

Audición Espacial en Ambientes Reverberantes: Aspectos Teóricos Relevantes

373

ARTICULOS

Claudia Arias^{1,2}

Oscar A. Ramos

Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina

Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

Compendio

En ambientes reverberantes el sonido se propaga en múltiples direcciones sufriendo cambios físicos de importancia. El sistema auditivo debe ser capaz de resolver la competencia perceptual que se produce entre el sonido original y sus reflexiones. En este artículo se presentan aspectos teóricos relevantes de la audición espacial con especial tratamiento del efecto precedente. Se trata de una estrategia inconsciente que el individuo utiliza para enfrentar la información sonora conflictiva de los espacios reverberantes. Es el fenómeno perceptual de fusión espacial que ocurre cuando dos sonidos similares se presentan desde diferentes lugares, separados por un breve retardo de tiempo. El individuo escucha sólo un sonido que localiza según la dirección del sonido que llegó primero.

Palabras clave: Audición espacial; localización sonora; fusión auditiva; efecto precedente.

Spatial Hearing in Reverberant Environments: Main Theoretical Aspects

Abstract

In recent years there has been a growing interest in the study of listener's abilities to function in reverberant spaces where a sound propagates in multiple directions and is reflected from nearby surfaces. This article deals with theoretical considerations of spatial audition in the presence of reflections, in particular with the precedence effect. It is considered as a strategy that listeners unconsciously employ to cope with multiple arrays of directional cues in reverberant spaces. It refers to the auditory phenomenon that occurs when two similar sounds are presented from different locations with a brief delay between them and only one sound is heard whose perceived location is dominated by the first arriving sound.

Keywords: Spatial audition; sound localization; auditory fusion; precedence effect.

La mayoría de los estudios de localización sonora han sido realizados en condiciones artificiales, i.e., utilizando auriculares o en cámara anecoica donde el sonido viaja en línea recta desde la fuente al sujeto. Sin embargo, casi todos los eventos sonoros cotidianos ocurren en lugares donde hay paredes, techos y objetos que reflejan el sonido, es decir, en ambientes reverberantes donde el hombre también ha demostrado ser muy hábil para localizar sonidos.

¹ Dirección: Ocaña 736 (5010) Córdoba, Argentina. Tel.: (+54) 3514808736. E-mail: carias@scdt.fc.utm.edu.ar

² Este trabajo es una versión revisada del trabajo presentado en el Primer Congreso de Acústica del Nuevo Milenio. Asociación de Acústicos Argentinos, ADAA. Junio de 2000. Buenos Aires, Argentina

En un ambiente reverberante el sonido se propaga en múltiples direcciones y sufre cambios físicos de importancia al reflejarse en las superficies cercanas. El sistema auditivo se enfrenta así con una batahola de información sonora y debe ser capaz de resolver la competencia perceptual que se produce entre el sonido original o directo y sus reflexiones o sonidos retardados.

Una estrategia utilizada de manera inconciente por el individuo para enfrentar la información sonora conflictiva de los ambientes reverberantes es el efecto precedente. Se trata de un mecanismo que -al atribuirle un fuerte pesaje al sonido directo y reducir la influencia de la información direccional de los sonidos retardados- le ayudaría al individuo a localizar con precisión la fuente sonora primaria que es la que tiene mayor significación vital. En este artículo presentamos aspectos teóricos relevantes de la audición espacial en presencia de reflexiones, con especial tratamiento del efecto precedente.

Principales Aspectos Teóricos

La Percepción Auditiva

Boothroyd (1997) ha definido a la percepción auditiva en términos de objetos y eventos que producen sonidos, es decir, en relación a la fuente sonora. El proceso involucrado es en extremo complejo y ha sido denominado por Bregman (1992) análisis de escenas auditiva (auditory scene analysis). Está referido a cómo el sistema perceptual separa o segrega la onda acústica en objetos y eventos sonoros.

