

Hugo Merchant y Germán Mendoza



La audición: ventana a la interacción social

El sistema auditivo transforma las vibraciones del aire en señales nerviosas que se transmiten del oído interno a la corteza cerebral auditiva. Nuestro sistema auditivo es complejo y nos permite comunicarnos a través del lenguaje y la música. Revisaremos las propiedades del sistema auditivo que han hecho posible que evolucionemos en sociedades estructuradas gracias a nuestras capacidades de interacción auditiva grupal.

Introducción

El sonido es de capital importancia para los animales y los seres humanos. En nuestra especie, el uso del sonido alcanza su máximo nivel de complejidad en el habla y la música. El habla permite la expresión de pensamientos como señales auditivas y la interpretación de dichos sonidos como pensamientos o ideas. Esta capacidad posibilita un eficiente intercambio de información entre las personas. La función de la música, en cambio, es más intrigante; puede decirse que provoca experiencias estéticas y emocionales en los oyentes, pero no sabemos por qué ocurren dichas experiencias y cuál es su utilidad evolutiva.

La comunicación mediante el habla o el disfrute de la música ocurre de forma tan espontánea que no somos conscientes del complejo proceso que suponen. Los pasos para percibir estímulos auditivos ocurren en el sistema nervioso. En primer lugar, nuestro oído debe transformar la energía mecánica de las ondas sonoras, presentes en el habla o en las notas musicales, al código de señales eléctricas que usa el sistema nervioso. Una vez ‘traducidos’, el cerebro procesa los sonidos y asigna significados, como ocurre en el lenguaje, o los asocia con sentimientos o recuerdos, como ocurre con la música. Estas asociaciones requieren de la participación de regiones cerebrales relacionadas con la memoria, el aprendizaje, el control del movimiento voluntario y las emociones.



La naturaleza del sonido

Lo que comúnmente percibimos como sonido se genera por la vibración, en forma de ondas, de las moléculas del aire. Como todas las ondas, el sonido tie-



ne cuatro propiedades básicas: frecuencia, amplitud, forma de onda y fase. La frecuencia y la amplitud son las características del sonido con las que estamos más familiarizados. Lo que nosotros percibimos, como la intensidad (o volumen) y el tono del sonido, dependen de la amplitud y la frecuencia de las ondas sonoras. A mayor amplitud de onda, mayor intensidad de sonido, y distintas frecuencias de onda resultan en la percepción de distintos tonos de sonido, desde los muy agudos (alta frecuencia) hasta los muy graves (baja frecuencia). El oído humano tiene un rango de detección de frecuencia de 20 a 20 mil ondas por segundo; los sonidos del habla y de los instrumentos musicales se encuentran dentro de este rango.

El procesamiento de los sonidos en la vía auditiva

¿Cómo transforma nuestro sistema auditivo las secuencias de sonidos que percibimos como el habla o la música? La respuesta es que se requiere de una intrincada serie de pasos que seguimos tratando de entender. La primera etapa de procesamiento del sonido ocurre en el oído. Cuando una onda de sonido llega al pabellón auricular, es redirigida hacia el conducto auditivo externo. Al fondo de éste se encuentra la membrana timpánica, la cual vibra con la onda de sonido de manera parecida a como la membrana de un tambor vibra cuando percutimos sobre ella. Después, la membrana transmite las vibraciones al martillo, el primero de los tres huesecillos del oído medio. De aquí, las vibraciones se transfieren al yunque y el estribo. Estos tres huesecillos amplifican las vibraciones y las transmiten al oído interno.

La cóclea, en el oído interno, transforma la energía mecánica del sonido en impulsos nerviosos. Esta estructura en forma de espiral contiene un tipo de sensor mecánico llamado células ciliadas, que tienen en un extremo unos mechones o vellosidades llamados estereocilios. Las vibraciones por los sonidos provocan el movimiento de los estereocilios, lo que desencadena en las neuronas cocleares cambios que transforman la energía mecánica en señales eléctricas.

