



**RIDAA**  
Repositorio Institucional  
Digital de Acceso Abierto de la  
Universidad Nacional de Quilmes



Universidad  
Nacional  
de Quilmes

Abregú, Ezequiel Lucas

# Percepción de distancia aplicada a la composición sonora



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Argentina.  
Atribución - 2.5  
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/ar/>

Documento descargado de RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes de la Universidad Nacional de Quilmes

*Cita recomendada:*

Abregú, E. L. (2018). *Percepción de distancia aplicada a la composición sonora. (Tesis de doctorado)*. Bernal, Argentina: Universidad Nacional de Quilmes. Disponible en RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/837>

Puede encontrar éste y otros documentos en: <https://ridaa.unq.edu.ar>

## Percepción de Distancia Aplicada a la Composición Sonora

TESIS DOCTORAL

**Ezequiel Abregú**

[ezequielabregu@gmail.com](mailto:ezequielabregu@gmail.com)

### Resumen

El objetivo general de este trabajo hace foco en realizar una investigación con una doble perspectiva: abordar el estudio de la distancia tanto en el ámbito científico como el musical y, por consiguiente, que los resultados obtenidos en la etapa de la investigación posean un valor artístico aplicable.

Para realizar esto, se propone: revisar los estudios realizados en el ámbito científico sobre la naturaleza, características y percepción de las pistas auditivas y visuales de distancia; estudiar cuáles son los límites y aspectos psicofísicos que determinan la percepción de distancia en la modalidad visual y auditiva; realizar una revisión general del estudio del espacio sonoro, tanto en el ámbito musical (acústico y electroacústico) como en el científico; plantear si la distancia auditiva puede ser utilizado en la composición e interpretación musical con la categoría y relevancia de elemento portador de forma; mostrar los resultados de una serie de experimentos para entender los indicios involucrados en la percepción visual y auditiva de distancia en entornos reverberantes (además de la interacción crossmodal); presentar una serie de piezas que tienen como eje central el uso de la distancia como parámetro portador de forma del discurso y el espacio sonoro; realizar un estudio comparativo sobre la base de una serie de entrevistas realizadas profesionales de distintos ámbitos (mezcla, mastering, interpretación, composición, producción).

Se revisará cuáles son las pistas involucradas en la percepción del espacio sonoro. Además. Se abordará, desde un punto de vista psicofísico, el sistema auditivo como procesador espacial para luego realizar una revisión exhaustiva de los indicios involucrados en la percepción auditiva en el eje horizontal (acimut), elevación y distancia.

Director: Dr. Ramiro Oscar Vergara

Co-Director: Oscar Edelstein

---

## Agradecimientos

---

Infinita gratitud hacia todas las entidades, instituciones, personas y experiencias que de alguna forma u otra contribuyeron a realizar esta tesis.

∞ Ramiro Vergara Oscar Edelstein Esteban Calcagno Pablo Etchemendy Manuel Eguía Pablo Riera Martín Matus Damián Anache Alejo Alberti Natalia Pastrovicchio Clarita Aníbal Tito Mary Nilda Vecchiatti Federico Iasi Escuela Universitaria de Artes Universidad Nacional de Quilmes CONICET Hernán Kerlleñevich Carla Colombini Martín Proscia Diego Mascaró Edgardo Palota Escuela Universitaria Universidad Nacional de Quilmes Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora Laboratorio de Acústica y Luminotecnia Programa de Investigación "Teatro Acústico" Pablo Di Liscia Marco Bailo Andrés Mayo Osvaldo Suárez Patricia Martínez Julio Viera Luis Arias Daniel Ovie Gustavo Basso Gautama Gise Cacho Isabel Fede Gonzi Ursi Lulu Paco Eneas Lucy ∞

Este trabajo fue financiado gracias a la beca de Doctorado otorgada por el CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), 2011-2016.

## Índice General

|  |    |
|--|----|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....   | 6  |
| 1.1. El espacio sonoro en la música.....   | 6  |
| 1.2. Desarrollos y objetivos.....  | 12 |
| 1.3. Referencias bibliográficas.....   | 13 |
| <b>2. EL SISTEMA AUDITIVO COMO PROCESADOR ESPACIAL</b> .....   | 14 |
| 2.1. Introducción.....   | 14 |
| 2.2. Ubicación espacial de sonidos en el eje horizontal.....   | 11 |
| 2.3. Localización vertical de fuentes sonoras.....   | 20 |
| 2.4. Información provista por la pinna.....  | 21 |
| 2.5. Información provista por el torso.....  | 22 |
| 2.6. Referencias bibliográficas.....   | 23 |
| <b>3. REVISIÓN DE LOS ASPECTOS MÁS RELEVANTES EN EL ESTUDIO DE LA PERCEPCIÓN AUDITIVA DE DISTANCIA</b> ..... | 26 |
| 3.1. Resumen.....  | 21 |
| 3.2. Introducción.....   | 21 |
| 3.3. Indicios de Percepción Auditiva de Distancia.....   | 22 |
| 3.4. Intensidad.....   | 23 |
| 3.5. Espectro.....   | 30 |
| 3.6. Familiaridad con el estímulo auditivo.....  | 31 |
| 3.7. Indicios acústicos binaurales.....  | 32 |
| 3.8. Reverberación.....  | 33 |
| 3.9. Pistas dinámicas.....   | 29 |
| 3.10. Representación interna de la distancia a una fuente sonora.....  | 30 |
| 3.11. Visión.....  | 30 |
| 3.12. Conclusiones.....  | 32 |
| 3.13. Referencias bibliográficas.....  | 33 |
| <b>4. LA DISTANCIA COMO DIMENSIÓN ESTRUCTURAL EN LA MÚSICA</b> .....   | 43 |
| 4.1. Introducción.....   | 43 |
| 4.2. Música y distancia.....   | 43 |
| 4.3. La percepción de distancia en la música electroacústica.....  | 43 |
| 4.4. Distancia en el espacio real e imaginario.....  | 50 |
| 4.5. Conclusiones.....   | 53 |
| 4.6. Referencias bibliográficas.....   | 54 |
| <b>5. PERCEPCIÓN VISUAL DE DISTANCIA</b> .....   | 51 |
| 5.1. Introducción.....   | 51 |
| 5.2. Pistas pictoriales.....   | 52 |
| 5.3. Pistas no pictoriales.....  | 53 |
| 5.4. Influencia del contexto.....  | 53 |
| 5.5. Métodos de medición y performance de la PVD.....  | 54 |
| 5.6. Referencias bibliográficas.....   | 60 |
| <b>6. EL PROCESO MULTISENSORIAL</b> .....  | 62 |
| 6.1. Introducción.....   | 62 |
| 6.2. La percepción multisensorial.....   | 62 |
| 6.3. El proceso multisensorial.....  | 63 |
| 6.4. El sonido altera aspectos temporales de la visión.....  | 65 |
| 6.5. El sonido altera otros aspectos de la visión.....   | 60 |
| 6.6. Modulación crossmodal del aprendizaje y la adaptación.....  | 61 |
| 6.7. Referencias bibliográficas.....   | 61 |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>7.</b>  | <b>EL ROL DE LA VISIÓN EN LA PERCEPCIÓN AUDITIVA DE DISTANCIA .....</b>  | <b>70</b>  |
| 7.1.       | Resumen .....  | 70         |
| 7.2.       | Introducción.....  | 70         |
| 7.3.       | Métodos generales.....   | 71         |
| 7.4.       | Resultados .....   | 74         |
| 7.4.1.     | Experimento 1 .....  | 74         |
| 7.4.2.     | Experimento 2 .....  | 74         |
| 7.4.3.     | Experimento 3 .....  | 71         |
| 7.5.       | Conclusiones .....   | 72         |
| 7.6.       | Referencias Bibliográficas .....   | 73         |
| <b>8.</b>  | <b>EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE RESPUESTA DE LOCALIZACIÓN DIRECTA PARA<br/>MEDIR LA PERCEPCIÓN AUDITIVA DE DISTANCIA .....</b> | <b>74</b>  |
| 8.1.       | Resumen .....  | 74         |
| 8.2.       | Introducción.....  | 81         |
| 8.3.       | Métodos generales.....   | 83         |
| 8.4.       | Experimento 1 .....  | 83         |
| 8.4.1.     | Procedimiento.....   | 83         |
| 8.4.2.     | Resultados.....  | 84         |
| 8.4.3.     | Discusión .....  | 81         |
| 8.5.       | Experimento 2.....   | 81         |
| 8.5.1.     | Procedimientos.....  | 82         |
| 8.5.2.     | Resultados.....  | 82         |
| 8.5.3.     | Discusión .....  | 84         |
| 8.6.       | Experimento 3.....   | 90         |
| 8.6.1.     | Procedimientos.....  | 90         |
| 8.6.2.     | Discusión .....  | 92         |
| 8.7.       | Discusión general.....   | 93         |
| 8.8.       | Referencias bibliográficas.....  | 90         |
| <b>9.</b>  | <b>EL CONTEXTO AMBIENTAL AUDITIVO AFECTA LA PERCEPCIÓN VISUAL DE<br/>DISTANCIA.....</b>                                    | <b>93</b>  |
| 9.1.       | Introducción.....  | 93         |
| 9.2.       | Procedimientos experimentales .....  | 102        |
| 9.2.1.     | Entornos de prueba .....   | 102        |
| 9.2.2.     | Participantes.....   | 103        |
| 9.3.       | Procedimiento experimental general .....   | 103        |
| 9.4.       | Métodos de estadística.....  | 100        |
| 9.5.       | Resultados .....   | 101        |
| 9.5.1.     | Experimento 1 .....  | 101        |
| 9.5.2.     | Experimento 2 .....  | 103        |
| 9.6.       | Discusión .....  | 107        |
| 9.7.       | Conclusiones .....   | 109        |
| 9.8.       | Referencias bibliográficas.....  | 111        |
| <b>10.</b> | <b>INTERDISCIPLINA ENTRE CIENCIA Y ARTE .....</b>  | <b>115</b> |
| 10.1.      | Introducción.....  | 115        |
| 10.2.      | Piezas para ensamble instrumental (2012).....  | 116        |
| 10.3.      | Marco teórico y realización .....  | 118        |
| 10.4.      | Instalación sonora: BÚCARO DE SECRETOS.....  | 121        |
| 10.4.1.    | Introducción .....   | 122        |
| 10.4.2.    | Marco teórico y realización.....   | 123        |
| 10.5.      | Obra escénica: LEJOS.....  | 127        |
| 10.5.1.    | Introducción .....   | 127        |

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| 10.5.2.      | Marco teórico y realización.....  | 128        |
| <b>10.6.</b> | <b>Escultura sonora: CRISÁLIDA .....</b>  | <b>131</b> |
| 10.6.1.      | Introducción .....  | 131        |
| 10.6.2.      | Marco teórico y realización.....  | 133        |
| <b>10.7.</b> | <b>Referencias bibliográficas.....</b>  | <b>136</b> |
| <b>11.</b>   | <b>ENTREVISTAS SOBRE EL USO DEL ESPACIO SONORO Y LA PERCEPCIÓN DE DISTANCIA .....</b> | <b>137</b> |
| 11.1.        | Introducción .....  | 137        |
| 11.2.        | Sobre la importancia del uso del espacio sonoro .....                                 | 139        |
| 11.3.        | Sobre las técnicas utilizadas para el tratamiento del espacio sonoro .....            | 142        |
| 11.4.        | Sobre la importancia y las técnicas relativas al uso de la distancia auditiva<br>144  |            |
| 11.5.        | Sobre los métodos de notación para indicar planos en distancia.....                   | 146        |
| 11.6.        | Sobre el concepto de Perspectiva Auditiva.....  | 147        |
| <b>12.</b>   | <b>CONCLUSIONES FINALES .....</b>   | <b>149</b> |
| 12.1.        | Referencias bibliográficas.....   | 153        |
| <b>13.</b>   | <b>ANEXOS .....</b>   | <b>155</b> |
| 13.1.        | Artículos publicados en el marco de esta tesis .....                                  | 155        |
| 13.2.        | Dos piezas para ensamble instrumental.....  | 156        |

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. El espacio sonoro en la música

El sonido se desarrolla siempre en un tiempo y espacio determinado. Desde la generación del sonido en la música el espacio se encuentra implícito, habilitando la posibilidad de ordenar, reconstruir y moldear dicho espacio para influir en la forma musical, por lo que la utilización del espacio en la música obedece a razones que exceden cuestiones meramente acústicas.

La idea del espacio como elemento para la construcción del discurso sonoro implica enfrentarnos a un término complejo que refiere a múltiples aspectos de la composición, la interpretación y la percepción musical. Esto se argumenta sobre la base de que el espacio es un elemento musical compuesto, el cual puede integrarse dentro de una estructura compositiva, llegando a adquirir una jerarquía relevante como elemento estructural del discurso sonoro.

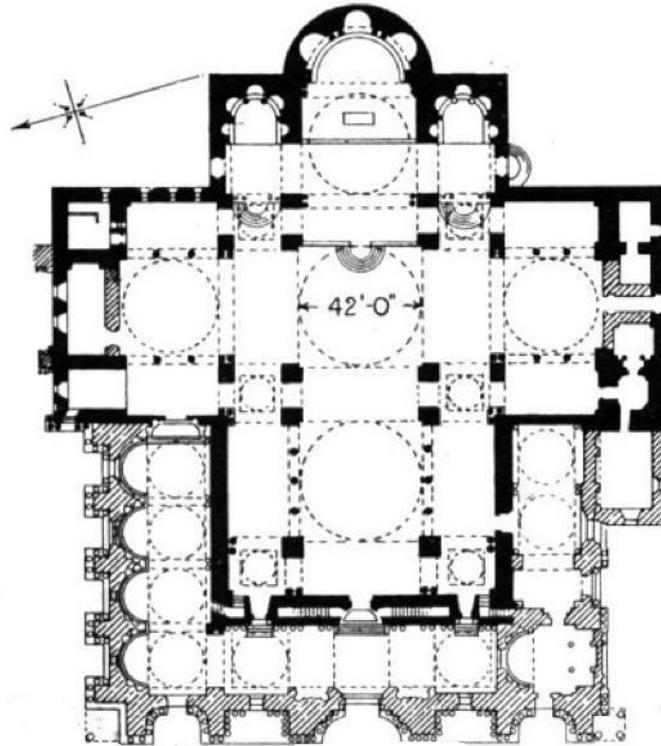
La espacialidad en la música representa una variable compositiva que cuenta con una larga historia. El tratamiento del espacio sonoro en la escena puede remontarse al uso de las máscaras que aumentaban las resonancias y direccionalidad de la voz de los actores y el coro en el teatro griego clásico (Knudsen, 1932). Sin embargo, aunque las técnicas compositivas referidas al manejo del espacio sonoro datan de varios siglos de desarrollo, la utilización sistemática de las dimensiones espaciales en la música cobra mayor relevancia a principios del siglo XX, donde diversos compositores utilizaron el espacio sonoro como un factor estructural clave de su discurso musical. Obras como *Universe Symphony* (1911-51) de Charles Ives, *Déserts* (1954) y *Poème électronique* (1958) de Edgard Varese, *Gruppen* (1955-57) de Karlheinz Stockhausen y *Persephassa* (1969) de Iannis Xenakis utilizan la concepción del espacio como una dimensión independiente y estructural, la cual se encuentra interrelacionada con otros parámetros del sonido, como el timbre, la dinámica, la duración y la altura.

En particular, es importante destacar que en las obras mencionadas no sólo se consagra identidad al espacio sonoro como una nueva dimensión musical, sino que también se generan teorías detrás de la espacialización del sonido que contemplan, entre otros, aspectos físicos, poéticos, pictóricos y perceptivos. De esta manera, las áreas de estudio y los campos de aplicación del conocimiento artístico-musical, derivados de dichos conceptos y teorías, se han ampliado durante las últimas décadas, favoreciendo la investigación interdisciplinaria respecto al uso del espacio sonoro y sus respectivos parámetros.

Además de ocupar un lugar central en la música, durante los últimos años el espacio sonoro y sus materias relacionadas se han vuelto tema de estudio en diversas disciplinas. Un ejemplo de lo antedicho puede verse reflejado en la investigación sobre las técnicas de

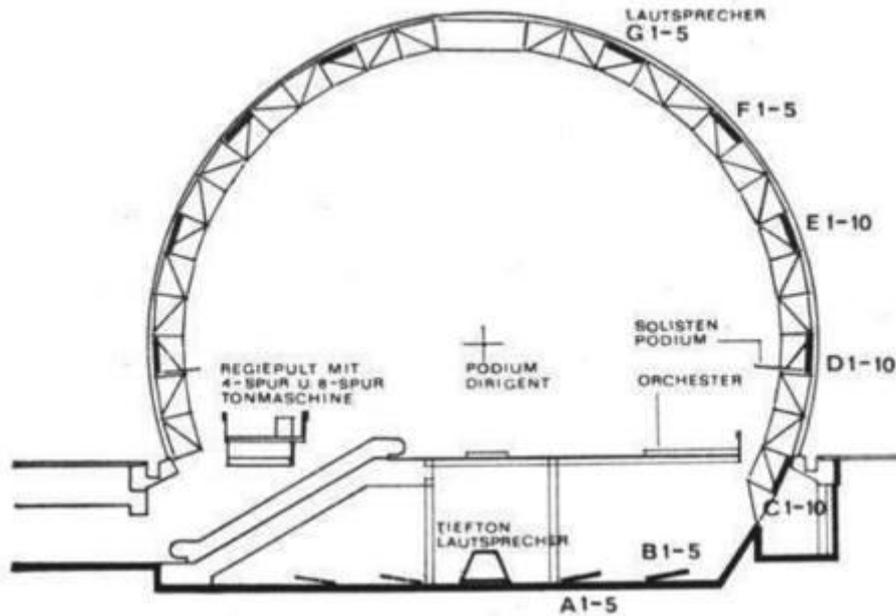
especialización del sonido en entornos acústicos reales y virtuales. Dichas técnicas se han desarrollado, en gran parte, basándose en principios psicoacústicos, modelos cognitivos y avances tecnológicos para desarrollar hardware o software de espacialización del sonido. En otro ámbito, en el campo científico se han realizado tesis y artículos de investigación que abordan con gran precisión cuáles son los indicios necesarios para generar una imagen acústica de una fuente virtual y de qué manera deben ser emulados, ya sea mediante un circuito electrónico o un algoritmo computacional. Sin embargo, no podemos afirmar que las técnicas musicales, referidas al manejo del espacio sonoro, hayan podido valerse de los estudios de las ciencias perceptivas de una manera global ya que, como veremos luego, en muchos casos son tenidos en cuenta sólo algunos de los indicios involucrados en la percepción auditiva del espacio sonoro, dejando de lado otros que son necesarios para obtener una imagen acústica convincente.

A modo general, el espacio de una composición musical podría representar, como atributo, el primer elemento de expresión y comunicación con el espectador. Por ejemplo, desde el primer momento, las características acústicas de una sala (real o virtual) influye directamente en la forma en que percibimos el discurso sonoro. Esta característica del espacio musical se complementa con la ubicación de las fuentes sonoras en el espacio, ya sean instrumentistas o parlantes. Una referencia histórica de este hecho se da en el período renacentista, mediante el uso de los coros divididos de la catedral de San Marcos de Venecia. Este tipo de estilo, llamado antifonal, representa un claro antecedente la dependencia de la construcción musical con el espacio arquitectónico (Stockhausen, 1959). El estilo de los compositores Venecianos se mostró fuertemente influenciado por las particularidades acústicas y arquitectónicas de la basílica de San Marcos de Venecia (Fig. 1.1), involucrando coros o conjuntos de instrumentos separados espacialmente, ejecutados de forma alternada.



**Figura 1.1:** *Planta de la basílica de San Marcos de Venecia (Italia)*

Durante el período clásico y romántico europeo la distribución espacial de los instrumentistas, en la mayoría de los casos, siguió el ideal francés de las escuelas militares del siglo XIX. En esta configuración, la disposición más generalizada se diferenciaba en dos zonas principales: la de los músicos en el escenario y la del público en la platea. En el siglo XX, se replanteó esta situación frontal de concierto proponiendo otro tipo de diseños y disposiciones. Por ejemplo, en 1962, el compositor alemán Karlheinz Stockhausen ideó el diseño de un nuevo tipo de recinto para ampliar las posibilidades de disposición del público y los músicos (Fig. 1.2). Dentro de las directivas propuestas por el compositor alemán, se pueden mencionar que el recinto debe ser circular, sin podio fijo, distribución de butacas flexible, techos y paredes para instalar parlantes y micrófonos, balcones suspendidos para músicos y propiedades acústicas de la sala configurables. Todas estas directivas intentaron adaptar la sala de conciertos a las nuevas necesidades compositivas de su época, utilizando salas específicamente diseñadas para una escucha espacial. Esta nueva manera de concebir los espacios posibilita pensar en las diferentes sensaciones que se pueden provocar en el oyente mediante el uso la espacialidad del sonido.



**Figura 1.2:** Karlheinz Stockhausen "Spherical Concert Hall". Diseño para la Exposición Mundial de Osaka, Japón (1970).

En otro ámbito, a mediados del siglo pasado, el manejo del espacio en la música electroacústica muchas veces estuvo ligado a los recursos y limitaciones técnicas de cada época, donde el parámetro del espacio no poseía una noción evidente, todavía falto de vocabulario técnico específico, y aún menos presentes las relaciones con los otros parámetros ya conocidos. Desde los comienzos de la música electroacústica, los compositores han utilizado la tecnología para extender los límites musicales, ya sea mediante la aplicación de procesos electrónicos o interactuando con instrumentos tradicionales. Sin embargo, el espacio en la música electroacústica es diferente al de la música instrumental. En la música electroacústica, el espacio como parámetro musical es muy abarcativo, multidimensional y difícil de definir, ya que incorpora la dimensión individual de las fuentes sonoras (utilizando parlantes), la relación entre ellas y el espacio acústico en el que las fuentes se oyen. Además, el espacio audible en sí mismo sólo puede ser percibido a través de la evolución temporal del discurso sonoro. El uso de parlantes en la música electroacústica tiene potencial para usar el espacio sonoro como un elemento estructural de una manera muy flexible. Las posibilidades espaciales habilitadas por la música electroacústica fueron (y son) muy significantes: es posible transportar al oyente a una gran variedad de entornos virtuales utilizando un único dispositivo (Fig. 1.3), expandiendo el espacio musical más allá de los límites físicos del entorno. De esta manera, es posible representar la sensación de lejanía, movimiento y direccionalidad en un entorno acústico virtual, pudiendo integrar dichos factores como estructurales del espacio musical.