Baker (1996), por su parte, ha señalado que entre la investigación psicoacústica -que estudia relaciones entre el estímulo sonoro y la correspondiente sensación subjetiva- y la investigación sobre percepción del lenguaje existe una gran área que ha sido pasada por alto que está referida a la percepción de sonidos cotidianos no verbales. Insta a los científicos para que investiguen acerca de cómo se perciben eventos sonoros simples tomando en cuenta los aportes que brinda la Ecología de la audición, los procesos cognitivos involucrados y el subestimado efecto del aprendizaje perceptual y de la experiencia.

La Acústica ecológica -nueva rama de la Acústica cuyo objetivo es estudiar la sensopercepción auditiva utilizando fuentes sonoras naturales en ambientes naturales- y las nuevas estrategias metodológicas utilizadas en la experimentación comportamental y fisiológica comienzan a dar sus frutos, especialmente en una de las grandes áreas de la investigación auditiva: la audición espacial.

Audición Espacial

El sistema auditivo es un sofisticado procesador espacial que le permite al organismo detectar y monitorear las posiciones de objetos auditivos en los planos horizontal y vertical y en distancia, facilitándole la identificación de los mismos. Una persona normal tiene una inmediata apreciación del espacio auditivo en tanto se orienta la mayoría de las veces, de manera natural, rápida y exacta hacia el evento acústico. Aunque la precisión espacial es más pobre en el dominio auditivo

que en el visual, el “mundo auditivo” tiene la ventaja de extenderse en todas las direcciones alrededor del observador mientras que el “mundo visual” se restringe a su región frontal (Grantham, 1995). Esta geometría perceptual particular permite la alineación óptima de los sistemas visual y auditivo durante la adquisición de información (Perrott, Saberi, Brown & Strybel, 1990).

Localización sonora

La habilidad del hombre para localizar fuentes sonoras -uno de los grandes temas del área de la audición espacial- es muy precisa, aún para localizar sonidos breves o producidos en ambientes reverberantes o ruidosos. Está referida a la percepción de la posición de la fuente en el plano horizontal (azimut) y en el vertical (elevación) y a la percepción de su distancia relativa (Figura 1).

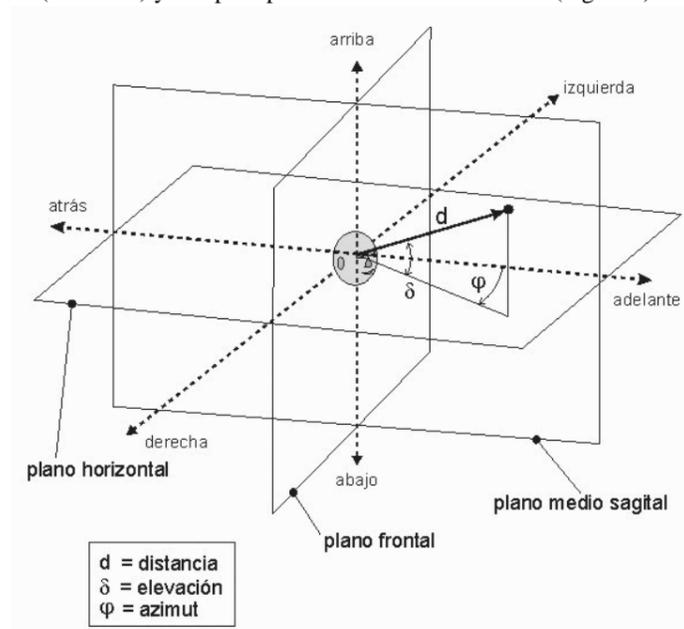


Figura 1. Representación esquemática de planos espaciales

El hombre es muy buen localizador en el plano horizontal, menos eficiente en el plano vertical y menos aún en relación a sus juicios sobre distancia (Moore, 1995). Las claves principales para determinar la posición de una fuente sonora son: a) la diferencia interaural en el tiempo de arribo del sonido a los dos oídos, ITD (interaural time difference); b) la diferencia interaural en el nivel sonoro, ILD (interaural level difference) y c) el filtraje – que depende de la posición de la fuente -causado por la interacción del sonido con los pliegues del pabellón de la oreja, cabeza, torso y hombros (Figura 2).