Las neuronas de la cóclea convierten la energía mecánica en impulsos eléctricos y descomponen los

sonidos complejos en sus componentes más sencillos, lo que percibimos como tonos. Diferentes tonos hacen vibrar diferentes secciones de la membrana basilar, activando diferentes células ciliadas. Esto genera en la membrana basilar una representación ordenada, en donde las células que responden a tonos similares están ubicadas en una misma región. Esta representación espacial de tonos se denomina *tonotopía* y constituye uno de los primeros ‘análisis’ de los sonidos que el sistema auditivo realiza. Este procesamiento transforma sonidos complejos como la música o el habla en actividad neuronal, donde cada grupo neuronal detecta tonos de una frecuencia particular. Tal actividad neuronal lleva información sobre distintos tonos que componen al sonido, su momento de ocurrencia en el tiempo y su intensidad, la cual depende del grado de activación de las células ciliadas.

Después de la cóclea, la información viaja por el nervio auditivo hacia el sistema nervioso central (véase la Figura 1). Primero llega a los núcleos cocleares del tallo cerebral, después a la oliva superior, al lemnisco lateral y de allí parte al colículo inferior



Figura 1. La vía auditiva.

del cerebro medio. Los núcleos de la oliva detectan de dónde proviene el sonido.

Debido a la forma en que las ondas sonoras viajan en el ambiente, cuando tú escuchas un sonido que viene de tu derecha, tu oído derecho recibe las ondas sonoras antes que tu oído izquierdo. La diferencia de tiempo es muy pequeña, de unos microsegundos, pero los circuitos neuronales en la oliva detectan esas diferencias, que nos permiten saber de dónde proviene el sonido. El lemnisco lateral, en cambio, detecta la duración de los sonidos. Ambos tipos de información llegan al colículo inferior, en el cual se representa un ‘mapa’ espacial donde diferentes secciones del colículo tienen neuronas que detectan la posición del sonido, identifican su frecuencia y duraciones específicas.

La información auditiva ya procesada por el colículo inferior pasa por el tálamo auditivo en el diencéfalo, donde hay neuronas que detectan tonos puros y combinaciones de distintas frecuencias. Algunas neuronas talámicas también detectan intervalos de tiempo entre dos sonidos. Estas propiedades permiten al tálamo procesar estímulos complejos como los sonidos del habla o la música.

El blanco final de la vía auditiva es la corteza auditiva, ubicada en el lóbulo temporal del cerebro, la cual se divide en corteza auditiva primaria (A1) y las áreas que circundan a ésta, también llamadas áreas del cinturón. En A1 existe una representación tonotópica precisa, donde distintas regiones de la corteza cerebral tienen neuronas que detectan distintos tonos. Las áreas auditivas del cinturón tienen un arreglo tonotópico menos preciso y sus neuronas detectan grupos de tonos en lugar de tonos puros. Además del mapa tonotópico, en la corteza auditiva hay neuronas que detectan sonidos más complejos que los simples tonos puros, como las sílabas de las palabras, en el caso de los humanos. Las personas en donde la A1 está lesionada, por accidentes cerebrovasculares u eventos similares, son incapaces de distinguir sonidos complejos y el orden de éstos en el tiempo. Así, las neuronas de A1 tienen información de la identidad de los estímulos auditivos simples y complejos, así como de su orden o secuencia en el tiempo.



El procesamiento de los sonidos de la música y del habla por la corteza cerebral se lleva a cabo en A1 de ambos hemisferios cerebrales, el izquierdo y el derecho. Luego, las etapas siguientes del procesamiento del habla ocurren en la corteza auditiva secundaria del hemisferio izquierdo. Esta área procesa las secuencias rápidas de sonidos que son típicas del habla. En el español, la velocidad promedio del habla es de 150 a 200 palabras por minuto. En cambio, la corteza auditiva secundaria del hemisferio derecho percibe cambios de la tonalidad. Esta asimetría en las cortezas auditivas del humano nos permite el procesamiento auditivo en dos dominios: el temporal y el de frecuencia.

