

## VALIDACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE INVESTIGACIÓN: LA LINTERNA SÓNICA

**L. Guillermo Gilberto<sup>a</sup>, Fernando Bermejo<sup>a,b</sup>, Valentín Lunati<sup>a</sup>, Aldo Ortiz Skarp<sup>a</sup>,  
Claudia Arias<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup>*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), FRC - UTN - UA CONICET,  
Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina,  
lguillermo.gilberto@gmail.com, fbermejo@psyche.unc.edu.ar, 50259@frc.utn.edu.ar,  
aortiz@scdt.frc.utn.edu.ar, carias@psyche.unc.edu.ar, <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra>*

<sup>b</sup>*Facultad de Psicología, Universidad Nacional de Córdoba, Enfermera Gordillo esquina Enrique  
Barros, Ciudad Universitaria. Córdoba, Argentina. <http://www.psyche.unc.edu.ar>*

**Palabras clave:** ecolocación, directividad, reflexión sonora, efecto peine.

**Resumen.** La Ecolocación Humana es una habilidad crucial para el movimiento independiente de la persona ciega, implica la utilización de sonidos autoproducidos para detectar, localizar y reconocer objetos. La Linterna Sónica (LS) es una herramienta de investigación diseñada para realizar pruebas de ecolocación con personas ciegas y con visión normal sin entrenamiento previo en esta habilidad. El dispositivo, que emite una señal sonora direccional, permite al usuario detectar objetos silentes cercanos a través de las reflexiones producidas. En este trabajo se exponen diferentes análisis llevados a cabo con la LS con el propósito de validar de manera objetiva y subjetiva su funcionamiento. En primer lugar, se estudió la directividad de la emisión sonora a distintas frecuencias y se verificaron las reflexiones producidas por un objeto experimental ante la incidencia de la señal de la LS. Se examinó el efecto peine producido por la reflexión en disposiciones estáticas y con grabaciones binaurales. También se analizaron espectrogramas del mismo efecto en situaciones dinámicas, i.e., variando el ángulo de elevación (plano vertical) y de azimut (plano horizontal) de la LS. Por último, se realizó una prueba psicofísica de detección de objetos para determinar su usabilidad.

## 1 INTRODUCCION

La ecolocación es una habilidad genuinamente humana e inexplorada, que está estrechamente vinculada con la localización de sonidos reflejados y se inscribe en el área escasamente estudiada aunque ciertamente promisorio de los procesos percepto-cognitivos de la audición cotidiana. Implica autoproducir sonidos con el propósito específico de obtener información ecoica para detectar, localizar y reconocer objetos que no se ven. Se han descripto dos modalidades complementarias de ecolocación: a larga (entre 2 m ó 3 m y 5 m) y corta distancia (menos de 2 m ó 3 m). En esta última, la señal directa o autoproducida (chascidos de dedos, clicks con la lengua, golpeteo del bastón, son algunas de las señales de ecolocación más comunes, que espontánea e intuitivamente generan la mayoría de las personas con discapacidad visual) y la reflejada no se perciben separadas sino fusionadas. Es la modalidad que mayor significación tiene en la vida diaria de una persona ciega, ya que le sirve no sólo para orientarse en el espacio sino además, para proteger su integridad física al evitar el choque contra obstáculos eventualmente presentes en su camino.

Es oportuno mencionar que el objeto que genera la reflexión o el eco (por ejemplo, una pared), es tratado como fuente sonora secundaria, con lo cual se considera que la ecolocación constituye una variación particular del proceso general de determinación de la fuente sonora directa. En este caso, la información acerca del sistema animal-ambiente se obtiene de un estímulo relacional único, la cupla directa-reflejada. La energía del estímulo generada por el individuo (señal directa) se propaga en el ambiente, es estructurada por éste, para luego retornar al receptor (señal reflejada). La información relevante se encuentra en las relaciones que existen entre los patrones de energía de salida y los patrones de energía que regresan (Stoffregen & Pittenger, 1995).

Conceptualizaciones históricas de la ecolocación resultan especialmente ejemplificadoras sobre el desarrollo del conocimiento en torno a este fenómeno: desde considerarla un fenómeno paranormal, un sexto sentido (Romain, 1924), hasta tratarla como una habilidad genuina e inexplorada que puede utilizarse habitualmente, aunque de manera inconsciente, por personas con y sin discapacidad visual (Stoffregen & Pittenger, 1995). Así, la ecolocación toma protagonismo como ejemplo de fenómeno que, para ser comprendido, requiere un abordaje extendido y unificado por sobre el tradicional estudio por separado de habilidades cognitivas, perceptuales y conductuales.

### 1.1 Señales de Ecolocación

Kish y Bleier (2000) consideraron que la ecolocación es una habilidad natural con la que cuentan animales y humanos para percibir el ambiente. Los murciélagos y delfines, entre otros animales, y las personas ciegas con buena habilidad de ecolocación, aprenden a emitir sonidos para generar reflexiones en las superficies del entorno las que, cuando regresan al perceptor, le informan precisamente sobre las características del ambiente y objetos que se encuentran en él. Establecieron un paralelismo entre la información contenida en los sonidos reflejados y en la luz reflejada, por ejemplo, por una linterna. Señalaron que no existe un método formal para entrenar esta habilidad, por lo que elaboraron una guía práctica para enseñar ecolocación a jóvenes ciegos destinada a docentes especiales. Desarrollaron clara y simplemente, estableciendo analogías con el desarrollo de habilidades visuales, conceptos teóricos y metodológicos claves y algunos ejercicios de aplicación sencillos con dificultad creciente, a modo de ejemplo.

Por su parte, Kish, quien es ciego desde el primer año de edad, en su calidad de doble

experto en el área de la ecolocación humana (usuario altamente eficiente y especialista en Orientación y Movilidad) ha creado el primer programa sistemático y comprensivo para el entrenamiento avanzado en ecolocación destinado a las personas ciegas. El FlashSonar consta de 11 ejes focales alrededor de los cuales se organiza el proceso de aprendizaje con actividades individuales y grupales. Uno de los ejes aborda la temática de la información sonora que se clasifica en pasiva y activa. La primera se refiere a los sonidos disponibles en el entorno, que generan reflexiones y ecos que pueden ser útiles. La activa se refiere a la producción de señales de ecolocación por parte del propio sujeto y deben cumplir tres requisitos: (a) control del usuario sobre el tipo de señal y direccionalidad, (b) buena alineación entre la señal y los oídos y (c) mínimo enmascaramiento del eco y buena familiaridad con la señal. Kish considera que los chasquidos con la lengua son señales ideales, ya que no sólo cumplen con esos requisitos, sino que el sujeto puede controlar fácilmente su nivel y sonoridad. El programa enseña a generarlos y usa cinco tipos de chasquidos con características acústicas diferentes (por ejemplo, más agudas o más graves) que sirven para distintos requerimientos de ecolocación. Con un entrenamiento avanzado en ecolocación y otras técnicas, la persona ciega logra realizar tareas tan complejas como manejar una bicicleta de montaña (con dispositivo sonoro en las ruedas), patinar o realizar travesías solitarias en ambientes desolados (Kish, 2009).