CLAUDIA ARIAS & OSCAR A. RAMOS

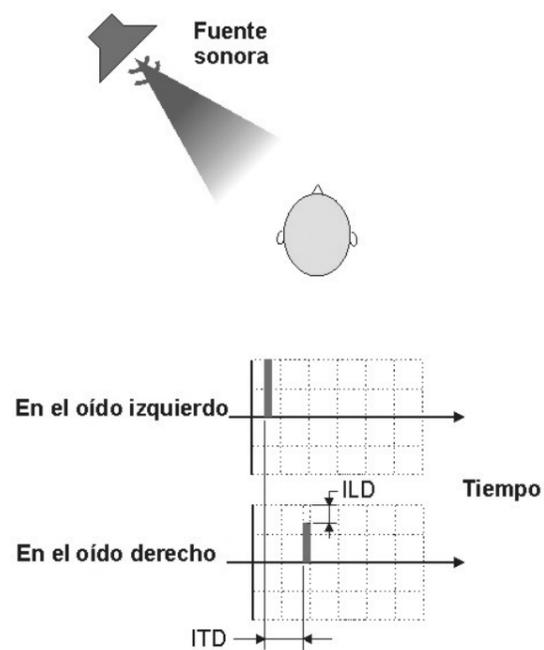


Figura 2. Localización sonora.
 Diferencia interaural de tiempo (ITD).
 Diferencia interaural de nivel sonoro (ILD)

Las diferencias interaurales, ITD e ILD, determinan la posición percibida de la fuente en el plano horizontal y la información espectral contenida en el filtraje mencionado, lo hace en el plano vertical. La percepción de la distancia está regida por una constelación de indicios que incluyen indicios de intensidad, reverberación y contenido espectral del objeto sonoro. Otros factores de nivel más alto como la experiencia, el aprendizaje, influencias visuales y 'entradas' propioceptivas influyen en la percepción del espacio auditivo (Blauert, 1997; Grantham, 1995).

En los estudios de localización sonora los estímulos se presentan según dos condiciones experimentales: en campo libre, donde el estímulo se pasa a través de un conjunto de altavoces apareados (o sea que sus diferencias espectrales han sido corregidas) dispuestos según un determinado arreglo espacial. La segunda condición, implica la presentación a través de auriculares con la ventaja indiscutible de que puede ejercerse un mayor control de los parámetros del estímulo. Su desventaja radica en que, si no se usan principios de la así llamada realidad virtual, los sonidos se escuchan como si se originaran dentro de la cabeza lo cual es un percepto antinatural.

Lateralización sonora

Una grabación en estéreo escuchada con auriculares da la sensación de que el sonido proviene de adentro de la cabeza. Plenge (1974) ha denominado internalización de la imagen sonora a tal percepción dentro de la cabeza de sonidos presentados a través de auriculares. La posición donde se ubica la imagen sonora a lo largo de una línea imaginaria trazada entre los oídos, se denomina lateralización de la imagen. Por el contrario, cuando el estímulo se presenta a través de altavoces, el sujeto percibe que el sonido proviene desde algún lugar situado en el espacio externo fuera de la cabeza, esto es, externalización de la imagen sonora. La posición subjetiva o aparente se denomina localización.

Un sonido presentado idénticamente a ambos oídos a través de auriculares, llamado estímulo diótico, se lateraliza en el centro de la cabeza. Se puede lograr que la imagen se mueva al oído derecho, por ejemplo, introduciendo un retardo de tiempo a la entrada del oído izquierdo o bien haciendo más intensa la señal del oído derecho.

Audición Espacial en Ambientes Reverberantes

Tal como lo mencionamos, en ambientes reverberantes el sonido se propaga en múltiples direcciones sufriendo cambios físicos de importancia al reflejarse en las superficies cercanas. El sistema auditivo debe resolver la competencia perceptual que se produce entre el sonido original y sus reflexiones. Es útil recordar, por una parte, que la fuente que genera el sonido original se denomina fuente primaria y la que genera la reflexión, fuente secundaria. Por la otra que, en general, la reflexión es una copia coherente, retardada y atenuada del sonido original que no se escucha como evento separado. El término eco se utiliza cuando la reflexión sí se percibe como un evento sonoro independiente separado del sonido directo.

