



**UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY**



**Facultad de
Psicología**

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

Trabajo Final de Grado

**Bases neurales del efecto de la música en el
aprendizaje de la lectura y sus dificultades**

31/07/2020

Montevideo, Uruguay

Estudiante: Mariana Sanders Ferro

CI: 4.717.840-2

Tutora: Camila Zugarramurdi

Revisora: Valentina Paz

Resumen

La relación entre el entrenamiento musical y determinadas características del lenguaje viene siendo estudiada desde hace muchos años. Sin embargo, la literatura existente sobre el vínculo entre este tipo de entrenamiento y la adquisición de la lectura en particular, es reciente. Si bien ha demostrado una relación de influencia positiva por parte de la música en los procesos necesarios para el aprendizaje de la lectura, los estudios hasta ahora han sido en su mayoría comportamentales. En el presente trabajo se investigan las áreas cerebrales que comparten ambos procesos, fundamentando en gran parte y contribuyendo a la comprensión de esta influencia positiva. Se pretende profundizar en el vínculo entre los entrenamientos musicales y la adquisición de la lectura, destacando las evidencias sobre las bases neurales del mismo, y demostrando así la capacidad de la música como herramienta potencialmente útil para compensar los mecanismos dañados en el proceso de adquisición de la lectura, como es el caso de las personas con dislexia.

Palabras claves: *entrenamiento musical - adquisición de la lectura - bases neurales - dislexia*

Introducción

Con el objetivo de dilucidar cuestiones relacionadas a la interesante relación entre la música y la lectura (dos dominios que podrían representar la evolución del ser humano debido a su largo proceso en la historia), se propone, en primer lugar, especificar esta relación ya que la misma conlleva varias afluencias. Por lo tanto, se perfiló la temática hacia lo que es la adquisición de la lectura, y particularmente cuando existen dificultades, investigando qué tipo de relación hay y cómo se da esta con la música. Partiendo de bases comportamentales, donde luego de intervenciones musicales individuos con déficits relacionados al aprendizaje de la lectura demostraban mejores resultados en tareas referidas a la misma, el presente trabajo tiene como meta esclarecer los procesos que se dan en este vínculo a nivel neural. Se pretende demostrar las bases neurales de este efecto de la música, las cuales fundamentan la capacidad de esta como herramienta de intervención en los déficits en la lectura.

En primer lugar se hace un recorrido por los procesos y las regiones cerebrales que están implicadas en la adquisición de la lectura. Aquí se detallan algunas características de la organización de nuestra escritura, las unidades elementales de la lengua, los mecanismos y recursos cognitivos que hacen posible la lectura y su desarrollo con el paso del tiempo desde el nacimiento del ser humano. También se explican los factores que predicen la lectura y las condiciones sin las cuales esta no es posible. Profundizando un poco más, se destacan algunas características del procesamiento auditivo en el cerebro, es decir, como este procesa las señales acústicas del habla.

Luego se explican algunas cuestiones relacionadas a la dislexia, ya que si bien no todos las personas con dificultades en la lectura terminan con este diagnóstico, una gran mayoría sí lo hace y sobre todo, los estudios que han investigado esta relación aluden a población con este diagnóstico.

En tercer lugar, se detalla información sobre la relación comportamental entre estos dos dominios. Entre las cuestiones desarrolladas se encuentran el hecho de que los recursos neurales y cognitivos necesarios para la lectura se superponen en el aprendizaje de hacer música, y la mejora de las habilidades lectoras a través del entrenamiento musical. Además, se profundiza sobre el procesamiento de los sonidos deteniéndose en la percepción del ritmo (ya que este es una característica tanto del habla como de la música), y por último se evidencia la relación entre las habilidades rítmicas y la conciencia fonológica.

Finalmente, para alcanzar el objetivo que se propone este trabajo, se evidencian los procesos anatómicos y funcionales de las regiones cerebrales compartidas, que sustentan los efectos positivos de la música en las dificultades del aprendizaje de la lectura, dando lugar a mecanismos que compensan los déficits presentes. Se demuestra además el funcionamiento cerebral complementario y sincronizado, más allá de la activación de diferentes regiones debido a las distintas características acústicas de los dos dominios.

Adquisición de la lectura

- Procesos implicados

Descifrar un código requiere de un aprendizaje y lo mismo ocurre con la lectura. Un lector experto es un descifrador experto (Dehaene et al., 2015). Nuestra escritura se organiza en un alfabeto, señalando cada uno de los sonidos elementales de la lengua hablada, cada fonema, como por ejemplo, el sonido *p* y el sonido *a* de la sílaba *pa*. Cada letra, o grupo de letras, es decir cada grafema se corresponde con un fonema de la lengua hablada. Por lo tanto, todos los buenos lectores saben decodificar, además de los grafemas, sus sonidos y los morfemas de las palabras (forma: raíz, prefijo, sufijo y terminaciones gramaticales).

Para entender la organización cerebral que subyace a la habilidad de leer, se deben observar los cambios que realiza el cerebro en desarrollo, en la adquisición de dicha habilidad. ¿Cómo es que la capacidad de leer emerge de la percepción visual y del lenguaje hablado preexistente? (Schlaggar & McCandliss, 2007). La interpretación de la ortografía, la forma escrita del lenguaje (forma gráfica), demanda el sistema cerebral de procesamiento visual del objeto. La unión entre ortografía y fonología (la forma sonora del lenguaje), es la condición sin la cual no ocurre la adquisición de la lectura. Esta unión implica conexiones funcionales entre los sistemas de procesamiento visual y procesamiento del lenguaje hablado. Por lo tanto, como paso uno, es necesaria la representación visual de la forma de la palabra, lo cual implica la región

occipitotemporal ventral izquierda, más conocida como VWFA (Visual Word Form Area; área visual de la forma de la palabra). La función primaria de esta área durante la lectura es el reconocimiento visual de la palabra que permite una rápida percepción de la misma en la lengua propia. La especialización funcional de esta área aparece durante la adquisición de la lectura. Como paso dos, se requiere la formación de uniones específicas entre estas representaciones visuales (ortográficas) y las representaciones relacionadas al sonido del lenguaje (fonológicas). A su vez, Defior (2014) agrega a estas dos habilidades, la de comprender el texto para una adquisición exitosa de la lectura.