**Figura 1.3:** *Sala de conciertos de música electroacústica multicanal.*

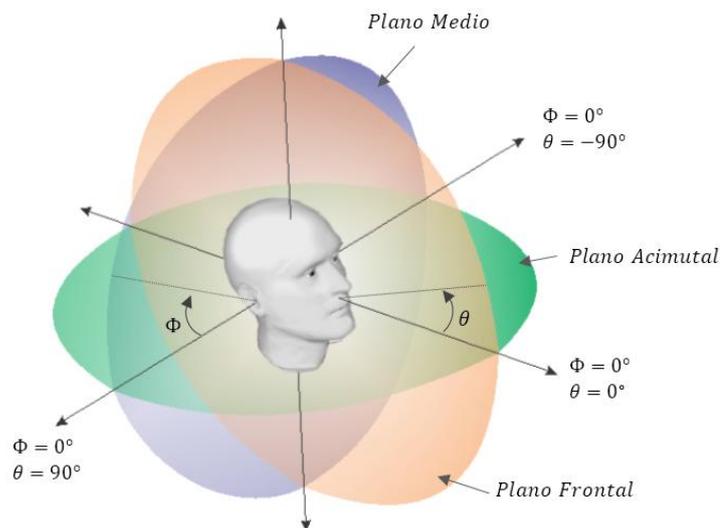
Otra de las características del medio electroacústico es la posibilidad de recontextualizar sonidos, atribuyéndoles un nuevo significado en el espacio virtual en el que acontecen, de acuerdo su acción en distintos contextos. Por ejemplo: dos sonidos, que en la naturaleza no podrían escucharse simultáneamente, pueden ser yuxtapuestos y describir un paisaje poco realista desde el punto de vista ecológico. Esta situación puede actuar como disparador de la interacción entre lo que se escucha y el conocimiento previo de las fuentes sonoras, proveniente de las experiencias pasadas del oyente.

Los patrones de comunicación interpersonal, la experiencia de la vida (rural o urbana) y el entorno arquitectónico en el que vivimos contribuyen directamente a la habilidad de interpretar pistas espaciales provenientes del entorno. El conocimiento previo del oyente se encuentra tan arraigado que el individuo desconoce su influencia sobre la interpretación de la información sensorial. Sumado a esto, las claves espaciales están siendo procesadas constantemente en nuestra experiencia con el entorno auditivo, adquiriendo un rol clave en nuestras actividades referentes a la escucha. De esta manera, los procesos cognitivos basados en la experiencia previa del oyente entran en juego y son esenciales para la experiencia espacial auditiva.

Las pistas del entorno, presentadas en un contexto de música electroacústica, pueden proveer asociaciones no sólo con el espacio físico donde transcurre la obra, sino

también con otras propiedades relativas a la espacialidad propuesta por el discurso sonoro. Risset (1969) menciona que la inclusión de grabaciones de diversos entornos en composiciones electroacústicas representa un dilema, debido a que la identidad de los sonidos “naturales” hace que los mismos no se presten a transformarlos sin que se pierda su contenido espacial. A pesar de esto, sonidos reconocibles son utilizados habitualmente en obras electroacústicas, especialmente en composiciones que continúan la tradición de la *música concreta*. De acuerdo a esto, en condiciones de escucha normal, la percepción generada en el oyente por una fuente sonora única es la que proviene de lo que llamamos “objeto sonoro”. Pierre Shaffer (2003) define al objeto sonoro como “*todo fenómeno sonoro que se perciba como un conjunto, como un todo coherente, y que se oiga mediante una escucha reducida que lo enfoque por sí mismo, independientemente de su procedencia o de su significado*”. El sistema auditivo ha evolucionado para reconocer la identidad de las fuentes que generan dichos objetos sonoros. Consecuentemente, un objeto sonoro será mapeado en el espacio de acuerdo a los atributos físicos de la fuente (ej: un orador es una persona, un ladrido es un perro). Vemos entonces que la interpretación del espacio sonoro está fuertemente vinculada a la expectativa del oyente, en donde la localización de las fuentes sonoras no es sólo tiene en cuenta las características inherentes de la señal sonora, sino también al grado de aprendizaje adquirido por el oyente.

A diferencia de escuchas circunstanciales, durante la situación de escucha atenta de música electroacústica, la posición de los oyentes se encuentra normalmente fija. La información espacial disponible que le llega al oyente, aparte de la obtenida de los movimientos de cabeza exploratorios es dependiente de las pistas acústicas disponibles. Como hemos mencionado, el espacio sonoro ha sido ampliamente investigado en el ámbito de la psicoacústica. Sin embargo, no lo han sido tanto sus posibilidades de ser un elemento portador de forma del discurso sonoro, y aún menor ha sido el uso de la distancia como factor estructural del discurso musical. Este hecho podría deberse al gran desbalance existente, en cuanto a la cantidad de información en la bibliografía especializada, sobre los indicios involucrados en la percepción de la posición de fuentes sonoras en el eje horizontal o acimut (ángulo de orientación en el eje horizontal) y en el de elevación (ángulo de orientación en el eje vertical) con respecto a los estudios relacionados al eje de la distancia (Fig. 1.1). Los dos primeros ejes han sido profundamente estudiados en el siglo pasado (y lo siguen siendo) y las pistas que ayudan a localizar un objeto en acimut y elevación han sido tratadas en numerosas publicaciones. Por el contrario, el estudio de la Percepción Auditiva de Distancia (PAD) de una fuente sonora, tanto en la música como en la psicofísica, involucra una gran cantidad de pistas aún no estudiadas en profundidad, convirtiéndose así en uno de los tópicos con mayor cantidad de enigmas a resolver.



**Figura 1.1:** Representación esquemática del eje de acimut, elevación y distancia

## 1.2. Desarrollos y objetivos

En el ámbito musical, existen pocos ejemplos en donde el parámetro de la PAD haya sido utilizado como un elemento organizador del discurso sonoro, construyendo un espacio en el que el oyente sea capaz, por ejemplo, de reconocer patrones de trayectorias o diferentes texturas y planos en distancia. Habitualmente, los parámetros que son utilizados como indicios de distancia actúan en un ámbito poco conocido y, en la mayoría de los casos, se procede de una manera empírica e intuitiva. Por tal motivo, el objetivo general de este trabajo hace foco en realizar una investigación con una doble perspectiva: abordar el estudio de la distancia tanto en el ámbito científico como el musical y, por consiguiente, que los resultados obtenidos en la etapa de la investigación posean un valor artístico aplicable.

Para realizar esto, se propone:

- revisar los estudios realizados en el ámbito científico sobre la naturaleza, características y percepción de las pistas auditivas y visuales de distancia.
- estudiar cuáles son los límites y aspectos psicofísicos que determinan la percepción de distancia en la modalidad visual y auditiva.
- realizar una revisión general del estudio del espacio sonoro, tanto en el ámbito musical (acústico y electroacústico) como en el científico.

- plantear si la distancia auditiva puede ser utilizado en la composición e interpretación musical con la categoría y relevancia de elemento portador de forma.
- mostrar los resultados de una serie de experimentos para entender los indicios involucrados en la percepción visual y auditiva de distancia en entornos reverberantes (además de la interacción crossmodal).
- presentar una una serie de piezas que tienen como eje central el uso de la distancia como parámetro portador de forma del discurso y el espacio sonoro.
- realizar un estudio comparativo sobre la base de una serie de entrevistas realizadas profesionales de distintos ámbitos (mezcla, mastering, interpretación, composición, producción).

A continuación revisaremos cuáles son las pistas involucradas en la percepción del espacio sonoro. Abordaremos, desde un punto de vista psicofísico, el sistema auditivo como procesador espacial para luego realizar una revisión exhaustiva de los indicios involucrados en la percepción auditiva en el eje horizontal (acimut), elevación y distancia.

### 1.3. Referencias bibliográficas

Knudsen, V. O. *Architectural Acoustics*. J. Wiley y Sons (1932).

Risett, J. C. *An Introductory Catalogue of Computer Synthesized Sounds*. Nueva Jersey. Bell Telephone Laboratories (1969).

Schaeffer, P. *Tratado de los objetos musicales*. Traducción de Araceli Cabezón de Diego. Alianza Editorial (2003).

Stockhausen, K. *Musik im Raum*. Die Reihe N° 5 (1959).

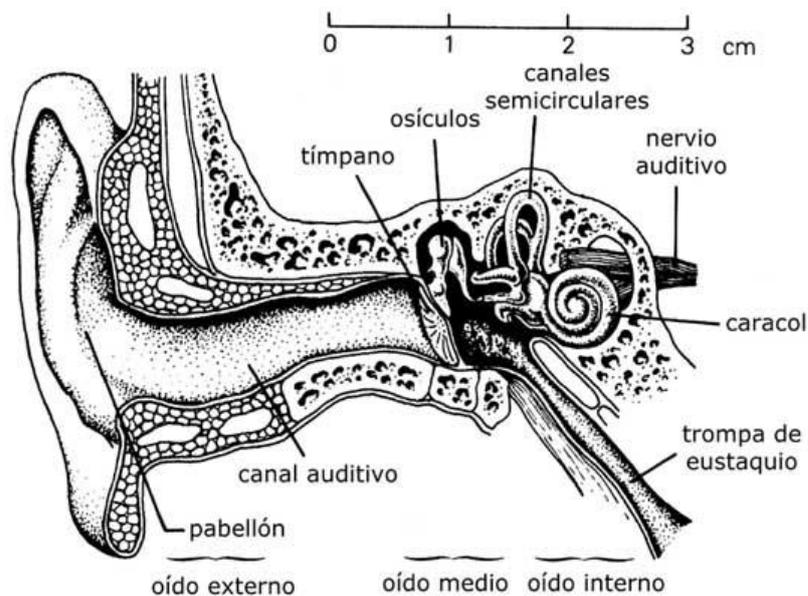
## 2. EL SISTEMA AUDITIVO COMO PROCESADOR ESPACIAL

### 2.1. Introducción

La audición se activa por la emisión de sonidos, se realiza a través del sistema auditivo e informa al sistema nervioso sobre algunos atributos de las fuentes sonoras. En humanos, el sistema auditivo tiene tres funciones principales:

- 1- Captación y procesamiento mecánico de las ondas sonoras.
- 2- Conversión de la señal acústica (mecánica) en impulsos nerviosos, y transmisión de dichos impulsos hasta los centros sensoriales del cerebro.
- 3- Procesamiento neuronal de la información codificada en forma de impulsos nerviosos.

La estructura del sistema auditivo se compone del oído externo, el oído medio, el oído interno y, finalmente, el sistema nervioso central (Fig. 2.1).



**Figura 2.1:** Estructura del sistema auditivo humano

El oído externo recibe y canaliza las ondas sonoras desde el exterior hacia la membrana timpánica, acoplado el oído medio con el campo acústico externo. Está conformado por el pabellón auricular o pinna y el canal auditivo externo. Como veremos en el Capítulo 2, el oído externo, principalmente la pina, contribuye decisivamente en la tarea de la localización espacial.

El oído medio transforma estas ondas en vibraciones mecánicas y es el encargado de compensar la diferencia de impedancias que existe entre el aire y los fluidos del oído

interno. Está conformado por el tímpano (separa el oído externo del oído medio), los osículos (martillo, yunque y estribo) y la trompa de Eustaquio (acopla la presión externa con la del oído medio).

El oído interno convierte y codifica estas vibraciones mecánicas en señales eléctricas que son transmitidas por fibras nerviosas a diferentes centros de procesamiento de orden superior en el cerebro. Dentro del oído interno se encuentran dos sistemas perceptivos distintos, el de la audición y el del equilibrio. El sistema encargado de codificar el sonido se conoce como cóclea y su función es descomponer el sonido en sus componentes de frecuencia e intensidad. Los componentes de frecuencia de la señal sonora y la intensidad de cada uno de estos componentes nos brindan información que es utilizada por nuestro sistema nervioso para diferenciar sonidos y, en muchos casos, reconocer la identidad de la fuente sonora. El sistema auditivo puede percibir sonidos dentro en un amplio rango de frecuencias e intensidades. Esta capacidad nos permite reconocer perturbaciones acústicas provenientes de fuentes sonoras con características muy diversas. Sin embargo, la importancia biológica del sistema auditivo no se debe solamente a su capacidad para reconocer la identidad espectral de las perturbaciones sonoras sino también a su capacidad para reconocer la ubicación espacial de la fuente que los genera. En los ambientes naturales, la capacidad de ubicar el lugar donde se encuentra la fuente del sonido tiene una importancia igual o superior a la capacidad de reconocer sus características espectrales, en especial si se encuentra ubicada fuera del campo visual del oyente. En general, el sistema auditivo posee menor precisión espacial que el sistema visual, sin embargo, tiene una gran ventaja: puede monitorear el espacio auditivo en todas las direcciones al mismo tiempo e independientemente de las condiciones lumínicas del ambiente.

La forma en que el sistema auditivo procesa la información espacial es diferente a la de otros sistemas sensoriales. A diferencia de otros órganos receptores como el de la vista y el tacto, en el órgano receptor del sistema auditivo no se produce una representación espacial explícita. En el sistema visual por ejemplo, el cristalino proyecta una imagen con información espacial concreta sobre los receptores de la retina y esta imagen es enviada desde la retina a la corteza visual manteniendo las mismas relaciones espaciales. En el sistema auditivo en cambio, el órgano receptor del oído interno (el órgano de Corti) no produce información espacial de forma directa. Como veremos más adelante, es en el cerebro y no en el órgano receptor del oído interno donde la información de frecuencia e intensidad proveniente desde ambos oídos es analizada para formar un mapa espacial con la ubicación de las fuentes percibidas.

Como vimos, la ubicación de la fuente sonora puede variar en acimut, en elevación y distancia. El cerebro utiliza diferentes indicios que contiene la señal sonora para estimar la

ubicación de la fuente en estas coordenadas. A continuación desarrollaremos conceptos generales sobre percepción espacial en los planos horizontal y vertical dejando distancia para un capítulo aparte (ver Capítulo 3).

## **2.2. Ubicación espacial de sonidos en el eje horizontal**

El sistema auditivo del ser humano posee mayor resolución espacial en el eje horizontal que en los otros planos del espacio auditivo. La resolución espacial para estimar la posición angular de una fuente sonora se mide en términos de mínimo ángulo audible (MAA - Mills, 1958). El MAA es la diferencia mínima en el ángulo de incidencia de un par de sonidos de idénticas características que un sujeto es capaz de reconocer. El MAA no tiene un valor absoluto ya que depende de diferentes factores externos como por ejemplo el ángulo de incidencia y la frecuencia de los sonidos. En los seres humanos, la resolución espacial en el plano horizontal es mayor cuando los sonidos provienen desde el frente de la cabeza que cuando provienen de los costados. De este modo, el MAA es mínimo para fuentes ubicadas cerca del plano sagital medio del oyente y aumenta gradualmente cuando los estímulos son presentados con valores de acimut crecientes. Cuando se utilizan estímulos ubicados en la parte frontal de la cabeza, el MAA en el plano horizontal tiene valores aproximados a  $1^\circ$ . Sin embargo, cuando el ángulo de incidencia del estímulo es aumentado gradualmente, el valor del MAA aumenta hasta alcanzar valores de  $10^\circ$  cuando los sonidos provienen de un ángulo de  $80^\circ$ . Cuando el ángulo de incidencia del sonido supera los  $80^\circ$  la resolución espacial disminuye considerablemente alcanzando valores de MAA mayores a  $40^\circ$ . Esta importante caída en la resolución espacial para sonidos lateralizados se debe a que cuando el sonido proviene desde ángulos cercanos a  $90^\circ$  los sujetos no son capaces de diferenciar si éste proviene de adelante o de atrás de su cabeza. Esto hace que, para sonidos provenientes de lugares lateralizados, los oyentes cometan errores mayores en la ubicación espacial de los mismos. Ésta zona de incerteza es conocida como el “*cono de confusión*” (Basso, 2006). Generalmente podemos mejorar nuestra estimación en la ubicación de sonidos que provienen con ángulos mayores a  $80^\circ$  moviendo levemente nuestra cabeza para ubicar la fuente sonora en algún sitio fuera de esta zona de incerteza donde la resolución espacial es más aceptable.

El MAA depende también de las características del sonido. En un trabajo publicado por Stevens y Newman (1936) se demostró que los seres humanos tenemos mayor precisión para ubicar la procedencia de un tono puro en acimut cuando este tiene frecuencias menores a 1 kHz o mayores a 3 kHz, mientras que la precisión disminuye cuando son utilizados tonos de frecuencias intermedias (entre 2-3 kHz). Cuando los sonidos provienen desde el frente de la cabeza, el MAA para un tono puro menor a 1 kHz es de aproximadamente  $1^\circ$  y de  $1.5^\circ$  para tonos con frecuencias mayores a 5 kHz. Sin

embargo, para tonos con frecuencias ubicadas entre 2 y 4 kHz, el MMA alcanza valores superiores a 3°. El hecho de que la resolución espacial sea dependiente de la frecuencia del estímulo se debe a las características que poseen los dos indicios principales que utiliza el cerebro para estimar la ubicación espacial de la fuente sonora en el plano horizontal. Estos indicios son: la Diferencia Interaural de Tiempo (ITD, del inglés Interaural Time Difference) y la Diferencia Interaural de Intensidad (ILD).

El ITD es la diferencia temporal de la llegada de una señal sonora a cada oído cuando el sonido proviene desde un lugar ubicado fuera del plano sagital medio de la cabeza de un oyente (con valores de acimut diferentes a 0°). En estos casos el sonido deberá recorrer diferentes distancias para llegar a cada uno de los oídos. De esta manera, el tiempo que tarda la señal en llegar desde la fuente a cada oído es diferente; el oído que está más cerca de la fuente recibirá el sonido antes que el oído que se encuentra más lejos. Cuando el sonido proviene con un acimut de 90° el ITD tiene su valor máximo ya que la señal, luego de llegar al oído más próximo, deberá recorrer la distancia máxima entre ambos oídos para llegar al otro. Por el contrario si la señal proviene desde el frente de la cabeza (acimut = 0) la distancia desde la fuente a cada oído es la misma y el valor de ITD será cero. El ITD es el indicio que más influye en la ubicación angular de la fuente sonora en el plano horizontal para sonidos de baja frecuencia (< a 1.3 kHz).

El ILD es la diferencia de intensidad que tiene la señal auditiva al llegar a cada oído cuando esta proviene de una ubicación con un acimut diferente de 0°. Esta diferencia en la intensidad recibida se produce principalmente por la absorción y reflexión (sombra acústica) que produce la cabeza sobre el sonido en su recorrido desde un oído al otro. La disminución en la intensidad del sonido producido por la cabeza depende del ángulo de incidencia del sonido. Si el sonido proviene desde el frente de la cabeza ambos oídos recibirán la señal con la misma intensidad y el ILD será cero. El valor de ILD va creciendo gradualmente a medida que la señal se desplaza hacia zonas con valores de acimut crecientes hasta alcanzar su valor máximo cuando el sonido proviene con un ángulo de incidencia de 90°. Además del ángulo de incidencia, el ILD depende de la relación entre el tamaño de la cabeza y la longitud de onda de la señal, esto es, la cabeza solamente absorberá parte de la señal auditiva cuando la longitud de onda del sonido tenga un valor menor al de su diámetro. Cuando la longitud de onda del sonido es mayor al diámetro de la cabeza la absorción y reflexión que ésta produce es mínima y por ende los valores de ILD se acercan a 0 independientemente del ángulo de incidencia del sonido. Esta es la razón por la cual el ILD es efectivo solamente para frecuencias elevadas.

