integración de la información multimodal sensorial y para proporcionar orientación para las operaciones motoras a través de sus conexiones con la corteza premotora; también se encontró involucrada en la lectura a primera vista. Finalmente, el giro temporal superior mostró relevancia para la elección de acciones específicas en respuesta a estímulos visuales durante la ejecución instrumental.

En relación al grosor cortical y la importancia de la red neuronal fronto-temporal desarrollada a través del entrenamiento de músicos profesionales, Bermúdez et al. (2009) realizaron un estudio para evaluar si existía una diferenciación hemisférica entre músicos profesionales y no-músicos. Los autores destacaron en los músicos el papel de la porción lateral del giro de Heschl y otras áreas por fuera de la corteza auditiva primaria a lo largo del giro temporal superior implicadas en la percepción y procesamiento de tono y otros sonidos complejos, como las melodías. Las diferencias en relación con la corteza frontal entre los músicos y no-músicos se manifestaron por el desempeño en diversas tareas musicales que requieren de una variedad de funciones ejecutivas, tales como el mantenimiento, seguimiento y recuperación de la información tonal y el procesamiento jerárquico de la estructura musical.

En referencia a la percepción tonal, Luders et al. (2004) realizaron un estudio morfométrico de la materia gris, con la intención de esclarecer previas investigaciones que mencionaban las diferencias en la asimetría interhemisférica. Para ello tomaron como sujetos de estudio a músicos profesionales, hombres y mujeres, con y sin oído absoluto. Los resultados indicaron que los músicos con oído absoluto presentaron un aumento significativo de la materia gris en el plano temporal izquierdo, en relación a los

músicos sin oído absoluto. Respecto a las diferencias según el sexo, el estudio mostró que los hombres músicos presentaban una profundidad marcada en el surco central con aumento del volumen en el plano temporal izquierdo por el derecho, a diferencia de las mujeres, quienes no presentaron una asimetría hemisférica. Estos estudios permiten vislumbrar las diferencias anátomo-fisiológicas relacionadas con el entrenamiento musical, el oído absoluto y el sexo del músico.

Siguiendo con la percepción de tonos, Schneider et al. (2002) realizaron un estudio sobre la activación del giro de Heschl en la corteza auditiva durante la discriminación tonal, por parte de músicos profesionales y no-músicos. Los resultados revelaron un incremento del 130% en el volumen de la materia gris en la zona antero medial del giro de Heschl en los músicos, luego de ser emitido un estímulo sonoro en las pruebas desarrolladas.

Existe un alto grado de variabilidad en ciertas regiones que indican que existe una diferencia en la percepción y procesamiento de los estímulos auditivos en función de la experiencia musical. Para llegar a esta conclusión, Schlaug, Martin, Thangaraj, Edelman y Warach (1996) desarrollaron un estudio sobre la neuroanatomía funcional de la percepción del tono. Los autores investigaron los cambios cerebrales, en músicos y no músicos, asociados a dos tareas de memoria auditiva: categorización de tonos y monitoreo auditivo. Los resultados confirmaron que las diferencias entre los grupos de estudio se manifestaron en la corteza prefrontal dorsolateral, corteza frontal inferior y córtex parietal anterior.

En relación a la plasticidad cortical, Elbert et al. (1995) hallaron que la representación cortical de los dedos de la mano izquierda en músicos que tocan instrumentos de cuerdas (como el violín) es mayor que en sujetos no músicos. El efecto fue menor para el dedo pulgar izquierdo (el cual no está involucrado en tocar las cuerdas, sino en sostener el instrumento) y no se encontraron diferencias en la representación de los dígitos de la mano derecha. Además, la reorganización cortical de los dedos de la mano izquierda correlacionó con la edad a la cual el músico comenzó

su entrenamiento. Estos resultados sugieren que la representación de diferentes partes del cuerpo en la corteza somatosensorial primaria depende del uso y los cambios que ocurren debido a las experiencias de vida de cada ser humano.

Pantev et al. (1998) llegaron al hallazgo de que existe una mayor representación cortical para tonos de piano que para tonos puros, en músicos que no-músicos. Además, esta mejora correlacionó con la edad a la cual los músicos habían comenzado su entrenamiento musical: cuánto más jóvenes comenzaban, mayor representación cortical se hallaba.