Por su parte, la autora establece que decodificar palabras y comprender son dos cosas diferentes, y son la base del modelo de lectura. La decodificación hace referencia a asignar un sonido al estímulo visual, y comprender significa identificar las palabras escritas para acceder a su significado. Identificar una palabra escrita implica acceder a la información fonológica, semántica y ortográfica. Para explicar tales procesos, la autora hace un recorrido por los modelos que explican los cambios que van ocurriendo en el proceso de adquisición de la lectura hasta alcanzar el dominio de la misma. Cabe distinguir por un lado, los Modelos Evolutivos, los cuales incluyen a los modelos por fases (explican el aprendizaje a través de ellas), y los modelos continuos (quienes sostienen que el progreso lector es continuo y los límites entre las fases son difusos) (Defior, 2014b). Por otro lado, están los Modelos de Lectura Experta, en los cuales es pertinente detenernos. Se distinguen dos, Modelo de Ruta y Modelo Conexionista. El primero establece dos rutas para procesar las palabras. Una ruta subléxica (indirecta o fonológica), por la cual se convierten las palabras escritas en sonido mediante las RCGF (reglas de correspondencias entre grafemas y fonemas). A medida que se desarrolla esta habilidad, el sistema se va sustituyendo por otro más automático y eficaz. Esto da lugar a la segunda ruta (léxica, directa o visual), a través de la cual las palabras se asocian directamente con su significado, implicando un reconocimiento global de las palabras. Ambas rutas están relacionadas y forman parte de un proceso sinérgico en el proceso de adquisición de la lectura. El uso de una o de la otra depende de los conocimientos que ya posee en el momento el lector. El resultado final del proceso de adquisición de la lectura, va a depender básicamente del funcionamiento del ensamblador fonológico, ya que es el único que permite generar las palabras que nunca han sido leídas. El buen lector se caracteriza por tener un procesador fonológico eficaz, que en la lectura hábil funciona automáticamente sin necesidad de esfuerzos conscientes para las operaciones pre léxicas (antes de reconocer la palabra), de manera que puede volcar estos esfuerzos para las operaciones post léxicas o de comprensión. De todas formas, un incorrecto funcionamiento de cualquiera de estos dos procesos, significaría una dificultad lectora. Por último, el modelo conexionista simula las redes neuronales y distingue tres niveles de representación de las palabras, que se corresponden con los niveles fonológicos, ortográficos y semánticos. Primero se encuentra la representación de la palabra ortográfica o escrita (input), luego está la representación de la palabra de forma fonológica

(output), la cual tiene conexión con la representación de la palabra en forma semántica (significado). Las redes conexionistas (simulan las redes neuronales) representan el proceso de aprendizaje de la lectura.

Retomando al momento evolutivo antes de aprender a leer, el cerebro del niño de 3 - 4 años maneja los fonemas de la lengua inconscientemente, es decir que el niño no sabe que sabe. (Dehaene et al., 2015). La lectura es una actividad difícil, mientras que el lenguaje hablado llega espontáneamente. Por lo que mucho antes de aprender a leer, el cerebro del bebé ya está organizado puesto que las áreas del lenguaje hablado funcionan desde los primeros meses de vida, así como también las visuales. Con la lectura, una parte de estas áreas va especializándose para reconocer los grafemas y fonemas, y esto a su vez conlleva una toma de conciencia de la lengua hablada llamada "conciencia fonológica".

Hasta ahora, se han mencionado dos de las habilidades cognitivas requeridas para adquirir la lectura que hacen referencia al conocimiento de las letras y a la integración de esta información con los sonidos correspondientes. Con respecto a las primeras, las *habilidades perceptivo-visuales*, se corresponden al input visual con el cual arranca la lectura (Defior, 2014a). Luego le siguen las *habilidades fonológicas*, las cuales se consideran como las principales e implican tres dimensiones: la conciencia fonológica (CF), la memoria verbal a corto plazo y el acceso rápido al léxico fonológico. La CF hace referencia al conocimiento explícito que tienen las personas de los sonidos de su lengua, habilidad para identificar, segmentar o combinar, de forma intencional, las unidades subléxicas de las palabras, (sílabas, unidades intrasilábicas y fonemas). Existen niveles de la CF: conciencia léxica (identificar palabras); conciencia de rima léxica (identificar rimas en las palabras); conciencia silábica (segmentar y manipular las sílabas que componen las palabras); conciencia intrasilábica (segmentar y manipular el arranque (c-v) y la rima (v-c el final) de las sílabas); y conciencia fonémica (segmentar y manipular las unidades más pequeñas del habla: fonemas). La memoria verbal a corto plazo es la capacidad para codificar y almacenar una pequeña cantidad de información verbal mediante un sistema de representación del sonido. Por último, las habilidades de acceso rápido al léxico fonológico, hacen referencia a la recuperación automática de la fonología de palabras conocidas sin necesidad de reflexión explícita, (Rapid Automated Naming - RAN). Otras de las habilidades relacionadas al desarrollo de la lectura son los *procesos de automatización* (automatizar el uso de las correspondencias grafemas-fonemas), los *procesos morfológicos* (conocimientos gramaticales del lenguaje escrito), y la *prosodia* (detección del acento, las pausas, la entonación). Habiendo explicado estas habilidades es posible concluir que son factores capaces de predecir la lectura. Se resumen en tres (conocimiento de las letras, CF y RAN) y son fundamentales en las etapas tempranas del aprendizaje de la lectura, a medida que se automatiza la decodificación van perdiendo fuerza y el niño pasa de centrarse en la decodificación a centrarse en la comprensión (Zugarramurdi, 2016). Por otro lado, cada uno de estos tres predictores tiene un valor diferente dependiendo de la

lengua que se trate, aún así la evidencia existente afirma que los tres son relevantes en todas las lenguas evaluadas. El conocer el sonido de las letras se basa en la asociación de estímulos visuales y estímulos auditivos, y si se mide previo a la instrucción lectora es un buen predictor del desempeño lector, como también para la decodificación. La velocidad de denominación (RAN) juega un rol en la velocidad y precisión de la decodificación. Consiste en nombrar de manera continua elementos alfanuméricos (letras y números) o no alfanuméricos (objetos y colores). Una buena conciencia fonológica es un requisito indispensable (aunque no suficiente) para comprender lo que se lee.

Por último, es preciso destacar ciertas características con respecto al procesamiento auditivo en el cerebro (Zugarramurdi, 2016). Al hablar, la señal acústica varía en *amplitud* (cambios en el volumen) a distintas escalas de tiempo (o ritmos). Los ritmos más lentos corresponden a la prosodia, o entonación, y varían en el rango de 1 a 3 hercios por segundo. Las sílabas, varían su ritmo en el rango de 4 a 8 hercios (4 a 8 sílabas por segundo) y cada sílaba dura aproximadamente 100-200 milisegundos. Los fonemas tienen un ritmo de entre 25 y 35 por segundo, con una duración de 30 milisegundos por fonema. ¿Por qué son importantes estos ritmos? Parece ser que la actividad eléctrica del cerebro, la cual refleja la actividad de las neuronas, también fluctúa a estos ritmos. Hay evidencia que sugiere que los ritmos lentos del cerebro se sincronizan con los ritmos lentos del habla, y estos ritmos lentos en el cerebro modifican la amplitud de los ritmos más rápidos. Por su parte, Goswami (2011) explica estas cuestiones partiendo de su teoría Temporal Sampling Framework. La autora considera lo fonológico como déficit central de la dislexia (en este caso, la dislexia se explica debido a un problema en el proceso fonológico, sin embargo se ampliará sobre esta condición más adelante en su sección correspondiente). La autora explica las dificultades en este tipo de dislexia a partir de un déficit en la sincronización entre las oscilaciones acústicas y las neurales, a bajas frecuencias. Esto significa que, si la dislexia implica una dificultad con el procesamiento de señales acústicas a bajas frecuencias, las personas con este trastorno presentarían dificultades con el procesamiento de las sílabas, ya que estas últimas se corresponden con dichas frecuencias. Por lo tanto, al fallar estas frecuencias lentas fallan en consecuencia las más rápidas, correspondientes con los fonemas, resultando en dificultades con el procesamiento de las sílabas y de los fonemas, dañando de esta manera la capacidad de adquirir la conciencia fonológica y el posterior aprendizaje de la lectura. Estas características tempranas y temporales de la señal acústica son procesadas en el hemisferio derecho, por lo que resulta posible que sean afectadas por el entrenamiento musical, compensando las dificultades y permitiendo una decodificación alternativa suficiente para el aprendizaje de la lectura (estas cuestiones serán ampliadas más adelante).