El efecto precedente

Es una estrategia utilizada de manera inconciente por el individuo para enfrentar la información sonora conflictiva de los ambientes reverberantes. Esta habilidad denominada también efecto Haas y/o Ley del primer frente de onda, ha sido definida como el fenómeno de audición espacial que ocurre cuando dos sonidos similares se presentan desde diferentes lugares separados por un breve retardo de tiempo. El sujeto escucha sólo un sonido que localiza en la dirección del sonido que le llegó primero, llamado líder o directo. Aunque la persona se da cuenta de la presencia del segundo sonido, i.e., sonido reflejado o retardado, le resulta difícil y hasta imposible localizarlo en algunas condiciones (Gardner, 1968; Wallach, Newman & Rosenzweig, 1949). Se ha sugerido que el efecto precedente es un mecanismo que le ayuda al individuo a localizar con precisión la fuente sonora primaria que es la que tiene mayor significación vital. El sistema auditivo le atribuye un fuerte pesaje al sonido directo reduciendo, de esta manera, la influencia de la información direccional contenida en los sonidos retardados.

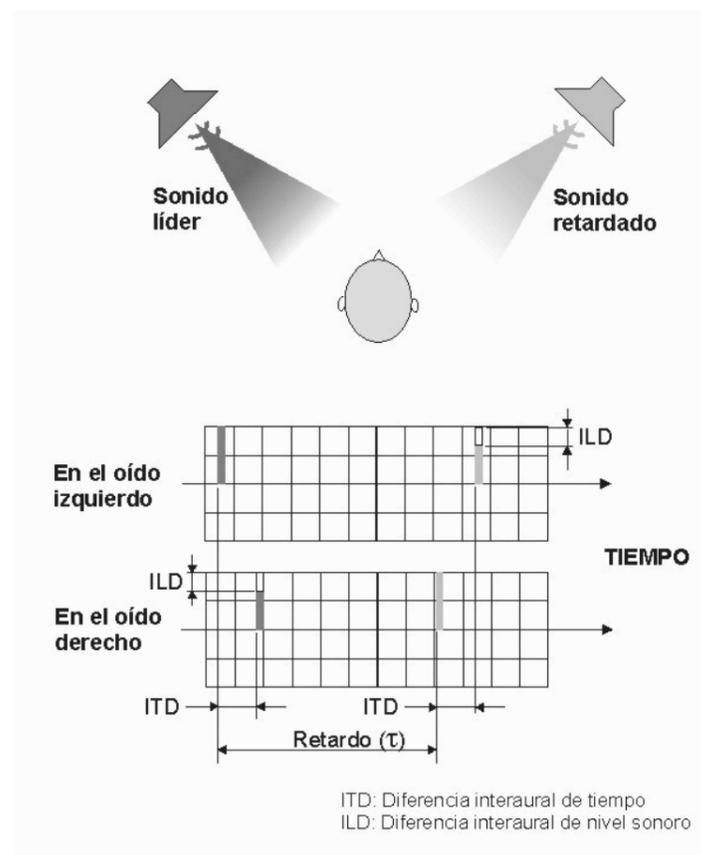


Figura 3. Representación esquemática del efecto precedente

En un estudio experimental típico sobre el efecto precedente en campo libre se emplean dos altavoces separados entre sí y equidistantes del sujeto (Figura 3). Un altavoz emite el primer sonido -el líder. El segundo altavoz emite, desde un lugar distinto y después de un breve retardo variable (t), una réplica del primer sonido a manera de reflexión simulada -el sonido retardado. Cuando ambos sonidos se presentan simultáneamente ($t=0$ ms) el sujeto percibe una única imagen fusionada "fantasma" ubicada en la mitad del trayecto entre ambos altavoces. A medida que el retardo se incrementa de 0 a 1 ms, la imagen 'fantasma' migra hacia el sonido líder. Para retardos entre 1 ms y 30 ms la fuente sonora se localiza en la posición del sonido líder y la información direccional contenida en el sonido retardado es prácticamente descartada. Para