Un estudio muy interesante llevado a cabo por Bangert y Schalug (2006) investigó la especialización cerebral en músicos, según el instrumento utilizado. Para ello compararon a personas que tocaban el piano con sujetos que se dedicaban a instrumentos de cuerdas. El primer grupo mostró un uso especializado mayormente de su mano derecha; mientras que el segundo grupo, de su mano izquierda. Hallaron que los pianistas tuvieron una ventaja en su hemisferio izquierdo en comparación con el grupo que se dedicaba a instrumentos de cuerda, y exactamente el patrón contrario se encontró al observar el cerebro de los violinistas y chelistas. Este estudio indicaría la existencia de una adaptación cerebral diferenciada, dependiendo del instrumento al cual se dedica cada músico en particular. En otras palabras, este resultado sugiere que las diferencias cerebrales no se hallan solamente entre músicos y no-músicos, sino también entre músicos profesionales entre sí, lo cual muestra el alto grado de especialización al cual puede arribar el encéfalo humano.

Como se ha detallado en el texto, la mayoría de los estudios evalúan a músicos en contraste con no-músicos, y la información sugiere que el ambiente juega el papel más importante en los cambios cerebrales observados. No obstante, no puede descartarse por completo que se hallen diferencias innatas en los sujetos músicos y que debido a predisposiciones genéticas, por ejemplo, elijan estudiar música o determinado instrumento. Una manera de dejar de lado el componente innato para enfocarse en lo ambiental, es evaluar no-músicos antes y después de

un entrenamiento musical. Por ello, Lappe et al. (2008) evaluaron a sujetos sin experiencia musical en condiciones controladas de laboratorio y compararon diferentes tipos de adiestramiento musical, para investigar el efecto del entrenamiento de modalidades cruzadas. Un grupo de sujetos se entrenaba sólo escuchando piezas de piano, mientras que otro grupo escuchaba y tocaba el piano. Evaluaron a ambos grupos antes y después de estos entrenamientos, en una tarea de detección de tonos anormales en un patrón musical. Hallaron que el adiestramiento multimodal (auditivo, sensoriomotor) resultó en mayores cambios plásticos en la corteza auditiva que el entrenamiento solamente auditivo.

El cerebelo se encuentra involucrado en el aprendizaje motor y las funciones cognitivas. Debido a ello, Hutchinson, Lee, Gaab y Schalug (2003) investigaron si músicos profesionales, los cuales adquirieron habilidades motoras desde temprana edad y las practican exhaustivamente a lo largo de su vida, tienen un cerebelo diferente que los no-músicos. Los autores hallaron diferencias en el volumen cerebelar entre los músicos y no-músicos hombres, no así en el cerebelo de mujeres. A su vez, este resultado correlacionó con la asiduidad del entrenamiento musical a lo largo de la vida, es decir, aquellos sujetos más intensamente entrenados tenían un cerebelo de mayor volumen que los que habían entrenado menos.

El cuerpo caloso es el principal tracto de fibras de nuestro cerebro y juega un papel sumamente relevante en la integración y comunicación entre los hemisferios cerebrales. Para evaluar si el entrenamiento intenso de los músicos facilitaría la transferencia interhemisférica, Schlaug, Jancke, Huang, Staiger y Steinmetz (1995) investigaron esta estructura en músicos que tocaban el teclado o instrumentos de cuerdas y no-músicos. Los resultados indicaron que no sólo hay diferencias entre el cuerpo caloso de músicos en comparación con no-músicos, sino que además se hallaron diferencias entre los músicos. Aquellos músicos que comenzaron tempranamente su entrenamiento musical tenían mayor desarrollo de esta estructura, que aquellos que comenzaron de modo tardío.

Este conjunto de estudios indicarían que las diferencias halladas en el sistema nervioso de los sujetos se deben al entrenamiento musical, más que a propiedades innatas de las personas. Hay una plasticidad cerebral que se debe a procesos adaptativos fruto de la estimulación ambiental.

Cambios de función en el cerebro debidos al entrenamiento musical

En los párrafos precedentes, se explicaron los cambios que sufren las estructuras del cerebro debido al entrenamiento musical. En este apartado se desarrollarán brevemente las diferencias relacionadas a cambios en el funcionamiento del cerebro de las personas, fruto del adiestramiento musical.