Otras regiones cerebrales implicadas en el procesamiento auditivo

 Después de la corteza auditiva, la información relacionada con los sonidos sigue dos rutas en el cerebro: los llamados circuitos dorsal y ventral (Figura 2). El primer circuito discurre por la parte dorsal o superior del cerebro, pasando primero por la corteza parietal y llegando a las cortezas premotoras del lóbulo frontal. Este circuito procesa la información espacial y temporal de los estímulos auditivos que sirve para guiar la conducta. Puede procesar información tanto

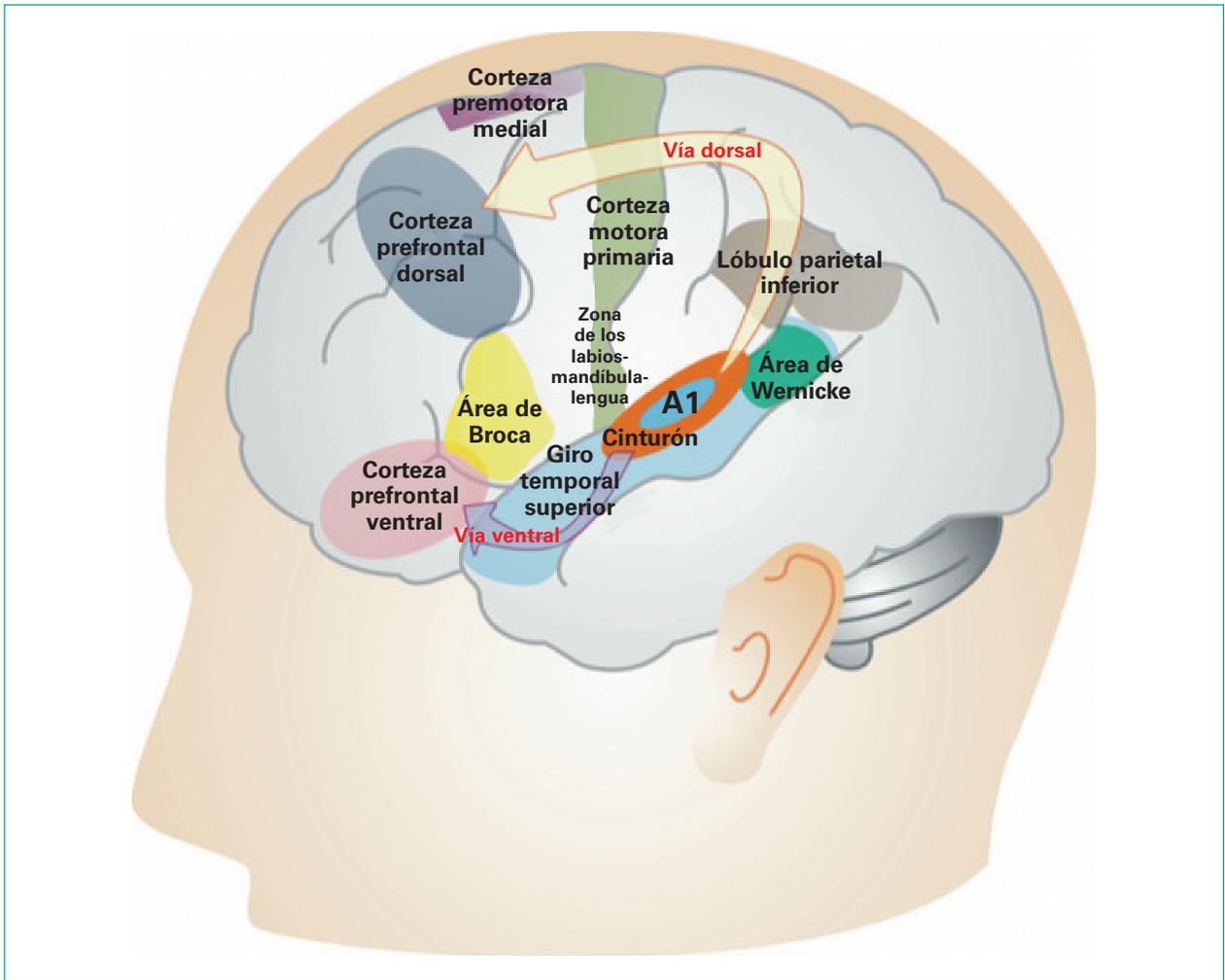


Figura 2. Principales regiones de la corteza cerebral relacionadas con el habla y la música.