La primera vez que se reportó la participación del ILD y del ITD como indicios binaurales para la ubicación de sonidos en el plano horizontal fue en un trabajo publicado por Lord Rayleigh (Rayleigh, 1907). En este trabajo se presenta una teoría todavía vigente (conocida hoy como *teoría duplex*), en la cual se postula que el ILD es el principal indicio

que utilizamos para la ubicación espacial (en acimut) de sonidos de frecuencias altas mientras que el ITD es el principal indicio para la ubicación espacial de sonidos de frecuencias bajas. Rayleigh observó que, las variaciones inducidas del ILD producían en los oyentes la ilusión de que la fuente sonora cambiaba de posición en acimut. En estas condiciones bastaba producir variaciones del ILD de solo 1-2 dB para que los sujetos reporten variaciones en la ubicación de la fuente en acimut. Rayleigh observó que la imagen auditiva va lateralizándose cuando los valores de ILD aumentan. Cuando la diferencia de intensidades era de alrededor de 15 dB los sujetos reportaban la posición aparente del sonido hacia una posición de acimut cercana a 90°. Sin embargo, cuando el estímulo utilizado era un tono puro de baja frecuencia ( $< 1.3$  kHz) los sujetos no eran capaces de reconocer la ubicación la fuente sonora y percibían el origen del sonido en una ubicación de acimut cercana a 0° independientemente de los valores de ILD. Como acabamos de ver, la sombra acústica responsable del ILD es producida principalmente por la absorción y reflexión del sonido producida cuando éste choca con la cabeza del oyente. La magnitud del ILD depende, además de las dimensiones de la cabeza del oyente, de la longitud de onda del sonido. Rayleigh explica que el hecho de que los tonos de baja frecuencia no provoquen ILD se debe a que cuando la longitud de onda de la señal es igual o mayor que el diámetro de la cabeza ésta no es capaz de reflejar el sonido y, por ende, no produce ningún tipo de atenuación en la intensidad del mismo por lo que el ILD tiene valores cercanos a cero. En la década del 70, estudios realizados con micrófonos binaurales colocados dentro del canal auditivo, en una posición cercana a la membrana timpánica, permitieron medir las diferencias en la intensidad del sonido en cada oído en función de la ubicación de la fuente, la frecuencia de la señal y el tamaño de la cabeza (Harrison y Downey, 1970). Estos experimentos, confirmando lo propuesto por Rayleigh en la teoría duplex, demostraron que el ILD es efectivo para las señales con longitudes de onda que son mayores que el diámetro de la cabeza del oyente y, además, que el ILD aumenta cuanto más chica es la longitud de onda de la señal. Sus resultados nos muestran como, en los seres humanos, los estímulos de frecuencias bajas (por ejemplo, 500 Hz) producen un ILD muy pequeño (cercano a 0 dB) mientras que los estímulos de frecuencias elevadas (por ejemplo, 8 kHz) producen valores de ILD superiores a 20 dB. De este modo se demostró que el rango de frecuencias en donde el ILD es efectivo es dependiente de la frecuencia del sonido y del tamaño de la cabeza del oyente. Sabemos entonces que el ILD es el indicio que nos permite ubicar en el plano horizontal el ángulo de incidencia de los sonidos con frecuencias mayores a 1,5 kHz. Sin embargo, no solamente somos capaces de ubicar la procedencia de sonidos de alta frecuencia sino que podemos detectar la ubicación, en acimut, de sonidos a lo ancho de todo el espectro de frecuencias audible. ¿Cómo detectamos entonces la procedencia de sonidos de baja frecuencia en donde el ILD deja de ser efectivo? Rayleigh observó que el único indicio que podía ayudar

a ubicar un sonido de baja frecuencia en el plano horizontal era la diferencia temporal con que el sonido llega a cada oído (es decir, el ITD) cuando éste proviene desde un acimut diferente de  $0^\circ$ . Rayleigh dio cuenta además de que la diferencia temporal en la llegada de una señal de baja frecuencia a los oídos haría que cada uno de estos reciba la señal en diferentes partes de la fase de la onda auditiva. Esta diferencia se conoce como diferencia interaural de fase (IPD) y refiere a la diferencia en la fase de la onda que arriba al oído, la cual es dependiente de la frecuencia de la señal sonora y de la ITD. Por ejemplo, si tuviéramos un tono a 1000 Hz que llega al oído izquierdo 0.5 ms después que al oído derecho tendríamos una diferencia de fase  $180^\circ$  entre ambos oídos. La IPD es muy útil cuando el oído tiene la capacidad de detectar diferencias menores a  $3^\circ$ . Rayleigh confirmó la sensibilidad de los oyentes al ITD y al IPD en una serie de experimentos muy ingeniosos, en los cuales utilizó un complicado mecanismo que activaba un par de diapasones intercambiables lo cual le permitía estimular cada oído con diferentes retardos temporales y con diferentes retardos en la fase de la onda sonora. Estos experimentos demostraron que, para tonos puros de frecuencias menores a 1 kHz, el ITD es muy efectivo para detectar la procedencia angular de sonidos en el plano horizontal. Sin embargo, cuando la frecuencia del estímulo es aumentada por encima de 1.3 kHz el ITD se hace menos efectivo y los sujetos empiezan a tener problemas para reconocer la procedencia del sonido (la imagen auditiva tiende a moverse hacia el centro de la cabeza) para perderla totalmente cuando la señal alcanza valores de frecuencia mayores a 1.6 kHz. La *teoría dúplex* de la localización binaural de sonidos en el plano horizontal ha sido confirmada por numerosos estudios psicofísicos y fisiológicos. Sin embargo hay un punto importante a tener en cuenta. En los experimentos de Rayleigh los estímulos utilizados eran tonos puros. Sin embargo, en la naturaleza la mayoría de los sonidos que escuchamos son espectralmente complejos y rara vez estamos expuestos estímulos sinusoidales puros. Hoy sabemos que el ITD también puede ser un indicio efectivo para estimar la procedencia de sonidos de frecuencias mayores a 1 kHz cuando estos son espectralmente complejos. Varios estudios psicofísicos demostraron que la sensibilidad al ITD de los seres humanos para ruidos de banda angosta de alta frecuencia es similar a la observada con tonos puros de baja frecuencia (Leakey et al. 1958). Con este tipo de estímulos, una persona puede reconocer cambios en la ubicación de la fuente sonora con una efectividad similar a la reportada con tonos puros de baja frecuencia. Resultados similares fueron obtenidos utilizando estímulos formados por una senoide de alta frecuencia con su amplitud modulada a frecuencias bajas. Por ejemplo, una persona puede detectar cambios en el ITD para una senoide de 4 kHz si su amplitud es modulada con una frecuencia de 200Hz. Sin embargo, si los espectros de los estímulos son cuidadosamente limitados a las frecuencias altas y sólo se utilizan los retardos interaurales como indicio, el umbral del ITD de los estímulos complejos es de 2 a 10 veces mayor que

el obtenido con estímulos de baja frecuencia. Es decir, los oyentes son menos sensibles a cambios en el ITD para estímulos espectralmente complejos de alta frecuencia que para estímulos de baja frecuencia. El rango de valores que puede alcanzar el ITD depende principalmente de dos factores: la velocidad del sonido y la distancia entre ambos oídos. En humanos, donde la velocidad del sonido es de 343 m/s; el sonido tardará 29  $\mu$ s por cada cm adicional que tenga que viajar hasta el otro oído. Por ejemplo, con una distancia interaural de alrededor de 20 cm, tiene un ITD máximo cercano a 700  $\mu$ s. Aunque estos valores temporales son diminutos, el ser humano puede discriminar ITDs muchísimo menores con valores que oscilan entre 10 y 20  $\mu$ s.

### **2.3. Localización vertical de fuentes sonoras**

Además de localizar fuentes sonoras en el plano horizontal de manera eficaz, los seres humanos también podemos percibir el ángulo de incidencia del sonido en el plano vertical con cierta precisión. Se habla de elevación cuando el sonido proviene con un ángulo de incidencia diferente de cero en el eje vertical (Blauert, 1997). Al igual que en acimut, el umbral de discriminación en elevación se mide mediante el MAA, que indica la mínima diferencia angular perceptible entre dos posiciones de una fuente sonora en el plano vertical. Algunos estudios han mostrado que los umbrales de MAA obtenidos mediante cambios en la elevación de una fuente sonora son generalmente de dos a cuatro veces más grandes que los observados en el plano horizontal (Wettschurek, 1973; Morrongiello y Rocca, 1987). Por ejemplo, Perrot y Saberi (1989) reportaron un MAA en elevación de 3.6°, utilizando ruido blanco como estímulo. Makous y Middlebrooks (1989) reportaron un error en la percepción de una fuente sonora de 3.5° cuando la fuente se encontraba al frente y al centro del oyente, el cual aumentaba gradualmente cuando la elevación de la fuente se incrementaba (máximo 20°). En este estudio también se reportó que cuando la fuente se encontraba en posiciones que combinaban acimut y elevación, los errores podían llegar como máximo a los 15°, mostrando una mejoría en la precisión cuando la información de ambos planos está disponible.

Como vimos, las diferencias interaurales de tiempo e intensidad que brindan las pistas utilizadas para la localización de fuentes sonoras en acimut son puramente binaurales (Blauert, 1997; Sodnik et al., 2004). En cuanto a la elevación, existen varios estudios que indican que los humanos utilizan pistas monoaurales del dominio frecuencial para realizar estas localizaciones (Garas, 2000). Mediante la reflexión y difracción de los sonidos en nuestro cuerpo, cabeza y oído externo, se proveen las principales pistas para la localización vertical (Algazi et al., 2001; Bloom, 1977).

Según Makous y Middlebrooks (1989), cuando una fuente sonora se encuentra en una posición que combina posiciones de acimut y elevación, el sistema auditivo es capaz

de combinar información de diferentes clases de pistas para sintetizar una imagen espacial unitaria. Gracias a los avances tecnológicos con respecto a los sistemas de captura, fue posible el desarrollo de micrófonos lo suficientemente pequeños como para ser introducidos dentro del canal auditivo. De esta manera fue posible obtener la Función de Transferencia Relativa a la Cabeza, mejor conocida como HRTF (del inglés, *Head Related Transfer Function*), la cual permite observar las variaciones en el espectro que se producen en los sonidos que chocan contra el torso, cabeza y pinna de un oyente (Rakerd et al., 1999; Searle et al., 1975; Middlebrooks, 1999; Shaw, 1966; Hebrank y Wright, 1974; Wightman y Kistler, 1989). Estas mediciones tienen la particularidad de capturar las características espectrales afectadas por la dirección con que llegan los sonidos y, por lo tanto, poder determinar cuáles son los cambios espectrales que se producen al variar la elevación de una fuente sonora. Según Middlebrooks (1999) se puede obtener las HRTF de forma efectiva mediante la utilización de sonidos de banda ancha, para tener información en el mayor rango de frecuencias posibles, reproducidos en campo libre (o cámara anecoica), para que el sonido no sea afectado por ningún tipo de reflexiones, y capturado mediante pequeños micrófonos con una respuesta en frecuencia plana, ubicados dentro o en la entrada del canal auditivo.

Mediante experimentos psicofísicos y grabaciones de HRTF se ha determinado que las señales que son filtradas por el cuerpo, la cabeza y la pinna presentan picos y valles en diferentes lugares del espectro. Estos picos y valles, producidos por la interferencia constructiva y destructiva de nuestra fisonomía, contiene información relacionada con la elevación de una fuente sonora, siendo esta información la que hace posible estimar la elevación de la misma (Shimoda et al., 2007).

#### **2.4. Información provista por la pinna**

La pinna ha sido objeto de estudio desde el siglo XIX, aunque a mediados del siglo pasado se han desarrollado los estudios más abarcativos sobre la utilidad de la misma en la localización de fuentes sonoras en el plano medio sagital, específicamente en la localización vertical. Mach (1874), Raleigh (1876) y Steinhauser (1879) han reportado varias consideraciones sobre la pinna. Mach conjeturó que la forma de la misma podría ser importante en la localización de las fuentes sonoras y fue uno de los primeros en detectar cambios en la calidad del sonido cuando se producían cambios en la orientación de la fuente sonora que se estaba escuchando. Según Mach, dichos cambios se debían a la transformación que recibían por parte de la pinna. Steinhauser, indicó que la construcción de la pinna del oído humano era similar a un cono que colecta los sonidos de las diferentes posiciones y que a la vez funcionaba como un reflector de determinados sonidos.

Ya en el siglo XX, Batteau (1967) reportó que la pinna podía funcionar como un transformador acústico esencial para la localización de las fuentes sonoras, reforzando esta teoría mediante la producción de un modelo matemático. Rofler y Butler (1968) han indicado que si bien el oído externo había sido considerado por mucho tiempo un órgano vestigial, en un trabajo de Jonkees y Groen (1946) se reportó que la localización en el plano vertical sería imposible sin éste. Para reforzar esta hipótesis, Fisher y Fredman (1968) y Gardner y Gardner (1973), realizaron experimentos cubriendo las circunvoluciones de la pinna, reportando que la habilidad de los oyentes para localizar sonidos en el plano medio y en elevación se reducía. Diversos estudios han reportado que la pinna influye sobre sonidos que poseen un contenido espectral por encima de los 3-4 kHz, debido a que estas frecuencias poseen una longitud de onda semejante a las cavidades que presenta el oído externo humano (Chum y Kim, 2011; Hofman et al., 1998; Bronkhorst, 1995). Algazi et al. (2001) reportaron que uno de los efectos más característicos de la pinna sobre el espectro es el que se denomina “*muesca de la pinna*” (del inglés, “pinna notch”), la cual aparece dentro de la octava entre 6 y 12Khz. Hoffman et al. (1999) se basan en estas características para apoyar la creencia de que para que una fuente sonora pueda ser bien localizada en el eje vertical debe tener energía en la zona sobreaguda del espectro.

Searle et al. (1975) y Butler y Belendiuk, (1977) han medido la respuesta en frecuencia del oído externo para diferentes ángulos de incidencia en el plano sagital. Estos han mostrado que por encima de los 5 kHz aparecen sucesivos picos y valles muy selectivos en la respuesta en frecuencia. También han observado que la posición de estos picos y valles espectrales cambia cuando el ángulo vertical de la fuente sonora se incrementa. Esta revisión de los estudios sobre el efecto de la pinna en el espectro de una fuente sonora muestra que ésta tiene influencia sobre el espectro de frecuencias por encima de los 3-4 kHz, por lo que para realizar una correcta localización de estos sonidos es necesario que los estímulos contengan energía en las frecuencias por encima de estos valores.

## **2.5. Información provista por el torso**

La información que el torso aporta a la percepción de fuentes sonoras en el plano vertical no fue estudiada hasta mediados del siglo XX. El torso y la cabeza perturban el espectro de frecuencias por debajo de los 3Khz (Hanson, 1944). Sin embargo se ha reportado que estos cambios tienen un efecto leve sobre la localización angular en el plano vertical y los resultados obtenidos generan información confusa. El efecto del torso en la localización vertical ha sido estudiado sistemáticamente por Gardner y Gardner (1973), quienes midieron las HRTF de un maniquí con y sin pinna, concluyendo que esta no tenía

influencia por debajo de los 3.5 KHz, pero que el torso introducía importantes modificaciones en el espectro de frecuencias entre los 700Hz y los 3.5KHz, las cuales consideraron “*pistas secundarias*”.

Kuhn (1987) realizó grabaciones binaurales con un maniquí (combinando condiciones con torso, sin torso, con pinna y sin pinna) reportando que observó variaciones por debajo de los 2 kHz en las condiciones sin pinna. Kuhn también observó que el filtrado debido al torso presentó forma de filtro peine (del inglés, “*comb filter*”), introduciendo muescas periódicas en frecuencias por debajo de los 3 kHz. La ubicación de estas muescas produce un patrón que varía directamente con la elevación de la fuente. Por otro lado, Searle et al. (1975) identificó seis pistas de localización en su modelo estadístico de la localización auditiva humana, y utilizó los datos de Gardner y Gardner (1973) para estimar la varianza proveniente de las reflexiones del torso o “el rebote en el hombro” (del inglés, “*shoulder bounce*”), concluyendo que el rebote en los hombros es la pista más débil en la percepción de la elevación.

## 2.6. Referencias bibliográficas

Algazi V. R., Avendano C. y Duda, R.O. Elevation localization y head-related transfer function analysis at low frequencies. AA. J. Acoust. Soc. Am., 109 (3), 1110–1122 (2001).

Basso, G. *Percepción Auditiva*. Ed. de la Universidad Nacional de Quilmes, Quilmes, Argentina (2006).

Batteau, D.W. The Role of the Pinna in Human Localization. Proc. R. Soc. Lond., 168 158–180 (1967).

Blauert, J. *Spatial hearing*. The psychophysics of human sound localization. Massachusetts, USA (1997).

Bloom, P. J. Determination of monaural sensitivity changes due to the pinna by use of minimum- audible-field measurements in the lateral vertical plane. AA. J. Acoust. Soc. Am., 61(3) 820–828 (1997).

Bronkhorst, A. W. Localization of real and virtual sound sources. AA. J. Acoust. Soc. Am., 98(5) 2542–2553 (1995).

Butler, R.A. y Belendiuk, K. Spectral cues utilized in the localization of sound in the median sagittal plane. AA. J. Acoust. Soc. Am., 61(5), 1264–1269 (1977).

Chum, C. J. y Kim, H. K. Sound Source Elevation Using Spectral Notch Filtering and Directional Band Boosting in Stereo Loudspeaker Reproduction. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 57(4), 1915–1920 (2011).

Fisher, H. G. y Freedman, S. J. The role of the pinna in auditory localization. J. Aud. Res., 8, 15–26 (1968).

Garas, J. *Adaptive 3D sound systems*. Springer, 2000.

Gardner, M.B. y Gardner, R.S. Problem of localization in the median plane: effects of pinnae cavity occlusion. AA. J. Acoust. Soc. Am. 53, 400–408 (1973).

Hanson, W. W. The baffle effect of the human body on the response of a hearing aid. AA. J. Acoust. Soc. Am. 16, 60–62 (1944).

Harrison, J. M. y Downey, P. Intensity changes at the ear as a function of the azimuth of a tone source: a comparative study. J. Acoust. Soc. Am. 47, 1509–1518 (1970).

Hebrank, J. y Wright, D. Spectral cues used in the localization of sound sources on the median plane. J. Acoust. Soc. Am., 56(6), 1829–1834 (1974).

Hofman P.M., Van Riswick J.G.A y Van Opstal A. J. Relearning sound localization with new ears. AA. Nature Neuroscience 1(5), 417–421 (1974).

Jongkees, L. W. B. y Groen, J.J. On Directional hearing. AA. J. Laryngol. Otol. 61, 494–504 (1946).

Kuhn, G.F. Physical acoustics and measurements pertaining to directional hearing. AA. En Directional Hearing, editado por W. A. Yost y G. Gourevitch (Springer-Verlag, New York), 3–21 (1987).

Leakey, D. M. y Sayers, B. M. Binaural Fusion of Low and High Frequency Sounds, ASA (1958).

Mach, E.: Archiv fur Ohrenheilkunde, 7(2), 14–26 (1874).

Makous, J.C. y Middlebrooks, J.C. Two-dimensional sound localization by human listeners. AA. J. Acoust. Soc. Am. 87(5), 2188–2200 (1989).

Makous, J.C. y Middlebrooks, J.C. Two-dimensional sound localization by human listeners. AA. J. Acoust. Soc. Am. 87(5), 2188–2200 (1990).

Middlebrooks, J.C. Virtual localization improved by scaling non individualized external-ear transfer functions in frequency. AA. J. Acoust. Soc. Am. 106(3) 1493–1510 (1999).

Mills, A. W. On the minimum audible angle. J. Acoust. Soc. Am. 30, 237-246. (1958).

Perrot, D. R. y Saberi, K. Minimum audible angle thresholds for sources varying in both elevation and azimuth. J. Acoust. Soc. Am. 87(4), 1728–1731 (1989).

Rakerd B., Hartmann A. M. y Mc Caskey, T. L. Identification and localization of sound sources in the median sagittal plane. AA. J. Acoust. Soc. Am. 106(5), 2812–2820 (1999).

Raleigh, L.: On Waves. AA. Phil. Mag., 1, 257–279 (1876).

Rayleigh, L. On our perception of sound direction. Philosophical Magazine 13, 6º serie, 214-232 (1907).

Rofler, S.K. y Butler, R.A.: Factors That Influence the Localization of Sound in the Vertical Plane. *J. Acoust. Soc. Am.* 43(6), 1255–1259 (1968).

Searle C.L., Cuddy C.R., Braida L. D. y Davis M. F. Binaural pinna disparity: another auditory localization cue. *AA. J. Acoust. Soc. Am.* 57(2), 448–455 (1990).

Searle C.L., Cuddy C.R., Braida L.D. y M.F., Davis. Binaural pinna disparity: another auditory localization cue. *AA. J. Acoust. Soc. Am.* 57(2), 448–455. (1975).

Shaw, E.A.G. Ear canal pressure generated by a free sound field. *AA. J. Acoust. Soc. Am.* 39, 465–470 (1966).

Shimoda T., Kumon M. Kohzawa R. Mizumoto I., Nakashima T. y Z., Iwai: Sound Localization of Elevation using Pinnae for Auditory Robots. En *Robust Speech Recognition and Understanding*, I-Tech Education and Publishing, 421–438 (2007).

Sodnik J., Bobojevic G., Susnik R. y Tomazic, S. The directional resolution of virtual sound sources in humans. *AA. Electrotechnical Review*, 71(3) 121–127 (2004).

Steinhauser, A. Phenomenom of binaural audition. *AA. Phil. Mag.*, 7(5) 181–261 (1879).

Stevens, S. S. y Newman, E. B. The localization of actual sources of sound. *American Journal of Psychology* 48, 297-306 (1936).

Wettschurek, R. G. The absolute difference limen of directional perception in the median plane under conditions of both, natural hearing and hearing with artificial-head-system. *Acustica* 28(4), 197–208 (1973).

Wightman, F. L. y Kistler, D. J. Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis. *J. Acoust. Soc. Am.* 85(2), 1829–1834 (1984).

### **3. REVISIÓN DE LOS ASPECTOS MÁS RELEVANTES EN EL ESTUDIO DE LA PERCEPCIÓN AUDITIVA DE DISTANCIA**

#### **3.1. Resumen**

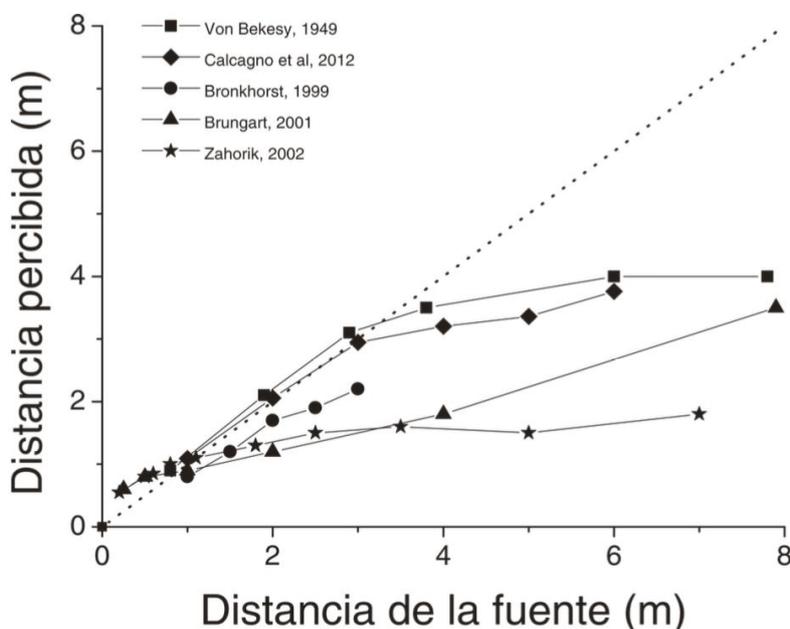
Un problema central en el estudio de la percepción auditiva es el de determinar las pistas utilizadas por el cerebro para ubicar fuentes sonoras. Como vimos en el capítulo anterior, los indicios relacionados con la percepción de la dirección del sonido (en acimut y elevación) han sido estudiados en profundidad durante el siglo pasado. Sin embargo, la percepción auditiva de distancia ha recibido menos atención por parte de los investigadores, convirtiéndose así en uno de los tópicos con mayor cantidad de interrogantes a analizar. El objetivo del presente capítulo es revisar los resultados más relevantes reportados sobre este tema desde principios de siglo XX hasta nuestros días.