Para evaluar la diferencia entre los cerebros de sujetos con y sin entrenamiento musical, Grousard et al. (2012) realizaron un estudio en el cual compararon la memoria de melodías familiares y no familiares entre músicos y no-músicos, así como las áreas cerebrales que se activaban en dicha tarea. Los resultados indicaron diferencias funcionales entre el recuerdo de músicos y no-músicos. En el caso de los músicos, reconocer las melodías familiares implicó que no sólo se activara su memoria semántica, sino que hubiera una interrelación con la memoria episódica de las melodías escuchadas. En otras palabras, cuando los músicos escuchaban melodías familiares, detalles perceptuales y contextuales se activaban en su mente, relacionando la melodía con memorias autobiográficas. Además, hallaron estructuras cerebrales que los diferenciaban: el hipocampo, un área dedicada al procesamiento y almacenamiento de la memoria episódica, se encontraba más implicado en los músicos que en los no-músicos. Por lo que los resultados sugieren que el entrenamiento musical se asocia con el desarrollo de habilidades mnemónicas específicas, que podrían contribuir a una reserva cognitiva importante en los músicos.

Varias investigaciones neurocognitivas han demostrado que el entrenamiento musical mejora el procesamiento auditivo. Por ejemplo, Boh, Herholz, Lappe y Pantev (2011) evaluaron el procesamiento de patrones auditivos complejos en músicos y no-músicos. Los sujetos

escucharon diferentes secuencias auditivas y fueron evaluados para indagar si percibían las desviaciones no esperadas en el patrón rítmico. Los autores hallaron que los músicos tuvieron una ventaja con respecto a los no-músicos al detectar la desviación del patrón musical, indicando que el entrenamiento afecta la capacidad de la memoria auditiva para descubrir patrones auditivos complejos.

En otro estudio, Gaab y Schlaug (2003) investigaron el patrón de activación cerebral entre músicos y no-músicos en una tarea de memoria para tonos, en donde los sujetos debían juzgar si lo que escuchaban eran dos tonos similares o no. No se hallaron diferencias entre el desempeño de ambos grupos, es decir, todos los participantes pudieron discriminar si dos tonos eran o no similares. Sin embargo, el patrón de activación cerebral fue diferente, pues los músicos mostraron mayor activación supramarginal y temporal posterior derecha; mientras que los no-músicos, una mayor activación en la corteza auditiva secundaria izquierda. Esto indica que los músicos difieren de aquellas personas sin entrenamiento musical en el patrón de activación cerebral, a pesar de que el desempeño comportamental en determinadas tareas sea semejante.

Seppanen, Hamalainen, Pesonen y Tervaniemi (2012) compararon las respuestas de P1, N1 y P2 (componentes de los potenciales relacionados al evento implicados en atención, detección de cambios y clasificación, y evaluación de los estímulos) en músicos y no-músicos. Hallaron que el entrenamiento profesional produjo una mejora en la plasticidad rápida en N1 y P2, lo cual indicaría que el entrenamiento musical modula la plasticidad neural rápida (dentro de los 10 minutos) para la codificación del sonido.

Como se ha mostrado a lo largo del texto, el entrenamiento puede modificar la organización funcional y/o estructural del cerebro. Se demostró en estudios con animales que el hipocampo es una estructura particularmente susceptible de ser modificada mediante el entrenamiento, sin embargo, no se ha encontrado evidencia en humanos. Por ello, Herdener et al. (2010) realizaron 2 estudios en los que evaluaron a músicos y no-músicos mediante resonancia magnética

funcional en una tarea de discriminación de patrones auditivos novedosos. En el primero de estos estudios se halló un aumento de las respuestas neurales a la novedad en el hipocampo izquierdo anterior en los músicos, lo cual da cuenta de un procesamiento diferenciado de acuerdo al entrenamiento. En el segundo estudio se evaluaron estudiantes de música antes y después de su adiestramiento musical. Se halló que luego del entrenamiento universitario, los estudiantes tuvieron un aumento en las respuestas neurales del hipocampo a la novedad. Estos resultados evidenciarían que existen cambios funcionales en el hipocampo adulto de los humanos relacionados al entrenamiento musical.

No sólo se han demostrado cambios funcionales en el cerebro posteriores a entrenamientos musicales prolongados, sino también después de sólo una semana de adiestramiento de discriminación auditiva (Gaab, Gaser & Schalug, 2006). En este estudio en particular, los autores demostraron que luego de 5 días de entrenamiento en discriminación de tonos, los sujetos mostraron mayor actividad en el Giro de Heschl, en el giro supramarginal y en el temporal superior posterior izquierdo, lo cual da cuenta de la plasticidad cerebral de nuestro cerebro a corto plazo.

Nuevamente, este conjunto de estudios demuestra la plasticidad cerebral debida al entrenamiento musical. No sólo se presentan diferencias en estructuras específicas, sino que el funcionamiento de ellas diverge debido al adiestramiento en música, tanto a corto como largo plazo.