de la localización de la fuente de los sonidos como del momento en que ocurrieron los sonidos o de su orden secuencial. El circuito ventral corre por la región ventral del cerebro, pasa por el lóbulo temporal superior y llega a la parte inferior o ventral del lóbulo frontal. Este circuito se especializa en el reconocimiento de los llamados objetos auditivos, como las vocales y las palabras.

Quizá una de las regiones corticales más famosas relacionadas con la percepción del habla es el área de Wernicke, localizada en el lóbulo temporal del cerebro, posterior a las cortezas auditivas con las que está conectada. Esta área es parte del sistema ventral de procesamiento auditivo y permite entender el significado de las palabras (véase la Figura 2). Las lesiones en esta área producen la afasia de Wernicke,

condición en la que los pacientes no pueden entender el habla y, aunque pueden producir palabras, éstas no tienen sentido.

■ Estructura y características de la música y el habla

■ La música y el habla están constituidas por secuencias de sonidos ordenados de acuerdo con reglas específicas. Para el habla las unidades básicas de sonido son los fonemas; en el caso de la música, las unidades básicas son las notas. La combinación de estas unidades resulta en palabras o en melodías. Estas entidades pueden combinarse en estructuras más complejas que corresponden a las oraciones del lenguaje, o a las canciones en el caso de la música.

La cantidad de oraciones o melodías que se pueden crear a partir de los elementos básicos es infinita.

La estructura periódica o repetitiva de la música y el habla otorga a ambas un ritmo. En la música el ritmo son los intervalos regulares de acentuación que cada persona asigna a las piezas musicales (como los momentos en los que mueves la cabeza al ritmo de una melodía). Para el habla, una característica importante es la duración de los fonemas, que está en el rango de las decenas de los milisegundos. Si la duración de un mismo fonema se modifica, lo percibimos distinto. Si se alteran los tonos del habla, pero se preservan sus características de duración, seguimos siendo capaces de entender el mensaje.