## **1.2 Investigaciones en ecolocación que utilizaron señales artificiales**

Más allá de lo auspicioso que resultan los programas de entrenamiento de señales de ecolocación para la Orientación y Movilidad de la persona ciega, resulta dificultoso evaluar esta habilidad en contextos exclusivamente científicos. El entrenamiento de esta habilidad demanda tanto la disponibilidad de personal altamente especializado como de muchas horas de entrenamiento sostenido. A los fines prácticos, recientemente varios investigadores han decidido evaluar personas ya expertas en ecolocación (Teng & Whitney, 2011; Teng, Puri, & Whitney, 2011, Thaler, Arnott & Goodale, 2011). De todas maneras, la desventaja de estos trabajos reside en la reducida muestra que se alcanza tomar. Otra alternativa posible es la utilización de ayudas electrónicas que agilicen el aprendizaje de esta habilidad. A pesar de no cumplir íntegramente con los paradigmas de la ecolocación, la utilización de estos dispositivos propone valiosos puntos de comparación para su estudio. A continuación se presenta una serie de trabajos que recurrieron a esta última alternativa.

Clarke, Pick y Wilson (1975) realizaron un extenso e importante trabajo donde evaluaron la habilidad para percibir obstáculos con y sin la ayuda de una linterna sónica manual, que diseñaron para mejorar los indicios naturales usados en la ecolocación. Se trataba de un gabinete acústico de dimensiones reducidas, con el parlante montado convenientemente para producir mayor direccionalidad de las señales sonoras utilizadas (clicks o ruido blanco) en el espectro requerido. Trataron de determinar si el entrenamiento en ecolocación utilizando la linterna mejoraba el rendimiento del sujeto cuando no la usaba. Llevaron a cabo experimentos en condición estática (sujeto y obstáculo fijos) y dinámica, a través de un curso de entrenamiento en ecolocación utilizando obstáculos familiares (por ejemplo, puertas y bordes de paredes) dispuestos en un recinto especial. Trabajaron con cuatro grupos: niños ciegos, adultos con ceguera de larga data, adultos con ceguera de corta data (de 1 a 3 años) y adultos con visión normal ocluida. Los dos primeros grupos mostraron un rendimiento superior al de los otros dos en detección de obstáculos en la condición estática. Con la ayuda de la linterna todos los sujetos realizaron más detecciones, con tendencia a la equiparación de los rendimientos entre los grupos. En el curso de entrenamiento, los niños y los adultos con visión

normal ocluida fueron los que realizaron el mayor número de detecciones, aunque estos últimos completaban el trayecto en un tiempo mucho mayor. Los adultos con ceguera de corta data realizaron el menor número de detecciones. La utilización de la linterna sónica duplicó aproximadamente la cantidad y alcance de detecciones de obstáculos. Finalmente, se evidenció un efecto de aprendizaje durante las pruebas con y sin la linterna.

Arias, Ramos, Ortiz Skarp y Hüg (1999) llevaron a cabo dos pruebas especialmente diseñadas para estudiar el intrigante fenómeno de la visión facial, aspecto particular de la ecolocación humana referido a la sensación cutánea que algunas personas, tanto ciegas como con visión normal, sienten en el rostro ante la cercanía del objeto. El procedimiento general consistió en lo siguiente: el sujeto permanecía sentado en una silla, usando un dispositivo sonoro (clicker) colgado del cuello, que emitía clicks o ráfagas de ruido blanco. Se le permitía girar la cabeza a ambos lados si lo deseaba, aunque no podía mover el tronco ni adelantar los brazos. Su tarea consistía en indicar la presencia de un obstáculo, prestando especial atención a cualquier sensación que experimentara. Si su respuesta era afirmativa, describía la sensación subjetiva y cuando no experimentaba ninguna, respondía “sin sensación”. En la mitad de los ensayos, se aproximaba al sujeto un objeto real (placa de aluminio de 50 cm por 42 cm sujeta a un bastidor triangular) y en la otra mitad, un objeto simulado o blanco fantasma. Se generaba esta ilusión acústica acercando al rostro del sujeto un bastidor triangular, en uno de cuyos vértices se había adherido esta vez, un pequeño emisor que emitía simultáneamente el sonido del clicker atenuado convenientemente.

Hughes (2001) evaluó en una serie de experimentos complementarios la utilidad potencial de un sonar aéreo (Kaspa) para proveer información efectiva en 3D de diversas disposiciones espaciales en recintos grandes. El participante con visión normal ocluida y utilizando el dispositivo debía aproximarse, explorar y luego categorizar en pasable o impasable las aberturas creadas entre dos paredes - panel alineados y no alineados. Los paneles fueron separados por aberturas tan pequeñas como 0,05 m y tan grandes como 1.05 m. Se evaluó el rendimiento para: diferentes posiciones de los paneles (fijas y variables), diferentes ángulos de aproximación a la apertura (ortogonales y oblicuos) y diferentes distancias y orientaciones de los paneles. Los participantes evidenciaron una inmediata habilidad para usar la información contenida en los ecos estructurados generados por el sonar, aunque la posición y el ángulo de aproximación afectaron el rendimiento de los mismos. Los datos confirmaron la inmediata utilidad de la información ecoica y resaltaron el rol fundamental del movimiento activo (exploración) en el aprendizaje perceptual. Además, realizaron análisis espectrográficos para identificar la información acústica potencial contenida en las señales utilizadas.

### 1.3 Linterna Sónica (LS)

La LS (figura 1) es una herramienta de investigación diseñada en el CINTRA para realizar pruebas de ecolocación con personas con y sin visión normal sin previo entrenamiento en esta habilidad. El dispositivo emite un ruido blanco filtrado de forma semidireccional, que permite al usuario percibir, a través de sus reflexiones en el ambiente, la presencia de objetos. Los sonidos que puede emitir comprenden un espectro de banda angosta filtrado entre 400 Hz y 10 kHz. La LS se conforma por un parlante para frecuencias altas (tipo tweeter) de 1 pulg., posicionado en el extremo de un tubo plástico de 20 cm acondicionado acústicamente. Este dispositivo se conecta a una caja de control portátil que permite la grabación y emisión de señales sonoras. La linterna se monta sobre una vincha plástica regulable. El usuario, además, tiene al alcance de la mano un control para encender y apagar el dispositivo y controlar la intensidad de la señal.

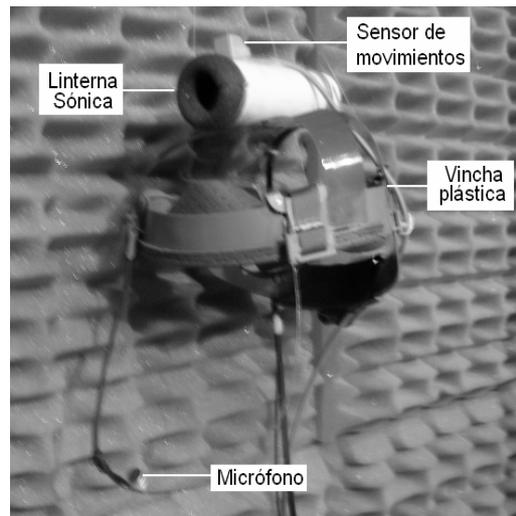


Figura 1: Linterna Sónica. En la imagen se observa la LS montada sobre una vincha plástica regulable. En la parte superior tiene acoplado un sensor de movimientos comercial (Patriot de Phollemus) para registrar los movimientos que hace la persona durante la prueba de ecolocación. En la parte inferior se fijó un pequeño micrófono tipo electret para grabar las señales de ecolocación que emita el participante con la LS o su propia boca durante la prueba.

