

El desarrollo de la audición humana

Enric Munar, Jaume Rosselló, Carmen Mas, Pilar Morente y Miquel Quetgles
Universitat de les Illes Balears

El estudio del desarrollo de la audición demuestra que el funcionamiento del sistema auditivo se puede descomponer en un amplio abanico de funciones y que cada una de estas funciones puede ser evaluada a partir de diversas medidas. Ello conlleva a resultados dispares cuando, en cada una de estas funciones y medidas, pretendemos establecer el momento evolutivo en el que el niño adquiere una competencia similar al adulto. En el documento se presentan datos y conclusiones de los trabajos experimentales más relevantes en el ámbito de estudio del desarrollo auditivo humano, con el fin de ofrecer un estado de la cuestión que ponga de manifiesto la necesidad de elaborar modelos que integren y acoplen la heterogeneidad de resultados. El documento se ha dividido en cuatro apartados: audición prenatal, una perspectiva psicofisiológica del desarrollo auditivo, una perspectiva psicoacústica (sonoridad, tonalidad y audición espacial) y reconocimiento auditivo.

The development of human audition. The study of auditory development shows that the activity of the auditory system may be split into several functions. Each one of these functions can be measured using different techniques. The use of several techniques produces different results when we seek to know when the child achieves a similar competence to an adult. We put forward the most relevant experimental results and conclusions of the study of human auditory development. The aim is to offer an updated exposition evidencing the need for new models that compose and connect the heterogeneous results. The paper is divided in four sections: prenatal audition, a psychophysiological view of auditory development, a psychoacoustic view (loudness, pitch perception and spatial audition), and auditory recognition.

La ontogenia puede entenderse como una serie de cambios ordenados y relativamente permanentes en las estructuras físicas, neurológicas y psicológicas que suponen modificaciones en el comportamiento, en las emociones y en las formas de interacción social (Newcombe, 1995). En los humanos, las consecuencias de los cambios de los primeros 20 años regularmente implican la incorporación de nuevos repertorios de respuesta, los cuales guían hacia una conducta más organizada, más compleja, más estable, más competente y más eficiente. Esta evolución se lleva a cabo a través de etapas sucesivas, cuya aparición significa, por norma general, un perfeccionamiento funcional de la etapa anterior.

Por otra parte, el estudio de la audición se enmarca en el ámbito más extenso del estudio de la percepción, la cual se puede concebir, en sentido amplio, como la actividad cognitiva inducida por la presentación física del objeto a través de los sentidos (García-Albea, 1999). De acuerdo con esta definición, la audición se activa por la emisión de sonidos, se realiza a través del sistema auditivo e informa al sistema cognitivo sobre algunos atributos de las fuentes sonoras (identificación, posición en el espacio, etc.). Resulta determinante distinguir entre el evento acústico (fenómeno físico) y el evento auditivo (fenómeno psicológico que se produce, en parte, como consecuencia del evento acústico), los cuales no

necesariamente son idénticos en cuanto a la información que contienen. El evento auditivo es objeto de estudio de la psicología de la percepción, el evento acústico lo es de la física acústica.

En las últimas décadas, la perspectiva de la metáfora mecanicista de la psicología cognitiva ha dominado el estudio de la percepción, metáfora que implícitamente inculca la idea de que las explicaciones evolutivas o funcionales son relativamente secundarias para una psicología de la percepción. El éxito científico de esta metáfora en la explicación de la función perceptiva se ha de entender como una consecuencia lógica de la obsesión de los psicólogos por buscar soluciones simples, pretendiendo imitar las estrategias habitualmente utilizadas por las llamadas ciencias duras (Blanco y Travieso, 1999). Por tanto, creemos que se hace necesario asumir la complejidad de los fenómenos perceptivos si queremos hacer una psicología de la percepción que alcance la trascendencia que debe tener la explicación psicológica.

El estudio ontogénico del sistema auditivo en niños tuvo poca trascendencia en el ámbito de la psicología evolutiva hasta la década de los setenta. Ello se debió fundamentalmente a tres razones: el sistema auditivo no tiene una respuesta observable unívoca a la estimulación acústica, la dificultad para controlar las características de los estímulos sonoros y el limitado conocimiento anatómico y sensorial del sistema auditivo (Aslin, Pisoni y Jusczyk, 1983). Estos tres obstáculos fueron superados por tres avances, respectivamente: la asunción de diversos sistemas de respuesta como medida del funcionamiento del sistema auditivo (respuestas motoras, reflejos de sobresalto, respuestas de orientación, medidas psicofisiológicas, etc.), el avance de la física acústica y de la tecnología de *alta fidelidad*, y las conclusiones de las investigaciones

Fecha recepción: 23-7-01 • Fecha aceptación: 8-10-01

Correspondencia: Enric Munar
Facultad de Psicología
Universitat de les Illes Balears
07071 Palma de Mallorca (Spain)
E-mail: dpsemr0@ps.uib.es

del premio Nobel von Békésy en el campo de la anatomía fisiológica del sistema auditivo durante los años sesenta. Todo ello marca el punto de inflexión hacia un próspero período en el estudio del desarrollo auditivo.

Audición prenatal

En el estudio sobre la audición en el feto, podemos disociar tres tópicos: la estructura acústica del entorno fetal que puede permitir la transmisión de sonidos, la maduración del sistema auditivo que determina el inicio del funcionamiento de la capacidad auditiva y las evidencias del funcionamiento auditivo prenatal.

Respecto a la estructura acústica, hay argumentos empíricos para creer que, en el útero, no sólo se oyen ruidos de la madre y del feto, sino que también se registran ruidos de procedencia externa, incluyendo sonidos de habla (Lecanuet, 1998). Estos sonidos son fundamentalmente de frecuencia baja, de 500 a 700 Hz. Por debajo de los 10kHz, los sonidos externos reciben una atenuación de 30-35 dB (Querleu, Renard, Versyp, Paris-Delrue y Crépin, 1988; Richards, Frentzen, Gerhardt, McCann y Abrams, 1992; Peters, Abrams, Gerhardt y Griffiths, 1993). Los componentes de frecuencia alta del habla se eliminan o se atenúan de forma muy notable. Las características prosódicas se preservan y algunos fonemas y palabras pueden ser reconocidos por adultos cuando se registran en posiciones del útero alejadas de la placenta. Los fonemas emitidos por un hombre y grabados en el útero de una oveja preñada presentan una inteligibilidad media del 55%, y de un 34% cuando los fonemas son de una voz femenina (Griffiths, Brown, Gerhardt, Abrams y Morris, 1994).