Diferencias en el cerebro en desarrollo

El cerebro de los músicos es considerado un objetivo ideal para el análisis de la función y estructura de la plasticidad neuronal. Durante la ejecución, un músico debe integrar rápidamente las señales sensoriales (auditiva, visual y propioceptiva) y los comandos motores (articulatorios, respiratorios y coordinación de los miembros) dentro de la propia persona, así como también con otros músicos que participan en la misma actividad. Este aprendizaje suele comenzar a edades tempranas y mantenerse durante varios

años. A lo largo del texto, se ha explicado cómo el cerebro de los adultos sufre modificaciones de acuerdo a la influencia de la música; en esta sección se presentarán los cambios que pueden surgir en aquellos cerebros que se encuentran en desarrollo, es decir, en el sistema nervioso de los niños.

Dos factores importantes que influyen en la función y estructura cerebral son la maduración debido al desarrollo ontogenético y la intensidad de la formación musical. Para estudiar la influencia de estos dos factores, Ellis et al. (2012) realizaron un estudio transversal, teniendo en cuenta los efectos de la edad (factor de desarrollo madurativo) y la cantidad de horas dedicadas al entrenamiento musical. El estudio se realizó mediante tareas de discriminación melódica y rítmica. Las regiones que se vieron involucradas debido a efectos madurativos fueron: la unión temporofrontal, la corteza premotora ventral y la parte inferior del surco intraparietal, las cuales son regiones que participan en la atención auditiva de los ritmos, la integración sensoriomotora y las transformaciones de la memoria de trabajo de tonos y patrones rítmicos. En cambio, el área que estuvo involucrada gracias al entrenamiento musical fue la parte posterior de la circunvolución temporal superior izquierda; un área implicada en la búsqueda de patrones temporales y la transformación de coordenadas motoras auditivas. Estos resultados dan cuenta de que no sólo influye el entrenamiento musical en el desempeño de los músicos, sino que un factor igualmente importante a tener en cuenta es la maduración del sujeto.

Para investigar la posibilidad de que el entrenamiento musical en la niñez pudiese alterar el desarrollo de las conexiones interhemisféricas a través del cuerpo caloso, Schlaug et al. (2009) evaluaron a 3 grupos de niños: uno con entrenamiento musical intenso (2-5 horas semanales), otro con un entrenamiento leve (1-2 horas semanales) y por último un grupo sin entrenamiento. Los grupos fueron comparados antes de la intervención y 29 meses después. Los autores hallaron que en la medida de base, es decir antes del entrenamiento, todos los grupos tenían el mismo volumen en el cuerpo caloso.

Luego del entrenamiento, aquellos niños que practicaron entre 2 y 5 horas semanales durante más de dos años tuvieron un aumento en su cuerpo calloso, comparados con los demás niños del estudio. Ello indica que el aprendizaje intensivo puede llevar a cambios estructurales en el cerebro.

En el ser humano, la maduración de las fibras neuronales se extiende hasta los 30 años aproximadamente, con diferencias regionales relacionadas con el desarrollo de distintas funciones. Por ejemplo, la maduración de los tractos de fibras frontales y temporoparietales izquierdas coincide con el desarrollo de la memoria de trabajo y la lectura; la maduración de fibras córtico espinales es paralela al desarrollo de los movimientos finos de los dedos.

Hasta el momento, poco se sabe sobre la relación entre el procesamiento musical y las adaptaciones microestructurales de la materia blanca. En relación al tema, Bengtsson et al. (2005) realizaron un estudio en el cual se comparaba a sujetos no-músicos y pianistas profesionales, teniendo en cuenta la cantidad de horas de estudios de la infancia, adolescencia y adultez (por medio de datos autobiográficos). Se observaron los efectos en la materia blanca de cada grupo. Los resultados sugieren que el entrenamiento musical induce plasticidad de la materia blanca, si se produce en un periodo en el cual los tractos de fibras se encuentran en maduración, durante la infancia. La única zona donde se encontró diferencia entre los grupos de adultos estudiados fue la extremidad posterior de la cápsula interna, que también se correlaciona con el entrenamiento durante la infancia. Por otra parte, el cuerpo calloso y los haces de fibras que conectan las áreas corticales de asociación no mostraron diferencias significativas entre la niñez y la adolescencia, lo que refleja que estas áreas están involucradas en tareas no musicales (Bengtsson et al., 2005; Imfeld, Oechslin, Meyer, Loenneker, & Jancke, 2009).