El diseño se realizó en función de requerimientos sugeridos en pruebas pilotos realizadas con diferentes sonidos e instrumentos para determinar qué características técnicas eran las más efectivas para obtener una señal de ecolocación adecuada para las pruebas comportamentales. En base a estas pruebas se dispuso que el dispositivo debía emitir una señal: de manera constante; simular al siseo que puede realizar una persona con su boca; desde una cavidad que genere una sensación similar a la que produce la cavidad bucal.

Durante el diseño se examinó si la disposición del tubo y su acondicionamiento acústico mejoraban efectivamente el desempeño del altavoz en términos de directividad. Se realizó una rápida validación con una señal de ruido blanco y realizando mediciones con el altavoz ubicado dentro del tubo acondicionado y fuera de él. Se evaluó la amplitud relativa de la señal en 6 posiciones [0; 15; 30; 45; 60 y 75] ° y en 7 frecuencias [3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10 y 12,5] kHz. Los resultados de esta comparación revelan que la señal emitida con la LS tiene una mejor directividad para las frecuencias de [3,15; 4; 5; 6,3; 10 y 12,5] kHz respecto de la señal emitida por el altavoz desprovisto del tubo (con mejoras de hasta el 13,8% en la proporción emisión a 45°/emisión frontal). Esto refuerza los resultados de las pruebas piloto en cuanto a las sensaciones subjetivas generadas por el diseño utilizado. Sólo para la frecuencia de 8 kHz se observa una señal levemente más direccional sin el tubo (3,1 % de mejoría en la proporción emisión a 45°/emisión frontal); aunque en la medición de esa frecuencia para ángulos de 60° y 75° el desempeño se equipara.

A partir de este diseño, se procedió a validar de manera objetiva y subjetiva el funcionamiento de la LS. Por una parte, se realizó un estudio detallado de la directividad de la emisión sonora a distintas frecuencias y se verificaron las reflexiones producidas por un objeto experimental ante la incidencia de la señal de la LS. Se examinó el efecto peine producido por la reflexión en disposiciones estáticas y con grabaciones binaurales. También se analizaron espectrogramas del mismo efecto en situaciones dinámicas, i.e., variando el ángulo de incidencia en elevación (plano vertical) y de azimut (plano horizontal) de la LS. Por otra parte, se realizó una prueba psicofísica de detección de objetos para determinar la eficacia

con que las personas pueden utilizar el dispositivo para percibir objetos. También se analizó si existe una modalidad de uso más conveniente que otra.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Medición de la directividad de la emisión sonora.

Se midió la directividad de la emisión sonora del dispositivo. De acuerdo a los requerimientos de las pruebas se midió en azimut  $180^\circ$  frontales en saltos de  $10^\circ$  y en elevación  $+35^\circ -30^\circ$  en saltos de  $5^\circ$ . Se utilizó una cabeza y torso artificial (cabeza y torso artificial normalizados Brüel & Kjær, 4128), un medidor de nivel sonoro (Brüel & Kjær 2250) y el sensor de movimientos (Patriot de Polhemus). La señal utilizada fue ruido blanco filtrado en 10 kHz.

#### 2.1.1 Procedimiento

Las pruebas se llevaron a cabo en la sala silente del CINTRA, se utilizó la vicha plástica que llevaba fija en la parte superior la LS y el sensor de movimientos, se montó la vincha sobre la cabeza y torso artificial y se posicionó la LS justo al frente, a  $0^\circ$  en azimut y  $0^\circ$  en elevación, del medidor de nivel sonoro (fijo en un trípode). Las posiciones se generaban girando la cabeza artificial y verificando el correcto ángulo con el sensor de movimientos. Se procedió a grabar la emisión sonora que generaba la LS encendida durante 20 s por cada posición.

#### 2.1.2 Resultados

Se analizaron las grabaciones evaluando el nivel total mínimo recibido para todo el espectro y en particular para las siguientes frecuencias: [4; 5; 6,3; 8; 10 y 12,5] kHz. Con estos datos y su interpolación se realizaron diagramas polares de las mediciones en el plano azimutal (Figuras 2 y 3) y en elevación (Figuras 4 y 5).

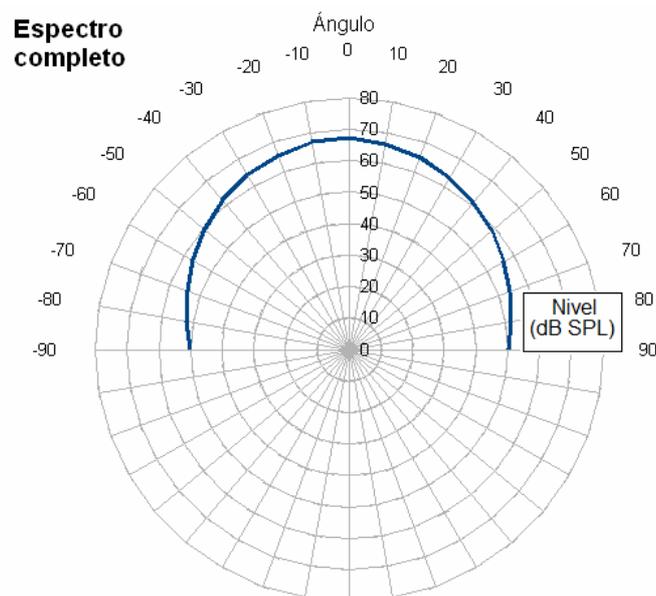


Figura 2: Diagrama polar de la amplitud de la señal en el espectro completo de frecuencias en el plano azimutal.

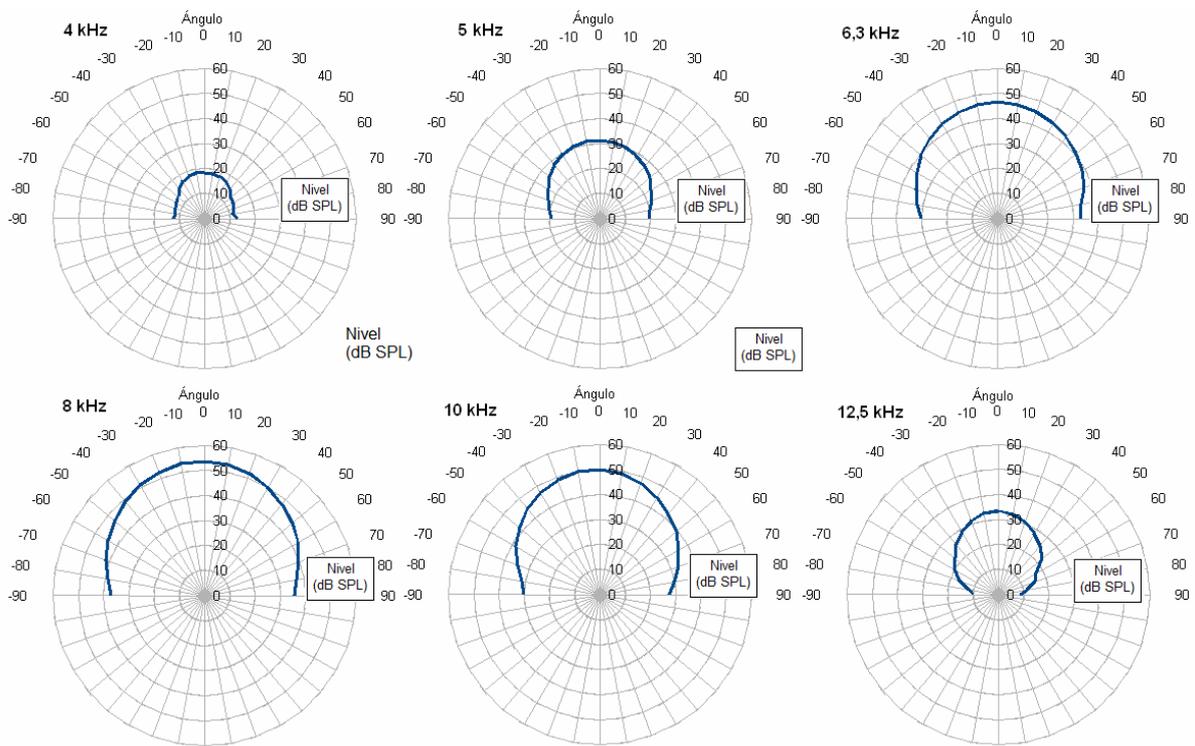


Figura 3: Diagramas polares de la amplitud de la señal en [4; 5; 6,3; 8; 10 y 12,5] kHz en el plano azimutal