A pesar de que la transmisión del sonido a través de la cavidad amniótica ha sido descrita suficientemente, se desconoce la proporción de las presiones acústicas que llegan al aparato auditivo, dado que también depende del modo de transducción que se produce en el feto (a través de los fluidos que llenan el oído o de conducción ósea). A partir de la extrapolación de estudios con ovejas, se concluye que la distribución tonotópica de la cóclea cambia durante la maduración (Rubel y Ryals, 1983) y que el oído del feto se estimula a partir de señales de frecuencia baja (inferiores a 125 Hz). Estas señales, en el feto, se codifican en las células ciliadas que posteriormente codificarán señales de frecuencia alta (Abrams, Gerhardt y Peters, 1995). También se ha establecido el grado de aislamiento de la cóclea respecto al exterior, obteniéndose que la diferencia mínima de intensidad para provocar el mismo potencial coclear antes y después del nacimiento se distribuye desde los 11 dB con 125 Hz a los 45 dB con 2000 Hz (Gerhardt, Otto, Abrams, Colle, Burchfield y Peters, 1992).

La cóclea alcanza dimensiones adultas alrededor de los cinco meses de gestación. En el feto humano, es a esta edad cuando se produce la inervación de las células ciliadas externas, y entre los seis y los siete meses cuando aparecen las primeras sinapsis consideradas maduras (Pujol, Lavigne-Rebillard y Uzile, 1991). Probablemente, la maduración del oído interno finaliza durante el octavo mes, con la organización de las conexiones aferentes y eferentes (Lecanuet, 1998). Moore et al. (2001), utilizando MRI, comprobaron que 4 fetos de 12, con períodos de gestación de 3-3'5 meses, manifestaban activación en uno o en ambos lóbulos temporales frente a sonidos aplicados en el abdomen de la madre, y uno de ellos activaba el frontal. Pasman, Rotteveel, Maassen y Visco (1999) examinaron la maduración de respuestas evocadas corticales auditivas desde la concepción hasta los 14 años, hallan-

do dos períodos de transición: el primero de ellos se establecía entre los 3 y los 3'5 meses de edad.

En los inicios del funcionamiento coclear, la competencia auditiva es pobre: las respuestas electrofisiológicas sólo se registran con frecuencias medias, los umbrales absolutos son altos, y no hay discriminación frecuencial ni tampoco codificación temporal. No obstante, esta competencia se perfecciona rápidamente: los umbrales decrecen, empieza la codificación temporal, se inicia la sensibilidad frecuencial y las unidades del nervio auditivo sintonizan a diferentes frecuencias.

En relación a las respuestas conductuales, no se puede concluir de forma precisa lo que ocurre, en el feto, en la audición a los tonos puros. No hay acuerdo respecto al contenido del estímulo que tiene una mayor propensión para provocar esas respuestas: son las frecuencias altas o las bajas las que tienen esa mayor propensión. Según Lecanuet (1998), la experiencia prenatal puede convertirse en un tipo de aprendizaje específico cuyos efectos se evidenciarán en algunas situaciones de después del nacimiento. Los sonidos pueden provocar, más o menos selectivamente, el llanto del recién nacido o respuestas de orientación. Los estímulos pueden perder esas propiedades de evitación si el niño ha sido expuesto a ellos durante el período uterino. Algunos argumentos a favor del funcionamiento del sistema auditivo del recién nacido provienen de las investigaciones que han utilizado sonidos musicales (Feijoo, 1981; Hepper, 1988) u otros tipos de sonidos y ruidos (Ando y Hattori, 1970, 1977) y de los estudios con niños prematuros, los cuales muestran que, una vez que éstos han pasado las primeras horas críticas, muestran evidencia de respuesta auditiva. De forma que, con un cierto soporte empírico, podemos asegurar que el recién nacido no es sordo. No obstante, tenemos pocas evidencias de que realice discriminaciones tonales o respuestas diferenciales correlacionadas con algunas características de complejidad del sonido.

A pesar de los datos anteriores, no está claro que se pueda confirmar, con suficientes argumentos empíricos, que la función auditiva se pueda dar por iniciada en este período. Es conveniente especificar que el oír del feto debe ser de una naturaleza diferente a la nuestra, en el sentido de que en la audición del feto no están presentes una serie de atributos del percepto auditivo, como la identificación o la audición consciente. Aun así, existe la creencia generalizada de que el niño oye antes de nacer, a menudo con una extrapolación de lo que es oír un tanto exagerada (Lecanuet, 1998).

Perspectiva psicofisiológica del desarrollo auditivo

Durante los primeros años, el sistema auditivo se convierte en una estructura progresivamente más compleja. Los cambios más pronunciados ocurren en el útero, primero en el embrión y después en el feto, pero el desarrollo auditivo no cesa en el nacimiento. En el niño concurren diversos procesos de tipo mecánico que van a dar lugar a la estructura final.

Existen diferencias evidentes entre el oído externo del niño y el del adulto de consecuencias funcionales. El canal auditivo infantil es de menor longitud, dando lugar a efectos desiguales de resonancia que se traducen en diferencias perceptivas de tonalidad: los niños, con relación a los adultos, perciben la tonalidad más aguda y manifiestan un sesgo en la localización del sonido debido a la mayor presencia de frecuencias altas. Por otra parte, los niños poseen una menor separación interaural que afecta a la fiabilidad de

las informaciones que proporcionan las diferencias interaurales de tiempo de llegada, de intensidad, de fase y espectrales para la localización espacial del sonido.

Los datos anatómicos sobre el oído medio demuestran que las dimensiones de los huesecillos alcanzan un grado parecido al de los adultos en el octavo mes de gestación. El tamaño del tímpano no es como el del adulto hasta el segundo año de vida. Ello supone una pérdida de potencial de amplificación que, no obstante, se corrige gracias a las dimensiones similares de las bases de los estribos del adulto y del niño. El reflejo acústico o estapedial aparece durante las primeras semanas, aunque el neonato requiere mayores intensidades para producirlo. Por otra parte, la menor longitud y diámetro de la trompa de Eustaquio del niño aumenta el riesgo de infecciones, pudiendo provocar graves repercusiones.