#### **3.2. Introducción**

A diferencia de la percepción espacial en acimut y elevación, la Percepción Auditiva de Distancia (PAD) ha recibido menos atención por parte de los investigadores. El estudio de la PAD se ha desarrollado mediante diferentes metodologías experimentales, en diferentes ambientes acústicos (tanto reales como virtuales) y utilizando estímulos de diversas características. Los experimentos realizados pueden dividirse, a grandes rasgos, en dos ramas: experimentos para obtener umbrales mínimos y experimentos para medir la precisión de un oyente al estimar la distancia a una fuente.

Para medir umbrales de PAD se han utilizado métodos de elección forzada de dos alternativas, mientras que para medir la precisión con que un oyente percibe la distancia física real de una fuente sonora, es necesario obtener curvas psicofísicas de PAD. Las curvas psicofísicas de PAD se realizan reproduciendo un estímulo desde diferentes distancias y obteniendo la distancia percibida por el oyente. En la mayoría de los estudios, la respuesta obtenida con cualquiera de estos métodos muestra que la distancia a una fuente sonora es percibida con menor precisión y mayor variabilidad que el ángulo de incidencia del sonido (Zahorik et al., 2005). En general, los humanos tienden a sobrestimar la distancia a la fuente cuando ésta se encuentra a menos de 2 metros, mientras que su distancia es subestimada cuando se encuentra a distancias mayores (Fig. 3.1). En la mayoría de los casos, la relación entre la distancia real a la fuente y la distancia percibida puede ajustarse mediante una función de potencia ( $Y = aX^b$ ) con un exponente considerablemente menor que uno, lo que corresponde a una no linealidad compresiva entre la distancia física y la percibida (Zahorik et al., 2005).

Como veremos a continuación, la PAD es un fenómeno complejo que involucra una gran cantidad de indicios diferentes (tanto acústicos como no acústicos). El objetivo de este capítulo es revisar los aspectos más relevantes publicados sobre PAD desde principios del siglo XX hasta nuestros días.



**Figura 3.1:** Resumen de curvas psicofísicas reportadas en diferentes artículos de PAD. Estos resultados fueron obtenidos mediante experimentos realizados en diferentes entornos acústicos (reales y virtuales) y con diferentes estímulos auditivos. Puede verse como en distancias pequeñas la distancia a la fuente es sobrestimada mientras que en distancias mayores es fuertemente subestimada.

### 3.3. Indicios de Percepción Auditiva de Distancia

Cuando un sonido atraviesa un espacio determinado sufre múltiples cambios en sus propiedades físicas antes de llegar a los oídos del oyente. Muchas de estas variaciones están relacionadas con la distancia entre el oyente y la fuente sonora. Sin embargo, como veremos más adelante, existen pistas que no tienen relación directa con los cambios que sufre la señal en su interacción con el medio y afectan de manera importante a la PAD.

Los indicios de PAD pueden dividirse entre relativos y absolutos. Los indicios relativos proporcionan información sobre la distancia a la fuente sonora mediante la comparación entre las distancias de dos o más fuentes. Estos indicios se estudian mediante procedimientos experimentales donde los estímulos son presentados de manera repetida desde diferentes distancias. Por el contrario, los indicios absolutos brindan al oyente la información necesaria para percibir la distancia a la fuente sin necesidad de un

estímulo de referencia. Los indicios absolutos de PAD se estudian mediante un método conocido como método de presentación única (Mershon y Bowers, 1989). Este método consiste en obtener la distancia aparente de la fuente en respuesta a un único estímulo auditivo proveniente de una distancia determinada. De este modo, a diferencia del procedimiento de presentaciones repetidas, el oyente no puede relacionar la información con la de otros estímulos presentados previamente.

Entre el amplio espectro de factores que influyen sobre la PAD podemos mencionar: la intensidad del sonido, los cambios en el espectro de frecuencias del estímulo, la relación de intensidades entre el sonido directo y el reverberante, indicios binaurales, la influencia de pistas visuales, el conocimiento previo del estímulo, etc. A continuación explicaremos cada uno de estos indicios y revisaremos los resultados más relevantes publicados hasta la fecha en la literatura especializada.

### **3.4. Intensidad**

La pista más obvia en la PAD es la relación entre la intensidad del sonido que llega al oyente y la distancia a la fuente sonora. Cualquiera de nosotros puede notar que la intensidad de un sonido proveniente de una fuente fija disminuye a medida que nos alejamos de ella y viceversa. En ambientes anecoicos (sin reflexiones) la relación entre la distancia a la fuente y la intensidad con que el estímulo llega al oyente obedece a la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Es decir, la intensidad de la señal disminuye 6dB cada vez que la distancia a la fuente se duplica y aumenta 6dB cuando la distancia a la fuente disminuye a la mitad (Gamble, 1909; Coleman 1963). Sin embargo, esta ley no puede aplicarse en ambientes reverberantes, ya que las reflexiones del sonido en las superficies de un recinto hacen que la pérdida de intensidad general del estímulo en función de la distancia sea menor (Begault, 1991).

La simpleza de la relación entre la distancia a la fuente y la intensidad hacen de éste un indicio muy influyente en PAD. Sin embargo, es importante aclarar que, desde la perspectiva del oyente, esta pista puede ser ambigua ya que variaciones en la potencia acústica de la fuente pueden ser confundidas con cambios en la distancia de la misma. De hecho, experimentos psicofísicos han demostrado que, cuando se manipula la intensidad de un estímulo auditivo reproducido desde una fuente fija, los oyentes tienen la sensación de que la distancia a la fuente cambia (von Békésy, 1949; Gardner, 1969).

Como mencionamos antes, la intensidad es un indicio relativo de PAD. Esto fue demostrado en por Mershon y King en 1975. Mershon y King utilizaron un método que consiste en obtener juicios de distancia en una cámara anecoica en respuesta a un único estímulo auditivo y por ende sin ninguna referencia previa. En estas condiciones no encontraron diferencias significativas en la distancia percibida por dos grupos de oyentes en respuesta a un mismo estímulo pero con intensidades diferentes (hasta 20 dB de

diferencia). En un segundo experimento, los autores presentaron a cada grupo un estímulo proveniente de distancias diferentes (2,74 y 5,49 m). La respuesta de ambos grupos tampoco fue significativamente diferente. Por último, Mershon y King encontraron que, si el mismo experimento era repetido en una sala reverberante, bastaba una sola presentación del estímulo para que la respuesta entre ambos grupos fuera significativamente diferente. Los autores concluyeron entonces que la intensidad es un indicio relativo de distancia mientras que factores relacionados con la reverberación pueden servir como indicios absolutos.

Debido al carácter relativo de la intensidad, los estudios interesados en estudiar el rol de este indicio en la PAD deben utilizar como mínimo dos presentaciones del estímulo para que el oyente pueda comparar entre ambas. Estudios pioneros en este tema han examinado la capacidad de los oyentes para discriminar cambios en la distancia aparente de la fuente en condiciones anecoicas, donde la intensidad es el principal indicio disponible. Gamble (1909) y Edwards (1955) reportaron que se necesita un cambio del 20% en la distancia real de la fuente para que un oyente sea capaz de percibirlo. Sin embargo, en trabajos posteriores se obtuvieron umbrales menores. Experimentos realizados por Simpson y Stanton (1973) y Strybel y Perrott (1984) reportaron umbrales de un 13 y 3 % respectivamente. Ambos trabajos muestran además que los umbrales de discriminación fueron mucho mayores cuando la fuente se encontraba a menos de 3 metros del oyente (48% y 20% respectivamente).

Además de estudiar la relación entre la intensidad del sonido y la distancia a la fuente se han realizado estudios específicos sobre la relación entre la sonoridad y la PAD. La sonoridad es una medida subjetiva de la intensidad con la que un sonido es percibido por un oyente. Stevens y Guirao (1962) demostraron que la sonoridad y la distancia aparente de la fuente están inversamente relacionadas. Sus datos muestran que se requiere variar la intensidad de la señal en  $\approx \pm 10$  dB para que el oyente reporte una disminución de la sonoridad a la mitad de su valor inicial o un aumento de la distancia del doble de su valor original. Resultados similares fueron obtenidos por Warren en 1958, quién reportó que fueron necesarios cambios de  $\pm 6$  dB para que los oyentes perciban variaciones en la distancia a la fuente del doble o la mitad (consistente con la ley de la inversa del cuadrado de la distancia).

Una forma más directa de estudiar el rol de la intensidad en la PAD es mediante la obtención de curvas psicofísicas. Casi sin excepción, los estudios que miden la eficacia de los oyentes para percibir la distancia a una fuente en ambientes anecoicos reportan una importante subestimación de la distancia a la fuente cuando esta se encuentra a más de 2m (Simpson y Stanton, 1973). Sin embargo, como veremos luego, esta subestimación puede estar relacionada, entre otros factores, con el tipo de estímulo que se utiliza. Por ejemplo, Mershon y King (1975) y Coleman (1962) indican que esta fuerte subestimación

puede ser revertida significativamente si los oyentes están familiarizados con el sonido que proviene de la fuente.

### **3.5. Espectro**

Existen por lo menos dos fenómenos relacionados con cambios en la distancia de la fuente sonora que inducen cambios sistemáticos en el espectro de un sonido: el filtrado que sufre el sonido inducido por las propiedades de absorción del aire y el aumento relativo de las frecuencias bajas producidas en el campo cercano (efecto de proximidad).

Con respecto al efecto de la absorción del aire sobre el espectro de un sonido, Nyborg y Mintzer (1955) han reportado que el coeficiente de absorción para un tono de 10 KHz es 20 veces mayor que para un tono de 1KHz. Es por esto que, en su viaje desde la fuente al oyente, un sonido pierde mayor cantidad de energía en la zona de frecuencias agudas del espectro. Es importante destacar que esta pérdida es moderada (entre 3 y 4dB por cada 100 metros a 4KHz – Ingard, 1953) y por ende puede ser percibida solamente para cambios en la distancia de la fuente relativamente grandes (> 15 m según Blauert, 1997). Sin embargo, Coleman en 1968 demostró que la cantidad relativa de energía en la zona aguda del espectro puede afectar la PAD aún en distancias menores. Coleman midió la distancia aparente a una fuente en respuesta a estímulos a los que se les filtraron las frecuencias agudas (emulando el efecto del sonido atravesando grandes distancias) y comparó los resultados con los obtenidos en las mismas condiciones pero en respuesta a estímulos sin filtrar. Sus resultados muestran que los estímulos filtrados fueron percibidos a una distancia significativamente mayor que los estímulos sin filtrar; demostrando que la pérdida de energía en la zona aguda del espectro está asociada a un aumento en la distancia de la fuente sonora. Resultados similares fueron obtenidos por Little et al. en 1992. Estos autores observaron además que el nivel relativo de alta frecuencia de un sonido afecta la distancia aparente de la fuente solamente cuando los oyentes pudieron comparar entre varios estímulos con cualidades espectrales diferentes. De este modo, demostraron que, al igual que la intensidad, los cambios espectrales producidos por la absorción del aire funcionan como un indicio relativo de distancia.

Por otro lado, algunos estudios han indicado que, cuando la fuente se encuentra a menos de 2 metros del oyente (campo cercano), el cambio espectral que sufre el sonido en relación a la distancia de la fuente es totalmente inverso al que se observa en campo lejano. von Békésy (1938) reportó que, en el campo cercano, el contenido de baja frecuencia de un estímulo aumenta cuando la distancia a la fuente sonora disminuye. Blauert (1997) sin embargo, indica que este efecto se da de forma muy tenue en el mejor de los casos y que, por lo tanto, no puede ser considerado como una pista influyente de PAD.

Como acabamos de ver, tanto los indicios espectrales producidos en el campo cercano como en el lejano ocurren en zonas acotadas del espectro de frecuencias. De este modo, para que estos indicios sean relevantes, es necesario que el sonido posea cierta complejidad espectral. Resultados obtenidos por Spiouzas et al. (2017) en una sala semi-reverberante indican que las cualidades espectrales del sonido afectan de forma contundente la distancia aparente de una fuente sonora. Sus resultados muestran que es relativamente fácil estimar la distancia a la fuente cuando ésta emite un sonido espectralmente complejo (ruido blanco) mientras que es más difícil hacerlo cuando emite tonos puros. Además los autores reportaron una correlación positiva entre el ancho de banda del estímulo y la precisión en los juicios de distancia.

### **3.6. Familiaridad con el estímulo auditivo**

La precisión para estimar la distancia a una fuente sonora puede verse afectada notablemente si el oyente está familiarizado con el sonido que ésta emite. Uno de los sonidos más familiares para el ser humano es sin duda la voz humana. Es por esto que la voz humana ha sido utilizada en varios estudios como modelo para estudiar el efecto de la familiaridad del estímulo auditivo sobre la PAD. En términos generales, existe consenso en que la precisión de la PAD aumenta si el estímulo auditivo es familiar para el oyente.

Como vimos en el apartado de intensidad, en ambientes anecoicos los oyentes tienden a subestimar la distancia a la fuente cuando esta se encuentra a distancias mayores a 2 metros. Sin embargo, si el estímulo utilizado es una voz esta subestimación es revertida significativamente (Von Békésy, 1949; Gardner, 1969). Es importante destacar que este aumento en la precisión no depende de la identidad de la persona que habla, ya que la precisión es similar cuando se compara la respuesta a voces de personas conocidas por los oyentes con la respuesta a voces de personas desconocidas (Brungart y Scott, 2001).

Sin embargo, existen reportes que contradicen lo antedicho. Por ejemplo, en experimentos realizados en una sala reverberante por Nielsen (1991), no se encontraron diferencias significativas cuando se comparó la distancia aparente de la fuente en respuesta a voz humana grabada con la distancia aparente en respuesta a otros tipos de estímulos (ruido blanco, música grabada y grabaciones de guitarra). En el mismo orden de cosas, en un experimento realizado por Zahorik (1998) en una sala reverberante virtual, la distancia aparente de la fuente ante estímulos de voz hablada y ruido blanco no presentó diferencias significativas. Tal vez, el hecho de que esos experimentos fueron realizados en ambientes reverberantes y que hayan utilizado un método de presentaciones repetidas, puede haber facilitado la tarea de los oyentes para percibir la distancia de los sonidos desconocidos disminuyendo así el efecto del conocimiento previo de la voz humana. Brungart y Scott (2001) sostienen además que en los experimentos de Nielsen y Zahorik

no se tuvo en cuenta un importante atributo de la voz humana: el nivel de producción del discurso (la intensidad con que la persona habla). Varios autores han sugerido que la relación entre el nivel de presentación del estímulo y el nivel de producción puede funcionar como un indicio de PAD. Los sonidos del habla con bajos niveles de producción pero con niveles altos de presentación (ej, susurros que llegan con alta intensidad) indicarían transmisores cercanos, mientras que los sonidos del habla con altos niveles de producción pero con niveles de presentación bajos (ej, gritos que llegan con baja intensidad) indicarían que la persona que habla se encuentra a distancias lejanas. En 1991 Mershon y Philbeck pusieron a prueba esta hipótesis y obtuvieron resultados contundentes. Los autores midieron la distancia aparente a una fuente fija utilizando voces pregrabadas con el mismo nivel de presentación pero diferentes niveles de producción (susurro, voz normal y gritos). Sus resultados muestran que un susurro fue percibido a menos de la mitad de distancia que una voz normal mientras que un grito se percibió a una distancia tres veces mayor. Resultados similares fueron obtenidos en otros estudios tanto en ambientes reales (Traunmüller y Eriksson, 2000) como en entornos virtuales (Brungart y Scott, 2001).

La voz hablada en reversa es espectral y temporalmente similar a el habla normal, con la diferencia de que no presenta información semántica. Brungart y Scott (2001) encontraron que el uso de voz en reversa reduce la habilidad de estimar distancias según distintos niveles de producción de voz. Por último, en un estudio reciente, Wisniewski et al. (2012) encontraron que mientras los participantes juzgaron distancia para voz hablada normal de forma más precisa que con la voz en reversa, la precisión no varió entre distintos idiomas (voz en inglés y bengalí), sugiriendo que la estimación de distancia del habla depende más de la fonética en vez de la familiaridad lexical.

### **3.7. Indicios acústicos binaurales**

Además de ser crucial para la percepción del ángulo de incidencia del sonido en acimut, la información que el sistema auditivo obtiene de las diferencias interaurales de tiempo (ITD) e intensidad (ILD), pueden servir como indicios de PAD cuando la fuente sonora se encuentra a distancias menores a un metro (Brungart, 1968; Simpson y Stanton, 1973). En este rango, los cambios de distancia a la fuente producen un aumento de ILD mayor que de ITD (Shinn-Cunningham, 2000; Brungart, 2001). En Zahorik et al. (2005) se sugiere que los oyentes pueden usar esta combinación de ILD variable e ITD estático como un indicio de PAD. Esta hipótesis surge en relación a resultados obtenidos por Brungart et al. en 1999. Los resultados obtenidos por Brungart indicaron que, en el campo cercano, los participantes son capaces de realizar estimaciones precisas de distancia

utilizando solamente pistas binaurales cuando la fuente se presenta con un ángulo de incidencia de 90°.

Otro efecto que ha sido propuesto como una posible pista binaural de PAD es el paralaje acústico. Este efecto se produce cuando una fuente sonora se encuentra lo suficientemente cerca de la cabeza de un oyente como para producir diferencias sustanciales entre los ángulos con que el sonido incide en cada oído. Esta forma de paralaje modifica el filtrado dependiente de la direccionalidad resultante de la difracción producida por los oídos, el torso y la cabeza (Ashmead et al., 1990; Blauert, 1997). Un estudio realizado por Otani y Hirahara (2009) estudió la relación entre el espectro obtenido de las HRTF (*Head Related Transfer Function*), calculadas mediante una simulación numérica, y la distancia a la fuente sonora (para distancias de la fuente < 3 m). El análisis reportó que los espectros de las HRTF simuladas variaban marcadamente en respuesta a cambios en la distancia de la fuente sonora.

Además de los trabajos que estudian el efecto de las pistas binaurales a cortas distancias, existen algunos estudios que han reportado el efecto de estas pistas para distancias de la fuente mayores a un metro. Lokki et al. (2011) sugieren que las reflexiones laterales afectan la PAD. Los autores reportaron que si los oyentes disponían de reflexiones laterales la fuente sonora era percibida a menor distancia que cuando sólo disponían de reflexiones provenientes del plano medio.

### **3.8. Reverberación**

En los ambientes reverberantes existen múltiples superficies u objetos que hacen que la señal se refleje o rebote, produciendo copias del sonido emitido por la fuente. De este modo, en los ambientes con reflexiones el sonido llega al oyente a través de dos vías: la vía directa (o sonido directo) y la reverberante (o sonido reverberante). El sonido directo es el que llega al oyente desde la fuente sin reflejarse en ninguna superficie. Por el contrario, el sonido reverberante llega al oyente después de reflejarse en, al menos, una superficie del recinto.

La reverberación es un importante indicio de PAD. Existe abundante evidencia que indica que la reverberación mejora notablemente la precisión de un oyente para percibir la distancia a una fuente sonora. Como vimos en el apartado de intensidad, en ambientes sin reflexiones, la PAD suele ser ineficaz (la distancia a la fuente es fuertemente subestimada). Sin embargo, se ha demostrado que esta subestimación disminuye significativamente en ambientes reverberantes (Mershon et al., 1989). Numerosos trabajos han reportado que la distancia aparente a una fuente ubicada a una distancia determinada es mayor en ambientes reverberantes que la obtenida bajo las mismas condiciones en salas anecoicas (Nielsen, 1993; Békésy, 1938; Butler et al., 1980; Begault, 1992). En el

mismo sentido, Bronkhorst y Houtgast (1999) demostraron, mediante experimentos psicofísicos en un entorno acústico virtual, que un incremento en el número de las reflexiones simuladas resulta en un aumento de la distancia aparente a la fuente.

Varios autores han sugerido que el aumento en la precisión de los juicios de distancia observado en ambientes reverberantes se debe al aporte de un importante indicio: la relación de energías que existe entre el sonido directo y el reverberante (relación D/R). En ambientes reverberantes, la intensidad del sonido directo disminuye 6dB cada vez que la distancia a la fuente se duplica, mientras que la energía del sonido reverberante permanece relativamente constante. La relación D/R es un indicio interesante ya que no depende de la intensidad de la señal y puede ser eficaz en cualquier entorno donde se produzcan reflexiones (incluso en campo abierto hay al menos una reflexión proveniente del suelo).