Debido a que los sistemas alfabéticos representan los sonidos de las palabras (fonemas) a través de las letras (grafemas), la lectura es principalmente una actividad fonológica, más allá de

lo perceptivo-visual. Por este motivo, deben conocerse las RCGF que establece el código, para lograr una automatización de la lectura conforme se desarrolla la habilidad. Esta tarea es indispensable para ir liberando recursos atencionales y mnésicos. Así mismo, se va reconociendo la palabra con más precisión y fluidez, logrando integrar la actividad semántica para darle significado. Esta tarea se facilita mediante una práctica cotidiana, por lo que es de suma importancia la frecuencia e intensidad de las lecturas en la infancia (Defior, 2014a; Dehaene et al., 2015).

- **Regiones cerebrales implicadas**

Al comienzo de esta sección se destacó un área cerebral implicada en la representación visual de la forma escrita de la palabra, la VWFA, ubicada en la región occipito-temporal del hemisferio izquierdo. Es preciso mencionar las demás áreas cerebrales implicadas en el proceso de adquisición de la lectura. Uno de los principales componentes es la unión temporoparietal. Esto incluye, el Giro Temporal Superior (GTS), el cual se ubica por debajo de la Cisura de Silvio, contiene a la Corteza Auditiva Primaria (CAP) y se relaciona con los procesos fonológicos sub-léxicos, particularmente con las correspondencias grafema-fonema (Ramus, 2004). La CAP está localizada en la zona superior del lóbulo temporal, encargada de percibir, codificar y decodificar la información auditiva. Estas dos serían las más implicadas en el procesamiento fonológico central del aprendizaje de la lectura, son las regiones que más se activan cuando hay dificultades en la misma, y a su vez, a donde apunta la influencia del entrenamiento musical (se detallará más información sobre esto en las siguientes secciones). Además, están implicados el Giro Angular (GA) y el Giro SupraMarginal (GSM), ambos ubicados en la parte inferior del Lóbulo Parietal. El primero comprende el léxico ortográfico, mientras que el segundo, en conjunto con el GTSp (GTS posterior), está implicado en los procesos fonológicos subléxicos. Cuando hay tareas que requieren el trabajo en conjunto de la ortografía y la fonología, el GA y el GSM son las regiones que se activan sugiriendo una relación de las mismas con cuestiones fonológicas y ortográficas (Schlaggar & McCandliss, 2007). Adicionalmente, el Lóbulo Frontal se involucra en menor medida, implicando el Giro Frontal Inferior (GFI; que a su vez comprende el área de Broca), el cual extendido hasta la corteza premotora dorsal ha sido asociado con la producción del lenguaje así como también con el análisis de elementos fonológicos dentro de las palabras (Schlaggar & McCandliss, 2007). También podría relacionarse con los procesos de categorización de las señales acústicas.

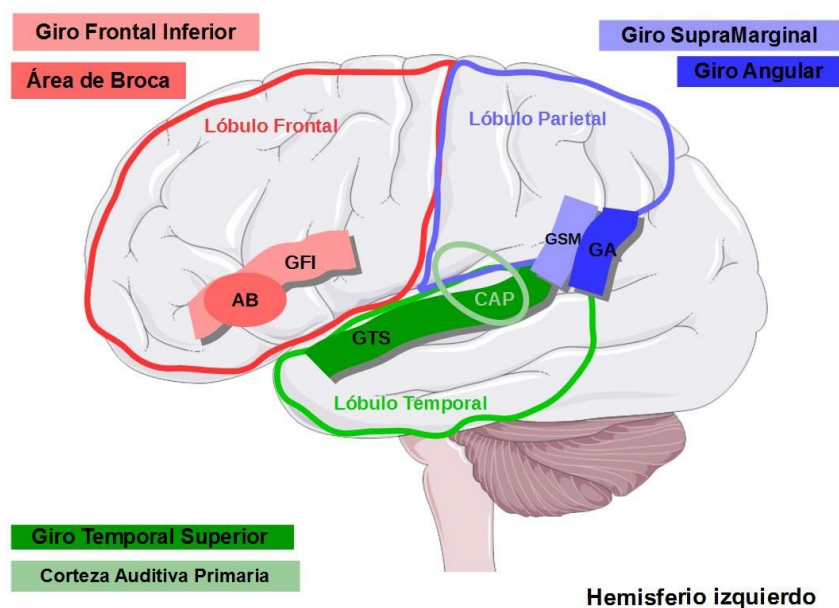


Figura 1. Áreas implicadas en el proceso de adquisición de la lectura. El área visual (VWFA) no está representada dado que no es posible verla en este corte sagital.

Dislexia

La Dislexia del desarrollo es una condición neurobiológica hereditaria, caracterizada por una dificultad inesperada en el desarrollo fluido y preciso de la lectura (Ozernov-Palchik et al., 2016). Afecta aproximadamente entre el 5% y el 17% de los niños. Estos últimos han mostrado anomalías funcionales y estructurales del cerebro en la red de lectura (GFI izquierdo, GSM, GTS, VWFA). El origen de las causas de esta dificultad no está del todo claro debido a la gran cantidad de variantes genéticas y factores ambientales implicados. Por su parte, el aspecto hereditario de la dislexia se estima de ser un 60% aproximadamente, implicando la variación de determinados genes que luego se asocian con los déficits cognitivos, sensoriales y perceptivos vistos en esta dificultad. Con respecto a alteraciones funcionales y estructurales del cerebro, se ha observado un aumento exponencial de las conexiones entre regiones temporales superiores con las regiones temporo-parietales. También el circuito occipito-temporal ventral (VWFA) se vuelve altamente especializado.