Respecto al desarrollo neuroanatómico, tenemos evidencias en animales de que las conexiones neurales se incrementan en densidad tras el nacimiento. En humanos, la mielinización continúa después del nacimiento: las mielinizaciones del nervio auditivo y del tronco encefálico se completan en torno a los 6 meses de edad, pero la de las vías que van a la corteza auditiva continúa hasta aproximadamente los 5 años (Boothroyd, 1997).

El uso de las respuestas electrofisiológicas puede ser otra vía para el estudio del desarrollo auditivo (Vila y Barbero, 2000). Estos estudios muestran un comportamiento del sistema auditivo paralelo al anteriormente expuesto. Las respuestas de amplitud y latencia del nervio alcanzan niveles adultos alrededor del mes de vida. Los componentes posteriores de las respuestas auditivas del tronco encefálico son similares a los de los adultos sobre el año de vida. Según el trabajo, anteriormente mencionado, de Pasman et al. (1999), con potenciales corticales, entre los 4 y los 6 años se produce el segundo período de transición. No obstante, las respuestas de latencia media, las cuales reflejan la actividad de la corteza auditiva, no están completamente maduras hasta los 14-16 años (Pacman et al., 1999). El componente P300, de abertura consciente al cambio en el patrón de sonido, no se puede considerar completamente maduro hasta los 15-20 años (Boothroyd, 1997; Albrecht, Suchodoletz y Uwer, 2000).

De una forma general, la maduración de las vías auditivas procede desde regiones neurales periféricas a regiones neurales centrales (Pujol, 1972). La evidencia incita a creer que el sistema auditivo central se regula dinámicamente por el sistema auditivo periférico a lo largo del desarrollo (Sanes, 1992). En definitiva, podemos decir que el desarrollo del sistema auditivo del niño es relativamente completo, pero que su refinamiento continúa a lo largo de la infancia y de la adolescencia.

Por otro lado, no podemos obviar la influencia de la experiencia en el desarrollo psicofisiológico del sistema auditivo, la cual puede tener un papel importante en el desarrollo de la interacción entre los mecanismos periféricos y los centrales. A este respecto, los experimentos de Stanton y Harrison (1996), con gatos, suponen dos implicaciones importantes: (a) las propiedades del ambiente acústico en el que los niños crecen influyen en la organización de la corteza auditiva; y (b) no es necesario que los sonidos del entorno que influyen en el desarrollo auditivo tengan una significación conductual, es suficiente con una presentación repetitiva o prolongada. Presumiblemente, la asignación de recursos corticales adicionales a un sonido se basa en la asunción de que la presencia de un sonido continuado implica su potencial importancia. El hallazgo está relacionado con la hipótesis de que la experiencia auditiva ejerce un papel importante en el desarrollo de un

sistema auditivo que está óptimamente organizado para la generación de evidencia sensorial desde los estímulos acústicos.

Perspectiva psicoacústica

La psicofísica utiliza el juicio del sujeto en la detección, la discriminación o la estimación de magnitudes como medida de la actividad perceptiva. El nivel consciente de estas respuestas depende de procesos mentales que integran informaciones de diversas procedencias. Sin embargo, los estudios psicofísicos, en general, y los psicoacústicos, en particular, tratan de separar la información originaria del proceso perceptivo y del auditivo, respectivamente, de la de otras procedencias. Se establecen situaciones que permiten obtener respuestas cuya precisión y rapidez tienen la menor influencia posible de otras variables no auditivas.

La aplicación del método psicofísico al estudio del desarrollo humano ha sido cuestionado básicamente por dos motivos (Werner, 1992). El primero supone que los ajustes metodológicos necesarios para la experimentación con niños no cumplen las asunciones subyacentes a los métodos psicofísicos. El análisis de los efectos del procedimiento sobre las medidas de sensibilidad realizado por Werner (1992) concluye que tan sólo dos variables tienen consecuencias consistentes sobre los umbrales de detección en los niños: el modo de presentación del estímulo y el refuerzo. La segunda crítica procede de la comparación entre el rendimiento de niños con el de adultos altamente motivados, infiriendo que la diferencia atencional entre ambos podría traducirse en diferencias significativas en los resultados. Schneider y Trehub (1992) aseguran que la falta de atención no afecta sustancialmente a las diferencias entre umbrales de niños y de adultos. Los factores motivacionales y atencionales explicarían sólo una pequeña fracción de las diferencias observadas en sensibilidad auditiva. Las conclusiones de estos estudios, junto con otros (Wightman y Allen, 1992), respaldan la aplicación de la psicofísica al estudio del desarrollo de la audición.

Percepción de la sonoridad

La psicoacústica ha dedicado mayor esfuerzo al estudio de la percepción de la tonalidad que al de la percepción de la sonoridad (Hirsh y Watson, 1996). La sonoridad es el atributo psicológico que nos permite situar los sonidos más fuertes en un extremo y los más débiles en el otro. Aunque la intensidad del estímulo es la dimensión física más determinante para la sonoridad, la frecuencia también puede modificarla pese a que la intensidad del estímulo sea la misma (López-Bascuas, 1999).

Un grupo de estudios evidencia que las diferencias entre umbrales absolutos de niños y de adultos se hallan entre 20 y 30 dB. Estas diferencias se obtuvieron en condiciones de *campo sonoro* (Trehub, Schneider y Endman, 1980). Un segundo grupo de estudios demuestra que las diferencias tan sólo son del orden de 8 a 18 dB (Schneider, Trehub y Bull, 1980). En éstos, los estímulos fueron presentados mediante auriculares. Las diferencias entre umbrales con auriculares y los medidos en *campo sonoro* decrecen a la edad de un año (Olsho et al., 1988). Este decremento hace pensar que, a esta edad, las dimensiones del canal auditivo ya se asemejan a las del adulto. Aun así, los umbrales absolutos con enmascaramiento no son similares a los adultos hasta los 5 o 6 años de edad (Boothroyd, 1997). Sin embargo, Schneider, Trehub, Morrongo y Thorpe (1989) indican que hay un descenso casi lineal entre los 6 meses y los 10 años de edad.