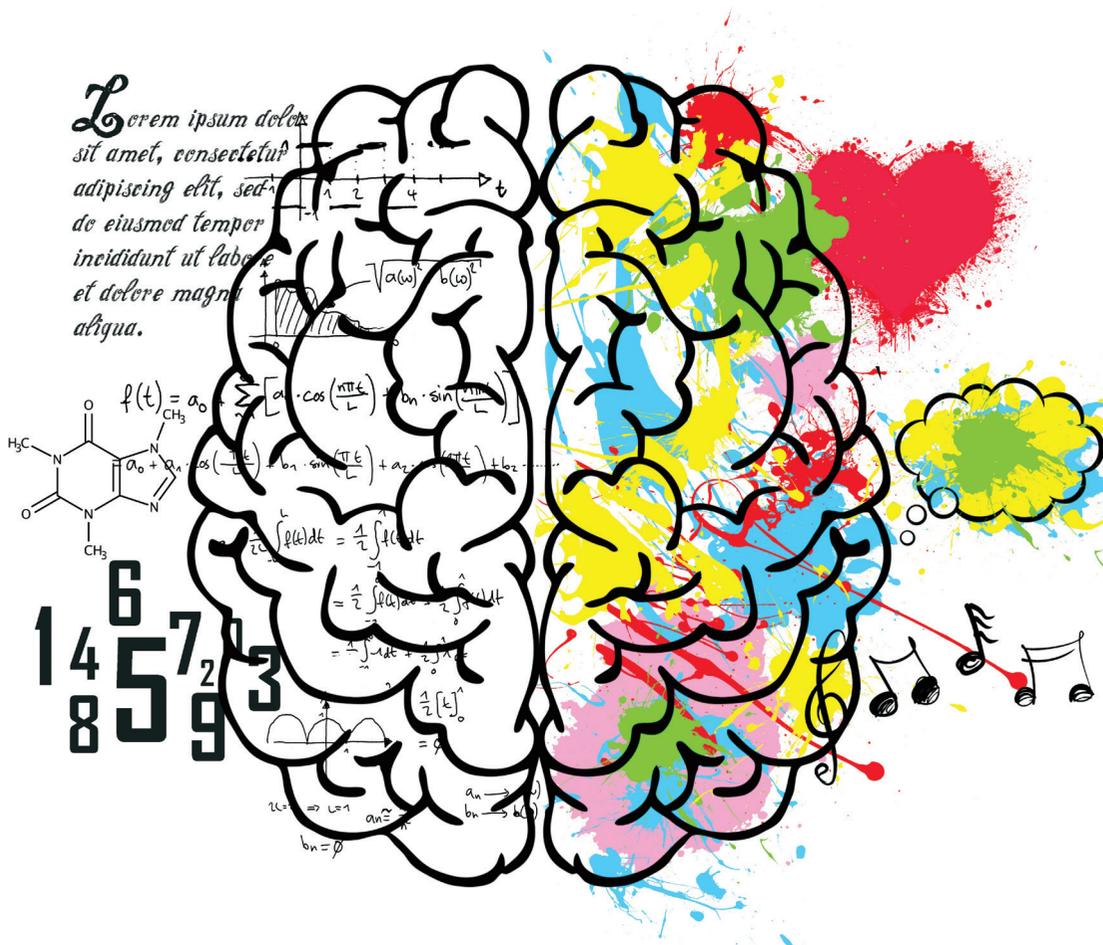
■ La relación entre percepción y acción en el habla y la música

■ El procesamiento auditivo, además de la percepción de los sonidos, incluye la generación de respuestas a esos estímulos, las cuales pueden ser internas,

como las respuestas emocionales que experimentamos al escuchar música, o externas, como cuando bailamos al ritmo de la música. Como el lector podrá imaginar, el último tipo de respuesta requiere de la participación del sistema motor. Este sistema incluye regiones del cerebro, de la médula espinal y del sistema nervioso periférico que controlan los movimientos.

La producción del habla depende del área de Broca, ubicada en el lóbulo frontal. Ésta y la corteza motora primaria se encargan de planear y ejecutar los movimientos de la boca, la lengua y las cuerdas bucales que producen el habla. El área de Broca se conecta con el área de Wernicke mediante el fascículo arqueado, el cual es un haz de fibras nerviosas que permite la comunicación entre las dos áreas y tiene un papel esencial en la coordinación de la parte perceptual y motora del habla.

En el caso de la música, las cortezas motoras, junto con la corteza parietal del circuito dorsal y los ganglios de la base, son importantes para seguir el



ritmo de la música. Las áreas motoras se encargan de formar una representación mental del ritmo. La información de este ritmo ‘interno’ se envía a la corteza motora primaria con el fin de generar los movimientos corporales para sincronizarnos con el ritmo de la música. Se cree que las cortezas motoras también envían la información de ese ritmo ‘interno’ a las cortezas auditivas para ser comparado con la música externa. Al comparar el ritmo ‘interno’ con el ritmo real, el sistema audio-motor calcula el error o diferencia entre ambos, lo que en teoría nos permite corregir nuestros movimientos para bailar sincronizados con la música.

Además del baile, otras respuestas motoras relacionadas con el procesamiento auditivo son el canto o tocar un instrumento musical. Ambos procesos cognitivos echan mano de las rutas cerebrales de integración audio-motora que hemos descrito. Además, en el caso de la ejecución de música o en casos especiales de vocalización, como el canto en coro, los humanos podemos generar sonidos, con instrumentos musicales o nuestro aparato fonador, en sincronía con otros sujetos, produciendo movimientos y sonidos que ocurren de manera simultánea y rítmica.