Hyde et al. (2009) compararon los cambios en la estructura cerebral y los comportamentales en niños pequeños (6 años de edad) que recibieron 15 meses de entrenamiento musical o no tuvieron adiestramiento alguno. Los autores

hallaron que los niños que fueron entrenados mostraron cambios en diferentes áreas cerebrales: áreas motoras, cuerpo calloso, regiones auditivas primarias, regiones frontomediales y frontolaterales y la región pericingulada posterior izquierda. Además, los sujetos que recibieron entrenamiento musical mostraron un mejor desempeño en las tareas musicales y auditivas en las cuales fueron evaluados, aunque no se hallaron diferencias en aquellas evaluaciones que no se relacionaban con la música, como las habilidades verbales o matemáticas. Estos resultados son acordes a los hallados en las diferencias encontradas en los cerebros de adultos músicos vs. no-músicos (Seung, Kyong, Woo, Lee, & Lee, 2005). Los cambios cerebrales inducidos por el entrenamiento fueron encontrados en aquellas áreas que se consideran relevantes desde el punto de vista musical.

En dos estudios similares se compararon niños de 9 a 11 años (Norton et al., 2005; Schlaug, Norton, Overy, & Winner, 2005), antes y después de un entrenamiento musical de 14 meses o sin adiestramiento alguno. Se evaluó el rendimiento tanto en tareas relacionadas con la música, por ejemplo tamborileo de dedos (tapping), así como en aquellas sin relación, por ejemplo un test de vocabulario. Hallaron diferencias significativas entre los sujetos que recibieron entrenamiento y los que no, en las evaluaciones relacionadas con lo musical (Hyde et al., 2009; Norton et al., 2005; Seung et al., 2005; Schlaug et al., 2005). Además hallaron diferencias en el test de vocabulario, una tarea no relacionada a la música, lo cual indica una transferencia entre aprendizajes y que el mejor desempeño en el área musical puede influir sobre aprendizajes no relacionados específicamente a la música. Las diferencias entre estos estudios y el Hyde et al. (2009; presentado en el párrafo precedente), en el cual no había transferencia de aprendizaje, pueden deberse a la edad en que fue realizada la evaluación en cada una de las investigaciones: 9-11 y 6 años, respectivamente.

Para investigar cómo el entrenamiento musical afecta la ontogenia, Koelsch, Fritz, Schulze, Alsop y Schlaug (2005) evaluaron tres grupos de sujetos: niños con entrenamiento musical,

adultos con entrenamiento musical y adultos no-músicos, en una tarea de discriminación de tonos. Si bien no hubo diferencias entre los grupos en la realización de la tarea de discriminación, las áreas cerebrales implicadas no fueron exactamente las mismas. En los adultos se activó el giro frontal inferior, corteza frontolateral orbital, ínsula anterior, corteza premotora ventrolateral y áreas anteriores y posteriores del giro temporal superior. En el hemisferio derecho, las activaciones fueron similares para los niños, pero en el hemisferio izquierdo los adultos mostraron una mayor activación en áreas prefrontales, temporales y el giro supramarginal superior. Tanto en adultos como niños, el entrenamiento musical se correlacionó con una mayor activación en el opérculo frontal y la parte anterior del giro temporal superior.

Los estudios descritos en esta sección apoyan los hallazgos presentados en los párrafos precedentes, lo cual da cuenta de la importancia del entrenamiento musical para el desarrollo diferencial del cerebro. Sin embargo, también sugieren que no se debe dejar de tener en cuenta la relevancia del factor madurativo, ya que éste permite que las potencialidades acordes al adiestramiento musical puedan surgir.

Conclusiones

El entrenamiento musical tiene las condiciones necesarias para poder estudiar la plasticidad cerebral en los humanos, ya que es una de las actividades de la vida diaria más complejas y multimodales. La investigación de los efectos del entrenamiento musical a corto y largo plazo arroja información sumamente relevante de cómo el cerebro humano está constantemente reorganizándose cuando se enfrenta a nuevas demandas o influencias ambientales determinadas (Pantev & Herholz, 2011).