Con respecto a la discriminación de intensidad, Sinnott y Aslin (1985) obtuvieron los umbrales diferenciales de 26 niños de edades comprendidas entre los siete y nueve meses. Los valores se establecieron entre los 3 y los 12 dB, a diferencia de los adultos, en los que se situaban entre 1 y 2 dB. Esto es así cuando se utiliza un método ascendente de presentación de la intensidad; cuando se utilizaba el método decreciente, los niños no respondían en ninguna de las dos técnicas usadas (giro condicionado de la cabeza y una técnica de adaptación). Según los autores, la aparente incapacidad del niño de esta edad para discriminar el decremento de intensidad sugiere que el sistema nervioso central del niño no controla el ritmo decreciente de las neuronas auditivas periféricas.

Los resultados de algunos estudios sobre la edad en la que se produce una mejora sustancial en la discriminación de intensidades son incompatibles. Según Faires y Lankford (1976), Fior y Bolzonello (1987), Maxon y Hochberg (1982), esta habilidad parece madurar bastante tarde. Por contra, otros autores sugieren una mayor rapidez de desarrollo: Jensen y Neff (1993) obtuvieron el mismo rendimiento en niños de 5 años que en adultos, y Berg y Boswell (2000) concluye que, utilizando intensidades altas, la capacidad de niños de 3 años para discriminar intensidades es similar a la de los adultos, aunque no con intensidades más bajas.

Percepción de la tonalidad

Los estudios sobre desarrollo auditivo han abordado la cuestión de la tonalidad a partir del examen de diferentes capacidades auditivas relacionadas con la percepción de la tonalidad. En este apartado, presentaremos las conclusiones sobre cuatro de estas capacidades: *low pitch*, sensibilidad frecuencial, resolución o selectividad frecuencial, y discriminación frecuencial.

El concepto de *low pitch* describe el fenómeno en el cual la frecuencia fundamental no se halla presente en la señal de un tono complejo periódico, sin embargo seguimos percibiendo su tonalidad (Fletcher, 1924). Puede considerarse como un tipo de constancia perceptiva y reafirma la idea de no linealidad del sistema auditivo. Algunas investigaciones apoyan la noción de que el *low pitch* involucra los procesos centrales del sistema auditivo (Houtsmma y Goldstein, 1972; Zartorre, 1988). Los niños de cuatro meses no perciben *low pitch* de forma similar a los adultos (Bundy, Colombo y Singer, 1982), aunque un 78% de los niños de siete meses ya son competentes en este procesamiento (Clarkson, 1992).

La *sensibilidad frecuencial* en los niños, durante los primeros meses de vida, es relativamente más susceptible a frecuencias altas (superiores a 4 kHz) y durante el desarrollo temprano aumenta la sensibilidad a frecuencias bajas (Trehub et al., 1980). A los 6 años, la sensibilidad a diversas frecuencias es significativamente inferior a la de adultos, no obstante a los 10 años obtienen valores similares a éstos (Elliott y Katz, 1980; Yoneshige y Elliott, 1981).

Los conceptos de *resolución frecuencial* y *selectividad frecuencial* definen la capacidad auditiva para distinguir una señal de una frecuencia determinada en presencia de señales de frecuencias circundantes. Para el estudio de la resolución frecuencial se han utilizado dos métodos con resultados controvertidos. Los estudios que han utilizado el *método del ruido horadado* (López-Bascuas, 1999) concluyen que los niños no consiguen un rendimiento similar al de los adultos hasta, como mínimo, los cinco años (Irwin, Stillman y Schade, 1986; Veloso, Hall y Grose, 1990; Hall y Grose, 1991). En cambio, los estudios que han utilizado el *método de enmascaramiento basado en el espectro de potencia* (López-Bas-

cuas, 1999) indican la relativa similitud entre las *curvas de sintonía psicoacústica* de los niños muy pequeños y de los adultos (Boothroyd, 1997). Utilizando este segundo método, la amplitud de las bandas críticas cambia muy poco desde la infancia a la edad adulta (Olsho, 1985; Irwin et al., 1986; Schneider, Morriongiello y Trehub, 1990), aunque los umbrales con enmascaramiento son significativamente mayores en los niños que en los adultos. Probablemente, la fuente más importante de este cambio de desarrollo es una transformación de tipo no lineal en la representación de la intensidad, ya que las dimensiones de la banda crítica no cambian sustancialmente con la edad. La fuente de este cambio no lineal puede encontrarse en el procesamiento central.

La *discriminación de la frecuencia* es muy pobre a los seis meses. Los umbrales diferenciales en niños de siete a nueve meses se establecen en un intervalo de 11 a 29 Hz, mientras que los de los adultos se distribuyen entre los 3 y los 5 Hz (Sinnott y Aslin, 1985). Estudios del ámbito musical indican que el desarrollo de la representación de la tonalidad comienza alrededor de los seis años (Briggs, 1991; Zimmerman, 1993) y entre los siete y los nueve años se produce un perfeccionamiento de esta representación (Wilson, Wales y Pattison, 1997).

Percepción auditiva del espacio

Un espacio auditivo está constituido por los sonidos que llegan hasta nosotros en una situación ambiental concreta. Existe abundante evidencia según la cual la formación del espacio auditivo no depende exclusivamente del sistema auditivo, la idea de que la representación del espacio depende de la interacción de diversos sistemas perceptivos está vigente. Piaget y Inhelder (1967) afirmaban que el niño representa, en un primer momento, diferentes espacios que, con el desarrollo, se funden en un espacio común. La actividad del neonato determinaría una serie de espacios sin coordinar (bucal, auditivo...) que al cabo de dos años se percibirían inmersos en uno solo. Sea como fuere, en este apartado nos interesa conocer en qué momento del desarrollo el niño consigue un funcionamiento similar al del adulto.

Percepción auditiva de la dirección espacial

Para determinar el desarrollo de la localización auditiva espacial se han utilizado fundamentalmente las técnicas de giro de la cabeza y de la mirada (Litovsky y Ashmead, 1997). Los neonatos giran la cabeza hacia el hemisferio en el cual está la fuente de sonido (Muir y Field, 1979; Clifton, Morriongiello, Kulig y Dowd, 1981). Sin embargo, no poseen una localización plenamente desarrollada. Por ejemplo, no se orientan hacia sonidos breves (Butterworth y Castillo, 1976; McGurk, Turnure y Creighton, 1977; Clarkson, 1992), de forma que las características del estímulo pueden repercutir en los resultados de las pruebas experimentales. Los estímulos más adecuados para provocar una respuesta de orientación en el niño son los compuestos por bandas amplias de frecuencia alta, superiores a 3.000 Hz (Morriongiello y Clifton, 1984).