La importancia del habla y la música en las sociedades humanas

La presencia de la música y el habla es universal en las sociedades humanas. Allí donde el ser humano ha logrado asentarse y desarrollar una cultura, el habla y la música han surgido como medios de comunicación e interacción. Somos capaces de producir vocalizaciones y conductas musicales sencillas, como seguir el ritmo de una canción con el movimiento del cuerpo, sin requerir un aprendizaje intensivo. Esto sugiere que el habla y la música son un resultado natural de la organización de nuestro sistema nervioso.

Las ventajas de tener un lenguaje hablado son innegables, pues a través de él compartimos conocimientos y experiencias. No es extraño que durante la evolución se haya favorecido el desarrollo de esta habilidad en el *Homo sapiens*. Las bondades de poder crear música, en cambio, no son tan obvias. ¿Cuáles fueron las ventajas adaptativas, si es que las hubo, que llevaron a la aparición de las extraordinarias habilidades musicales del *Homo sapiens*?

Se ha sugerido que la música, al igual que el habla, promueve y mantiene la unión de los grupos sociales humanos. Uno puede imaginar tribus de hu-



manos prehistóricas creando música, danzando y cantando alrededor de una fogata en una noche de luna. Cada tribu habría tenido sus canciones, que tal vez hablarían de batallas, de la cacería emprendida, o de sus héroes y dioses. La música y la tradición oral habrían promovido un sentido de pertenencia, un tipo de identidad cultural que fortaleció la cohesión del grupo. Esto, en teoría, habría favorecido la existencia de grupos cada vez más grandes y organizados y eventualmente la aparición de ciudades y Estados. La hipótesis del valor social de la música tiene además un sustento neurobiológico: cantar y bailar induce la liberación de endorfinas en el cerebro, que provocan un sentimiento de bienestar.

La música y el lenguaje son herramientas humanas de comunicación que nos han permitido generar sociedades y probablemente han sido un motor para el desarrollo en los seres humanos de áreas cerebrales dedicadas a la integración audiomotora compleja. Aun cuando somos muy visuales, nuestra comunicación depende en gran medida del sistema auditivo: la sordera es mucho más debilitante socialmente que la ceguera.

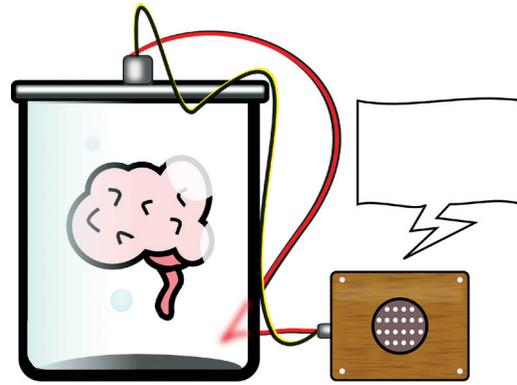
Hugo Merchant

Instituto de Neurobiología de la UNAM.

hugomerchant@unam.mx

Germán Mendoza

Instituto de Neurobiología de la UNAM.



Lecturas recomendadas

Kotz, S. A., A. Ravnani y W. T. Fitch (2018), "The evolution of rhythm processing", *Trends in Cognitive Sciences*, 22:896-910.

Mendoza, G. y H. Merchant (2014), "Motor system evolution and the emergence of high cognitive functions", *Progress in Neurobiology*, 122:73-93.

Merchant, H. et al. (2015), "Finding the beat: a neural perspective across humans and non-human primates", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370:20140093.

Poeppel, D. y M. F. Assaneo (2020), "Speech rhythms and their neural foundations", *Nature Reviews Neuroscience*, 21:322-334.

Purves, D. et al. (2018), *Neurociencia*, EUA, Sinauer Associates.

Zatorre, R. J., P. Belin y V. B. Penhune (2002), "Structure and function of auditory cortex: music and speech", *Trends in Cognitive Sciences*, 6:37-46.

Zatorre, R. J., J. L. Chen y V. B. Penhune (2007), "When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production", *Nature Reviews Neuroscience*, 8:547-558.