Las investigaciones descritas no sólo llevan a dar cuenta de los correlatos anatomofisiológicos de la percepción y producción musical, sino también las diferencias halladas entre músicos y no-músicos. Estas diferencias se deben mayormente al aprendizaje, ya que los músicos tienen diferencias estructurales y funcionales con los sujetos no-músicos debidas al entrenamiento

intenso llevado a lo largo de la vida. Además, aquellos sujetos que comenzaron su entrenamiento más precozmente muestran a su vez diferencias con los músicos menos entrenados (Elbert et al., 1995; Hutchinson et al., 2003; Schlaug et al., 1995). Por otro lado, las diferencias halladas entre los músicos se relacionan con el instrumento en el cual fueron entrenados, por ejemplo, el entrenamiento en violinistas se asocia con adaptaciones en las regiones cerebrales que controlan los movimientos de los dedos de la mano izquierda y el entrenamiento en piano se asocia con adaptaciones cerebrales en aquellas regiones encargadas de controlar los movimientos de los dedos de ambas manos (Amunts et al., 1997; Bangert, Nair, & Schlaug, 2005; Elbert et al., 1995).

Además, los estudios descritos muestran que cuánto antes comience el adiestramiento musical, mayores serán los cambios que surjan en el cerebro de la persona, y que el aprendizaje que sea realizado en el área de la música puede influir en el desarrollo de otros aspectos no relacionados a ella específicamente, por ejemplo habilidades verbales.

Por otro lado, hay estudios que dan cuenta de que con poco entrenamiento (tan sólo una semana) pueden verse cambios en el cerebro de los sujetos, lo cual da cuenta de la enorme plasticidad que tiene el sistema nervioso y de la predisposición que tiene el encéfalo a la percepción y producción musical.

De esta forma, se puede ver que la adaptación cerebral tiene relación directa no sólo con el entrenamiento musical realizado sino también con la exigencia propia de cada instrumento musical. Ello evidencia las diferencias entre cerebros musicales y no musicales, y entre cerebros de músicos dedicados a diferentes estilos musicales, llevando a pensar en la enorme capacidad de adaptación y cambio de la cual el sistema nervioso puede dar cuenta.

Sería interesante continuar evaluando la transferencia entre aprendizajes musicales y no-musicales, ya que los estudios dan cuenta de diferencias de acuerdo a la edad del sujeto. Si la transferencia fuese finalmente confirmada y se demostrara que el aprendizaje musical ayuda

o apuntala otras habilidades cognitivas, podría utilizarse a la música como una herramienta fundamental en la educación de los sujetos, tanto desde edades tempranas como avanzadas.

Desde un punto de vista evolutivo, sería sumamente relevante poder arribar a conclusiones acerca de la función filogenética de esta capacidad cognitiva, ya que ésta data de tiempos simultáneos al surgimiento de capacidades tan esenciales del ser humano como el lenguaje (Walín, Merker, & Brown, 1999). ¿Es su finalidad sólo cultural? ¿es la música una capacidad cognitiva que va más allá de lo meramente recreacional? Tanto éstas como otras preguntas más aguardan la respuesta de futuras investigaciones.

Agradecimientos y Financiamiento

Las autoras agradecen las sugerencias realizadas por la Lic. Valeria Cores que llevaron a la mejora del manuscrito. También al apoyo de CONICET, la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica y UBACyT, Argentina.