La inmadurez en el neonato de esta capacidad se hace patente en la tendencia discontinua del desarrollo en la orientación hacia las fuentes sonoras. La capacidad se manifiesta hasta el primer mes, desapareciendo a esta edad y reapareciendo a los cuatro meses, ahora con una latencia de respuesta mucho menor, de 1 segundo aproximadamente (Field, Muir, Pilon, Sinclair y Dodwell, 1980; Muir, Clifton y Clarkson, 1989). Muir y Clifton (1985) fun-

damentan su explicación en la maduración de los mecanismos centrales; así, la respuesta de orientación a los cuatro meses pasaría de ser un reflejo subcortical a una respuesta cortical de carácter volitivo.

El efecto de precedencia define la percepción de un solo sonido a partir de la presencia de los dos estímulos sonoros emitidos desde diferentes lugares en un corto espacio de tiempo. Los niños manifiestan este efecto, girando la cabeza hacia el primer sonido, a los cuatro meses de edad (Muir et al., 1989). Según Muir et al. (1989), la maduración del sistema central auditivo a esta edad también se reflejaría en el efecto de precedencia.

El método más usado en el estudio experimental de la localización auditiva es el mínimo ángulo audible (MAA), el cual mide el cambio de posición más pequeño que podemos detectar. La tarea supone la discriminación espacial de dos sonidos en un plano concreto. Los resultados han mostrado que el MAA progresa de 20-25 grados a los 4 meses a menos de 5 grados a los 18-24 meses (Ashmead, Clifton y Perris, 1987; Morrongiello 1988; Morrongiello y Rocca, 1990; Ashmead, Davis, Whalen y Odom, 1991; Litovsky, 1997) (véase la tabla 1). Litovsky (1997) obtuvo un MAA en niños de 5 años similar al de los adultos. Por tanto, después de que la capacidad de localización del sonido reaparezca a los cuatro meses, la precisión de la localización auditiva mejora durante un período prolongado.

Edad	MAA	Estudios experimentales
5 meses	19,8°	Ashmead et al. (1991)
6 meses	19°	Ashmead et al. (1987)
	14,5°	Ashmead et al. (1991)
	12°	Morrongiello (1988)
9 meses	12°	Morrongiello (1988)
12 meses	9,4°	Ashmead et al. (1991)
	8°	Morrongiello (1988)
15 meses	6°	Morrongiello (1988)
18 meses	5,6°	Litovsky (1997)
	4°	Morrongiello (1988)
5 años	1,5°	Litovsky (1997)
Adultos	1-2°	Mills (1958)
		Perrott et al. (1989)
	< 1°	Hartmann i Rakerd (1989)
		Litovsky i Macmillan (1994)

Las claves más relevantes para la localización del sonido en el plano horizontal son las diferencias interaurales o, en otras palabras, las diferencias de tiempo, de intensidad, de fase o espectrales entre un oído y otro. Los niños desarrollan rápidamente las diferencias interaurales de tiempo (DIT) (Kaga, 1992). Los bebés de dos meses detectan DIT, pero no de intensidad (DII) (Bundy, 1980). El estudio de Ashmead et al. (1991) señala que las DIT obtenidas en niños de 4 a 7 meses (50-75 μ s) eran inferiores a las que se podían esperar de los valores de MAA obtenidos con los mismos bebés (100-140 μ s); como referencia cabe señalar que los valores de adultos son de 10 a 20 μ s. Estos resultados indican que la

sensibilidad a las DIT es notable durante las primeras etapas de vida, aunque el niño no la aprovecha suficientemente para precisar las posiciones de las fuentes sonoras. Por otra parte, Litovsky y Ashmead (1997) sugieren que, en niños de 6 meses, las DII tienen una importancia mínima en la precisión de la localización, los valores de DII no son similares a los de los adultos hasta los 12-16 años.

Por consiguiente, la precisión en la localización de sonidos en campo libre no puede explicarse únicamente en función de los cambios de sensibilidad a las diferencias interaurales. Litovsky y Ashmead (1997) proponen dos aproximaciones teóricas. La primera postula la necesidad de una re-calibración continua entre los valores de las claves de localización auditiva y las posiciones reales de las fuentes sonoras durante el desarrollo. Si la recalibración ocurre de forma constante, aparecerán períodos durante los que la localización no es tan precisa como permitiría la sensibilidad a las claves subyacentes (DIs), sobre todo cuando los valores cambian rápidamente. Este proceso de recalibración parece complicado y costoso. La segunda propuesta se basa en el crecimiento de la cabeza, el cual causaría cambios rápidos en las claves interaurales (DIT, DII y diferencias espectrales) y en las monoaurales (las espectrales). Si consideramos que un niño simplemente necesita dirigir su atención en una dirección extensa para percatarse de los acontecimientos importantes, puede ser adecuado poseer un sistema de localización auditiva relativamente rudimentario o sin refinar. La evidencia a favor de esta propuesta proviene de algunos trabajos psicofisiológicos: el colliculus superior de una variedad de especies contiene una estructura semejante a un mapa espacial basado en una afluencia de entradas visuales, auditivas y somatosensoriales (King y Moore, 1991).

Percepción auditiva de la distancia

La representación del emplazamiento de la fuente sonora es inherentemente tridimensional. Pese a ello, son pocos los trabajos sobre audición de la distancia y los esfuerzos de investigación se dirigen básicamente a la representación bidimensional.

Peris y Clifton (1988) realizaron el primer estudio sistemático de audición de la distancia en niños, utilizando como evidencia el estiramiento de brazos. El estudio demuestra que los niños no estiran los brazos ante los sonidos que no están a su alcance. La conclusión es que los niños de seis meses pueden confiar en la información auditiva para realizar una discriminación dicotómica de la distancia.

La clave más importante para la estimación de la distancia a partir de la información auditiva es la sonoridad que provoca el suceso acústico. Litovsky y Clifton (1992) centraron su estudio evolutivo en esta clave de distancia percibida. Hallaron que los niños de seis meses tienen una capacidad básica para discriminar entre las fuentes que están a su alcance y las que no lo están, aunque no ejecutan esta tarea únicamente a partir de la clave de sonoridad. Parece probable que la competencia en esta capacidad tenga una considerable supeditación a la experiencia.