retardos que exceden los 30-35 ms la imagen se 'parte' en dos y el sujeto puede localizar separadamente ambos eventos según la posición de los respectivos altavoces (Blauert, 1997). El retardo para el cual la imagen fusionada se 'parte' en dos se llama umbral del eco y depende fuertemente del tipo de estímulo empleado, por ejemplo: lenguaje= 35 ms; clicks=5-10 ms (Freyman, Clifton & Litovsky, 1991). El efecto precedente ha sido replicado con éxito en estudios de lateralización con resultados similares a los obtenidos en estudios de localización. Se han reportado muy pocos experimentos de localización de fuentes sonoras virtuales bajo efecto precedente (Dizon, Litovsky & Colburn, 1997).

Perceptos involucrados en el efecto precedente

Tres perceptos están involucrados en este fenómeno: fusión, dominancia en la localización y supresión de la discriminación del sonido retardado (Litovsky, Colburn, Yost & Guzman, 1999).

El primer percepto se refiere a la fusión de los dos sonidos en una sola y coherente imagen auditiva, lo cual resulta útil para evitar imágenes sonoras múltiples. Es interesante destacar que la presencia del sonido retardado se detecta claramente: si se apaga el altavoz que emite el sonido retardado la imagen percibida cambia notablemente en sonoridad, espacialidad y timbre.

El percepto de dominancia se refiere al procesamiento de la información direccional, esto es, dónde se localiza la imagen fusionada y cuánto la posición del sonido líder domina esta percepción. Aunque la información direccional contenida en el sonido retardado no es ignorada completamente, como ya se mencionó, es el líder quien mayormente contribuye a determinar la posición percibida.

El tercer percepto se refiere a la habilidad del sujeto para procesar la información direccional contenida en el sonido retardado, lo cual implica extraer información de un sonido que no es audible como evento separado. Los últimos estudios muestran que a pesar de que el ser humano no es consciente de las reflexiones, es capaz de procesar la información contenida en ellas. Por ejemplo: Saberi y Perrott (1990) concluyeron que es posible mediante el aprendizaje y el entrenamiento 'apagar' este mecanismo de supresión y extraer la información contenida en los ecos; Freyman, Mccall y Clifton (1998) reportaron una buena sensibilidad de los sujetos para percibir varios aspectos del sonido retardado incluyendo su intensidad y contenido espectral.

Componentes dinámicos del efecto precedente

Experimentos recientes han demostrado que el efecto precedente tiene componentes dinámicos evidenciado a través del así denominado mecanismo de incremento gradual en la supresión del eco (*build up of echo suppression*). Si se presenta un único par de pulsos -un click y su reflexión simulada retardada en 8 ms, por ejemplo- el sujeto escuchará dos eventos separados (recordar que el valor de umbral para este tipo de señales es 5 ms). Sin embargo, cuando se presenta el mismo par de pulsos en la forma de trenes de pares de pulsos

(cuatro pares por segundo, por ejemplo), el sujeto escuchará dos eventos separados pero sólo durante los primeros cuatro a ocho pares después de lo cual el eco se hace inaudible como evento separado, es decir, se produce la fusión. En otras palabras, el umbral del eco se incrementa durante el curso de una secuencia de pulsos idénticamente presentados (Freyman et al., 1991).

Es interesante destacar que este mecanismo dinámico se libera cuando ocurren cambios repentinos en la configuración del estímulo o cuando aparece información nueva, proceso que se denomina rompimiento de los fenómenos de precedencia o liberación de la supresión (breakdown of precedence phenomena o release from suppression; Clifton, 1987).