Los déficits cognitivos y perceptivos han llevado a adoptar una perspectiva de déficit múltiple, incluyendo además factores de riesgo. Estudios en niños pre-lectores con riesgo hereditario de dislexia, han identificado un desarrollo atípico del lenguaje (Ozernov-Palchik et al., 2016). Se ha reportado un procesamiento atípico de niveles auditivos bajos, de las señales acústicas con variaciones, y en el procesamiento auditivo rápido en pre-lectores con riesgo de dislexia. También, una discriminación dañada del rise time (en los cambios en la amplitud; característica de la señal acústica que se explicará más adelante), lo cual es importante para la

detección del ritmo del habla y la prosodia. Adicionalmente, un pobre aprendizaje perceptivo y una pobre sincronización temporal han sido demostradas, como también déficits en la atención y en las funciones ejecutivas. Por último, condiciones ambientales empobrecidas tienen influencias desfavorables en niños predispuestos genéticamente a la dislexia, aumentando la probabilidad de fallar en la lectura. Por lo tanto, se ha llegado a la conclusión de que la dislexia es el resultado de la interacción entre múltiples riesgos y factores protectores a nivel genético, neural, cognitivo y ambiental. Por ende, un modelo etiológico multidimensional es necesario para entender esta condición. Adoptar un modelo multifactorial incentiva a un acercamiento interdisciplinario, considerando los múltiples componentes para entender y tratar la dislexia.

Muchos adultos con un diagnóstico de dislexia no logran habilidades fluidas y precisas para la lectura. Otros logran una lectura funcional pero mantienen dificultades residuales en el habla, en la conciencia fonológica y en la fluidez. Por último, hay algunos que se convierten en “disléxicos compensados” o “lectores resilientes”. Más allá de esto, hay factores cognitivos y ambientales favorecedores que han surgido en la literatura que incluyen una alta inteligencia, un rico vocabulario, una fuerte dependencia con lo semántico, una extensa memoria visual, fuertes habilidades racionales y la habilidad de mantener la atención. Los estudios cerebrales de personas compensadas han demostrado que estos reclutan regiones adicionales, como por ejemplo se ha evidenciado una fuerte actividad del giro frontal inferior derecho para tareas de procesamiento fonológico (Ozernov-Palchik et al., 2016).

Las capacidades de aprendizaje que presenta el niño así como también las de recuperación, son incluso mayores que las de un adulto por lo que un entrenamiento intenso y repetido puede superar estos déficits (Dehaene et al., 2015).

Relación música-lectura

- Estudios comportamentales

Existe una base teórica para el vínculo entre el entrenamiento musical y la habilidad de leer, ya que los recursos neurales y cognitivos necesarios para la adquisición de la lectura también están presentes y se superponen en el aprendizaje de hacer música (Tierney & Kraus, 2013). Además, hay una amplia evidencia empírica que indica que el entrenamiento musical promueve y mejora la habilidad de leer. Lo más notorio, es que algunos de los aspectos neurales de la decodificación del habla que son deficientes en individuos, como por ejemplo, con dislexia, y que reflejan una sincronización disminuida, se muestran fortalecidos en músicos en comparación con no-músicos. Esto posiblemente sea debido a que tanto la música como el habla son rítmicos, ambos implican un procesamiento complejo de las secuencias de sonidos (Ozernov-Palchik & Patel, 2018). Muchos autores proponen que este vínculo se debe a los mecanismos del procesamiento temporal compartidos por la música y el lenguaje. Este procesamiento temporal es

fundamental para algunos aspectos del desarrollo de la lectura, como la habilidad de analizar gramaticalmente y convertir el flujo del habla en unidades lingüísticas discretas (fonemas, sílabas y morfemas), es decir que los procesos fonológicos serían los que median en este vínculo entre la adquisición de la lectura y el entrenamiento musical. Por su parte, Goswami (2002) y colaboradores investigan y profundizan en las dificultades que presentan los niños con dislexia en la percepción del ritmo. Considerando a este último como una propiedad de los cambios lentos de la amplitud de la señal del habla, asociada a la frecuencia de las sílabas, cuya detección es un problema en disléxicos, investigaron el impacto que este problema en detectar las modulaciones de amplitud puede tener en la percepción del ritmo de las señales acústicas. Diseñaron una tarea perceptiva en la cual la MA (Modulación de Amplitud) se modificó para afectar la percepción del pulso (*beat*), en el flujo auditivo, e hipotetizan que los niños con dislexia van a mostrar una menor sensibilidad a la percepción de las modulaciones de amplitud en comparación con los controles. Se les presentaban secuencias de sonidos con una modificación en el *rise time* (tiempo de subida) de la amplitud de la señal, el cual variaba de 15 ms, percibido como un pulso, a 300 ms, el cual por ser largo se percibía como un cambio en el volumen. Luego se les pedía a los niños que dijeran si percibían un cambio en el volumen o el pulso. Los resultados revelaron que la detección del pulso fue más pobre para los niños disléxicos, y parece variar según el nivel de lectura. Efectivamente concluyen que esta dificultad en detectar las modulaciones lentas de amplitud (relacionadas a las sílabas) afecta en consecuencia a la percepción del pulso. Asimismo, los autores observan una correlación entre la detección del pulso y los niveles de lectura y conciencia fonológica. Si la detección del pulso varía según el nivel de lectura, también demuestra estar relacionado con el procesamiento fonológico, por lo que el déficit primario en la dislexia se asocia a estos dos fenómenos.

Por otro lado, Flaugnacco (2015) y colaboradores evaluaron habilidades de la lectura en niños con dislexia antes y después de un entrenamiento musical, comparándolos con un grupo con entrenamiento de dibujo, y muestran que aquellos niños con entrenamiento musical superaron al grupo de dibujo en varias de las tareas de lectura. En la tarea de lectura de textos, el número de niños con un pobre rendimiento antes del entrenamiento bajó a la mitad luego del entrenamiento musical. Algo similar ocurrió con la lectura de pseudopalabras, fue más preciso en aquellos niños post-entrenamiento musical. Las habilidades fonológicas también mejoraron. Por último, el resultado de la tarea de producción del ritmo terminó convirtiéndose en el mejor predictor de la conciencia fonológica (medida por las tareas diseñadas para ello). Cuanto mejor era el resultado en la tarea de habilidades rítmicas, mejor era en la tarea de conciencia fonológica. Concluyen que efectivamente el entrenamiento musical promueve las habilidades de lectura en niños con dislexia, y apoyan la hipótesis de intervenciones basadas en el ritmo para el desarrollo fonológico.

- Bases neurales

Hay estudios que analizan las dificultades en la lectura y su relación con algún tipo de entrenamiento musical, evidenciando cambios anatómicos en determinadas regiones cerebrales. Sin embargo, es pertinente mencionar que los estudios abocados a estos análisis desde una perspectiva neuroanatómica son relativamente escasos y recientes. A continuación, se detallarán tres estudios realizados con niños, con un entrenamiento musical de por medio y evaluando habilidades de lectura antes y después del mismo. Cabe aclarar que el entrenamiento musical no fue parte de la investigación en los tres estudios, en dos de ellos los niños ya venían con cierto entrenamiento y lo que se les controlaba era el nivel del mismo. En el otro estudio restante, los investigadores sí aplicaron un entrenamiento musical.