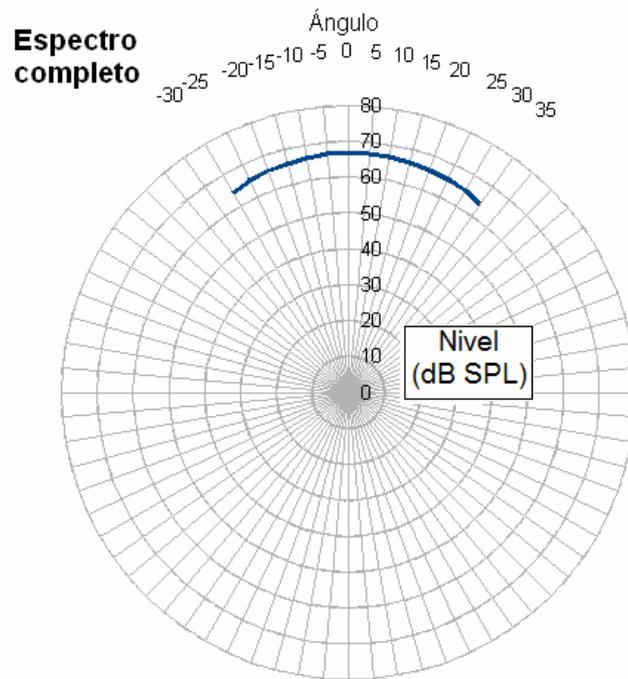


Figura 4: Diagrama polar de la amplitud de la señal en el espectro completo de frecuencias en elevación.

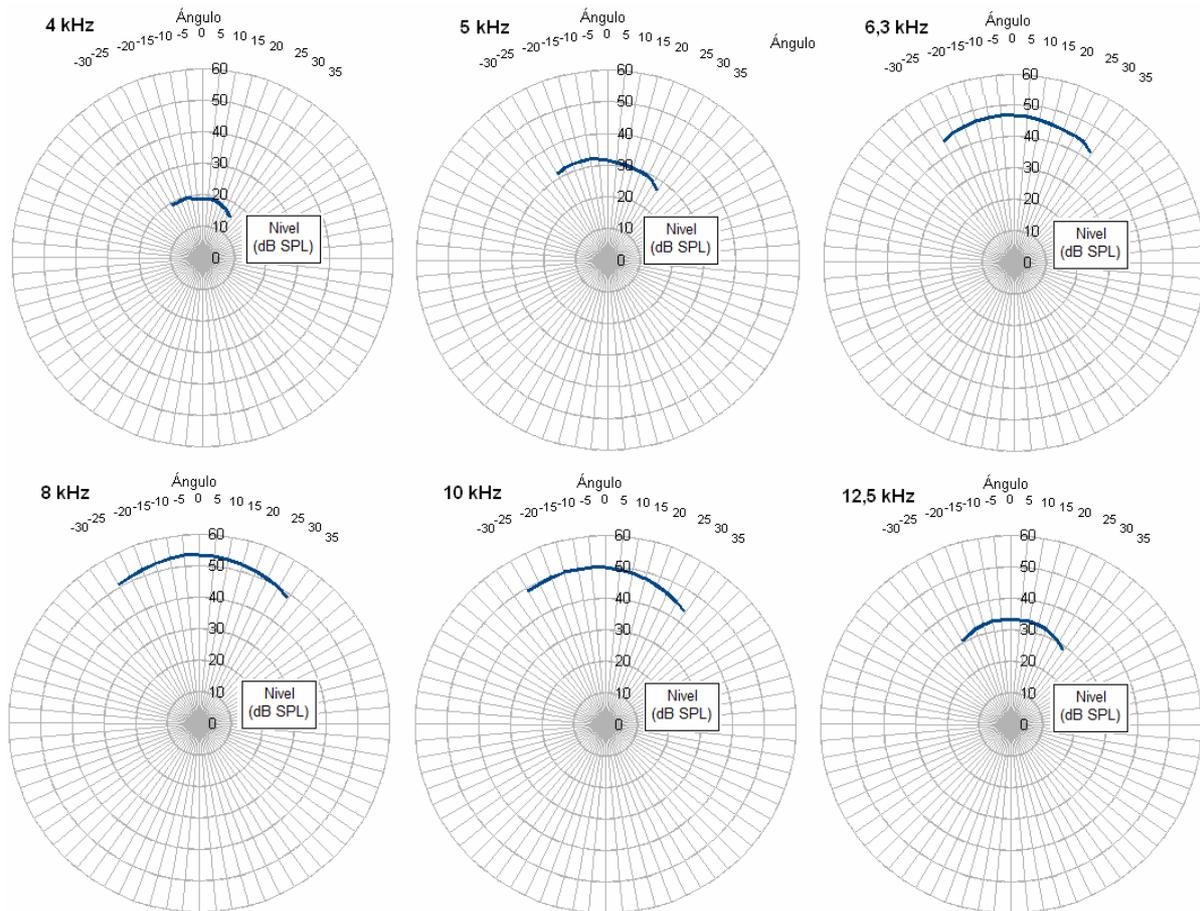


Figura 5: Diagramas polares de la amplitud de la señal en [4; 5; 6,3; 8; 10 y 12,5] kHz en elevación.

En azimut, los lóbulos de radiación fueron simétricos respecto a  $0^\circ$ . En el gráfico que representa los niveles del espectro completo, se observa una atenuación de 17,2 dB en las posiciones laterales ( $\pm 90^\circ$ ) con respecto al frente ( $0^\circ$ ). Esto es una reducción del 86,2% de la energía que llega a los laterales respecto del frente de la LS. El mismo efecto, pero más pronunciado, se observa en los gráficos donde se ponderan las frecuencias [8; 10 y 12,5] kHz. Para 8 kHz la atenuación es de 18,3 dB, para 10 kHz de 22,7 dB y para 12,5 kHz de 25,2 dB. En cambio, en las frecuencias más bajas la atenuación corresponde a 16,3; 12,2 y 6,1 dB en función de las frecuencias [6,3; 5; 4] kHz respectivamente.