Múltiples trabajos indican que la relación D/R conforma una pista absoluta de PAD. Mershon y Bowers (1979) han reportado que, a diferencia de lo que ocurre en ambientes anecoicos, en ambientes reverberantes basta una sola presentación del estímulo para que los oyentes reporten la distancia de la fuente con bastante precisión. La importancia de la relación D/R fue estudiada por primera vez en un estudio realizado por Von Békésy (1938). Békésy demostró que un decrecimiento en la relación D/R resulta en un incremento en la distancia aparente de la fuente sonora. Mershon y King (1979) demostraron que el efecto de la relación D/R se da en un amplio rango de distancias entre la fuente sonora y los oyentes. La efectividad de este indicio fue probada también en ambientes acústicos virtuales (Butler et al., 1980; Begault, 1992). Desde hace años, la relación D/R ha sido considerada uno de los indicios más influyentes en PAD. No obstante, este indicio tiene varias limitaciones. Zahorik (2002) reportó que el umbral de sensibilidad para la relación D/R resulta en valores de alrededor de 5-6 dB. Este umbral representaría un cambio en la distancia de más del 100%. Zahorik concluye entonces que la relación D/R no proporciona la información suficiente para percibir cambios finos en la distancia de la fuente sonora. Sin embargo, en un estudio realizado por Larsen et al. (2008), similar al publicado por Zahorik, se reportaron umbrales mucho menores ( $\approx 2-3$  dB) para la relación D/R. Otra limitación de la relación D/R es que su valor depende fuertemente de las características acústicas del medio ambiente. Por ejemplo, una fuente cercana en una sala reverberante puede tener la misma relación D/R que una fuente distante en una habitación con menor reverberación. Sin embargo, existe suficiente evidencia en la literatura para considerar a la relación D/R como un importante indicio de PAD.

### **3.9. Pistas dinámicas**

El flujo de información acústica surgida del movimiento de las fuentes sonoras y/o del oyente puede proveer información auditiva de distancia en dos formas: Tau acústico y el parallax absoluto de movimiento. La tau acústica refiere a la velocidad de cambio en el nivel del sonido de los oyentes (Ashmead, 1995). La estimación de la tau acústica puede ser relativa a la estimación de distancia, ya que son proporcionales cuando la velocidad es constante (Zahorik, 2005) la tau acústica también puede ser expresada como el tiempo de arribo de una fuente sonora hacia el oyente a una velocidad constante; es decir, la distancia dividida por la velocidad.

La segunda forma de información dinámica, el paralaje de movimiento absoluto, es el cambio en la dirección angular de la fuente sonora causada por el movimiento de la fuente relativa al oyente. Un experimento en el cual observadores estáticos o móviles percibieron distancias de un tren de pulsos estáticos a una velocidad de 20 Hz, a una distancia entre 2 y 6 metros, mostró que las pistas dinámicas llevaron a mejoras en la precisión de la estimación de distancia (Spiegle, 1993). El estudio sugirió que las pistas dinámicas pueden mejorar la percepción de distancias más grandes que 2m.

### **3.10. Representación interna de la distancia a una fuente sonora**

Como veremos en detalle en el próximo capítulo, para oyentes con visión normal, la calibración de la distancia auditiva es procesada para ser utilizada, principalmente, para mejorar la modalidad visual en la localización de fuentes sonoras. Perrot et al. (1990) hipotetizaron que la función principal de la sistema auditivo espacial podría ser proveer información que permita a los individuos redireccionar sus ojos para conducir a la fóvea (área de la retina donde se enfocan los rayos luminosos), en línea con la fuente sonora. Esto da como resultado que el espacio auditivo se encuentra constantemente actualizado usando la modalidad visual, logrando una representación espacial interna respecto a al entorno en el que el individuo se encuentra inmerso (Lewald, 2013). Para una estimación precisa de distancia, el sistema auditivo tiene que escalar apropiadamente la representación interna de las pistas de distancia disponibles, de manera de que la percepción de distancia externa sea coherente con la interna.

### **3.11. Visión**

Para lograr una representación coherente del mundo exterior, nuestro sistema nervioso debe procesar información muy diversa procedente de sus diferentes modalidades sensoriales; principalmente a través de las modalidades visual y auditiva. Muy a menudo, las modalidades visual y auditiva transmiten información contradictoria y el estudio de cómo nuestro sistema nervioso resuelve esta discrepancia ha atraído mucha

atención durante los últimos años (ver King, 2009). En estos casos, el cerebro tiende a resolver el conflicto a favor de la modalidad más precisa o más apropiada. Un ejemplo es el famoso "*efecto ventrílocuo*", donde la presencia de un estímulo visual atrae la localización angular de una fuente sonora (Radeau y Bertelson, 1974; Recanzone, 1998).

La mayoría de los trabajos que estudian la interacción entre la localización visual y auditiva se han enfocado en la localización angular en acimut. Sin embargo, un reducido número de estudios han reportado sesgos similares al producido por el efecto ventrílocuo en distancia. Un estudio pionero sobre el rol de la visión en la PAD fue publicado por Gardner en 1968. Gardner hizo estos experimentos en una sala anecoica en la que dispuso cinco parlantes ubicados en línea recta a diferentes distancias del participante. Los parlantes fueron ubicados al nivel de los ojos de los participantes, de modo que estos solamente podían ver el parlante más cercano durante el experimento. Los resultados de Gardner mostraron que, aunque el estímulo fue reproducido siempre desde el parlante más lejano, los oyentes reportaron (sin excepción) que el sonido provenía del primer parlante, justamente el único que podían ver. De esta manera se demostró que la imagen del primer parlante producía un efecto de atracción, similar al efecto ventrílocuo, sobre la ubicación en distancia de la fuente que emitía el sonido. Gardner llamó a este fenómeno perceptivo "*efecto de proximidad de la imagen*" (Gardner, 1968). Resultados similares fueron obtenidos por Mershon et al. (1980) donde se reporta que el efecto de proximidad de la imagen ocurre tanto en entornos anecoicos como en reverberantes y además que la distancia de la fuente sonora puede ser sobrestimada o subestimada dependiendo de la posición del objeto visual.

Con el propósito de reexaminar este fenómeno, Zahorik (2001) realizó experimentos en un ambiente semireverberante pero utilizando un dispositivo similar al de Gardner. Este experimento sugiere que el efecto de captura visual en distancia no es tan general como suponían los estudios anteriores. De hecho, sus resultados mostraron que la presencia de pistas visuales incrementó la precisión de los oyentes para percibir la distancia de la fuente sonora.

Resultados similares fueron obtenidos por Calcagno et al. en 2012. En este trabajo los autores realizaron experimentos en una sala semireverberante en completa oscuridad pero en presencia y ausencia de pistas visuales mínimas. De este modo, los participantes no podían ver el parlante de prueba en ningún momento, evitando así que el efecto de proximidad de imagen afecte la respuesta. Los resultados de este trabajo reforzaron la idea de que la información visual afecta la PAD. Los autores observaron que, en ausencia de pistas visuales, la distancia a la fuente era fuertemente subestimada cuando se encontraba a distancias mayores a 3 m. Sin embargo, cuando el experimento fue realizado en presencia de pistas visuales esta subestimación fue revertida. Como agregado, los resultados de Calcagno et al. (2012) muestran que la información visual obtenida por los

participantes durante el experimento puede ser guardada en su memoria para ser utilizada, minutos después, como referencia espacial en experimentos realizados sin pistas visuales. De hecho, obtuvieron una respuesta muy precisa en la oscuridad cuando se les permitió a los oyentes inspeccionar visualmente la sala de pruebas antes de realizar el experimento. Los autores concluyen que el rol de la visión en la PAD es la de brindarle al cerebro información confiable sobre las características espaciales (dimensiones) del lugar donde se producen los acontecimientos auditivos (en este caso, los cambios en la distancia de la fuente), con el fin de calibrar la información procedente de señales auditivas de PAD (en su mayoría relativas) para asignar un valor de distancia a la fuente de sonido dentro de este espacio.

### **3.12. Conclusiones**

La PAD ha recibido relativamente poca atención por parte de los investigadores en comparación con otros aspectos de la percepción auditiva del espacio. En general se ha explicado este hecho por la diferencia en la complejidad y cantidad de los indicios involucrados en cada caso. La PAD involucra información proveniente de un gran número de indicios muy variables dependientes tanto del estímulo sonoro como de las características del ambiente donde este se desarrolla. También influyen en la PAD factores cognitivos de alto nivel, como el conocimiento previo del estímulo o el conocimiento de las dimensiones del espacio donde se desarrolla el sonido.

Hemos visto que la mayoría de estas pistas necesitan algún tipo de referencia para ser efectivas. Por otro lado revisamos indicios que contienen información que nos permite estimar la distancia a una fuente sonora sin necesidad de compararlas con información previa. Este tipo de pistas, como por ejemplo la relación D/R, son conocidas como indicios absolutos de PAD. El cerebro utiliza, dependiendo de cada situación, la información proveniente de cada uno de estos indicios con el fin de estimar, lo más precisamente posible, la distancia a la que se encuentra la fuente de sonido. Sin embargo, muchos autores han reportado que, aun en presencia de múltiples pistas auditivas, la PAD dista de ser eficaz.

La gran mayoría de los estudios de PAD han reportado que la distancia a la fuente es fuertemente subestimada cuando se encuentra a más de 2 metros del oyente (Zahorik et al., 2005). La distancia donde comienza a producirse esta compresión se conoce comúnmente como *horizonte auditivo* (Bronkhorst y Houtgast, 1999; Zahorik, 2002). Se ha sugerido que el horizonte auditivo ocurre a distancias donde el campo acústico reverberante domina completamente el sonido directo. Sin embargo, los resultados obtenidos en los trabajos de Zahorik (2001) y Calcagno et al. (2012) indican que la distancia donde ocurre el horizonte auditivo depende también de factores que no están

relacionados con las características acústicas del ambiente. En Calcagno et al. (2012) se propone que esta mejoría se debe a que las claves visuales le brindan al participante información sobre el tamaño del recinto donde se desarrolla el experimento. Los autores sugieren que esta información ayuda a calibrar la información auditiva de distancia (en su mayoría relativa) para otorgarle a la fuente sonora una ubicación dentro de un espacio determinado. Sugieren además que no solamente el sistema visual puede brindar este tipo de información, ya que la reverberación también contiene indicios relacionados con el tamaño del recinto y que, por ende, ayudan a calibrar las demás pistas para que la respuesta esté asociada a un lugar específico.

Estos resultados abren un nuevo horizonte en el estudio de la PAD, debido a que la mayoría de los estudios en este tema se llevaron a cabo en la oscuridad y en ambientes desconocidos por los oyentes (en muchos casos, salas con tratamiento acústico). Quizás este cambio de paradigma dentro del estudio de la PAD pueda explicar el por qué de la subestimación histórica reportada por estudios anteriores. El hecho de que no existan muchos grupos en el mundo que estudien la PAD hace que el avance sobre el tema no sea tan exhaustivo como en otros campos. Además, como mencionamos repetidas veces en este texto, muchos de los resultados en esta área son contradictorios y en muchos casos los experimentos están realizados en condiciones experimentales muy disímiles.

Por estas razones nosotros consideramos esta área como un campo fértil para futuras investigaciones las cuales permitirán comprender mejor los mecanismos involucrados en la PAD.

### **3.13. Referencias bibliográficas**

Ashmead D. H., LeRoy D. y Odom R. D. Perception of the relative distances of nearby sound sources. *Perception & Psychophysics* 47, 326–331 (1990).

Ashmead, D.H., Davis, D. L., y Northington, A. Contribution of listeners' approaching motion to auditory distance perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 21, 239–256 (1995)

Begault, D. Preferred sound intensity increase for sensation of half distance. *Perceptual and Motor Skill* 71, 1019-1029 (1991).

Begault, D. R. Perceptual effects of synthetic reverberation on three-dimensional audio systems. *Journal of the Audio Engineering Society* 40, 895-904 (1992).

Békésy, von G. The moon illusion and similar auditory phenomena. *American Journal of Psychology*, 62, 540–552 (1949).

Békésy, von G. Über die Entstehung der Entfernungsempfindung beim Hören (On the origin of the sensation of distance in hearing). *Akustische Zeitschrift*, 3, 21-31 (1938).

Blauert J. *Spatial hearing* (rev. ed.). MIT Press, Cambridge, MA.

- Bronkhorst, A. W. y Houtgast, T. (1999). Auditory distance perception in rooms. *Nature*, 397, 517-520 (1997).
- Brungart, D. S. Auditory localization of nearby sources. *Journal of Acoustical Society of America* 106(6), 3589-602 (1999).
- Brungart, D. S. Auditory parallax effects in the hrtf for nearby sources. *Proceedings of the 1999 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 171–174 (1999).
- Brungart, D. S. y Rabinowitz, W. M. Auditory localization of nearby sources I: Head-related transfer functions. *Journal of Acoustical Society of America* **106**, 1465- 1479 (1999).
- Brungart, D. S. y Scott, K. R. The effects of production and presentation level on the auditory distance perception of speech. *Journal of Acoustical Society of America* **110**, 425–440 (2001).
- Brungart, D. S., y Scott, K. R. The effects of production and presentation level on the auditory distance perception of speech. *The Journal of the Acoustical Society of America* 110, 425–440 (2001).
- Butler, R. A., Levy, E. T. y Neff, W. D. Apparent distance of sounds recorded in echoic and anechoic chambers. *The Journal of Experimental Psychology* 6, 745–750 (1980).
- Cabrera D., Azzali A., Capra A., Farina A., Martignon Perceived room size and source distance in five simulated concert auditoria. 12th International Congress on Sound and Vibration Lisbon, Portugal (2006).
- Calcagno E. R., Abregu E, L., Eguía M. C. y Vergara R. O. The Role of Vision in Auditory Distance Perception. *Perception*, 41(2) 175–192 (2012).
- Coleman, P. D. Failure to localize the source distance of an unfamiliar sound. *Journal of Acoustical Society of America* 34, 345–346 (1962).
- Coleman, P. D. An analysis of cues to auditory depth perception in free space. *Psychological Bulletin*, 60, 302–315 (1963).
- Coleman, P. D. Dual role of frequency spectrum in determination of auditory distance. *Journal of Acoustical Society of America* 44, 631–634 (1968).
- Edwards, A. S. Accuracy of auditory depth perception. *The Journal of General Psychology* 52, 327–329 (1955).
- Gamble, E. A. Intensity as a criterion in estimating the distance of sounds. *Psychological Review* 16, 416–426 (1909).
- Gardner, M. B. Proximity image effect in sound localization. *Journal of Acoustical Society of America* 43, 163 (1968).
- Gardner, M. B. Distance estimation of 0 degrees or apparent 0 degree-oriented speech signals in anechoic space. *Journal of Acoustical Society of America* 45, 47–53 (1969).
- Ingard, U. A. review of the influence of meteorological conditions on sound propagation. *Journal of Acoustical Society of America* 25, 405–411 (1953).
- King, A. J. Visual influences on auditory spatial learning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 364, 331-339 (2009).

- Lewald, J. Exceptional ability of blind humans to hear sound motion: Implications for the emergence of auditory space. *Neuropsychologia* 51, 181–186 (2013).
- Lienard, J. S. y Benedetto, M. G. D. Effect of vocal effort on spectral properties of vowels. *Journal of Acoustical Society of America* 106, 411–422 (1999).
- Little, A. D., Mershon, D. H. y Cox P. H. Spectral content as a cue to perceived auditory distance. *Perception* 21, 405–416 (1992).
- Lokki, T. y Pätynen J. Lateral reflections are favorable in concert halls due to binaural loudness. *Journal of Acoustical Society of America*, 130 (5), EL345-EL351 (2011).
- Lokki, T., Pätynen J., Tervo, S., Siltanen, S. y Savioja, L. Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. *Journal of Acoustical Society of America* 129, EL223–EL228 (2011).
- Mershon D. H., Desaulniers D. H., Amerson T. L. Kiefer S. A. Visual capture in auditory distance perception: proximity image effect reconsidered. *Journal of Auditory Research* 20, 129-136 (1980).
- Mershon D. H. y Bowers J. N. Absolute and relative cues for the auditory perception of egocentric distance. *Perception*, 8, 311-322 (1979).
- Mershon D. H., Ballenger W. L, Little A. D., McMurtry P. L. y Buchanan, J. L. Effects of room reflectance and background noise on perceived auditory distance. *Perception* 18, 403-416 (1989).
- Mershon, D. H. y King, L. Intensity and reverberation as factors in the auditory perception of egocentric distance. *Perception y Psychophysics* 18, 409-415 (1975).
- Middlebrooks J. C. y Green D. M. Sound Localization by Human Listeners. *Annual Review of Psychology* 42, 135-159 (1991).
- Nielsen, S. H. Auditory distance perception in different rooms. *Journal of the Audio Engineering Society* 41, 755-770. (1993).
- Nyborg, W., Mintzer, D. Review of sound propagation in the lower atmosphere. U.S. Air Force WADA Tech. Rept 54–60 (1955).
- Otani, M., Hirahara T. Numerical study on source-distance dependency of head-related transfer functions. *Journal of Acoustical Society of America* 125 (5), 3253-3261 (2009).
- Perrott, D. R., Saberi, K., Brown, K., y Strybel, T. Z. Auditory psychomotor coordination and visual search performance. *Perception y Psychophysics* 48, 214–226 (1990).
- Radeau M., Bertelson P. The after-effects of ventriloquism. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 26, 63-71 (1974).
- Recanzone, G. H. Rapidly induced auditory plasticity: the ventriloquism aftereffect. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 95, 869-875 (1998).
- Jesteadt, W., Luce, R. D., y Green, D. M. Sequential effects in judgments of loudness. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 3, 92- 104 (1977).

Sheeline C. W. An investigation of the effects of direct and reverberant signal interaction on auditory distance perception. Ph.D. Dissertation Department of Hearing and Speech Sciences, Stanford University (1984).

Shelton B. R., Searle C. L. The influence of vision on the absolute identification of sound-source position. *Perception & Psychophysics* 28, 589-596 (1980).

Shinn-Cunningham B. G. Learning reverberation: Considerations for spatial auditory displays. In *Proceedings of the 2000 International Conference on Auditory Displays Atlanta* (2000).

Simpson, W. E. y Stanton, L. D. Head movement does not facilitate perception of the distance of a source of sound. *American Journal of Psychology* 86, 151–159 (1973).

Speigle, J. M. y Loomis, J. M. Auditory distance perception by translating observers. Paper presented at the IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality, Washington DC (1993).

Spiousas I., Etchemendy P., Eguía M. C., Calcagno E. R., Abregú E y Vergara R. O. Sound spectrum influences auditory distance perception of sound sources located in a room environment. *Frontiers in Psychology* doi: 10.3389/fpsyg. (2017).

Stein, B. E., Meredith, M. A., Huneycutt, W. S. y McDade, L. Behavioral indices of multisensory integration: Orientation to visual cues is affected by auditory stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience* 1, 12- 24 (1989).

Stevens, S. S. y Guirao, M. Loudness, reciprocity and partition scales. *Journal of Acoustical Society of America* 34, 1466– 1471 (1962).

Strybel, T. Z. y Perrott, D. R. Discrimination of relative distance in the auditory modality: The success and failure of the loudness discrimination hypothesis. *Journal of Acoustical Society of America* 76, 318–320 (1984).

Traunmüller, H., y Eriksson, A. Acoustic effects of variation in vocal effort by men, women, and children. *Journal of Acoustical Society of America* 107, 3438–3451 (2000).

Vergara, R. O., Calcagno E. y Eguía M. C. The role of spectral cues and minimum bandwidth in the auditory perception of distance. *The Journal of the Acoustical Society of America* 128(4), 2455 (2010).

Von Békésy, G. The structure of the middle ear and the hearing of one's own voice by bone conduction. *Journal of Acoustical Society of America*. 21, 217-232 (1949).

Warren, R. M. A basis for judgments of sensory intensity. *American Journal of Psychology*, 71, 675–687 (1958).

Wenzel, E. M., Arruda, M., Kistler, D. J. y Wightman, F. L. Localization using nonindividualized head-related transfer functions. *Journal of Acoustical Society of America* 94, 111–123 (1993).

Wisniewski, M. G., Mercado, E., Gramann, K., y Makeig, S. Familiarity with speech affects cortical processing of auditory distance cues and increases acuity. *PLoS One* 7, e41025 (2012).

Zahorik P., Brungart D. S. y Bronkhorst A. W. Auditory Distance Perception in Humans: A Summary of Past and Present Research. *Acta Acustica united with Acustica* 91, 409-420 (2005).

Zahorik, P. Experiments in Auditory Distance Perception. Ph.D. thesis, University of Wisconsin—Madison (1998).

Zahorik, P. Estimating sound source distance with and without vision. *Optometry y Vision Science* 78, 270-275 (2001).

Zahorik, P. Assessing auditory distance perception using virtual acoustics. *Journal of Acoustical Society of America*, 111, 1832-1846 (2002).

Zahorik, P. Auditory display of sound source distance. *Proceedings of the 8th International Conference on Auditory*. Kyoto, Japan, 239–243 (2002).

## **4. LA DISTANCIA COMO DIMENSIÓN ESTRUCTURAL EN LA MÚSICA**

### **4.1. Introducción**

El presente capítulo trata sobre el manejo del espacio sonoro en la música. Específicamente es revisado el plano auditivo de distancia y su relación con la composición musical tanto instrumental como electroacústica. En primera instancia se hará una revisión de algunas estrategias utilizadas por distintos compositores para simular la ubicación de fuentes sonoras en el plano de distancia tanto en ambientes reales como virtuales. Además, desarrollamos conceptos sobre la creación del espacio sonoro a través de múltiples capas sonoras, como también mediante la utilización de fuentes fijas de referencia.

El objetivo de este capítulo es dar un panorama general sobre las herramientas compositivas utilizadas en el manejo de la distancia auditiva como factor estructural del discurso musical. Intentaremos entonces establecer una correspondencia plausible entre la utilización de la distancia en la música y los estudios perceptivos referidos a la misma. Advirtiendo que la bibliografía en este campo de estudio es escasa a nivel internacional, y prácticamente nula a nivel local, intentaremos dar un panorama general sobre el estado actual del tema, indagando en la interrelación entre música y ciencia con respecto al campo menos estudiado en la percepción del espacio sonoro: la Percepción Auditiva de Distancia (PAD).