Referencias

- Amunts, K., Schlaug, G., Jancke, L., Steinmetz, H., Schleicher, A., Dabringhaus, A., et al. (1997). Motor cortex and hand motor skills: Structural compliance in the human brain. *Human Brain Mapping*, 5, 206-215.
- Arias Gómez, M. (2007). Música y neurología. *Neurología*, 22(1), 39-45.
- Bangert, M., Hinrichs, H., Peschel, T., Heinze, H., Schlaug, G., Rotte, M., et al. (2006). Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: Evidence from fMRI conjunction. *NeuroImage*, 30, 917-926.
- Bangert, M., Nair, D. & Schlaug, G. (2005). *Macroscopic scale anatomical differences in the primary motor cortex of musicians playing different instruments*. In: Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Toronto, Canada.
- Bangert, M. & Schlaug, G. (2006). Specialization of the specialized in features of external human brain morphology. *European Journal of Neuroscience*, 24, 1832-1834.
- Bengtsson, S., Csikszentmihalyi, M. & Ullén, F. (2007). Cortical Regions Involved in the Generation of Musical Structures during Improvisation in Pianists. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(5), 830-842.
- Bengtsson, S., Nagy, Z., Skare, S., Forsman, L., Forssberg, H. & Ullén, F. (2005). Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development. *Nature Neuroscience*, 8(9), 1148-1150.
- Berkowitz, A. & Ansari, D. (2008). Generation of novel motor sequences: The neural correlates of musical improvisation. *NeuroImage*, 41, 535-543.
- Berkowitz, A. & Ansari, D. (2010). Expertise-related deactivation of the right temporoparietal junction during musical improvisation. *NeuroImage*, 49, 712-719.
- Bermudez, P., Lerch, J., Evans, A. & Zatorre, R. (2009). Neuroanatomical Correlates of Musicianship as Revealed by Cortical Thickness and Voxel-Based Morphometry. *Cerebral Cortex*, 19, 1583-1596.
- Bermudez, P. & Zatorre, R. (2005). Differences in gray matter between musicians and nonmusicians. *Annals of New York Academy of Sciences*, 1060, 395-399.
- Boh, B., Herholz, S., Lappe, C. & Pantev, C. (2011). Processing of complex auditory patterns in musicians and nonmusicians. *Plos One*, 6, 1-10.
- Brown, S., Martinez, M. & Parsons, L. (2006). Music and language side by side in the brain: a PET study of the generation of melodies and sentences. *European Journal of Neuroscience*, 23, 2791-2803.
- Chen, J., Penhune, V. & Zatorre, R. (2008). Listening to Musical Rhythms Recruits Motor Regions of the Brain. *Cerebral Cortex*, 18, 2844-2854.
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B. & Taub, E. (1995). Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science*, 270, 305-307.
- Ellis, R., Norton, A., Overy, O., Winner, E., Alsop, D. & Schlaug, G. (2012). Differentiating maturational and training influences on fMRI activation during music processing. *NeuroImage*, 60, 1902-1912.
- Gaab, N., Gaser, C. & Schlaug, G. (2006). Improvement-related functional plasticity following pitch memory training. *NeuroImage*, 31, 255-263.
- Gaab, N. & Schlaug, G. (2003). Musicians differ from nonmusicians in brain activation despite performance matching. *Annals of New York Academy of Sciences*, 999, 385-388.
- García-Casares, N., Bertier Torres, M., Froudish Walsh, S. & Gonzalez-Santos, P. (2011). Modelo de cognición musical y amusia. *Neurología*. doi:10.1016/j.nrl.04.010.
- Gaser, C. & Schlaug, G. (2003). Brain Structures Differ between Musicians and Non-Musicians. *Journal of Neuroscience*, 23(27), 9240-9245.
- Grossard, M., La Joie, R., Rauchs, G., Landeau, B., Chételat, G., Viader, F., et al. (2012). When music and long term memory interact: Effects of musical expertise on functional and structural plasticity in the hippocampus. *Plos One*, 5, 1-8.
- Herdener, M., Esposito, F., di Salle, F., Boller, C., Hiltl, C., Habermeyer, B., et al. (2010). Musical training induces functional plasticity in human hippocampus. *Journal of Neuroscience*, 30, 1377-1384.
- Hund-Georgiadis, M. & von Cramon, D.Y. (1999). Motor-learning-related changes in piano players and non-musicians revealed by functional magnetic-resonance signals. *Experimental Brain Research*, 125, 417-425.
- Hutchinson, S., Lee, L., Gaab, N. & Schlaug, G. (2003). Cerebellar volume of musicians. *Cerebral Cortex*, 13, 943-949.
- Hyde, K., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A., et al. (2009). Musical training shapes structural brain development. *Journal of Neuroscience*, 29, 3019-3025.
- Imfeld, A., Oechslin, M., Meyer, M., Loenneker, T. & Jancke, L. (2009). White matter plasticity in the corticospinal tract of musicians: A diffusion tensor imaging study. *NeuroImage*, 46, 600-607.