En elevación, el lóbulo de radiación que pondera el espectro completo se presenta simétrico con una atenuación comparable a la observada en azimut, de 2,5 y 4 dB para  $30^\circ$  y  $35^\circ$ . De todas maneras, los lóbulos de radiación ponderados por frecuencias muestran más asimetrías. Para 4 y 5 kHz los lóbulos presentan un máximo que no se expresa a  $0^\circ$  sino a  $-15^\circ$ , por lo que la atenuación es mayor en los ángulos positivos, hacia arriba. Para 6,3 kHz el máximo se presenta a  $-5^\circ$ . Para 8 y 12,5 kHz el máximo está a  $0^\circ$ , sin embargo para 10 kHz el máximo se presenta en una franja angular que va desde  $0^\circ$  a  $-20^\circ$ . Estas irregularidades posiblemente se deban a los diferentes coeficientes de absorción de los materiales que componen el techo y suelo de la sala.

En líneas generales, en el plano azimutal se observa un efecto de atenuación considerable en las posiciones laterales de los lóbulos de las frecuencias más altas, lo cual estaría sugiriendo cierto comportamiento direccional de la señal de la LS en estas frecuencias. En tanto que en elevación el efecto es más confuso debido probablemente a las condiciones en

que se realizaron las mediciones. Además se observó que la respuesta en frecuencia del altavoz utilizado no era plana en las frecuencias de trabajo.

## 2.2 Medición de las reflexiones de la señal

Una forma para verificar si verdaderamente existe una reflexión útil de la señal de la LS es observar la presencia del efecto peine (o filtro peine) y sus características en el espectro de la señal que llega al oído del sujeto bajo prueba. Se sabe que la adición acústica de dos señales similares (directa y reflejada en este caso) pero separadas ligeramente en tiempo produce una señal combinada que exhibe evidentes efectos de cancelación y refuerzo en bandas de frecuencia regulares y predecibles. Este resultado mostrado en la pantalla de un analizador de espectro resulta en un arreglo de picos y valles que tiene la apariencia de un peine, de ahí su nombre.

Se realizaron dos pruebas para estudiar este efecto: una realizando grabaciones de audio binaurales con una cabeza y torso artificial (Brüel & Kjaer 4128); y otra con grabaciones monoaurales, con un participante realizando un rastreo para encontrar un objeto reflectante.

### 2.2.1 Prueba con cabeza y torso artificial.

En esta prueba se montó la LS a la cabeza artificial y se la enfrentó a una placa de vidrio (objeto experimental en las pruebas comportamentales) para analizar sus reflexiones. Se utilizaron los micrófonos incorporados en los oídos de la cabeza artificial y una señal de ruido blanco con ancho de banda desde 440 hasta 5000 Hz en la LS. La señal se reprodujo de dos modos diferentes: continuo y por ráfagas (para imitar el siseo que realiza una persona al ecolocar). Se verificaron las reflexiones que produce el blanco cuando la señal de la LS incide sobre él de forma perpendicular y con un corrimiento de  $+15^\circ$  y  $-15^\circ$ .

#### 2.2.1.1 Procedimiento

Las pruebas se llevaron a cabo en la sala silente del CINTRA, se montó la vincha que sujeta solidariamente la LS en la parte superior con el sensor de movimientos sobre la cabeza artificial. En frente, de forma perpendicular, se posicionó el blanco de vidrio circular de 0,22 m de radio a una distancia de 0,60 m. Las posiciones requeridas para las mediciones se generaron girando la cabeza artificial y verificando el correcto ángulo con el sensor de movimientos. Se procedió a grabar la emisión sonora que generaba la LS encendida mediante los micrófonos de la cabeza artificial, durante 20 s. por cada posición y para cada señal. En cada posición se grabó, además, la acción de la LS sin la presencia del objeto reflectante. Luego se generaron gráficas espectrales mediante software para procesamiento de audio y se analizaron cada una de las condiciones.

#### 2.2.1.2 Análisis

En primera instancia se compararon las grabaciones con y sin blanco reflectante. El efecto peine se verifica claramente en los espectros de las grabaciones realizadas con incidencia perpendicular. Se observa cómo la presencia de 2 señales (directa y reflejada) interfiriendo entre sí conforman máximos y mínimos espaciados regularmente en frecuencia (Figura 6).

Se puede verificar que el peine se debe a la reflexión producida en la placa de vidrio analizando la distancia en Hertz entre 2 mínimos o máximos contiguos:

$$\Delta d = c / f_p. \quad (1)$$

donde  $\Delta d$  es la diferencia entre las trayectorias directa y reflejada,  $c$  es la velocidad del sonido

y  $f_p$  es la frecuencia del peine (distancia entre máximos o mínimos contiguos).



Figura 6: Espectros de frecuencias de la grabación binaural. A la izquierda se observa un diagrama de la emisión de la señal sin y con blanco reflectante al frente (en la parte superior e inferior respectivamente). A la derecha están las gráficas espectrales correspondientes a estas situaciones.

Tomando la velocidad del sonido en el aire para 20 °C ( $c = 343$  m/s), obteniendo  $f_p$  de la gráfica espectral ( $f_p = 376$  Hz.) y reemplazando en (1) se tiene que:

$$\Delta d = 343 [m/s] / 376 [1/s] = 0,91 m \quad (2)$$

Según estos cálculos la diferencia entre las trayectorias es de 0,91 m. Realizando las mediciones pertinentes se determina que el recorrido de la señal directa, la distancia entre la LS y el oído del simulador de torso y cabeza, es de 0,20 m. Mientras que, la distancia recorrida por la señal reflejada, que corresponde al trayecto linterna-blanco más el trayecto blanco-oído, es de 1,10 m considerada desde el extremo frontal de la linterna (levemente sobresaliente a la frente del simulador) y despreciando el pequeño ángulo formado entre los 2 trayectos que la componen. Teniendo en cuenta estos datos la diferencia entre las trayectorias es de 0,90 m, resultado muy similar al obtenido desde la gráfica espectral (0,91m).

Cuando la linterna apunta a  $\pm 15^\circ$  (Figura 7) fuera del centro del blanco también se mantiene el efecto peine a pesar que el nivel de la señal disminuye. Se observa además que la posición de los nodos y antinodos y la intensidad de un oído son diferentes a los del otro. Esto es debido a que la señal reflejada toma caminos diferentes para llegar a cada uno de ellos. Para el caso de  $+15^\circ$  (tomando positivo el sentido del reloj) el oído izquierdo ofrece una trayectoria menor a la señal reflejada que el oído derecho. La disminución de la intensidad se debe a que la cabeza se interpone en el recorrido de la señal reflejada hacia el oído derecho produciendo atenuación sonora. Inspeccionando la gráfica se obtiene que para el oído izquierdo  $f_p$  es 384 Hz. y para el derecho de 368 Hz. Las  $\Delta d$  correspondientes son 0,893 m y 0,932 m respectivamente. En las mediciones realizadas es interesante notar la verificación de los siguientes cálculos. En relación a la distancia, si se considera la distancia entre los oídos de la cabeza artificial (0,19 m), un giro de  $15^\circ$  acerca el oído izquierdo y aleja el derecho aproximadamente 0,02 m del blanco. Esta variación de distancias recorridas se corresponde con las diferencias calculadas a partir del espectro.



Figura 7: Espectro de frecuencias con el blanco reflectante enfrentado a 15° (abajo). A la izquierda se observa un diagrama de la emisión de la señal a 15 ° del centro del blanco reflectante y a la derecha la gráfica espectral de esta situación.