Reconocimiento auditivo

El reconocimiento y la retención de sonidos parece estar relacionado con experiencias emocionales anteriores. En el estudio realizado por Pich (1988) se manifiestan dos estilos perceptivos diferenciados. El primero, propio de los niños de menor edad, que

ante una situación en la que se les presenta un sonido nuevo, imprevisto, o fuera de su contexto habitual, tienden de forma inmediata a asimilarlo a una experiencia anterior, relacionada con el sonido y casi siempre emocional (hipótesis emocional). El otro estilo perceptivo corresponde a niños de mayor edad, así como avanza la edad el niño analiza más cuidadosamente los indicadores sensoriales del sonido y esto le lleva, en determinados casos, a la duda o a manifestar desconocimiento, permaneciendo atentos hasta el final del estímulo para después emitir la respuesta. (Pich, 1988).

Discusión y conclusiones

De lo expuesto sorprende la dificultad para establecer una edad aproximada en la que el desarrollo auditivo haya alcanzado el grado de adulto. Por ejemplo, hemos señalado que el niño manifiesta una sensibilidad relativa, aunque no absoluta, a frecuencias altas respecto a la capacidad del adulto. Ello puede deberse a una razón de desarrollo: la sensibilidad a frecuencias altas se desarrolla primero que la sensibilidad a frecuencias bajas. No obstante, también existe una explicación alternativa según la cual la población adulta padece una pérdida de sensibilidad a frecuencias altas como consecuencia de los efectos a la exposición a determinados ruidos del entorno, del consumo de ciertas sustancias y del natural envejecimiento. Parece ser que, a nivel fisiológico, la sensibilidad a frecuencias altas es más frágil que a frecuencias bajas. Bredberg (1968), en un estudio experimental con adolescentes, comprobó una pérdida de receptores auditivos en la zona basal de la cóclea, zona responsable de la recepción sensorial de las frecuencias altas. De forma que la mencionada diferencia de sensibilidad, así como otros efectos, pueda deberse a la inmadurez de la audición del niño o bien a la decadencia de la del adulto.

De forma general, podemos concluir que algunas capacidades auditivas se desarrollan en etapas muy tempranas; en cambio, otras, y según el estudio que tomemos, parecen madurar a edades relativamente altas, más allá de la adolescencia. Cabe la posibilidad de que estas variaciones sean reflejo de la complejidad de la función auditiva, de la diversidad de tareas y medidas utilizadas, o bien de una combinación de ambas cosas. Consideramos que transitoriamente debemos observar las conclusiones presentadas a lo largo del documento de forma individual, dado que no poseemos modelos que puedan aunar los resultados de los diversos apartados.

En nuestra opinión, el estudio del desarrollo auditivo humano adolece en dos aspectos fundamentales. En primer lugar, no poseemos datos sobre algunos de los tópicos que deben conformar un estudio sistemático del desarrollo auditivo, por edades y por funciones o tareas auditivas, como por ejemplo sobre el reconocimiento auditivo, la audición del movimiento o de la distancia. En segundo lugar, se hace perentoria la conveniencia de generar modelos que integren y armonicen la heterogeneidad de los resultados de las últimas décadas, en una confluencia fructífera de la psicología evolutiva y de la orientación más experimentalista de la psicología.

Sin embargo, nos atreveremos a exponer una breve reseña de los estudios comentados a lo largo del documento:

En el nacimiento, la capacidad auditiva es funcional, aunque con una competencia muy limitada. Durante los primeros años, el niño es relativamente más sensible a los tonos agudos que a los graves. El niño consigue la competencia sobre el *low pitch* muy pronto, alrededor de los 7 meses. Los estudios sobre resolución frecuencial que han utilizado el *método de enmascaramiento basado en el espectro de potencia* indican la relativa similitud entre las *curvas de sintonía psicoacústica* de los niños muy pequeños y de los adultos. En cambio, los estudios que han utilizado el *método de ruido horadado* establecen que los niños no alcanzan un nivel de rendimiento similar al de los adultos hasta, como mínimo, los 5 años. Los estudios de discriminación frecuencial también indican esta edad como inicio de un buen rendimiento, los estudios sobre desarrollo de la percepción musical señalan que es a partir de esta edad cuando se empieza a perfeccionar la representación tonal. Los umbrales absolutos con enmascaramiento y la sensibilidad frecuencial presentan datos similares: algunos autores consideran que los niños no alcanzan valores de adultos hasta, al menos, los 5 años; otros autores indican que esta equiparación se produce en edades entre los 5 y los 10 años.

Por cuanto a la audición del espacio, los neonatos presentan conductas que demuestran algún tipo de habilidad en este sentido. No obstante, es a partir de los 4 o 5 meses cuando el niño comienza a desarrollar una localización espacial más similar a la del adulto, la primera era bastante refleja. Los niños de 5 años obtienen valores de MAA (mínimo ángulo audible) similares a los de los adultos, aunque el efecto de precedencia, a pesar de mostrar también valores semejantes a los adultos con estímulos simples, todavía tiene una menor precisión con tonos más complejos.

Referencias

- Abrams, R.M., Gerhardt, K.J. y Peters, A.J.M. (1995). Transmission of sound and vibration to the fetus. En J.P. Lecanuet, W.P. Fifer, N. Krasnegor y W.P. Smotherman (eds.), *Fetal development: a psychobiological perspective* (pp. 315-330), Hillsdale: Erlbaum.
- Albrecht, R., Suchodoletz, W.V. y Uwer, R. (2000). The development of auditory evoked dipole source activity from childhood to adulthood. *Clinical Neurophysiology*, *111*, 2.268-2.276.
- Ando, Y. y Hattori, H. (1970). Effects of intense noise during fetal life upon postnatal adaptability (Statistical study of the reactions of babies to aircraft noise). *Journal of the Acoustical Society of America*, *47*, 1.128-1.130.
- Ando, Y. y Hattori, H. (1977). Effects of noise on sleep of babies. *Journal of the Acoustical Society of America*, *62*, 199-204.
- Ashmead, D.H., Clifton, R.K. y Perris, E.E. (1987). Precision of auditory localization in human infants. *Developmental Psychology*, *23*, 641-627.
- Ashmead, D.H., Davis, D.L., Whalen, T. y Odom, R.D. (1991). Sound localization and sensitivity to interaural time differences in human infants. *Child Development*, *62*, 1.211-1.226.
- Aslin, R.N., Pisoni, D.B. y Jusczyk, P.W. (1983). Auditory Development and Speech Perception in Infancy. En P.H. Mussen *Handbook of Child Psychology. Volumen II* (cap. 8). New York: John Wiley & Sons.
- Berg, K.M. y Boswell, A.E. (2000). Noise increment detection in children 1 to 3 years of age. *Perception and Psychophysics*, *62*, 868-873.
- Blanco, F. y Travieso, D. (1999). Procesamiento básico de la visión. En E. Munar, J. Rosselló y A. Sánchez-Cabaco (eds.), *Atención y percepción* (pp. 235-265). Madrid: Alianza.
- Boothroyd, A. (1997). Auditory Development of the Hearing Child. *Scandinavian Audiology*, *26* (sup. 46), 9-16.
- Bredberg, G. (1968). Cellular pattern and nerve supply of the human organ of Corti. *Acta Otolaryngologica*, *236* (sup.).