Neurofisiología de la audición y efecto precedente

Los nuevos hallazgos experimentales en neurofisiología de la audición indican que la corteza auditiva no es necesaria para discriminar los parámetros físicos del sonido: intensidad, altura tonal, timbre, duración. El oído es quien se encarga de analizarlos y codificarlos.

Los atributos de la fuente sonora: azimut, elevación, distancia y naturaleza - que son los que realmente guían la acción del animal en el entorno- son analizados y codificados en el complejo olivar superior que es quien integra la actividad aferente que llega y distribuye las actividades eferentes que genera a los sitios que corresponden (Masterton, 1992). Recientes investigaciones sugieren que el proceso es aún más complejo: el complejo olivar superior envía información (las diferencias interaurales, espectro, orden de arribo, entre otros datos) a los centros superiores donde es evaluada y comparada posiblemente con la información obtenida a través de la visión (Hartmann, 1999).

En relación al efecto precedente poco se sabe aún acerca del sustrato fisiológico de este fenómeno auditivo a pesar de la creciente actividad científica de la última década. Los estudios más recientes indican que, si bien estadios iniciales de este mecanismo pueden ocurrir en el tronco encefálico, las respuestas de neuronas únicas no pueden dar cuenta de todos los aspectos relacionados con el efecto precedente. Por ejemplo, sus aspectos dinámicos (*build up and breakdown*) están mediatizados en niveles más altos de la vía auditiva que el colículo inferior. Los estudios de lesiones en el gato, los estudios evolutivos y los fisiológicos parecen sugerir en conjunto, que la corteza auditiva es esencial en el fenómeno de la precedencia (Litovsky, 1998).

Conclusión

La habilidad para localizar con exactitud la fuente de un sonido es de importancia capital tanto para los animales como para los humanos (Clarkson & Clifton, 1991). En un ambiente reverberante el sonido se propaga en múltiples direcciones sufriendo importantes cambios físicos cuando se refleja en las superficies cercanas. El sistema auditivo debe ser capaz de resolver la competencia perceptual que se produce entre el sonido original y sus

reflexiones. Se ha evidenciado en los últimos años un creciente interés por estudiar el efecto que tienen las reflexiones sobre la habilidad para localizar sonidos y por comprender cómo procesa el sistema auditivo los múltiples indicios direccionales que existen en ambientes reverberantes.

Una estrategia utilizada por el individuo para enfrentar la información conflictiva de los ambientes reverberantes es el efecto precedente. Este mecanismo le ayudaría al individuo a localizar con precisión la fuente sonora primaria -que es la que tiene mayor significación vital- pues le atribuye un fuerte pesaje al sonido directo y reduce la influencia de la información direccional de los sonidos retardados. Sin embargo, hallazgos recientes sugieren que el sistema auditivo no elimina sino que, por el contrario, mantiene la información contenida en las reflexiones aún cuando se produzca fusión y dominancia del líder en relación a la posición percibida. Ciertos cambios en el ambiente acústico liberan el mecanismo de supresión y el sujeto puede así extraer información del sonido retardado (Freyman et al., 1998; Saberi, et al., 1990).

Todas las hipótesis tomadas en conjunto, ninguna de las cuales brinda una explicación completa aún, sugieren que el procesamiento de los sonidos reflejados se apoya en mecanismos centrales como los que están involucrados en la cognición (Blauert, 1997, Litovsky et al., 1999). Los avances científicos logrados en este campo del conocimiento -que ofrece una 'ventana única' para estudiar procesos auditivos complejos a partir del aporte conjunto de varios abordajes disciplinarios: la percepción humana, la fisiología, el comportamiento animal y el desarrollo (Litovsky et al., 1999)- han puesto de manifiesto las extraordinarias capacidades del sistema auditivo humano para aprender a percibir cambios sutiles en los sonidos y utilizar esta información para su propio beneficio (Arias & Ramos, 1998; Freyman et al., 1998; Saberi, et al., 1990).