Por otro lado, se sabe que la ecuación que revela la posición de cada uno de los mínimos es:

$$f_{min} = n \cdot f_p/2 \quad (n = 1, 3, 5, 7\dots) \quad (3)$$

Al tomar arbitrariamente un mínimo del oído izquierdo, por ejemplo el que se halla en 3854 Hz, se observa que se corresponde a

$$n = 3854 \text{ Hz} / (368 \text{ Hz}/2) \approx 21. \quad (4)$$

Se espera que para el oído derecho el mínimo correspondiente a  $n = 21$  se encuentre en:

$$21 \cdot (394 \text{ Hz}/2) = 4032 \text{ Hz}. \quad (5)$$

En efecto se observa en el espectro un mínimo a 4026 Hz.

Todos los efectos se observaron independientemente de la señal utilizada, ruido blanco continuo o por ráfagas.

## 2.2.2 Prueba con sujeto experimental.

En este ensayo se situó a un participante portando la LS sentado frente a un objeto reflectante. Con movimientos de cabeza el sujeto rastreó su campo frontal en búsqueda del blanco. La señal emitida fue ruido blanco filtrado entre 440 y 5000 Hz y la emisión sonora es continua. El audio de la prueba fue grabado con un micrófono montado solidariamente con la vincha y los movimientos utilizados para encontrar el objeto se grabaron utilizando el sensor instalado en la LS. El objetivo de esta medición fue examinar el comportamiento de la LS en una situación dinámica.

### 2.2.2.1 Procedimiento

La prueba también se llevó a cabo en la sala silente del CINTRA, pero en este caso la grabación se realizó mediante un micrófono que se suspende justo al frente del mentón del sujeto y la sala permaneció a oscuras. La persona estuvo sentada en una silla y frente a ella se colocó una cortina oscura. La función de esta cortina es ocultar la posición de un blanco de vidrio cuadrado de 0,40 m de lado que se coloca detrás y a 0,80 m del sujeto. La tela de la cortina no influye en la medición ya que es acústicamente transparente para las frecuencias de trabajo de la LS. En el ensayo analizado el objeto experimental estuvo posicionado a la izquierda del participante, a 45° a 1,20 m del piso.

Una vez que el sujeto enciende la LS, comienza a mover su cabeza libremente para encontrar el blanco. Todos los movimientos del sujeto y los sonidos presentes durante el

ensayo se grabaron de manera sincronizada en una computadora. Estos datos se procesaron para generar espectrogramas sincronizados con gráficas de los movimientos realizados por el sujeto.

### 2.2.2.2 Análisis

Al examinar el ensayo se puede comprobar la correspondencia entre los movimientos del sujeto y los peines exhibidos. La figura 8 muestra las gráficas del espectrograma de la señal en correspondencia con los movimientos en azimuth (rojo) y elevación (verde) del participante en el ensayo. Las líneas punteadas horizontales muestran la posición del blanco durante la prueba.

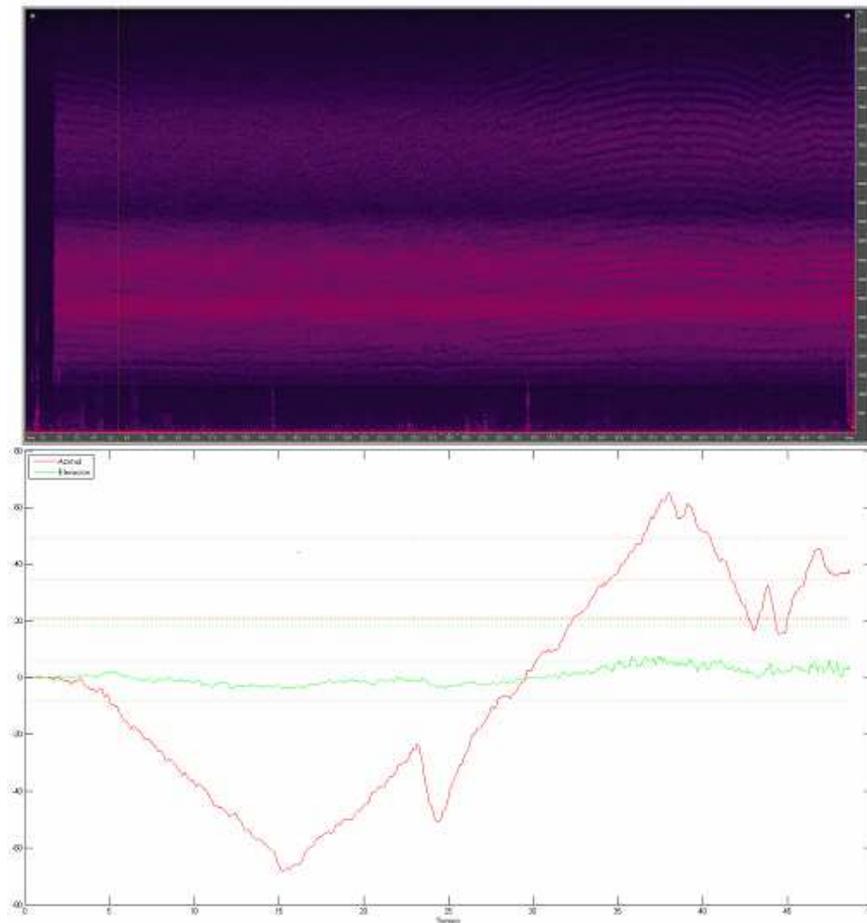


Figura 8: Gráficos de espectrograma y movimientos de cabeza en ensayo de localización del blanco a  $45^\circ$  con la LS.

Se observa en el gráfico de movimientos que la persona no realizó grandes movimientos en elevación, puesto que dicho ángulo se mantiene aproximadamente constante durante toda la prueba. El análisis entonces recae sobre los movimientos en el plano azimutal. En una primera inspección se observa claramente cómo el efecto peine aparece cuando el ángulo de la linterna se acerca a la posición del blanco. Se distingue un ángulo crítico donde el efecto peine comienza a manifestarse, esto es, cuando la LS apunta aproximadamente a  $\pm 45^\circ$  del centro del blanco. Lo cual se relaciona directamente con el patrón de directividad de la LS observado

anteriormente, se espera que a una incidencia con inclinación superior, la porción de la señal que alcanza el blanco sea lo suficientemente débil para no presentar reflexiones significativas.

Otro aspecto interesante es el carácter “creciente” del efecto peine cuando el participante se acerca al ángulo del blanco. Los mínimos y máximos observados se van corriendo hacia arriba en frecuencia a la vez que se alejan entre sí mientras el sujeto se va acercando al centro del blanco. Esto coincide con los hallazgos de Basset y Esatmond (1964) que explican cómo la distancia espectral entre las líneas del peine crece a medida que la distancia a un objeto reflectante disminuye.

Considerando la diferencia entre las trayectorias recorridas por la señal directa y la reflejada se obtiene que la primera es constante en toda la prueba ya que el micrófono y la LS están sujetas solidariamente a la misma vincha. La segunda (LS-blanco-micrófono) decreciente mientras el ángulo de la LS se acerca al centro del blanco. Esta disminución en la distancia se ve reflejada en un peine con máximos y mínimos más distantes entre sí. Este ensanchamiento del peine produce el corrimiento en frecuencia para mínimos y máximos con un mismo  $n$  produciendo el efecto “creciente”.