- Briggs, C.A. (1991). A model for understanding musical development. *Musical Therapy*, 10, 1-21.
- Bundy, R.S. (1980). Discrimination of sound localization cues in young infants. *Child Development*, 51, 292-294.
- Bundy, R.S., Colombo, J. y Singer, J. (1982). Pitch perception in young infants. *Developmental Psychology*, 18, 10-14.
- Butterworth, G. y Castillo, M. (1976). Coordination of auditory and visual space in newborn human infants. *Perception*, 5, 155-160.
- Clarkson, M. (1992). Infants' perception of low pitch. En L.A. Werner y E.W. Rubel (eds.), *Developmental psychoacoustics* (pp. 159-188). Washington: American Psychological Association.
- Clifton, R.K., Morrongiello, B.A., Kulig, J. y Dowd, J.M. (1981). Newborns' orientation toward sound: Possible implications for cortical development. *Child Development*, 52, 833-838.
- Elliott, L.L. y Katz, D.R. (1980). Children's pure tones detection. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67, 343-344.
- Faires, W.L. y Lankford, S.E. (1976). Auditory frequency and intensity discrimination ability of cerebral palsied children. *British Journal of Disorders of Communication*, 11, 73-80.
- Feijoo, J. (1981). Le foetus. Pierre et le Loup. En E. Herbinet y M.C. Busnel (eds.), *L'Aube des Sens* (pp. 192-209). Paris: Stock.
- Field, J., Muir, D., Pilon, R., Sinclair, M. y Dodwell, P. (1980). Infants orientation to lateral sounds from birth to three months. *Child Development*, 51, 295-298.
- Fior, R. y Bolzonello, P. (1987). An investigation on the maturation of hearing abilities in children. *Ear & Hearing*, 8, 347-349.
- Fletcher, H. (1924). The physical criterion for determining the pitch of a musical tone. *Physical Review*, 23, 427-437.
- García-Albea, J.E. (1999). Algunas notas introductorias al estudio de la percepción. En E. Munar, J. Rosselló y A. Sánchez-Cabaco (eds.), *Atención y percepción* (pp. 179-200). Madrid: Alianza.
- Gerhardt, K.J., Otto, R., Abrams, R.M., Colle, J.J., Burchfield, D.J. y Peters, A.J.M. (1992). Cochlear microphonics recorded from fetal and newborn sheep. *American Journal of Otolaryngology*, 13, 223-226.
- Griffiths, S.J., Brown, W.S., Gerhardt, K.J., Abrams, R.M. y Morris, R.J. (1994). The perception of speech sounds recorded within the uterus of a pregnant sheep. *Journal of the Acoustical Society of America*, 96, 2.055-2.063.
- Hall, J.W. y Grose, J.H. (1991). Notched-noise measures of frequency selectivity in adults and children using fixed-masker-level and fixed-signal-level presentation. *Journal of Speech and Hearing Research*, 34, 651-660.
- Hepper, P.G. (1988). Fetal «soap» addiction. *Lancet*, 1, 1.147-1.148.
- Hirsh, I.J. y Watson, C.S. (1996). Auditory psychophysics and perception. *Annual Review of Psychology*, 47, 461-484.
- Houtsma, A.J.M. y Goldstein, J.L. (1972). The central origin of pitch of complex tones: Evidence from musical recognition. *Journal of the Acoustical Society of America*, 51, 520-529.
- Irwin, R.J., Stillman, J.A. y Schade, A. (1986). The width of the auditory filter in children. *Journal of the Experimental Child Psychology*, 41, 429-442.
- Jensen, J. y Neff, D. (1993). Development of basic auditory discrimination in preschool children. *Psychological Science*, 4, 104-107.
- Kaga, M. (1992). Development of sound localization. *Acta Paediatrica of Japan*, 34, 134-138.
- King, A.J. y Moore, D.R. (1991). Plasticity of auditory maps in the brain. *Trends Neuroscience*, 14, 31-37.
- Lecanuet, J.P. (1998). Foetal responses to auditory and speech stimuli. En A. Slater (ed.), *Perceptual Development: visual, auditory, and speech perception in infancy*. Hove: Psychology Press.
- Litovsky, R.Y. (1997). Developmental changes in the precedent effect: estimates of minimum audible angle. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102, 1.739-1.745.
- Litovsky, R.Y. y Ashmead, D.H. (1997). Development of binaural and spatial hearing in infants and children. En R.H. Gilkey y T.R. Anderson (eds.), *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments* (pp. 571-592). Mahwah, NJ: LEA.
- Litovsky, R.Y. y Clifton, R.K. (1992). Use of sound-pressure level in auditory distance discrimination by 6-month-old infants and adults. *Journal of the Acoustical Society of America*, 92, 794-802.
- López-Bascuas, L.E. (1999). Percepción de la tonalidad y de la sonoridad. En E. Munar, J. Rosselló y A. Sánchez-Cabaco (coords.), *Atención y percepción* (pp. 489-517). Madrid: Alianza.
- Maxon, A. y Hochberg, I. (1982). Development of psychoacoustic behavior: Sensitivity and discrimination. *Ear & Hearing*, 3, 301-308.
- McGurk, H., Turnure, C. y Creighton, S. (1977). Auditory-visual coordination in neonates. *Child Development*, 48, 138-143.
- Moore, R.J. et al. (2001). Antenatal determination of fetal brain activity in response to an acoustic stimulus using functional magnetic resonance imaging. *Human Brain Mapping*, 12, 94-99.
- Morrongiello, B. (1988). Infants' localization of sounds along of two spatial dimensions: Estimates of minimum angle audible. *Developmental Psychology*, 24, 8-13.
- Morrongiello, B. y Clifton, R.K. (1984). Effects of sound frequency on behavioral and cardiac orienting in newborn and five-month-infants. *Journal of Experimental Child Psychology*, 61, 429-446.
- Morrongiello, B. y Rocca, P.T. (1990). Infants' localization of sounds within hemifields: Estimates of minimum audible angle. *Child Development*, 61, 1.258-1.270.
- Muir, D. y Clifton, R.K. (1985). Infants' orientation to the location of sound sources. En G. Gottlieb y N.A. Krasengor (eds.), *Measurement of audition and vision in the first postnatal year of life: A methodological overview* (pp. 171-194). Norwood, NJ: Ablex.
- Muir, W.D., Clifton, R.K. y Clarkson, M.G. (1989). The development of a human auditory localization response: En U-shaped function. *Canadian Journal of Psychology*, 43, 199-216.
- Muir, D. y Field, J. (1979). Newborn infants orient to sounds. *Child Development*, 50, 431-436.
- Newcombe, N. (1995). *Child development. Change over time*. New York: Harper Collins College Publishers.
- Olsho, L.W. (1985). Infant auditory perception: Tonal masking. *Infant Behavior and Development*, 8, 371-384.
- Olsho, L.W., Koch, E.G., Carter, E.A., Halpin, C.F. y Spetner, N.B. (1988). Pure-tone sensitivity of human infants. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84, 1.316-1.324.
- Pasman, J.W., Rotteveel, J.J., Maassen, B. y Visco, Y.M. (1999). *European journal of paediatric neurology*, 3, 79-82.
- Perris, E.E. y Clifton, R.K. (1988). Reaching in the dark toward sound as a measure of auditory localization in 7-month-old infants. *Infant Behavioural Development*, 11, 477-495.
- Peters, A.J.M., Abrams, R.M., Gerhardt, K.J. y Griffiths, S.K. (1993). Transmission of airborne sounds from 50-20.000 Hz into the abdomen of sheep. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 12, 16-24.
- Piaget, J. y Inhelder, B. (1967). *The child's conception of space*. New York: Norton & Company.
- Pich (1988). *Audición infantil (Estudio sobre reconocimiento y retención de sonidos)*. Palma: Servicio de Publicaciones de la Universitat de les Illes Balears.
- Pujol, R. (1972). Development of tone-burst responses along the auditory pathway in the cat. *Acta Oto-Laryngologica*, 74, 383-391.
- Pujol, R., Lavigne-Rebillard, M. y Uzile, A. (1991). Development of the human cochlea. *Acta Otolaryngologica*, 482, 7-12.
- Querleu, D., Renard, X., Versyp, F., Paris-Delrue, L. y Crépin, G. (1988). Fetal hearing. *European Journal of Obstetrics and Reproductive Biology*, 29, 191-212.
- Richards, D.S., Frentzen, B., Gerhardt, K.J., McCann, M.E. y Abrams, R.M. (1992). Sound levels in the human uterus. *Obstetrics and Gynecology*, 80, 86-190.
- Rubel, E.W. y Ryals, B.M. (1983). Development of the place principle: Acoustical trauma. *Science*, 219, 512-514.
- Sanes, D.H. (1992). The refinement of central auditory form and function during development. En L.A. Werner y E.W. Rubel (eds.), *Developmental Psychoacoustics* (pp. 257-279). Washington: American Psychological Association.
- Schneider, B.A., Morrongiello, B.A. y Trehub, S.E. (1990). Size of critical band in infants, children and adults. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 642-652.
- Schneider, B.A. y Trehub, S.E. (1992). Sources of developmental changes in auditory sensitivity. En L.A. Werner y E.W. Rubel (eds.), *Developmental Psychoacoustics* (pp. 3-46). Washington: American Psychological Association.
- Schneider, B.A., Trehub, S.E., Morrongiello, B.A. y Thorpe, L.A. (1989). Developmental changes in masked thresholds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86, 1.733-1.742.