### **4.2. Música y distancia**

Como se expuso en el Capítulo 3, el trabajo experimental presenta la gran ventaja de poder aislar una característica del sonido determinada para focalizar el estudio sobre la misma. Como veremos a continuación, esto es algo que difícilmente encontraremos en el campo de la música instrumental, dado que las pistas involucradas en PAD se encuentran interrelacionadas de forma tal que es muy difícil manipular una sin involucrar a la demás. La creación de la Perspectiva Auditiva (la ubicación de las fuentes sonoras en distancia) se presenta como un rasgo de especial atención en la música debido a que la localización de fuentes sonoras en un espacio real, o imaginario, es considerado como un elemento compositivo estructural. La perspectiva auditiva en la música intenta disparar la imaginación creando un espacio sonoro concreto mediante instrumentos, auriculares o parlantes. Este hecho se presenta de forma análoga a lo que ocurre con la perspectiva visual, en donde se construye la ilusión de un espacio tridimensional desde uno bidimensional.

Un recurso compositivo drástico, utilizado para generar diferentes planos de profundidad en la música, es manipular directamente la distancia entre la fuente y el

espectador, lo cual afecta de manera coherente a una gran cantidad de indicios de PAD. Un ejemplo de esto son las obras de la Escuela Veneciana del siglo XVII, en la cual los compositores variaron directamente la distancia entre grupos corales para generar diferentes planos sonoros. Es el caso de los salmos de Willaert a ocho voces, uno de los más tempranos ejemplos (1550) de efectos de “eco distante” mediante el contraste de intensidad entre los grupos corales. Otro caso célebre es el tercer movimiento, de la *Sinfonía Fantástica* de Berlioz (1830) (Fig. 4.1) en donde un dueto pastoral imaginario se presenta con el corno inglés en escena y con el oboe fuera del escenario.

The image shows a musical score for two instruments: Oboe and Corno Inglés (English Horn). The tempo is marked 'Adagio' with a quarter note equal to 84. The time signature is 6/8. The Oboe part is marked 'fuera de escena' and begins in the third measure with a melodic line. The Corno Inglés part is marked 'p' and plays a rhythmic accompaniment. The score shows the first four measures of the passage.

**Figura 4.1:** El oboe fuera de escena implica varios indicios de PAD. *Sinfonía Fantástica*, 3º movimiento (Berlioz, 1830).

En este caso, el compositor genera diferentes planos sonoros manipulando directamente la distancia entre los instrumentos. Obviamente, el efecto que se produce es llamativo dado que están involucrados una multiplicidad de indicios claves de PAD. Por un lado, al emitirse fuera del escenario, el sonido que llega al oyente proveniente del oboe no es el directo sino el proveniente de las reflexiones. Al mismo tiempo, el filtrado que producen las paredes de la sala y otras superficies absorbentes producen un cambio espectral lo suficientemente convincente para que el oyente perciba una imagen auditiva distante. Sumado a esto, el hecho de que el espectador no vea la fuente genera en éste una contradicción: el sonido del oboe se escucha “en la sala”, pero no se puede ver la localización de la fuente. Esto, sumado a los demás cambios antes nombrados, contribuye a enfatizar la sensación de lejanía. Un ejemplo similar es el efecto de “llamado” de trompeta distante de Fidelio, en la Obertura de Leonora N° 3 (Op. 72) compuesta por Beethoven en 1806. En este pasaje, no es suficiente que el instrumentista toque suavemente (menor intensidad) para simular un aumento en la distancia de la fuente, sino que debe ubicarse a cierta distancia de los cantantes y la orquesta con el fin de que la trompeta adquiriera el timbre deseado.

Ya dijimos que los recursos antes nombrados son drásticos debido a que el efecto de profundidad se logra variando directamente la distancia de la fuente sonora. Por otro lado, históricamente en la música se han implementado una variedad de técnicas compositivas para simular cambios de profundidad desde fuentes fijas. Las primeras herramientas

utilizadas para generar diferentes planos de profundidad desde fuentes fijas (los diferentes instrumentos de la orquesta) fueron: el control de la dinámica (inherente al estilo del período barroco), y el manejo de las posibilidades tímbricas instrumentales. Esto se implementó mediante técnicas sencillas, como la reducción o multiplicación del número de instrumentos y la regulación del desarrollo dinámico de un evento musical.

Dijimos antes que un indicio obvio en PAD es la relación entre la intensidad y la distancia a la fuente sonora. No sorprende entonces que los cambios en la dinámica hayan sido un recurso muy utilizado para simular distancia. La intensidad en la música instrumental básicamente se implementa a través de la dinámica, las articulaciones y el fraseo. La dinámica se encuentra estrechamente relacionada con la intensidad (objetiva) y sonoridad (subjetiva) del sonido, mientras que la articulación y el fraseo afectan a la envolvente dinámica global. Dada esta característica, podemos observar que, a diferencia del material sonoro involucrado en los experimentos de laboratorio, en un contexto musical la dinámica es altamente dependiente de la subjetividad, la interpretación del instrumentista y el contexto musical.

La precisión en la escritura de dinámicas y articulaciones no apareció hasta el siglo XVIII, en donde encontramos un abanico de indicaciones más amplio que un simple contraste entre *p* y *f*. De ahí en más, las intensidades del fraseo musical fueron evolucionando desde una simple escala de valores relativos entre *ppp* a *fff*, pasando por las complejidades racionales del serialismo integral, hasta la escritura analógica más inclinada a la medición de la intensidad física. De esta manera, el desarrollo de la dinámica en la música se ha convertido de un simple (aunque efectivo) factor de contraste a un campo técnico y expresivo que abarca más de una dimensión musical: la dinámica musical también implica aspectos estéticos, expresivos y compositivos.

Como mencionamos antes, la evolución en el uso de la dinámica en la música se ha desarrollado en función de las diferentes necesidades expresivas y estéticas. A continuación veremos que el uso de la dinámica también se ha expandido a otros campos, en particular al del espacio sonoro.

En la música instrumental la utilización de la intensidad se encuentra correlacionada con el cambio de la envolvente espectral. Esta característica, inherente a los instrumentos acústicos, presenta un fuerte vínculo con el alejamiento o acercamiento de la fuente sonora. Por citar un ejemplo didáctico, si un violín se toca fuerte aumentará tanto la intensidad como la magnitud de los componentes en alta frecuencia de la señal, incluso con la utilización de sordina. En cambio, si toca suavemente los componentes de alta frecuencia serán atenuados. Este hecho, aunque parezca obvio, determina drásticamente la ubicación aparente de la fuente en el espacio sonoro (recordemos que, al igual que la pérdida de intensidad, una baja en el componente de altas frecuencias está relacionado con un aumento en la distancia a la fuente) y puede ser incrementado aún más si es

combinado con la ubicación espacial del instrumentista. En este ejemplo podemos apreciar como la utilización de un recurso simple (variar la dinámica de la ejecución) genera información relacionada con la ubicación aparente de la fuente en distancia a través del control sobre indicios diferentes de la PAD. Esto representa una correspondencia directa con los experimentos realizados en laboratorio, en donde se ha demostrado que los cambios espectrales de la señal sonora a una misma distancia tienen un fuerte impacto sobre la PAD.

En los instrumentos acústicos, los cambios espectrales (o sea, tímbricos) se producen mediante distintos modificadores y técnicas de ejecución. Dado el gran avance de los recursos instrumentales desarrollados hasta la actualidad, la modificación espectral del sonido emitido por instrumentos acústicos se ha expandido hasta límites insospechados hace unos 60 años. Por nombrar un modificador tímbrico elemental, podemos observar que para casi todos los instrumentos de la orquesta sinfónica moderna existe al menos un tipo específico de sordina. Como ya es sabido, con este recurso, el timbre “natural” del instrumento es modificado atenuando mayormente las frecuencias más altas del espectro, otorgando al sonido una cualidad más velada. El uso de este tipo de técnica actúa significativamente sobre el espectro general del instrumento. La atenuación en altas frecuencias producido por el uso de la sordina evoca al indicio de absorción causada por el aire cuando la fuente se encuentra a una distancia considerable. Además, como mencionamos previamente, estos dispositivos causan una disminución en la intensidad global del sonido, lo cual representa otro indicio importante en la PAD.

Los modificadores y las técnicas instrumentales poseen la cualidad de ser efectuados con diverso grado de control, dependiendo del registro, el tipo de técnica y las posibilidades de cada instrumentista. Mediante la combinación e interacción de los factores mencionados, a través de la historia de la música han surgido técnicas de modificación tímbrica para simular distancia de manera efectiva. Un claro ejemplo de lo antedicho lo podemos encontrar en el segundo movimiento la obra de Rimsky-Kórsakov llamada *Capricho Español* (1887), en donde de los sonidos naturales del corno se suceden con los “*bouchés*” (Fig. 4.2). En el siguiente pasaje es notable como una fuente fija, representada por el corno, puede generar el efecto de distancia modificando sólo el timbre y la intensidad.

Andante con moto ♩ = 112

The image shows a musical score for the second movement of 'Capriccio Español' by Rimsky-Kórsakov. The tempo is 'Andante con moto' with a metronome marking of 112. The score is in 3/8 time and B-flat major. The instruments are Corno en F, Violin I, Violin II, Viola, Violoncello, and Contrabass. The French horn part has a melodic line with a triplet and a section marked 'bouchés' (p). The string parts are marked 'pp'.

**Figura 4.2:** Uso de sonidos *bouchés* en el corno francés como modificador tímbrico para simular distancia a la fuente. *Capriccio Español*, 2º movimiento (Rimsky-Kórsakov, 1887).

Como vimos anteriormente, Spiouzas (2017) demostró que los sonidos espectralmente complejos son más sencillos de ubicar en distancia que los de espectro simple. Las características espectrales en el ámbito instrumental presentan resultados perceptivos similares a los descritos por Spiouzas. Dado que la PAD es dependiente no solo de la frecuencia sino también del ancho de banda, la utilización de timbres análogos a los tonos puros sinusoidales o de banda angosta (como los armónicos en los instrumentos de cuerda) puede resultar con mayor grado de ubicuidad que los instrumentos que presentan un ancho de banda más amplio, como puede ser el caso de un platillo. Como veremos más adelante, esta característica es de utilidad cuando se requiere estructurar la textura en diversos estratos distribuidos en el plano de la distancia. Es decir, desde este punto de vista sería contradictorio superponer en distancia diferentes estratos con sonidos de espectro simple dada la ubicuidad característica de los mismos.

Es notable la manera en que nuestro sistema perceptivo parece intentar otorgarle algún tipo de forma física a materiales que no los son. Los sonidos musicales claramente tonales sugieren formas regulares y simples, y los sonidos ruidosos indican formas más complicadas, pero incluso esta relación se mantiene sólo en los casos en que el objeto de

origen es idéntico o muy aliado con el sonido real productor. De esta manera podemos inferir que una vaga idea deriva de una forma de una fuente no-familiar dada su falta de representación mediante un significado. Stockhausen (1989) menciona la siguiente experiencia: *“si alguien susurra al oído muy suavemente solemos asociarlo con cercanía, a pesar de que el sonido posea una amplitud alta. En cambio, si escuchamos un trueno que está ocurriendo a más de 10 kilómetros lo asociamos con lejanía. Ambos sonidos poseen la misma amplitud, pero se perciben espacialmente de forma radicalmente distintas”*. Es aquí donde observamos que la PAD está determinada no solo por la información que brindan los indicios antes mencionados sino, además, por el conocimiento previo del estímulo. Tomando en cuenta los estudios psicofísicos de PAD podemos suponer que resultará más sencillo generar diferentes estratos en distancia utilizando sonidos conocidos que sonidos desconocidos, ya que estos últimos son más difíciles de ubicar en el eje de la distancia.

#### **4.3. La percepción de distancia en la música electroacústica**

A diferencia de lo que ocurre con la música instrumental, en la música electroacústica los compositores no están limitados a fuentes sonoras pre- existentes. Esta particularidad otorga a los compositores la posibilidad de diseñar sonidos que den soporte específico a la espacialidad musical. Pero también pueden explorar ámbitos acústicos que sugieran derribar la validez física del espacio sonoro. Cuando una música es tocada, con instrumentos acústicos en una sala real, nos ofrece una variedad de pistas a nivel físico tanto visuales como acústicas, las cuales permiten que el oyente genere una experiencia espacial sobre el mundo físico. En la música electroacústica, la experiencia ante los fenómenos que se producen en un espacio acústico real ha sido uno de los puntos centrales de estudio, pero la tecnología de reproducción multicanal amplía de una manera radical el alcance y la complejidad de la espacialidad generada. Es por eso que uno de los aspectos más importantes que diferencian a la música electroacústica de la acústica es el rango expandido de su paleta espacial, determinada por la interacción entre la tecnología y la respuesta del oyente. Sin embargo, esta característica en ocasiones se presenta como una desventaja: la descripción física de los indicios en un entorno acústico virtual provee sólo una precaria guía para generar una imagen auditiva en el oyente, dada la esencia inmaterial de la música emanada mediante parlantes.

En el campo de la música por computadora, la mayoría de las investigaciones concernientes a la percepción auditiva del espacio sonoro pueden encontrarse en dos líneas de estudio: 1) la investigación sobre la percepción y la cognición en la audición espacial y 2) la investigación aplicada sobre la reproducción sonora. Con esta tecnología, los compositores pudieron controlar, a diferencia de lo que ocurre en el ámbito

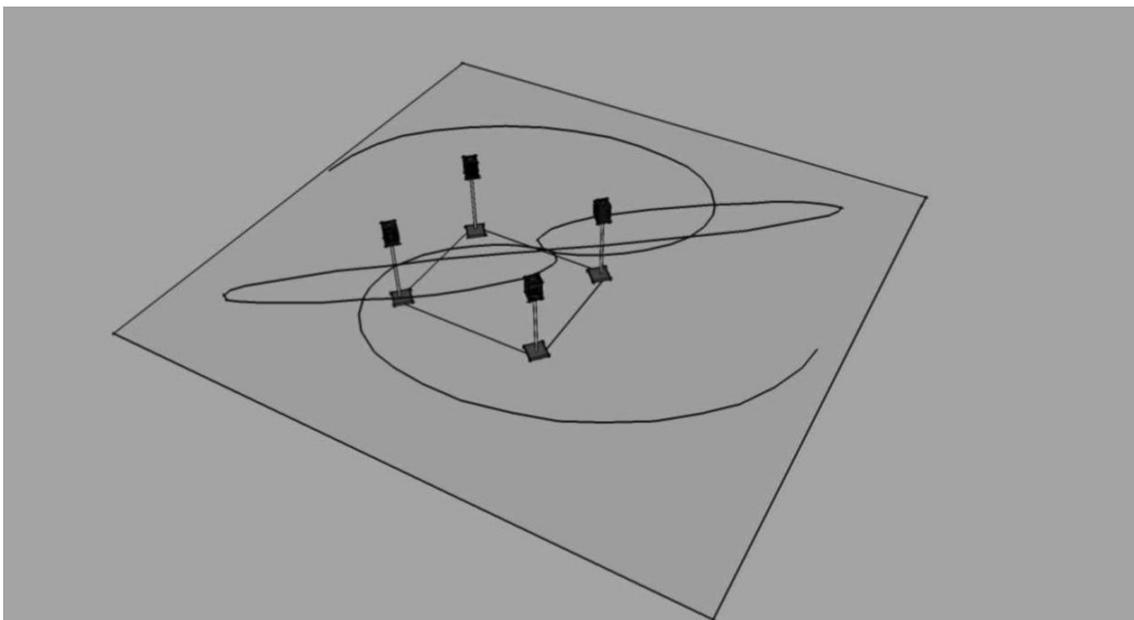
instrumental, diferentes indicios espaciales de manera aislada. Esto les permitió a los compositores hacer del espacio sonoro un parámetro controlable aunque, a la fecha, con resultados efectivos muy variables. Sin dudas es en este ámbito donde se produce el mayor cruce entre los estudios psicofísicos, las técnicas de espacialización y el imaginario compositivo.

Un ejemplo de la especificidad del manejo de los indicios de la PAD en la música electroacústica es el control de la intensidad. A diferencia de la música instrumental, la utilización de la tecnología en la música electroacústica le permite al compositor, mediante un software, modificar la amplitud de la señal de la fuente virtual de manera proporcional a la distancia entre ésta y el oyente sin afectar otros indicios de distancia. Esto muestra un correlato directo entre las investigaciones psicofísicas referentes a la intensidad del sonido en distancia. Para ejemplificar lo antedicho, podemos citar el modelo aplicado por John Chowning en *Turenas* (1972) en donde implementa un sistema cuadrafónico (cuatro parlantes) para simular un espacio sonoro determinado mediante un modelo matemático. Este modelo utiliza un multiplicador de intensidad que actúa de acuerdo a la ley del cuadrado inverso de manera independientemente en cada canal dependiendo de las diferentes posiciones de la fuente. Este tipo de procedimiento es uno de los más difundidos para simular la ubicación y desplazamiento de una fuente sonora en el espacio auditivo. Mediante el desplazamiento de esta “fuente fantasma” en el eje horizontal y de distancia es posible obtener una gran cantidad de trayectorias. Por citar un ejemplo célebre, en el libro de Wishard (1995) *On Sonic Art*, encontramos diagramas y esquemas de posibles gestos espaciales bidimensionales. Sin embargo, debemos advertir que muchas de las trayectorias planteadas por Wishard pueden ser prácticamente indistinguibles entre sí: no es lo mismo diagramar visualmente una trayectoria que escucharla. Un clásico ejemplo es la trayectoria basada en curvas de Lissajous que cumple un rol fundamental en *Turenas*. Chowning concluyó que la trayectoria de la “fuente fantasma” era mucho más convincente tomando como referencia curvas simples, claras y bien estructuradas para lograr trayectorias que puedan ser percibidas y así robustecer la dinámica espacial del discurso musical. En la Figura 4.3 mostramos el movimiento de *Turenas* como un ejemplo clásico de una trayectoria compleja en el eje horizontal y de profundidad utilizando figuras basadas en las curvas de Lissajous.

Desde mediados del siglo XX se han desarrollado sistemas de espacialización del sonido para simular un determinado espacio acústico mediante parlantes. Ejemplos de sistema de espacialización renombrados pueden ser Intensity Panning, Ambisonic y Dolby 5.1. No es el objetivo de este capítulo profundizar en estos sistemas, ya que existe excelente bibliografía a nivel internacional y local (Basso et al., 2009) que trata el tema de forma exhaustiva. Desde el punto de vista de la implementación técnica, el espacio musical electroacústico tiene efectividad solo si podemos percibir de manera evidente las

características sonoras del espacio real o imaginario como estructura. Dicha estructura puede basarse, entre otros factores, en el tipo de reverberación que genera un espacio dado. En la música sinfónica, por ejemplo, gran parte del problema ya viene resuelto de antemano dado que el trabajo compositivo utilizando los instrumentos de orquesta presenta una espacialidad en sí misma. Salvo que los instrumentos acústicos se muevan en el recinto, son muy pocas las veces en las que podemos modificar la relación entre el sonido directo de los instrumentos y las reflexiones de la sala.

Por el contrario, al trabajar en un espacio virtual es necesario generar la reverberación del entorno acústico imaginario donde los acontecimientos sonoros acontecen. A diferencia de lo que ocurre con la reverberación de una sala real, en donde los factores que afectan a la misma no cambian en el tiempo, en el espacio electroacústico la reverberación adquiere mayor plasticidad. Esto habilita a generar distintos espacios de características diferentes los cuales pueden actuar como entidades compositivas independientes. Dicho esto, podemos inferir que en la música electroacústica podría ser necesario crear un espacio propio, que no viene dado solamente por los objetos sonoros como sí ocurre con los instrumentos acústicos. Además de la reverberación general de una sala, las herramientas actuales nos permiten manipular la relación D/R con cierta facilidad.

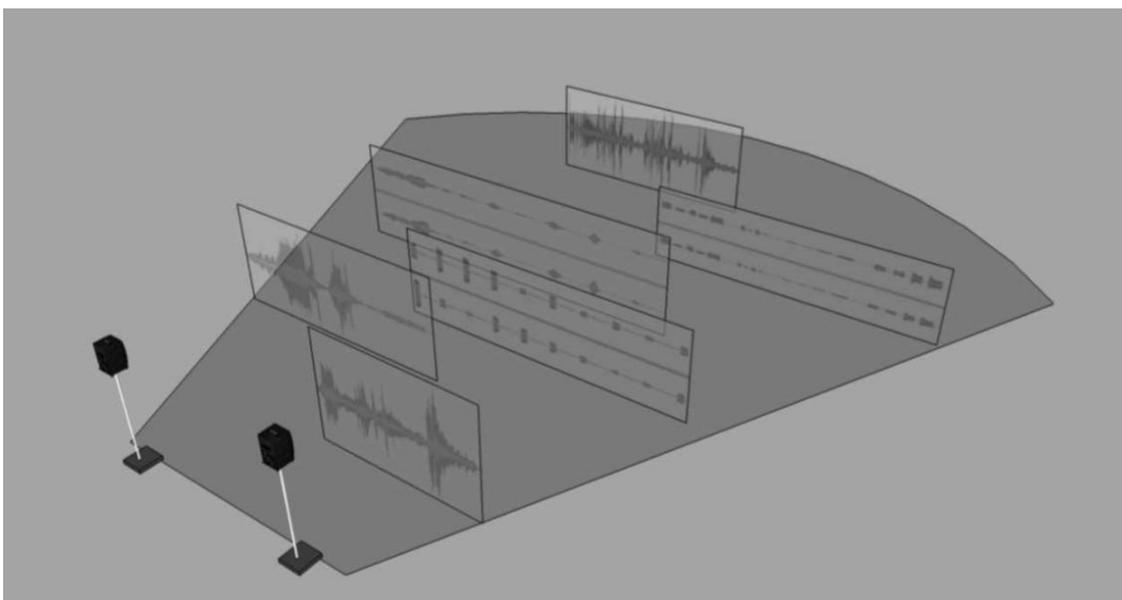


**Figura 4.3:** *Movimiento espacial complejo en el eje horizontal y de distancia (Turenas, Chowning, 1975).*

#### **4.4. Distancia en el espacio real e imaginario**

La percepción espacial, tanto visual como auditiva, nos permite ubicar objetos en el mundo real, el cual nos brinda una multiplicidad enorme de referencias que nos ayudan a ubicar los objetos, visuales y sonoros, en relación a ellas. Por el contrario, en la música es necesario construir un espacio que en la mayoría de los casos es imaginario, para luego poder operar sobre el mismo.