## 2.3 Análisis subjetivo

Se realizó una prueba de detección objetos para determinar usabilidad de la LS y conocer si existe una modalidad de uso más conveniente que otra. Se evaluaron 4 personas con visión y audición normal (de entre 18 y 29 años, 3 mujeres y un hombre) equipadas con la LS en la cámara silente del CINTRA. Los participantes, con la visión ocluida y de acuerdo a un modo específico de uso de la LS, exploraban el ambiente para determinar la presencia / ausencia de un objeto al frente de ellos.

Como objeto experimental se utilizó una placa cuadrado de vidrio de 0,40 m de lado. El soporte del blanco se compone de un mástil de madera de 1.6 m de altura, cubierto con material fonoabsorbente, adherido en uno de los extremos a una base adecuada. En el otro extremo, un brazo sostiene el objeto y puede ser fijado al mástil a diferentes alturas. Los participantes tenían en su cabeza la vincha plástica regulable que sostiene a la LS.

### 2.3.1 Procedimiento

El participante permaneció sentado en una sala silente equipado con la LS sobre su cabeza y con la visión ocluida. Frente a él, el experimentador colocó o no el objeto experimental a la altura del rostro en una de las 2 posiciones fijas de antemano (a 80 cm o a 160 cm). Su tarea consistió en encender la LS y explorar el ambiente de acuerdo a la modalidad específica que se le indicó (moviendo libremente la cabeza -“M”-, prendiendo y apagando repetidamente la LS -“P/A”- o sin mover ni apagar la LS - “Sin M – P/A”), para determinar si el objeto está presente. En cada ensayo se registró la respuesta del participante: “Sí, hay un objeto delante” - “No, no hay un objeto delante”.

Antes de comenzar los ensayos, se realizó una breve familiarización con el dispositivo donde el participante percibía la presencia de un objeto similar al experimental en distancias muy cercanas ( $> 0,50$  m). Los ensayos se presentaron en orden aleatorio de acuerdo a un protocolo definido de antemano diferente para cada participante. Durante la prueba el participante no recibió retroalimentación de sus respuestas. Entre los ensayos el participante se colocaba unos auriculares que emitían música para evitar escuchar las pistas sonoras producidas por la manipulación del objeto experimental. La administración de cada prueba duró aproximadamente 90 minutos. Durante la prueba se realizó una pausa para evitar la fatiga del participante.

Las variables bajo estudio fueron: Presencia del objeto sonoro (presencia vs. ausencia); Distancia (cerca, a 80 cm vs. Lejos, a 160 cm); Modalidad de uso de la linterna (movimiento de cabeza vs. prendido y apagado de LS vs. sin movimiento prendido y apagado la linterna sólo una vez). Los parámetros medidos fueron: Cantidad de aciertos, rechazos correctos, omisiones y falsas alarmas. Diseño de la prueba: 2 (presencia del objeto sonoro) x 2 (distancia del objeto) x 3 (Modalidades de uso de la LS) x 10 repeticiones = 120 ensayos. Se realizó un análisis descriptivo de las respuestas y se efectuó la inspección visual de los gráficos de los tipos de respuesta. Además se calcularon los índices de sensibilidad y de especificidad de la tarea de detección y se examinó la existencia de diferencias en las distancias y las modalidades de uso de la LS con un ANOVA de medidas repetidas.

### 2.3.2 Resultados

La cantidad de aciertos, rechazos correctos, omisiones y falsas alarmas correspondiente a todos los participantes se puede observar en la Tabla 1. Del total de los 480 ensayos que resolvieron los 4 participantes, 391 fueron respuestas correctas (199 aciertos y 192 rechazos correctos), mientras que 89 respuestas fueron incorrectas (48 falsas alarmas y 41 omisiones).

Estímulo	Respuestas	
	Sí	No
Con objeto	199	41
Sin objeto	48	192

Tabla 1: Cantidad de aciertos, rechazos correctos, omisiones y falsas alarmas de la prueba subjetiva.

En función de estos resultados es posible calcular la sensibilidad y la especificidad de la detección. La sensibilidad es la probabilidad de acierto sobre el total de veces que se presenta la señal; la especificidad es la probabilidad de realizar rechazos correctos sobre el total de veces que no se presenta la señal. Un sistema de detección perfecto es sensible (detecta la señal siempre o casi siempre que aparece) y específico (es capaz de distinguir la señal del ruido y no da una respuesta positiva cuando no está la señal). La sensibilidad se calcula de la siguiente forma:  $n^{\circ}$  de aciertos / ( $n^{\circ}$  de aciertos +  $n^{\circ}$  de omisiones). Por otro lado, la especificidad es:  $n^{\circ}$  de rechazos correctos / ( $n^{\circ}$  de rechazos correctos +  $n^{\circ}$  de falsas alarmas). En este caso, el índice de sensibilidad es de 0,829 y el de especificidad de 0,8. Ambos índices son cercanos a 1, la probabilidad ideal, lo cual sugiere que la detección es muy buena. Una cuestión similar se observa si se toma el promedio de las tasas de aciertos de todos los participantes está sobre el 80% de aciertos (se computan los aciertos y los rechazos correctos). Cuando se presentó el objeto experimental el 80% de las respuestas fueron correctas y cuando no se presentaba las respuestas correctas llegaron al 82,9%. Tanto con o sin objetos los participantes fueron capaces de realizar la tarea de detección con una alta proporción de aciertos.

Los resultados de los 240 ensayos donde se presentaba el objeto experimental variando su distancia se pueden observar en la Tabla N° 2. En general se observan más respuestas correctas en la condición cerca (110) que en la lejos (89), lo que sugiere que la primera era más fácil de resolver que la segunda. Esto mismo se puede observar en la Figura 9, donde se grafica el promedio de las tasas de aciertos en función de la distancia del objeto. Es interesante notar al respecto que además de la diferencia en el valor de las tasas (Cerca = 91,6%; Lejos = 74,1%), su variabilidad es diferente, lo que indica que las respuestas en la condición cerca eran más consistentes que lejos.

Estímulo	Respuestas	
	Correcta	Incorrecta
Cerca	110	10
Lejos	89	31

Tabla 2: Respuestas de la prueba subjetiva en función de la distancia al objeto.

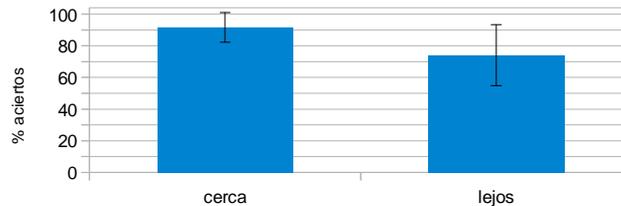


Figura 9: Porcentajes de acierto para las dos distancias probadas.

En relación a la modalidad de uso de la LS, de manera similar a la primera tabla, se pueden observar en la tabla N° 3 los resultados de acuerdo a la presencia del objeto y la respuesta del participante, con el agregado de la división por cada modalidad. En líneas generales, se mantienen las mismas tendencias en todas las modalidades, una mayor cantidad de aciertos y de rechazos correctos. Con la modalidad “movimiento” se produjeron respuestas ligeramente más precisas que con el resto, es decir, más respuestas correctas (141) y menos errores (19). Con las modalidades “P/A” (124 respuestas correctas y 36 errores) y “Sin M – P/A” (126 respuestas correctas y 34 errores).

Estímulo	Movimiento		P/A		Sin M–P/A	
	Sí	No	Sí	No	Sí	No
Con objeto	68	12	66	14	65	15
Sin objeto	7	73	22	58	19	61

Tabla 3: Aciertos, rechazos correctos, omisiones y falsas alarmas para las distintas modalidades de uso de la LS.