- Sinnott, J.M. y Aslin, R.N. (1985). Frequency and intensity discrimination in human infants and adults. *Journal of the Acoustical Society of America*, 78, 1.986-1.992.
- Stanton, S.G. y Harrison, R.V. (1996). Abnormal cochleotopic organisation in the auditory cortex of cats reared in a frequency augmented environment. *Auditory Neuroscience*, 2, 97-107.
- Trehub, S.E., Schneider, B.A. y Endman, M. (1980). Developmental changes in infants' sensitivity to octave-band noises. *Journal of Experimental Child Psychology*, 29, 282-293.
- Veloso, K., Hall, J.W. y Grose, J.H. (1990). Frequency selectivity and modulation masking release in adults and in 6-year-old children. *Journal of Speech and Hearing Research*, 33, 96-102.
- Vila, E. y Barbero, M. I. (2000). The locus of deficits in dysphonemic dyslexia: an ERP analysis. *Psicothema*, 12, 79-85.
- Werner, L.A. (1992). Interpreting developmental psychoacoustics. En L.A. Werner y E.W. Rubel (eds.), *Developmental psychoacoustics* (pp. 47-88). Washington: American Psychological Association.
- Wightman, F. y Allen, P. (1992). Individual differences in auditory capability among preschool children. En L.A. Werner y E.W. Rubel (eds.), *Developmental psychoacoustics* (pp. 113-133). Washington: American Psychological Association.
- Wilson, S.J., Wales, R.J. y Pattison P. (1997). The representation of tonality and meter in children aged 7 and 9. *Journal of Experimental Child Psychology*, 64, 42-66.
- Yoneshige, Y. y Elliott, L.L. (1981). Pure-tone sensitivity and ear canal pressure at threshold in children and adults. *Journal of the Acoustical Society of America*, 70, 1.272-1.276.
- Zartorre, R.J. (1988). Pitch perception of complex tones and human temporal lobe function. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84, 566-572.
- Zimmerman, M.P. (1993). An overview of developmental research in music. *Council for Research in Music Education Bulletin*, 116, 1-12.