Por un lado, en un estudio de 2018 se investigaron los correlatos neurales del procesamiento fonológico en niños con Desarrollo Típico (DT) con y sin entrenamiento musical, y en niños con Dislexia (*Developmental Dislexia - DD*) sin entrenamiento musical, basándose en la afirmación de que el entrenamiento musical muestra asociaciones positivas con las habilidades implicadas en el procesamiento fonológico, pero sin tener en claro los mecanismos neurales que sustentan dicha teoría (Zuk et al., 2018). Para evaluar el procesamiento fonológico, se les presentaban oralmente dos palabras a la vez que aparecía una imagen correspondiente en la pantalla. En la condición experimental (*first sound matching*), los niños debían determinar si las dos palabras empezaban con el mismo sonido o eran diferentes. En la condición control (*voice matching*) tenían que determinar si las dos palabras eran dichas por la misma voz (mismo género) o no. También evalúan a los niños con un set de evaluaciones para la escritura y la lectura, además de características generales. Como era de esperar, el grupo con DD demostró puntajes bajos en los tests de lectura y escritura, mientras que ambos grupos (con y sin entrenamiento) de los niños con DT no demostraron diferencias. Con respecto a las neuroimágenes, a través de la información dada por Resonancia Magnética Funcional (fMRI), se revelan que los tres grupos muestran diferencias en el Giro Angular (GA) bilateral, en el Giro SupraMarginal (GSM) izquierdo, y en el Giro Temporal Superior (GTS) derecho. Los niños con DD muestran una menor activación de dichas áreas, en comparación con los grupos con DT (con y sin entrenamiento musical), mientras que los niños con entrenamiento musical muestran mayores activaciones bilaterales en comparación con los grupos sin entrenamiento musical. De esta manera, se puede afirmar que la activación funcional de las regiones temporo-parietales del hemisferio izquierdo asociadas con el procesamiento fonológico, está dañada en niños con dislexia, y mejorada bilateralmente en niños con entrenamiento musical. En base a estos resultados, los autores proponen que el entrenamiento musical facilita la activación bilateral de estas regiones, estableciendo un camino neural alternativo para la lectura y promoviendo mecanismos neurales compensatorios del hemisferio derecho en lectores con dificultad. Esto también evidencia de que por más que la

especialización del hemisferio izquierdo haya sido atribuída ampliamente al logro de la lectura, la activación del hemisferio derecho puede ser beneficioso entre los individuos que demuestran patrones neurales atípicos durante el aprendizaje de la lectura, y pueden ser ocupados por experiencias ambientales como por ejemplo un entrenamiento musical.

Continuando con los estudios abocados a investigar regiones cerebrales compartidas por estos dos dominios, algunos autores investigaron si la práctica de un instrumento musical puede mejorar la eficiencia neural en la decodificación de la información auditiva (Seither-Preisler et al., 2014). Para esto dividieron al grupo en dos (los niños ya venían con una práctica musical previa), por un lado estaban los “practicantes bajos” y por otro los “practicantes altos” (esto fue medido por un test de aptitud musical). Hubo dos tomas de medida con un intervalo de tiempo de 13 meses entre ellas. En cada toma se aplicaron evaluaciones psicológicas, auditivas y evaluaciones cognitivas. Con respecto a los tests cognitivos, evaluaron las dos veces el Coeficiente Intelectual (CI), la lectura (fluida) y la ortografía. También en ambas tomas hubo una sesión de imagen con resonancia magnética estructural (MRI) para evaluar la anatomía de la CA (Giro de Heschl y planum temporale), y una magnetoencefalografía funcional (MEG) para investigar el funcionamiento de la misma, en respuesta a estímulos acústicos a los cuales los niños debían escuchar pasivamente. Los autores encuentran que luego de un entrenamiento musical de 13 meses las diferencias ocurren en el tamaño, en la eficiencia neural y en la sincronización bilateral de la CA. En cuanto a las habilidades de lectura, demuestran estar relacionadas a las actividades musicales. Aquellos niños que pasaban más tiempo practicando un instrumento musical, presentaban un aumento de tamaño del Giro de Heschl (giros temporales transversos ubicados en el extremo posterior del GTS, que permiten el sentido de la audición), y una sincronización mejorada entre hemisferios, dado que entre ambos grupos varió la asincronía bilateral. Esta última disminuye cuando aumenta la práctica musical. Es sabido que los hemisferios cerebrales están en constante intercomunicación, pero este estudio evidencia que el entrenamiento musical aporta a dicha comunicación y es generadora de una sincronización que al parecer podría favorecer a las rutas alternativas para los mecanismos relacionados al aprendizaje de la lectura. Por lo tanto, en esta oportunidad se revela que el entrenamiento musical es capaz de promover la sincronización de la actividad de la CA y por ende aumentar la transferencia interhemisférica, acelerando la maduración funcional de la CA en un desarrollo atípico.

Puesto que, como se mencionó más arriba, las dificultades a las cuales beneficia el entrenamiento musical están relacionadas con el procesamiento temprano de las señales acústicas, es preciso analizar lo que se denomina como “*Voice Onset Time*” (VOT) ya que este es un parámetro fonológico y niños con dislexia presentan déficits en el procesamiento del mismo. VOT hace referencia al lapso de tiempo entre el aire de los gestos laríngeos y el sonido oral del comienzo de la letra (Ingram, 2007). La sensibilidad al VOT impacta en la percepción categórica (PC) de estímulos auditivos. Por PC se entiende como la habilidad para discriminar entre