La figura N° 10 muestra el rendimiento de los 4 participantes en función de la modalidad de uso de la LS. Se puede observar que todos respondieron sobre el nivel de azar; que los participantes 2 y 3 tuvieron un mejor rendimiento, esto es, fueron más precisos y sus respuestas fueron menos variables; que en todos los participantes la modalidad movimiento resultó la más efectiva, con la excepción del participante 3 que obtuvo mejores resultados con la modalidad sin M /P-A. Es interesante mencionar que durante y luego de la prueba todos los participantes mencionaron tener incertidumbre sobre sus respuestas, es decir, ninguno de ellos tenía seguridad sobre su rendimiento, especialmente cuando el objeto estaba lejos. En este sentido, la mayoría de los participantes comentó que muchas veces se arriesgaban en responder sin estar seguros.

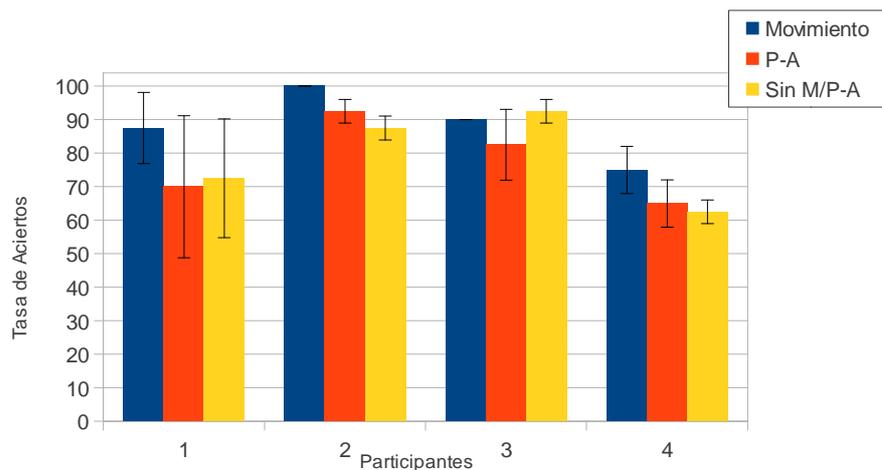


Figura 10: Aciertos por modalidad de uso en cada participante.

### 3 CONCLUSIONES

En función de lo trabajado, se pudo determinar que la LS es una herramienta útil para realizar pruebas de ecolocación con personas ciegas y con visión normal sin entrenamiento previo en esta habilidad. Tanto las pruebas objetivas como la subjetiva revelaron índices que apoyan su adecuado funcionamiento.

En relación a la evaluación de la directividad de la señal de la LS, se asume que su funcionamiento es apropiado. Si bien el plano azimutal el espectro completo de frecuencias muestra un comportamiento levemente omnidireccional, un análisis banda a banda indica que las frecuencias superiores a 4 kHz presentan mejores condiciones de directividad. En cambio, y en elevación se manifiesta un efecto más confuso debido probablemente a las condiciones de la sala donde se realizaron las mediciones. En este sentido, sería conveniente ampliar el rango de mediciones a ángulos superiores e inferiores para conocer mejor el comportamiento de la LS y verificar que no haya reflexiones en el suelo y/o techo que puedan interferir la medición. En tanto que, para el diseño de pruebas comportamentales, se debe considerar el desigual rendimiento de la linterna para movimientos horizontales y verticales.

Con respecto al estudio de las reflexiones de la señal de la LS: se verificó la presencia de reflexiones a través del análisis de filtros peines. Se verificó que las reflexiones (efectos peines) encontradas en la gráfica se deben a la interacción entre la señal emitida por la LS y los objetos experimentales dispuestos. Además, se explicó la presencia de efectos peines en las gráficas espectrales, en función del cálculo matemático de las ecuaciones del filtro y las mediciones realizadas.

A partir de la prueba de detección de objetos se determinó que el uso de la LS para detectar objetos resulta muy efectivo. Las respuestas de los participantes fue sensible y específica, esto es, discriminaba aceptablemente la presencia / ausencia del objeto. A pesar de la falta de significación estadística, se encontraron fuertes tendencias que estarían señalando, por un lado, que los objetos posicionados en regiones cercanas son más fáciles de detectar que en las regiones lejanas; por otro lado, que realizar movimientos exploratorios con la cabeza ofrece mejor información sobre la presencia del objeto. Más allá del buen rendimiento generalizado, la tarea no resulta igual de fácil en todas las condiciones y para todos los participantes. El nivel de precisión de las respuestas dependió de las condiciones experimentales y los sujetos. Incluso, en algunos casos se observó una gran variabilidad en las respuestas de un mismo participante en una misma condición experimental.

En síntesis, el trabajo realizado permite concluir que la LS es un dispositivo útil para llevar a cabo pruebas comportamentales de ecolocación. Se detectaron propiedades acústicas adecuadas para aplicar en experimentos de ecolocación. Asimismo, personas con audición normal y sin un entrenamiento especial son capaces de utilizar este dispositivo de una manera efectiva. De todos modos, para futuros estudios que utilicen la LS es aconsejable prestar especial atención a la disposición de las condiciones experimentales, puesto que el rendimiento de los participantes puede ser sensible a estas manipulaciones.

#### 4 FINANCIAMIENTO

Este trabajo ha sido financiado a través de los PID UNC N° 05/P130 y PID UTN N° 1711

#### 5 REFERENCIAS

- Arias, C., Ramos, O.A., Ortiz Skarp, A.H. & Hüg, M. (1999). ¿Visión facial o audición facial? [Facial vision or facial audition?]. Memorias del XXVII Congreso Interamericano de Psicología. Caracas, Venezuela.
- Bassett, I.G; Eastmond, E.J. (1964). Echolocation: measurement of pitch versus distance for sounds reflected from a flat surface. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 36, 5, 911-916.
- Clarke, N. V., Pick, G. F. & Wilson, J. P. (1975). Obstacle detection with and without the aid of a directional noise generator. *American Foundation for the Blind. Research Bulletin*, 29, 67-85.
- Hughes, B. (2001). Active artificial echolocation and the nonvisual perception aperture passability. *Human Movement Science*, 20 (4-5), 371-400.
- Kish, D. (2009). Flash sonar program: Helping blind people learn to see. Recuperado el 10 de octubre de 2007, de <http://www.worldaccessfortheblind.org>
- Kish, D. & Bleier, H. (2000). Echolocation: What it is, and how it can be taught and learned. California Association of Orientation and Mobility Specialists, River side, CA.
- Romains, J. (1924). Eyeless sight. A study of extra-retinal vision and the paroptic sense. New York and London: The Knickerbocker Press.
- Stoffregen, T.A. & Pittenger, J.B. (1995). Human echolocation as a basic form of perception and action. *Ecological Psychology*, 7(3), 181-216.
- Teng, S. & Whitney, D. (2011) The acuity of echolocation: spatial resolution in sighted persons compared to the performance of an expert who is blind. *Journal of Visual Impairment and Blindness* 105(1):20–32
- Teng, S., Puri, A. & Whitney, D. (2011) Ultrafine spatial acuity of blind expert human echolocators. *Experimental Brain Research*, (4):483-8
- Thaler, L., Arnott, SR. & Goodale, MA. (2011) Neural correlates of natural human echolocation in early and late blind echolocation experts. *PLoS ONE* 6(5):e20162