En el ámbito de la música instrumental, cuando un compositor trabaja con la idea de gradiente, profundidad, contorno y marco, la orquesta se presenta como un orgánico instrumental que contiene lugares fijos los cuales permiten trabajar con ideas de ampliaciones espaciales que involucran distancia y perspectiva auditiva. En este caso las posiciones, que están determinadas por la ubicación instrumental, están enmarcadas y fijadas por nuestra memoria construyendo un espacio previamente configurado. En 1971, Stockhausen (1971) plantea la idea de “*composición espacial multi-capa*” (Fig. 4.4), invitando a la reflexión sobre el espacio más allá de los sonidos que acontecen alrededor del oyente a una distancia fija. Stockhausen parece no sobreestimar la técnica de composición espacial multi-capa ya que advierte que la misma se encuentra limitada por nuestra percepción. En analogía con lo que ocurre con la melodía y armonía en el plano bidimensional de la música tradicional, la construcción de una profundidad espacial por la superposición de capas habilita la idea de establecer una perspectiva auditiva en el espacio tridimensional.



**Figura 4.4:** Técnica de composición multi-capa en el campo estéreo planteada por Stockhausen.

Un ejemplo claro en el que el espacio se presenta como un factor fundamental del discurso musical es *Cristal Argentó* (2011), del compositor argentino Oscar Edelstein. El autor comenta sobre su obra:

*“En Cristal Argentó el trabajo con las “distancias” interválicas e instrumentales consiste en: a) uso de las distancias objetivas o reales existentes entre las diversas fuentes fijas instrumentales para la generación de otras formas y estructuras con volumen, b) las fórmulas que detallan los tipos y grados de conexiones posibles entre esas fuentes fijas (uso de conectores entre instrumentos y grupos) c) estudio de las distancias perceptivas -imaginarias- que conlleva el uso de diferentes intervalos de altura, timbre y tiempo, como también la consideración en escala de los intervalos musicales clásicos para el diseño de armonías y texturas, en consideración a las distancias entre grupos, c) las modificaciones en el volumen y peso sonoro (entendido también como densidad) ya sea en el tratamiento del “grosor” de las líneas o la profundidad de los bloques.”*

Edelstein parte desde una idea emparentada con las capas múltiples de Stockhausen pero introduce el concepto de fuentes fijas como factor fundamental para generar el marco (el espacio) donde transcurre el discurso sonoro. Edelstein propone una teoría basada en dos ideas fundamentales (Eguía y Edelstein, 2007):

1. Sin fuentes fijas de referencia no hay espacio en el sentido constructivo.

2. Toda distancia puede ser considerada como un intervalo y de allí adaptada a una escala que interprete a los campos provenientes de lo real, lo imaginario y lo simbólico.

Edelstein plantea dos grandes campos para construir (o imaginar, pensar, nombrar y cifrar) al espacio musical: el Posicional, o Teatral, ligado a las fuentes fijas de emisión y la experiencia en la escena, y el Abstracto, considerado como la resultante de los diseños de movimientos entre fuentes diversas, la generación de texturas, estructuras o discursos en un entorno creado.

Esta teoría es otro ejemplo de cómo las herramientas musicales surgidas de conocimientos empíricos se relacionan con la percepción del espacio en el mundo real. La percepción de distancia, tanto en la modalidad visual como en la auditiva, ha demostrado que, para que podamos percibir la ubicación de un objeto a cierta distancia, es necesaria la presencia de múltiples indicios relacionados con el espacio donde los objetos están ubicados.

De manera similar, cuando existen en la música puntos de referencia estructuralmente bien definidos, el espacio cobra sentido en nuestra percepción como un marco contenedor del relato sonoro. Pero cuando los puntos de referencia adquieren un carácter más abstracto, la construcción del marco no es tan sencilla. El solo hecho de trabajar con un material musical implica intrínsecamente un espacio y una distancia. Si las fuentes se encuentran situadas en lugares estratégicos, surge que el manejo de la perspectiva auditiva y la distancia es mucho más claro. Es claro para el compositor, pero sobre todo es mucho más claro para el oyente. Según Edelstein *“las posiciones fijas no solo cubren el rol de determinar un espacio acústico imaginario sino que establecen lazos con las posiciones fijas históricas, como lo son los instrumentos de la orquesta. Es decir, en las posiciones fijas está la historia de la música”*.

#### 4.5. Conclusiones

En el panorama musical contemporáneo la concepción del espacio musical representa una importante dimensión estructural. En la música, el espacio sonoro se manifiesta mediante dimensiones poéticas, estéticas y expresivas, aunque queda claro que para construir espacialidad de manera plausible también es necesario recurrir a nuestra percepción del mundo real.

En el ámbito de la música instrumental, los compositores históricamente han utilizado distintas técnicas para generar distancia en el espacio sonoro. Dichas técnicas, surgidas principalmente de la experiencia de los compositores, se enfocaron en el control de diferentes cualidades acústicas del sonido, las cuales fueron postuladas años después por la psicoacústica experimental como importantes indicios de PAD. Sin embargo, al trabajar con instrumentos acústicos, resulta extremadamente complicado manipular de manera aislada los indicios involucrados en la PAD. Por ejemplo, cuando un instrumentista realiza cambios en la ejecución con el fin de producir modificaciones en la intensidad del sonido se producen inevitables variaciones en el contenido espectral del mismo (en ambos casos se trata de importantes indicios de PAD).

Un caso muy diferente es el de la música electroacústica, en donde las herramientas tecnológicas actuales posibilitan abordar algunos de los indicios involucrados en la PAD de manera independiente y controlada. Esto permite construir un contenedor en el cual ocurren interacciones particularmente complejas entre la audición espacial y otros campos de la percepción auditiva. Sin embargo, más allá de los últimos avances de los sistemas de espacialización del sonido, la utilización de la distancia en la música electroacústica dista mucho de estar resuelta. El escalamiento de la intensidad, la simulación del filtrado de la señal en función de la distancia y la aplicación de reverberación artificial parecen no alcanzar para generar una imagen acústica convincente en distancia. Hemos visto a lo largo de este trabajo que factores importantes como la calidad espectral del sonido, el conocimiento previo de las fuentes sonoras y la relación con la información provista por la modalidad visual pueden influir de manera contundente en la PAD. El conocimiento de este tipo de información facilitaría la tarea del compositor a la hora de simular la ubicación de una fuente sonora a una distancia determinada o realizar transiciones espaciales de una manera más sutil. De acuerdo a lo antedicho, sería muy beneficioso clasificar los timbres utilizados tanto en una orquesta sinfónica como en la música electroacústica de acuerdo al grado de ubicuidad. Un ejemplo claro sería la relación entre la ubicuidad de una fuente en distancia y el ancho de banda del sonido que esta emite. Por ejemplo, sería contradictorio otorgarle una ubicación específica en el eje de distancia a una fuente sonora que emita sonidos espectralmente simples, similares a tonos puros, ya que hemos visto que éste tipo de sonidos no son fáciles de ubicar en distancia.

Por otro lado, experimentos de PAD, tanto en la modalidad visual como en la auditiva, han demostrado que para percibir correctamente la distancia a un objeto es relevante conocer las dimensiones del lugar donde ocurren los acontecimientos sonoros y visuales. La utilización de la reverberación artificial para simular una sala determinada es un claro ejemplo de cómo un indicio acústico puede darnos información sobre el tamaño de un recinto, lo cual tiene un fuerte impacto sobre la PAD. Como dijimos anteriormente, el oído funciona actuando conjuntamente con el sentido de la vista. Se ha demostrado de manera contundente el grado de incidencia que posee la visión sobre nuestra percepción del espacio acústico (Calcagno, 2012). Podemos observar así que la PAD puede variar en función de la presencia, ausencia, saturación, escasez y ubicación de las pistas visuales. Conociendo este hecho, inferimos que esta característica no es ajena al ámbito musical. Pensar en el concepto de perspectiva visual y auditiva nos posibilita concebir un espacio musical híbrido, en el cual no solo operen fuentes sonoras fijas sino también distintas pistas visuales que afectan directamente la estructura musical en el espacio.

Hemos visto que la PAD involucra una variedad de indicios acústicos y no-acústicos que pueden afectar de manera importante el manejo del espacio en la música. Sin embargo, aunque existan distintas técnicas instrumentales y electroacústicas para simular profundidad en el espacio musical, el tratamiento de la distancia como factor estructural en la música dista mucho de estar resuelto. Esta situación no es exclusiva del ámbito musical ya que también es escaso el número de investigaciones referidas a la PAD a nivel internacional. De este modo, la PAD se presenta como un campo fértil en el que aún queda mucho camino por recorrer tanto para la música como para la psicoacústica experimental.

#### **4.6. Referencias bibliográficas**

Basso, G., Di Liscia, O. P. y Pampin, J. (eds.): *Música y Espacio: ciencia, tecnología y estética*. Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes (2009).

Calcagno, E. R., Abregú, E. L., Eguía, M. C. y Vergara, R. O. The Role of Vision in Auditory Distance Perception, *Perception* 41, 175-92 (2012).

Eguia, Manuel y Oscar Edelstein: "The Acoustic Grid", en Amalia Barboza (ed.): *Insert - Zehn Kooperationen zwischen Kunst und Wissenschaft* (Frankfurt: Gutleut Verlag) (2007).

Maconie, R. (ed.): *Stockhausen on music*. Marion Boyars, London (1989).

Spiouas I., Etchemendy P., Eguia M. C., Calcagno E. R., Abregú E. L. y Vergara R. O. Sound spectrum influences auditory distance perception of sound sources located in a room environment. *Frontiers in Psychology* doi: 10.3389/fpsyg (2017).

Vergara, R. O., Calcagno E. R. y Eguía, M. C. The Role of Spectral Cues and Minimum Bandwidth in the Auditory Perception of Distance, *Journal of the Acoustic Society of America* 128(4) (2010).

Wishart, T. *On Sonic Art*. New York, Imagineerring Press, 1985. Nueva edición, Amsterdam: Harwood Academic Publishers (1996).

## 5. PERCEPCIÓN VISUAL DE DISTANCIA

### 5.1. Introducción

Una de las funciones claves de la modalidad visual es proveer una representación estable y significativa del entorno. Esta no es una tarea trivial, ya que la entrada de información sensorial en ocasiones no es clara, presentando ambigüedades y quedando abierta a múltiples interpretaciones. El advenimiento de la electricidad nos ha permitido observar nuestro entorno incluso en la oscuridad. Las nuevas tecnologías nos han hecho depender en gran medida de las imágenes y el texto para la comunicación y el entretenimiento. Esta tendencia de concentrar nuestra atención en base al uso de canales visuales ha llegado a ser incluso más pronunciado en las últimas décadas.

Paralelamente, una extensiva literatura experimental ha demostrado que el espacio visual percibido también es propenso tanto a errores variables como sistemáticos, como ha sido descrito en varias revisiones (Suppes et al., 1989; Cutting y Vishton, 1995). Históricamente, el espacio visual ha sido considerado como una estructura abstracta independiente de su contenido. En varios estudios el contexto del entorno fue considerado como irrelevante o una fuente de pistas indirectas de tamaño y distancia. Para eliminar los efectos del entorno no deseados, los experimentadores en ocasiones presentaron sólo algunos puntos de luz en una sala a oscuras (Suppes, 1989). Sin embargo, la concepción de que el espacio visual es un contexto invariante podría no ser del todo cierto. Por ejemplo, Indow (1991) y Suppes (1995) han concluido que el espacio visual es dependiente del contexto. Además, estudios reciente evidencian que la profundidad visual puede ser modulada y afectada por el plano del suelo. Sinai et al. (1998) demostraron que la distancia percibida fue reducida por las discontinuidades del plano del suelo por un brecha espacial o un cambio textural. Wu et al. (2004) variaron el área y la localización de regiones visibles del plano del suelo y concluyeron que si la percepción de distancia depende del plano del suelo, quizás pueda estar influenciada también por otras superficies visibles.

Por otro lado, varios estudios muestran una diversidad de resultados sobre el campo perceptivo audiovisual, como puede ser el caso del estudio de la percepción de distancia egocéntrica (o sea, la distancia percibida por un observador hacia un objeto sonoro). Algunos estudios han mostrado que las distancias pueden ser percibidas tanto de forma exacta (con un pequeño error sistemático) como precisa (con poca variabilidad). Por ejemplo, en un estudio de Reiser et al. (1990) los participantes vieron claves visuales de 2 a 22 m de distancia en campo abierto y luego caminaron cegados hasta la localización de la clave visual. El error constante promedio fue solo del 2%, independientemente de la distancia. Otro caso paradigmático se da con el método de caminar cegado (del inglés

“*blindfolded*”) a claves previamente vistas hasta 10 metros, en donde usualmente la estimación de distancia presenta un error muy pequeño (Rieser, 1990; Rieser, 1995; Rieser 2004).

La Percepción Visual de Distancia (PVD) es la habilidad de percibir el entorno en tres dimensiones (3D) y la posición relativa de los objetos en dicho entorno (Watson y Enns, 2012). La PVD permite la interacción y exploración del entorno, además de brindarnos información acerca de los objetos y superficies que están más distantes.

La PVD es compleja y aún no ha sido comprendida completamente. El proceso comienza cuando la luz reflejada de un objeto ubicado en el entorno llega al ojo por la pupila, es curvado cuando pasa a través de la córnea y el cristalino, alcanzando luego la retina. El resultado es una imagen de dos dimensiones invertida sobre la retina, la cual sólo puede ser percibida en color y alta resolución en la pequeña área foveal (área de la retina donde se enfocan los rayos luminosos y se encuentra especialmente capacitada para la visión del color). Teniendo en cuenta este proceso, ¿cómo es posible percibir el espacio en tres dimensiones y la distancia de los objetos a partir de esta imagen?

Con el objetivo de comprender cuáles son los mecanismos de la PVD, a continuación revisaremos cuáles son las principales pistas visuales involucradas. También se revisarán los métodos de medición de PVD en entornos reales. De esta manera, este estudio nos ayudará luego a comprender la relación crossmodal existente entre la PVD y la PAD, la cual se abordará en el siguiente capítulo.

## **5.2. Pistas pictoriales**

Las pistas contenidas en una escena sin movimiento como una imagen son llamadas pictoriales (Goldstein, 2007). Podemos nombrar cinco de ellas: oclusión, tamaño relativo, densidad relativa, altura en el campo visual y perspectiva aérea (Cutting et al., 1995).

En el primer caso, si un objeto es parcialmente ocluido por otro, es visto como más lejano que el objeto ocluyente. Naturalmente, la oclusión sólo indica distancia relativa (no absoluta), pero es efectiva sobre el rango total de distancias percibidas. El tamaño relativo describe que cuanto más lejano está un objeto, más pequeño es la imagen retinal. De forma similar, grupos de objetos tienen una densidad retinal alta cuando se muestran lejanos. Por otra parte, el tamaño relativo puede brindar información de distancia absoluta si el tamaño del objeto es conocido y es útil a la hora de estimar distancias en el rango percibible. El tamaño relativo y la densidad relativa también explican la utilidad de la textura del suelo para la percepción de distancia, la cual fue estudiada por Gibson (1950) a mediados del siglo XX. Más recientemente, He et al. (2004) y Wu et al. (2004) demostraron

que una amplia expansión de suelo continuo y texturado de forma homogénea ayuda a la percepción de distancia verídica.

La pista de PVD de altura sugiere que tanto el observador como el objeto están sobre el plano del suelo, la distancia al objeto puede ser computada como una función de la altura del ojo del observador y el ángulo entre la línea de visión hacia el horizonte y la línea de visión al objeto (Rand et al., 2011).

Finalmente, la perspectiva aérea (o perspectiva atmosférica) describe que un objeto en la distancia es más azulado y de bajo contraste. Esta pista de PVD sólo provee información de distancia relativa y su rango de efectividad varía con las condiciones del clima.

### **5.3. Pistas no pictoriales**

En oposición a las pistas de distancia pictoriales, existen las pistas no-pictoriales que brindan información importante para la percepción de distancia. Estas pistas derivan del movimiento del sistema oculomotor (convergencia y acomodación) y del factor de que los humanos tenemos dos ojos (disparidad binocular). Cuando los observadores se mueven, la imagen retinal de los objetos estacionarios también se mueven, y mientras más alejados estén los objetos más lento será dicho movimiento. Esto es llamado paralaje de movimiento (*motion parallax*) y es importante para distancia cortas, pero su efectividad se reduce para objetos distantes (Cutting y Vishton, 1995).

A medida que los ojos se mueven hacia adentro para mirar objetos cercanos, el ángulo entre los ejes ópticos de los ojos disminuye, lo que se llama convergencia. El cambio en la curvatura del cristalino del ojo permitiendo focalizar un objeto a varias distancias es llamado acomodación. Convergencia y acomodación están naturalmente vinculados pero son señales disociables. El sistema visual obtiene información de los músculos que controlan la convergencia y acomodación, que luego pueden servir como pistas de distancia. Asumiendo el conocimiento o familiaridad respecto al objeto, la distancia interpupilaria (IPD), estas pistas combinadas son pistas de distancia muy efectivas hasta 3 metros (Cutting y Vishton, 1995) y con la convergencia comienza a ser más efectiva a los dos metros. Ya que el ojo ve el entorno desde diferentes posiciones, la imagen sobre la retina difiere levemente. La diferencia en la imagen en el ojo izquierdo y el ojo derecho es llamado disparidad binocular. Aunque su efectividad es mayor en el campo cercano (disminuyendo linealmente con la distancia) es considerada como una pista de distancia importante.

### **5.4. Influencia del contexto**

Mientras la investigación sobre las pistas de PVD han tenido una larga tradición, estudios recientes sugieren que la PVD podría no sólo estar influenciada por la disponibilidad o confiabilidad de las pistas de distancia, sino también por la influencia del entorno. Podríamos inferir que, teniendo pistas de distancia lo suficientemente claras, todos los otros aspectos del entorno deberían ser irrelevantes para la percepción de distancia. Sin embargo, estudios recientes ponen en duda que el entorno no influya sobre la PVD. Los resultados de Lappin et al. (2006) mostraron que la precisión de la distancia estimada fue diferente utilizando tres diferentes tipos de entornos (un lobby, un pasillo y un lugar abierto con césped) a pesar de que todos los lugares poseían múltiples pistas de profundidad. Witt et al. (2007) realizó cinco experimentos en espacios abiertos y cerrados, manteniendo una distancia constante entre el participante y el target. El resultado indica que el espacio más allá del target, a pesar de no aportar pistas de distancia relevantes, puede influenciar considerablemente la distancia percibida.

### **5.5. Métodos de medición y performance de la PVD**

Para determinar que tan buenos somos los humanos para percibir la distancia egocéntrica se han ido desarrollado una variedad de métodos de medición. En general, hay tres categorías principales de medición que podemos mencionar: reporte verbal, combinación perceptual (*perceptual matching*) y acción directa visual (*visual direct action*). El *reporte verbal* es el método de medición más tradicional y común. Aquí, los participantes reportan verbalmente su estimación de distancia en una unidad de medida familiar o como un múltiplo de un grado dado (Loomis y Andknapp, 2003). La ventaja obvia del reporte verbal es la sencillez y conveniente manera de medición. La desventaja de este método se da por la posible inclusión de influencias cognitivas. Por ejemplo, el reporte verbal no sólo es dirigida por la percepción sino también por el conocimiento previo. Esto podría desviar la medición del proceso perceptual.

Otro método de medición es la *combinación perceptual*, en donde los participantes son instruidos para estimar la distancia o el tamaño de un objeto en comparación con la distancia o tamaño de una objeto de referencia. A pesar de que este método está menos influenciado por factores cognitivos también las distancias tienden a ser levemente subestimadas (Loomis y Philbeck, 2008).

Finalmente, el *método de acción directa*, el cual es relativamente nuevo, representa una nueva categoría de método de medición para la PVD. Aquí, los participantes ven una objeto a la distancia, luego con cegados (utilizando antifaces) para después realizar algún tipo de acción para estimar la distancia al objeto. La acción más utilizada es caminar hasta la distancia a la que se percibió el objeto. Las estimaciones con éste método son bastante buenas sin errores sistemáticos hasta los 25 m (Loomis y Andknapp, 2003). Sin embargo,

esta precisión depende de diversos factores como por ejemplo de la velocidad del caminar: si los participantes son instruidos en caminar más rápido que lo normal, la precisión empeora (Riesser, 1990). Los participantes podrían usar una simple estrategia como, por ejemplo, el cálculo de pasos necesarios para alcanzar un objetivo, los cuales podrían ser influenciados no solo por la percepción sino también por factores cognitivos. Para evitar esto, se desarrolló la tarea de triangulación: luego de ver el objeto, se les pide a los participantes rotar en un ángulo específico y luego caminar cegado por una distancia corta y fija. A partir del ángulo indicado en dirección del target, visto previamente, se puede calcular la distancia percibida. El método de caminar a ciegas de forma triangulada es considerablemente buena hasta distancias de al menos 20 metros, a pesar de que existe mayor variabilidad que la estimación obtenida mediante la caminata a ciegas sin triangulación (Loomis y Philbeck, 2008).