estímulos, a partir de un grupo continuo de estímulos. En la percepción del habla, se identifican categóricamente sonidos acústicamente distintos de un continuo de características similares (Bidelman & Walker, 2019; Ingram, 2007). Por ejemplo, lograr identificar dónde empieza un estímulo y dónde termina otro de una secuencia acústica de estímulos (sílabas) tales como “ba”, “da”, “pa”. De todas formas, si el proceso fonológico anormal en niños con DD es causa de las dificultades en la percepción de características acústicas-fonéticas, sigue siendo una cuestión abierta. En este estudio de Frey et al. (2019), el objetivo era determinar si niños con DD podrían desarrollar una mejor sensibilidad para el VOT luego de un entrenamiento musical. Tanto antes como después del entrenamiento, los niños fueron evaluados cognitivamente y con tests de lectura para comparar habilidades y funcionamiento entre niños con DD y niños con DT. Del grupo de niños con DD, la mitad fueron entrenados musicalmente (DysMus) y la otra mitad con un entrenamiento de dibujo (DysPaint). En cuanto a la tarea para visualizar la sensibilidad al VOT, la misma consistió, bajo un paradigma de *oddball*, en presentarles a los niños aleatoriamente estímulos estándar intercalados con estímulos con variaciones en la duración o frecuencia del VOT, mientras se los registraba con EEG. Se estudiaron los efectos de 6 meses de entrenamiento musical en la percepción del VOT a través del Mismatch Negativity (MMN). El MMN hace referencia a un potencial evocado (*Event-Related Potential - ERP*) que muestra la respuesta eléctrica cerebral que se presenta al haber un cambio en un estímulo auditivo repetitivo y que puede ser iniciada aún sin prestarle atención. Se mide a partir de la diferencia entre el ERP del estímulo desviado y el ERP del estímulo estándar. Por lo tanto, un aumento de la diferencia entre la percepción de los estímulos (desviado y estándar), significa una mejor distinción de ambos estímulos, y por ende un aumento en la capacidad de procesar la información del VOT. Luego del entrenamiento musical aumenta el MMN en el grupo experimental, pero no en el grupo control. Los autores esperaban una normalización del efecto en el grupo musical pero no en el de dibujo. Para esta hipótesis, compararon el grupo con TD antes del entrenamiento con los grupos DysMus y DisPaint después del entrenamiento. Los efectos fueron similares para TD y DysMus, pero fue mayor para TD que para DysPaint. Esto sugiere que efectivamente el entrenamiento musical promueve el procesamiento preatencional del VOT, y concluyen que el mismo mejora la sensibilidad al VOT, sugiriendo una posible mejora de la percepción categórica. Cabe destacar sin embargo que los autores no observan mejoras en ésta cuando la miden comportamentalmente.

Si bien hay regiones cerebrales compartidas entre el lenguaje y la música, las características acústicas de ambos son diferentes y por lo tanto es posible que activen regiones distintas de la corteza auditiva bilateral. Estudios con población adulta se han encargado de investigar sobre estas cuestiones relacionadas a las distintas regiones cerebrales implicadas y su funcionamiento complementario, los cuales se detallarán en los siguientes párrafos.

De una señal acústica se extraen por un lado las palabras y por otro las melodías. La percepción del habla depende fuertemente (pero no solo) de la habilidad de procesar modulaciones temporales cortas, que son decisivas para discriminar palabras con sonido similar, y la percepción de la música, de manera complementaria, requiere de la habilidad de procesar la composición detallada de los espectros del sonido, es decir de las variaciones tonales del sonido. Partiendo de esta base, en un estudio llevado a cabo por Albouy y colaboradores (2020), se investiga la asimetría cerebral para el habla y la música y se preguntan si dicha asimetría emerge de las señales acústicas o de las redes neurales específicas de cada dominio. Analizan con fMRI el impacto de Modulaciones Espectro-Temporales en las respuestas neurales al habla y a las melodías. Con respecto a las Modulaciones Espectro Temporales, (*Spectro-Temporal Modulations - STM*), estas refieren a manipulaciones que descomponen las señales acústicas tanto en la dimensión temporal como en la espectral. En dicho estudio los autores presentan “oraciones cantadas” a participantes adultos, degradadas temporal o espectralmente. La tarea consiste en identificar si la melodía o el contenido oracional (lenguaje) de dos estímulos consecutivos es igual o diferente. Los autores observaron que la percepción del lenguaje se vio más afectada cuando se degradaba información temporal, mientras que la percepción de las melodías estaba más afectada por las degradaciones espectrales. A nivel neural, encuentran que la decodificación neural de los contenidos melódicos y del lenguaje dependen en primer lugar de patrones de la actividad neural en la CA derecha e izquierda respectivamente. Por lo tanto, concluyen que la sensibilidad que tiene la CA a las modulaciones espectro-temporales, hace a la especialización neural de dicha área para dichas características. El hecho de que la percepción del lenguaje haya sido más afectada por la degradación temporal, y la percepción de las melodías por la degradación espectral, significa, por lo tanto, que ambos dominios aprovechan un continuo espectro-temporal de dos sistemas neurales (ubicados uno en cada hemisferio), que se complementan, haciendo que la decodificación de las características acústicas resulte más eficiente.

Nuevamente se confirma la eficiencia de la sincronización de la CA mediante estímulos musicales, apuntando a la idea de que ambos dominios optimizan los mecanismos neurales de una manera complementaria, a través de los cuales el cerebro humano procesa las señales acústicas. Por otro lado, también se evidencia un rol del hemisferio derecho en la comunicación humana, algo que podría sorprender dada la creencia de lateralizar todo lo relacionado al lenguaje al hemisferio izquierdo.

Retomando la línea planteada sobre la percepción categórica, hay estudios que revelan la posible relación e influencia de la música sobre ésta. Bidelman & Walker (2019), investigando la plasticidad de la categorización auditiva, analizan por un lado, si las regiones cerebrales en las cuales se forman las categorías del lenguaje y de la música se diferencian según la experiencia musical. Para esto, se registró la actividad cerebral con EEG de 20 personas adultas (10 músicos y 10 no-músicos) mientras categorizaban rápidamente sonidos del habla y de la música.

Previamente estos autores ya habían demostrado que músicos entrenados tienen una categorización mejorada del habla, es decir más rápida, comparada con no-músicos. De acuerdo con la idea de que la musicalidad expande regiones del habla y automatiza el proceso categórico, los autores creen que aquellos individuos con entrenamiento musical logran categorizar de manera correcta con activaciones tempranas en la CAP. En cuanto a las personas con menos experiencia musical, la categorización sería más compleja ya que necesitan transferir la información a regiones más complejas del procesamiento del sonido, como lo sería el Giro Frontal inferior (GFI). Efectivamente, los resultados revelan una doble disociación funcional de la red auditiva-lingüística (CAP-GFI) que sustenta la percepción categórica y que depende de la musicalidad y del dominio del estímulo. Los autores observaron que, mientras que los músicos muestran una categorización neural temprana en la CAP, los no-músicos transmiten la información a áreas lingüísticas de mayor orden, al GFI, para acceder a las representaciones categóricas. En conclusión, la musicalidad también parece tener cierta influencia en lo que respecta a la PC, automatizando habilidades que apoyan a los procesos auditivos-perceptivos necesarios para la categorización del sonido.