- Koelsch, S., Fritz, T., Schulze, K., Alsop, D. & Schlaug, G. (2005). Adults and children processing music: An fMRI study. *NeuroImage*, 25, 1068-1076.
- Lappe, C., Herholz, S.C., Trainor, L.J. & Pantev, C. (2008). Cortical plasticity induced by short-term unimodal and multimodal musical training. *Journal of Neuroscience*, 28, 9632-9639.
- Limb, C. & Braun, A. (2008). Neural substrates of spontaneous musical performance: An fMRI study of jazz improvisation. *Plos One*, 3, 1-9.
- Lotze, M., Scheler, G., Tan, H.R., Braun, C. & Birbaumer, N. (2003). The musician's brain: functional imaging of amateurs and professionals during performance and imagery. *NeuroImage*, 20, 1817-1829.
- Luders, E., Gaser, C., Jancke, L. & Schlaug, G. (2004). A voxel-based approach to gray matter asymmetries. *NeuroImage*, 22, 656-664.
- Manzano, O. & Ullen, F. (2012). Goal-independent mechanisms for free response generation: Creative and pseudo-random performance share neural substrates. *NeuroImage*, 59, 772-780.
- Munte, T.F., Kohlmetz, C., Nager, W. & Altenmüller, E. (2001). Neuroperception. Superior auditory spatial tuning in conductors. *Nature*, 409, 580.
- Norton, A., Winner, E., Cronin, K., Overy, K., Lee, D. & Schlaug, G. (2005). Are there pre-existing neural, cognitive, or motoric markers for musical ability? *Brain Cognition*, 59, 124-134.
- Pantev, C. & Herholz, S. (2011). Plasticity of the human auditory cortex related to musical training. *Neuroscience Biobehavioral Reviews*, 35, 2140-2154.
- Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L.E. & Hoke, M. (1998). Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature*, 392, 811-814.
- Peretz, I. (2006). The nature of music from a biological perspective. *Cognition*, 100, 1-32.
- Peretz, I. & Coltheart, M. (2003). Modularity of music processing. *Nature Neuroscience*, 6, 688-691.
- Schlaug, G. (2001). The brain of musicians. A model for functional and structural adaptation. *Annals of New York Academy of Sciences*, 930, 281-299.
- Schlaug, G., Forgeard, M., Zhu, L., Norton, Andrew, Norton, Andrea, & Winner E. (2009). Training-induced neuroplasticity in young children. The neuroscience and Music III: Disorders and Plasticity: *Annals of New York Academy of Sciences*, 1169, 205-208.
- Schlaug, G., Jancke, L., Huang, Y., Staiger, J. & Steinmetz, H. (1995). Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia*, 33, 1047-1055.
- Schlaug, G., Martin, B., Thangaraj, V., Edelman, R. & Warach, S. (1996). Functional anatomy of pitch perception and pitch memory in non-musicians and musicians: an fMRI-behavioral study, Abstract.
- Schlaug, G., Norton, A., Overy, K. & Winner, E. (2005). Effects of music training on the child's brain and cognitive development. *Annals of New York Academy of Sciences*, 1060, 219-230.
- Schneider, P., Scherg, M., Dosch, H.G., Specht, H.J., Gutschalk, A. & Rupp, A. (2002). Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nature Neuroscience*, 5, 688-694.
- Schulz, M., Ross, B. & Pantev, C. (2003). Evidence for training-induced cross-modal reorganization of cortical functions in trumpet players. *Neuroreport*, 14, 157-161.
- Seppänen, M., Hamalainen, J., Pesonen, A. & Tervaniemi, M. (2012). Music training enhances rapid neural plasticity of N1 and P2 source activation for unattended sounds. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 1-13.
- Seung, Y., Kyong, J., Woo, S., Lee, B. & Lee, K. (2005). Brain activation during music listening in individuals with or without prior music training. *Neuroscience Research*, 52, 323-329.
- Sluming, V., Barrick, T., Howard, M., Cezayirli, E., Mayes, A. & Roberts, N. (2002). Voxel-based morphometry reveals increased gray matter density in Broca's area in male symphony orchestra musicians. *NeuroImage*, 17, 1613-1622.
- Sluming, V., Brooks, J., Howard, M., Downes, J.J. & Roberts, N. (2007). Broca's area supports enhanced visuospatial cognition in orchestral musicians. *Journal of Neuroscience*, 27, 3799-3806.
- Soria-Urios, G., Duque, P. & Garcia-Moreno, J. (2011a). Música y cerebro: fundamentos neurocientíficos y trastornos musicales. *Neurología*, 52, 45-55.
- Soria-Urios, G., Duque, P. & Garcia-Moreno, J. (2011b). Música y cerebro (II): evidencias cerebrales del entrenamiento musical. *Neurología*, 53, 739-746.
- Walin, N., Merker, B. & Brown, S. (1999). *The origins of music*. MIT Press.
- Zatorre, R., Chen, J. & Penhune, V. (2007). When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews*, 8, 547-558.
- Zatorre, R., Halpern, A., Perry, D., Meyer, E. & Evans, A. (1996). Hearing in the Mind's Ear: A PET Investigation of Musical Imagery and Perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8, 29-46.
- Zatorre, R. (1998). Functional specialization of human auditory cortex for musical processing. *Brain*, 121, 1817-1818.