Referencias

- Arias, C. & Ramos, O. A. (1998). Ecolocación humana: una síntesis de aspectos relevantes. *Discapacidad Visual Hoy. Aportes sobre la Visión Diferenciada*, 4(6), 21-28.
- Baker, K. L. (1996, Agosto). *Auditory perception: Between psychophysics and speech*. Poster presented in the XXVI International Congress of Psychology, Montreal, Canada, IUPsyS.
- Blauert, J. (1997). *Spatial hearing: The psychophysics of human sound localization* (Revised Edition). Cambridge, MA, USA: MIT.
- Boothroyd, A. (1997). Auditory development of the hearing child. *Scandinavian Audiology*, 26(46), 9-16.
- Bregman, A. S. (1992). Auditory scene analysis: Hearing in complex environments. In S. McAdams & E. Bigand (Eds.), *Thinking in sounds: The cognitive psychology of human audition* (pp. 10-36). New York, USA: Oxford University.
- Clarkson, M. G. & Clifton, R. K. (1991). Acoustic determinants of newborn orienting. In M. J. Salomon Weiss & P. R. Zelazo (Eds.), *Newborn attention. biological constraints and the influence of experience*. Norwood, NJ, USA: Ablex.
- Clifton, R. K. (1987). Breakdown of echo suppression in the precedence effect. *Journal of the Acoustical Society of America*, 8(2), 1834-1835.

- Dizon, R., Litovsky, R. Y. & Colburn, H. S. (1997). Positional dependence on localization dominance in the median-sagittal plane [Resumen]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(5 Pt.2), 3106.
- Freyman, R. L., Clifton, R. K. & Litovsky, R. Y. (1991). Dinamic processes in the precedence effect. *Journal of the Acoustical Society of America*, 90(2 Pt. 1), 874-884.
- Freyman, R. L., McCall, D. M. & Clifton, R. K. (1998). Intensity discrimination for precedence effect stimuli. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(4), 2031-2041.
- Gardner, M. B. (1968). Historical background of the Haas and/or precedence effect. *Journal of the Acoustical Society of America*, 43 (6), 1243-1248.
- Grantham, W. D. (1995). Spatial hearing and related phenomena. En B. C. J. Moore (Ed), *Hearing*. San Diego, CA, USA: Academic Press.
- Hartmann, W. M (1999). How we localize sound. *Physics Today*, 52(11), 24-29
- Litovsky, R. Y (1998). Physiological studies of the precedence effect in the inferior colliculus of the kitten. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(6), 3139-3152.
- Litovsky, R. Y., Colburn, H. S., Yost, W. A. & Guzman, S. J. (1999). The precedence effect. *Journal of the Acoustical Society of America*, 106(4 Pt. 1), 1633-1654.
- Masterton, R. B. (1992). Role of the central auditory system hearing: The new direction. *Tins*, 15(8), 280-284.
- Moore, B. C. J. (1995). *Hearing. - Handbook of perception and cognition* (Second edition) San Diego, CA, USA: Academic Press.
- Perrott, D. R., Saberi, K., Brown, K. & Strybel, T. Z. (1990). Auditory psychomotor coordination and visual search performance. *Perception and Psychophysics*, 48, 214-226.
- Plenge, G. (1974). On the difference between localization and lateralization. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56, 944-951.
- Ramos, O. A., C. Arias, A. & Ortiz, S. (2000). *Audición espacial en ambientes reverberantes: Aspectos teóricos relevantes* [Resumen], Primer Congreso de Acústica del Nuevo Milenio, Buenos Aires, Argentina.
- Saberi, K. & Perrott, D. R. (1990). Lateralization thresholds obtained under conditions in which the precedence effect is assumed to operate. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87(4), 1732-1737.
- Wallach, H., Newman, E. B. & Rosenzweig, M. R. (1949). The precedence effect in sound localization. *The American Journal of Psychology*, 62(3), 315-337.

Claudia Arias y Oscar A. Ramos pertenecen al Centro de Investigación y Transferencia en Acústica, CINTRA, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Claudia Arias pertenece además, al Centro de Investigaciones de la Facultad de Filosofía y Humanidades, CIFFyH y Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.