Por otro lado, y profundizando aún más en el procesamiento categórico auditivo, Mankel et al. (2020) evalúan si diferencias individuales de la musicalidad afectan la categorización del lenguaje. Con “*musicalidad*” hacen referencia a un potencial innato para la música sin necesidad de entrenamiento formal, lo que los autores llaman como “*musical sleepers*”. Incluso no-músicos varían en sus habilidades innatas musicales, y personas con altos niveles de musicalidad muestran procesos neurales fortalecidos del lenguaje. Por lo tanto, si la PC se acompaña de las diferencias de los individuos en sus habilidades auditivas-perceptivas, los autores predicen que los individuos, musical sleepers, mostrarían respuestas comportamentales y neurales más fuertes para la PC del lenguaje (es decir, una decodificación de las categorías más eficiente). En esta ocasión, midieron con EEG a no-músicos que varían en sus habilidades de escuchar música mientras clasificaban vocales a lo largo de un continuo acústico-fonético. Los resultados revelan que “*musical sleepers*” categorizan el lenguaje más eficientemente (más rápido, reflejado por los tiempos de reacción), lo cual también se evidencia por una decodificación categórica fortalecida, en comparación con individuos con una aptitud musical más empobrecida. Los correlatos neurales para la PC ocurren en los ERPs N1 y P2 (N1 para el pico negativo entre 100-160ms, y P2 para el pico positivo entre 160-220ms). Para la decodificación categórica miden restando la latencia de P2 de cada extremo del continuo de las vocales presentadas, menos la latencia del punto medio. “*Musical sleepers*” mostraron mayores diferencias de latencia en el hemisferio derecho que los no “*musical sleepers*”, demostrando mejores respuestas para categorizar en la CA derecha. Además, en musical sleepers, se observan mayores diferencias de latencia en P2 en el hemisferio derecho respecto al hemisferio izquierdo. Estos resultados demuestran que la eficiencia de los procesos categóricos en ambos niveles (neural y comportamental) varía según sus habilidades perceptivas

auditivas inherentes. El estudio también evidencia la existencia de una sensibilidad auditiva natural en ausencia de entrenamiento musical, que se asocia a mejoras en el procesamiento de la categorización auditiva. Por lo que, sin descartar la experiencia de la que dependería la musicalidad, los autores exponen que el “cerebro musical” probablemente sea como un interjuego entre predisposiciones, factores ambientales y entrenamiento. Dado que las cuestiones relacionadas al lenguaje siempre fueron conocidas por estar lateralizadas en el hemisferio izquierdo, es sorprendente el hecho de que al parecer las respuestas neurales para la categorización de lenguaje son más aparentes en la CA derecha, lo cual hace posible que individuos con gran musicalidad busquen otras fuentes complementarias del hemisferio derecho para el procesamiento del lenguaje. Asimismo, se sigue dando lugar a la influencia positiva de la música en los procesos necesarios para la adquisición de la lectura, permitiendo mecanismos y regiones compensatorias en caso de tener dañadas las redes típicas del lenguaje. Concluyendo, se destaca que algunos individuos poseen naturalmente habilidades auditivas superiores que permiten un mejor procesamiento neural y una mejor percepción categórica del habla, lateralizada en el hemisferio derecho. De todas maneras, una larga experiencia musical mejora la precisión de clasificar sonidos y aumenta la velocidad de acceso a representaciones del lenguaje más allá de las habilidades naturales o inherentes.

En resumen, las áreas cerebrales que se comparten entre ambos dominios, se relacionan a los procesos de categorización de sonidos, lo cual permite un desarrollo normal de la capacidad de asociar correctamente los sonidos a su letra correspondiente, habilitando así el aprendizaje de la lectura. Por lo tanto, cuando existen déficits en dicho aprendizaje, los procesos afectados podrían corresponderse con un desarrollo atípico en estos niveles del procesamiento de las señales acústicas, en donde el entrenamiento musical tendría una influencia positiva compensando tales procesos.

Conclusión

Por lo tanto, si la música es una característica acústica procesada preferencialmente en el hemisferio derecho, y el lenguaje en el hemisferio izquierdo, ¿cómo es posible que un entrenamiento musical activando regiones del hemisferio derecho puede compensar dificultades procesadas en el hemisferio izquierdo?, y por ende demostrar así un efecto positivo para la adquisición de la lectura, sobre todo cuando esta se encuentra dañada.

A lo largo del trabajo, se pretendió demostrar evidencias que fundamentan los beneficios de la música en los procesos de adquisición de lectura de manera contundente, puesto que se investigó más allá de las respuestas comportamentales. El hecho de evidenciar las bases neurales de estos efectos contribuye con la credibilidad de este tipo de intervención y con una

mayor seguridad al momento de elegirlo como una herramienta para trabajar las dificultades en la lectura. Además, también contribuye con la garantía de los resultados, dado que genera cambios anatómicos y funcionales en el cerebro, sirviéndose de la plasticidad neural. Sin embargo, es necesario tener en cuenta el momento de aplicación, ya que si se aplica en un niño que recién comienza a leer, los beneficios serán mayores y más resistentes en el tiempo que aplicándolo en adolescentes o adultos.

En un primer momento, los procesos y las regiones implicadas en la adquisición de la lectura dejan (además de la evidencia de regiones compartidas con el procesamiento de la música) a los procesos fonológicos (o mejor dicho a la conciencia fonológica), como un componente imprescindible para una adquisición exitosa de la lectura. A su vez, en muchos casos son estos los procesos que resultan dañados causando una dificultad, dejando como consecuencias un desarrollo posterior atípico (como sucede en la dislexia), donde la persona es incapaz de acceder a las representaciones fonémicas de la lengua, inhabilitando la adquisición de la lectura adecuadamente y por medios convencionales. Para determinar qué es exactamente lo que ocurre, en qué momento y cómo la música entra en juego a favor de reparar este desarrollo perturbado, es necesario entender cómo se procesan estas cuestiones fonológicas en el cerebro, y aún más, conocer primero el procesamiento de las señales acústicas en el cerebro. De esta manera, se constata una característica fundamental compartida por ambos dominios, que es el hecho de ser rítmicos, y por consiguiente implican un procesamiento complejo de las secuencias de sonido. Esta característica es el puntapié para profundizar en las bases neurales de este vínculo positivo entre la música y la lectura. A esto se le suma el procesamiento temporal compartido por ambos, ya que el cerebro procesa las señales acústicas a los mismos tiempos (ritmos) que la actividad eléctrica cerebral espontánea. En otras palabras, la actividad eléctrica del cerebro fluctúa a los mismos tiempos en los que se procesan los fonemas (así como también las sílabas), haciendo que los tiempos relacionados al procesamiento de la conversión de las letras en sus correspondientes sonidos, determinen como principal mediador de este vínculo a los procesos fonológicos. Este procesamiento ocurre en etapas tempranas del proceso de la señal acústica y preferentemente en regiones del hemisferio derecho, por lo que finalmente aparece la conexión con la música y los entrenamientos musicales en especial. Es en ese preciso momento y lugar donde también ocurre el procesamiento de estímulos musicales, por lo que interviniendo con un entrenamiento musical se promueve la sensibilidad a estas características de la señal acústica. Entonces, si las señales acústicas de los fonemas (requisito previo para la adquisición de la lectura), no pueden continuar con su proceso normal en el hemisferio izquierdo como ocurre en el desarrollo típico, podría decirse que buscan ser procesadas en otras regiones, complementándose con el hemisferio derecho, que con el apoyo de intervenciones musicales logran seguir su curso de forma alternativa. Aún más, dado que anatómicamente hablando, las regiones temporo-parietales del hemisferio izquierdo asociadas con el procesamiento fonológico, muestran

menos activaciones en niños con dislexia y mejores activaciones bilaterales en niños con entrenamiento musical, se está comprobando que este último facilita la activación bilateral de regiones asociadas al procesamiento fonológico, estableciendo mecanismos compensatorios del hemisferio derecho. Es interesante destacar el rol de este último como fuente a la que se recluta para compensar procesos lateralizados a la izquierda. Otras regiones, como los Giros de Heschl en la CA también se ven modificados luego de un entrenamiento musical aumentando sus activaciones, cooperando con el procesamiento auditivo. Conjuntamente con esto, debido a la utilización de ambos hemisferios, es lógico pensar que la música también colabora con la comunicación y la sincronización de ambos hemisferios, favoreciendo las rutas compensatorias y alternativas para el aprendizaje de la lectura y la decodificación de las señales acústicas. Por último, otro de los procesos requeridos para el aprendizaje de la lectura que resulta afectado positivamente por la música, es el de la percepción categórica. En este caso la música se encarga de automatizar estos procesos de manera eficiente, los cuales también ocurren en la CA derecha. Desprendiéndose un poco de la temática central, cabe destacar la idea de un potencial innato para la música (musicalidad), es decir una mayor predisposición a cuestiones relacionadas con la música sin entrenamiento formal de la misma. Quienes presentan este potencial, también demuestran tener procesos fortalecidos del lenguaje.

En suma, la relación música-lenguaje se hace visible en regiones cerebrales encargadas de procesar la información acústica en etapas tempranas, es decir que, conociendo que en estas etapas tiene lugar el procesamiento fonológico de la lectura, la influencia del entrenamiento musical apunta sobre el mismo, mostrando un efecto compensatorio en las dificultades para el aprendizaje de la lectura a dicho nivel. Asimismo, el entrenamiento musical aumenta la sincronía neural entre el sistema auditivo, haciendo del mismo una manera efectiva de mejorar las habilidades para la lectura en niños. Se piensa la intervención con esta herramienta musical como una opción que contribuye con las dificultades en la lectura, sin dejar de lado el entrenamiento de la misma en sí, funcionando así como complementarias. Además también es preciso tener en cuenta el tipo de dificultad en específico y las características e intereses del niño. De todas maneras, a través de la mejora de habilidades rítmicas y el hecho de que la música sea en sí misma una actividad gratificante y emocionalmente estimulante, hace que sea una herramienta educativa poderosa, mejorando los procesos atencionales, perceptivos y motivacionales. Es importante también la intervención en etapas tempranas de la vida ya que así es posible que los beneficios se extiendan hasta la adultez, de lo contrario, la intervención en la adolescencia o en adultos no genera beneficios a largo plazo (Tierney & Kraus, 2013).

“Words and music are the tracks of human evolution.” John S. Dunne

Referencias bibliográficas

- Albouy, P., Benjamin, L., Morillon, B., & Zatorre, R. J. (2020). Distinct sensitivity to spectrotemporal modulation supports brain asymmetry for speech and melody. *Science*, 367(6481), 1043-1047. <https://doi.org/10.1126/science.aaz3468>
- Bidelman, G. M., & Walker, B. (2019). Plasticity in auditory categorization is supported by differential engagement of the auditory-linguistic network. *NeuroImage*, 201, 116022. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116022>
- Defior, S. (2014a). *Procesos implicados en el reconocimiento de las palabras escritas = Processes involved in the recognition of written words*. 20.
- Defior, S. (2014b). *Procesos implicados en el reconocimiento de las palabras escritas = Processes involved in the recognition of written words*. 20.
- Dehaene, S., Dehaene-Lambertz, G., Sevilla, Y., Padilla López, L., & D'Alessio, M. J. (2015). *Aprender a leer: De las ciencias cognitivas al aula*. Siglo XXI.
- Flaugnacco, E., Lopez, L., Terribili, C., Montico, M., Zoia, S., & Schön, D. (2015). Music Training Increases Phonological Awareness and Reading Skills in Developmental Dyslexia: A Randomized Control Trial. *PLOS ONE*, 10(9), e0138715. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138715>
- Frey, A., François, C., Chobert, J., Velay, J.-L., Habib, M., & Besson, M. (2019). Music Training Positively Influences the Preattentive Perception of Voice Onset Time in Children with Dyslexia: A Longitudinal Study. *Brain Sciences*, 9(4), 91. <https://doi.org/10.3390/brainsci9040091>
- Goswami, U., Thomson, J., Richardson, U., Stainthorp, R., Hughes, D., Rosen, S., & Scott, S. K. (2002). Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia: A new hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(16), 10911-10916. <https://doi.org/10.1073/pnas.122368599>
- Goswami, Usha. (2011). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(1), 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.10.001>

- Ingram, J. C. L. (2007). *Neurolinguistics: An Introduction to Spoken Language Processing and its Disorders*. 444.
- Mankel, K., Barber, J., & Bidelman, G. M. (2020). Auditory categorical processing for speech is modulated by inherent musical listening skills: *NeuroReport*, *31*(2), 162-166. <https://doi.org/10.1097/WNR.0000000000001369>
- Ozernov-Palchik, O., & Patel, A. D. (2018). Musical rhythm and reading development: Does beat processing matter?: Rhythm and reading development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1423*(1), 166-175. <https://doi.org/10.1111/nyas.13853>
- Ozernov-Palchik, O., Yu, X., Wang, Y., & Gaab, N. (2016). Lessons to be learned: How a comprehensive neurobiological framework of atypical reading development can inform educational practice. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *10*, 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.05.006>
- Ramus, F. (2004). The Neural Basis of Reading Acquisition. En *The cognitive neurosciences* (3rd ed, pp. 815-824). MIT Press.
- Schlaggar, B. L., & McCandliss, B. D. (2007). Development of Neural Systems for Reading. *Annual Review of Neuroscience*, *30*(1), 475-503. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.28.061604.135645>
- Seither-Preisler, A., Parncutt, R., & Schneider, P. (2014). Size and Synchronization of Auditory Cortex Promotes Musical, Literacy, and Attentional Skills in Children. *Journal of Neuroscience*, *34*(33), 10937-10949. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5315-13.2014>
- Tierney, A., & Kraus, N. (2013). Music Training for the Development of Reading Skills. En *Progress in Brain Research* (Vol. 207, pp. 209-241). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63327-9.00008-4>
- Zugarramurdi, C. (2016). Oscilaciones cerebrales y adquisición de la lectura. En *Libro del 9o Foro de Lenguas* (En Programa de Políticas lingüísticas, pp. 143-157). ANEP-CODICEN.
- Zuk, J., Perdue, M. V., Becker, B., Yu, X., Chang, M., Raschle, N. M., & Gaab, N. (2018). Neural correlates of phonological processing: Disrupted in children with dyslexia and enhanced in

musically trained children. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 34, 82-91.

<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.07.001>