Es importante notar que hay una distinción entre extensión percibida y localización percibida (Witt et al., 2007). O sea, algunos métodos de medición podrían, estrictamente hablando, medir la localización percibida, pero no necesariamente la extensión percibida. Por ejemplo, Witt et al. (2007) han mostrado que los resultados pueden diferir entre pedirle a los participantes caminar cegados hasta una distancia para percibir localización del objeto y pedirles que caminen hasta una distancia determinada.

En resumen, la distancia estimada varía de acuerdo al método de medida utilizado. Sin embargo, en términos generales, los resultados mostraron que los humanos son buenos en percibir distancias en entornos reales por lo menos hasta 20 metros.

## 5.6. Referencias bibliográficas

Cutting, J. E., y Vishton, P. M. Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In *Handbook of Perception and Cognition, Vol 5; Perception of Space and Motion*. W. Epstein and S. J. Rogers, Eds., Academic Press, San Diego, CA, 69–117 (1995).

Cutting, J. E., y Vishton, P. M. Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In *Handbook of Perception and Cognition, Vol 5; Perception of Space and Motion*. W. Epstein y S. J. Rogers, Eds., Academic Press, San Diego, CA, 69–117 (1995).

Gibson, J. J. *The Perception of the Visual World*. Houghton Mifflin, Oxford, England. (1950).

Goldstein, E. B. *Sensation and Perception* (7th ed.). Wadsworth-Thomson Learning, Belmont, California (2007).

He, Z. J., Wu, B., Ooi, T. L., Yarbrough, G., y Wu, J. Judging egocentric distance on the ground: Occlusion and surface integration. *Perception* 33(7),789–806 (2004).

Indow, T. A critical review of Luneburg's model with regard to global structure of visual space. *Psychological Review* 98, 430-453 (1991).

- Lappin, J. S., Shelton, A. L., y Rieser, J. J. Environmental context influences visually perceived distance. *Attention Percept. Psychophys.* 68 (4), 571–581 (2006).
- Loomis, J. M. Y Philbeck, J. W. Measuring perception with spatial updating and action. In *Embodiment, Ego-space, and Action*, R. L. Klatzky, B. MacWhinney, and M. Behrman, Eds., Psychology Press, New York, 1–43. (2008).
- Loomis, J. M. y Knapp, J. M. Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. In *Virtual and Adaptive Environments*, L. J. Hettinger and M. W. Haas, Eds., Erlbaum, Mahwah, NJ, 21–46 (2003).
- Rand, K. M., Tarampi, M. R., Creem-Regehr, S.H., And Thompson, W. B. The importance of a visual horizon for distance judgments under severely degraded vision. *Perception* 40 (2),143–154 (2011).
- Rieser, J. J., Ashmead, D. H., Talor, C. R. y Youngquist, G. A. Visual perception and the guidance of locomotion without vision to previously seen targets. *Perception* 19, 675-689 (1990).
- Rieser, J. J., Holman, K., Cummins, P., Weingarten, F., y Ridley, C. Similarities in bipedal, bimanual, and quadrupedal locomotion: Evidence for a unified locomotor action system. *Abstracts of the Psychonomic Society* 9 (5). (2004).
- Rieser, J. J., Pick, H. L., Jr., Ashmead, D. A., y Garing, A. The calibration of human locomotion and models of perceptual–motor organization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance* 21, 480-497 (1995).
- Sinai, M. J., Ooi, T. L., y He, Z. J. Terrain influences the accurate judgement of distance. *Nature*, 395, 497-500 (1998).
- Suppes, P. Some foundational problems in the theory of visual space. In R. D. Luce, M. D'Zmura, D. D. Hoffman, G. J. Iverson, y A. K. Romney (Eds.), *Geometric representations of perceptual phenomena: Papers in honor of Tarow Indow on his 70th birthday (37- 45)*. Hillsdale, NJ: Erlbaum (1995).
- Suppes, P., Krantz, D. M., Luce, R. D., y Tversky, A. *Foundations of measurement: Vol. 2. Geometrical, threshold, and probabilistic representations*. San Diego: Academic Press (1989).
- Watson, M.R., y Enns, J.T. (in press). *Depth perception*. On-line data base Neuroscience and Biobehavioral Psychology, Elsevier Ltd, Oxford, UK (2012)
- Witt, J. K., Stefanucci, J. K., Riener, C. R., Y Proffitt, D. R. Seeing beyond the target: Environmental context affects distance perception. *Perception* 36, 12,1752–1768. DOI: <http://dx.doi.org/10.1068/p5617> (2007).
- Wu, B., Ooi, T. L., y He, Z. J. Perceiving distance accurately by a directional process of integrating ground information. *Nature* 428, 73-77 (2004).

## **6. EL PROCESO MULTISENSORIAL**

### **6.1. Introducción**

Por más de un siglo, el funcionamiento del cerebro en general, y la percepción en particular, ha sido concebida como altamente modular (Pascual Leone y Hamilton, 2001). Esta forma de ver la percepción ha sido relevante respecto al estudio del procesamiento visual y de cómo la visión es considerada como la modalidad dominante. Por otro lado, numerosa evidencia (especialmente en los últimos años) ha revelado que la percepción visual puede ser modificada tanto cuantitativa como cualitativamente por la presencia de información proveniente de otras modalidades. Esta modulación puede tener lugar en diferentes niveles de procesamiento y dominios perceptuales. La modulación crossmodal del procesamiento visual no está acotada a la percepción, sino que también juega un importante rol en el aprendizaje perceptual visual. Existe evidencia de que la información crossmodal puede ser utilizada para calibrar la visión y ajustar el peso relativo de las pistas visuales (Adams et al., 2004). Esta interacción podrían seguir estrategias que intentan minimizar el error perceptual estimado sobre el promedio.

A continuación se revisarán cuáles son los principales estudios sobre los mecanismos involucrados en la percepción multisensorial y, en particular, la relación crossmodal audiovisual. Este capítulo intenta establecer la importancia de la interacción multisensorial, la cual depende de la información proveniente de diferentes sentidos involucrados. El objetivo será subrayar la relevancia del conocimiento acerca de cómo la interacción audiovisual varía de acuerdo al contexto, para entender la bases del mecanismo de integración multisensorial y la representación del espacio en distancia.

### **6.2. La percepción multisensorial**

Históricamente, se ha tendido estudiar las diferentes modalidades sensoriales de forma aislada, ya sea por razones prácticas o teóricas. Pero en nuestra experiencia diaria, la estimulación multisensorial es ubicua. De hecho, un creciente número de trabajos sugieren que la percepción es multisensorial, y que la interacción perceptual multisensorial es “la regla y no la excepción” (Shimojo y Shams, 2001).

La percepción del mundo real depende de la integración de la información multisensorial. La percepción del entorno es un aspecto ubicuo de la experiencia diaria, en donde nuestra percepción del mundo claramente se beneficia de información proveniente de múltiples modalidades. En humanos, con audición y escucha normal, la percepción del mundo exterior se basa principalmente en la visión y la audición. La habilidad para determinar de forma precisa y rápida la localización de una fuente de sonido es de una

gran importancia en la vida de muchas especies. El proceso de localización del sonido también juega un rol clave en direccionar la atención hacia el objeto o el evento de interés, dado que ellos pueden ser registrados por otros sentidos, más comúnmente la visión.

Una percepción del entorno robusta requiere que la información proveniente de nuestros cinco sentidos sea combinada en un nivel central para producir una única percepción unificada del entorno. Los humanos poseemos múltiples sistemas sensoriales que son sensibles a los diferentes indicios perceptuales del contexto. La integración de la información a través de modalidades sensoriales expresan una importante ventaja adaptativa. Teorías recientes y evidencias presentadas en varios estudios sugieren que la combinación no ocurre de una manera rígida, sino que siguen reglas dependientes de la situación que otorgan información para ser combinada con la máxima eficiencia.

La integración multisensorial es caracterizada principalmente por dos fenómenos perceptuales. Primero, la mejora crossmodal ocurre cuando la precisión es incrementada por la información congruente abarcando más de una modalidad sensorial. Segundo, la ilusión crossmodal puede ocurrir cuando información incongruente abarca diferentes modalidades. Diversos trabajos han dado evidencia sustancial de que el proceso multisensorial otorga ventajas sobre el proceso unimodal. En general, estímulos multisensoriales son detectados más rápidamente que sus componentes unimodales (Fort et al., 2002; Giard y Peronnet, 1999). Apoyando esta idea, Erns y Bulthoff (2004) afirman que la clave para obtener una percepción robusta sucede cuando se combinan e integran información proveniente de múltiples modalidades sensoriales.

La integración de información multisensorial puede reducir la ambigüedad (Sumbly y Pollack, 1954) e incrementar la precisión de la percepción de la respuesta (Talsma et al., 2010). Diversos estudios indican que las señales visuales tienden a ser localizadas con mayor precisión y con menor variabilidad que las señales auditivas (Alais y Burr, 2004; Battaglia y Jacobs, 2003). Los estímulos visuales y auditivos alineados temporal y espacialmente presentan menor desvío y variación en cuanto a su localización que usando una modalidad aislada. De hecho, la disponibilidad de diferentes señales sensoriales, y la habilidad para combinar estas señales en una manera que refleje con precisión los eventos que tienen lugar en el entorno, podría reforzar el procesamiento perceptual frente al ruido interno/externo y los sesgos perceptuales de una modalidad específica. Por ejemplo, cuando la confiabilidad de una modalidad sensorial es comprometida por el ruido o la desviación, la información proveniente de otra modalidad podría ayudar en la desambiguación de los estímulos y facilitar la percepción, o al menos hacerla útil funcionalmente.

### **6.3. El proceso multisensorial**

En las últimas décadas ha habido un gran interés por estudiar el proceso multisensorial. Trabajos recientes han cuestionado que la percepción unisensorial ocurre antes que lo multisensorial, valiéndose de la evidencia presente en estudios comportamentales y neurofisiológicos, los cuales sugieren que el proceso multisensorial ocurre mucho antes de lo que se suponía. Un creciente número de estudios sobre interacción multisensorial ha cuestionado la visión tradicional de que las modalidades sensoriales son independientes funcionalmente.

Mientras que los más conocidos ejemplos de la interacción crossmodal involucran modificaciones de otras modalidades por la visión, existe un número de estudios en la literatura que reportan interacciones crossmodales en la dirección opuesta. La mayoría de estos trabajos involucran tanto modificaciones de las características temporales percibidas de estímulos visuales así como las de duración (Walker y Scott, 1981) y frecuencia (Gebhard y Mowbray, 1959; Shipley, 1964; Welch et al., 1986). Sin embargo, las características temporales no son los únicos atributos de los estímulos visuales sujetos de modificación. Por ejemplo, Stein et al. reportaron que la intensidad percibida de un estímulo visual es mejorada en presencia de sonido (Stein et al. 1996). Igualmente, debemos notar que todos los reportes mencionados, respecto a la modificación de la visión por otras modalidades, involucra pequeños cambios cuantitativos en oposición al cambio radical en la calidad de percepción.

También existe evidencia en donde un sonido coincidente, tanto espacial como temporalmente, puede mejorar la detección visual de un estímulo degradado. El análisis de la detección de las señales revela tanto un cambio en el criterio de toma de decisiones como en la sensibilidad perceptiva (Green, 1989) causado por el sonido (Frassinetti, 2002). Una posible explicación para este efecto del sonido ha sido que el sonido provee una función general de alerta/detonante que causa un procesamiento más eficiente del estímulo concurrente en general.

Otro ejemplo de cómo el sistema perceptivo se enfrenta con el conflicto espacial intersensorial es el llamado "*efecto ventrílocuo*" (Howard, 1966; Thurlow, 1973; Warren y Welch, 1981) el cual hemos visto en el capítulo anterior. En este efecto, el estímulo visual y auditivo están alineados en tiempo, desplazando el estímulo visual a una distancia modesta, frecuentemente causará que el estímulo auditivo es "capturado" por el evento visual.

En caso de ambigüedad o conflicto perceptivo, la entrada auditiva afecta considerablemente la evaluación percibida de un estímulo visual, a pesar de la congruencia espacial o la intensidad de los estímulos auditivos (Gebhard y Mowbray, 1959; Shipley, 1964; Welch et al., 1986). En este sentido, el sonido puede afectar la visión en el dominio temporal. Esto lo hace un sentido adaptativo, ya que la modalidad auditiva tiene mucha más resolución que la modalidad visual. La duración percibida de un estímulo

visual y el intervalo entre dos eventos visuales pueden ser influenciados por el sonido (Walter y Scott, 1981).

#### **6.4. El sonido altera aspectos temporales de la visión**

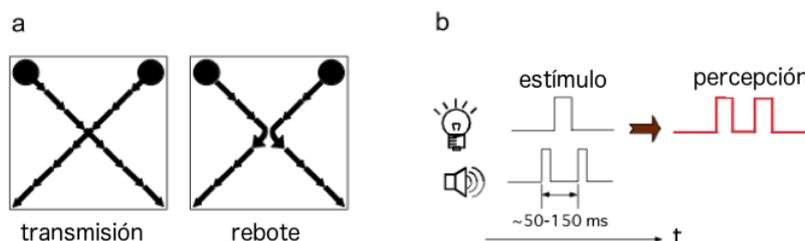
Diversos estudios revelan que la percepción visual podría ser alterada en el dominio del tiempo por otras modalidades. La duración percibida (Walker y Scott, 1981) o la velocidad (Warren et al., 1986) en la que se presenta un estímulo visual ha mostrado que puede ser influenciada al ser acompañado de señales sonoras. La resolución temporal puede ser incluso mejorada o desmejorada ante la presencia de información sonora, dependiendo de las relaciones temporales entre el estímulo visual y el auditivo. En un estudio de Scheier et al. (1999) cuando dos estímulos lumínicos fueron activados en diferentes ubicaciones con un pequeño retardo de aparición (-60 a +60 ms) la precisión de la percepción temporal de las dos luces fue mejor cuando la clave visual estuvo acompañada de un estímulo auditivo, en comparación a cuando la clave visual no fue acompañada por ningún sonido. Contrariamente, la performance de los sujetos empeoró (en comparación a la condición sin sonido) cuando dos sonidos fueron insertados en el lapso temporal existente entre los dos estímulos visuales. Estos resultados son consistentes con los de otros estudios en los que un flash de luz es percibido adelantado, temporalmente, cuando es precedido de un sonido.

Teniendo en cuenta los casos mencionados, podemos ver que la modalidad más apropiada o eficaz, respecto a una tarea, es la que dominante en el proceso multisensorial. La visión tiene una resolución espacial muy alta, por lo que dominará en ésta tarea, en comparación a la modalidad auditiva que presenta mayor resolución temporal. La dominancia de la visión en el efecto ventrílocuo y la dominancia de la audición en tareas temporales, son consistentes con ésta hipótesis.

#### **6.5. El sonido altera otros aspectos de la visión**

La alteración de la modalidad visual por el sonido no siempre se encuentra limitada a los aspectos temporales de los estímulos visuales. La percepción auditiva puede afectar la organización perceptiva de la modalidad visual. Por ejemplo, un sonido repentino puede mejorar la detección de flashes subsiguientes en la misma ubicación (McDonald et al., 2000). También, la intensidad de un estímulo visual ha mostrado que puede incrementarse por la presencia del sonido (Stein et al., 1996). Existe evidencia de que el sonido puede alterar la interpretación de un evento visual de movimiento (Sekuler, Sekuler y Lau, 1997). En este experimento de Sekuler y Lau (1997) se les presentaron a los sujetos dos claves visuales idénticas, moviéndose una contra otra. Luego, se les preguntó si habían percibido

las claves visuales rebotando o traspasándose una sobre el otra. Cuando se presentó el estímulo visual sin sonido, la mayoría de los observadores reportaron una percepción de traspaso, y no de rebote. Por el contrario, cuando un sonido corto fue agregado, en el momento que las claves visuales coincidían, la percepción visual fue desviada fuertemente, a favor del movimiento de rebote (Fig. 6.1).



**Figura 6.1:** Ilusión visual causada por el sonido. a) La ilusión transmisión-rebote fue reportada por Sekuler et al. (1997). b) La ilusión de flash inducida por el sonido fue reportada por Shams et al. (2000).

La alteración de la visión por el sonido no está limitada a modulaciones de intensidad percibida o situaciones de ambigüedad con el estímulo visual. Por ejemplo, en el efecto de “Ilusión de flash” (Shams et al., 2000) cuando un único flash es acompañado de múltiples beeps auditivos es percibido como una ráfaga de múltiples flashes. Esto indica que el fenómeno de la ilusión del flash es en efecto una ilusión visual y no se debe a la dificultad de la tarea o a una desviación cognitiva producida por el sonido.

### 6.6. Modulación crossmodal del aprendizaje y la adaptación

Para tareas donde la estimación visual puede utilizar múltiples pistas, la ponderación de las pistas visuales pueden ser afectadas por cuán consistente es cada pista en relación a la pista no-visual. Las señales crossmodales también pueden mejorar la memoria visual y el aprendizaje perceptual. Por ejemplo, en un trabajo de Murray et al. (2004) se encontró que cuando la tarea de los sujetos consistía en juzgar si una imagen era presentada con anterioridad o por primera vez, la precisión del reconocimiento fue superior para las imágenes que que fueron inicialmente presentadas juntas con sus correspondientes sonidos (ej: imagen de una campana y el sonido “dong”), en comparación con las imágenes que fueron presentadas inicialmente sin sonido. En otras palabras, la codificación audiovisual de objetos mejora la recuperación visual.

### 6.7. Referencias bibliográficas

Adams, W. J., Graf, E. W., Ernst, M. O. Experience can change the 'light-from-above' prior. *Nature Neuroscience* 7, 1057–8 (2004).

Alais, D., Burr, D. The ventriloquist effect results from near- optimal bimodal integration. *Curr Biol* 14, 257–262 (2004).

Battaglia P., Jacobs R., Aslin R. Bayesian integration of visual and auditory signals for spatial localization. *J Opt Soc Am* 20(7), 1391–1396 (2003).

Ernst, M. O. y Bulthoff, H. H. Merging the sense into robust percept. *Trends in Cognitive Science* 8(4), 162-169 (2004).

Fort, A., Delpuech C., Pernier J., Giard M. H. Dynamics of cortico-subcortical cross-modal operations involved in audio-visual object detection in humans. *Cereb Cortex* 12, 1031–1038 (2002).

Frassinetti, F., Bolognini, N., Ladavas, E. Enhancement of visual perception by crossmodal visuo–auditory interaction. *Experimental Brain Research* 147, 332–43 (2002).

Gebhard, J. W., Mowbray G. H. On discriminating the rate of visual flicker and auditory flutter, *Am. J. Psychol.* 72, 521–528 (1959).

Giard M. H., Peronnet, F. Auditory-visual integration during multimodal object recognition in humans: a behavioural and electrophysiological study. *J Cogn Neurosci*; 11:473–490 (1999).

Green D. M., Swets J. A. *Signal detection theory and psychophysics*. Los Altos, CA: Peninsula Publishing (1989).

Howard I. y Pa W. *Human spatial orientation*. London, Wiley (1966).

McDonald, J. J., Teder-Salejarvi, W. A. y Hillyard, S. A. Involuntary orienting sound improves visual perception. *Nature* 407, 906-908 (2000).

Murray M. M., Michel C. M., Grave de Peralta R., Ortigue S., Brunet D., Gonzalez Andino S. Rapid discrimination of visual and multisensory memories revealed by electrical neuroimaging. *Neuroimage* 21, 125–35 (2004).

Pascual-Leone A., Hamilton R. The metamodal organization of the brain. *Progress in Brain Research* 134, 427–45 (2001).

Scheier, C. R., Nijhawan, R., y Shimojo, S. Sound alters visual temporal resolution [Abstract]. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 40, 41-69 (1999).

Sekuler, R., Sekuler, A. A. y Lau, R. Sound alters visual motion perception. *Nature* 385, 308 (1997).

Shams, L., Kamitani, Y. y Shimojo, S. Visual illusion induced by sound. *Cognitive Brain Research* 14, 147-152 (2002).

Shimojo, S. y Shams, L. Sensory modalities are not separated modalities: plasticity and interaction perceptual modality. *Acoustic Science and Technology* 22(2), 61-67 (2001).

Shipley T. Auditory flutter-driving of visual flicker, *Science* 145, 1328–1330 (1964).

Stein B. E., London N., Wilkinson L.K., Price D. D. Enhancement of perceived visual intensity by auditory stimuli: a psychophysical analysis. *J. Cognit. Neurosci.* 8, 497–506 (1996).

Sumby, W. H., y Pollack, I. Visual contribution to speech intelligibility in noise. *Journal of the Acoustical Society of America* 26, 212–215 (1954).

Talsma, D., Senkowski, D., Soto-Faraco, S. y Woldorff, M. G. The multifaceted interplay between attention and multisensory integration. *Trends in Cognitive Sciences* 14, 400–410 (2010).

Thurlow W.R., Jack C. E. Certain determinants of the “ventriloquism effect”. *Perceptual and Motor Skills* 36, 1171–84 (1973).

Walker J. T. y Scott K. J. Auditory–visual conflicts in the perceived duration of lights, tones, and gaps. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 7, 1327–39 (1981).

Walker J. T. y Scott K. J. Auditory–visual conflicts in the perceived duration of lights, tones and gaps, *J. Exp. Psychol.: Hum. Percept. Perform.* 7, 1327–1339 (1981).

Warren D. H., Welch R. B., McCarthy, T. J. The role of visual–auditory “compellingness” in the ventriloquism effect: implications for transitivity among the spatial senses. *Perception & Psychophysics* 30, 557–64 (1981).

Welch R. B., Duttonhurt L. D., Warren D. H. Contributions of audition and vision to temporal rate perception, *Percept. Psychophys* 39, 294–300 (1986).

## **Trabajo de Campo y Resultados**

Desde el comienzo de la investigación respecto a la percepción de distancia nos enfocamos en abordar una nueva y efectiva metodología, que pueda solventar algunas limitaciones de métodos experimentales utilizados en las principales investigaciones previas del área (Ver Capítulos 7, 8 y 9). A diferencia del método más extendido para reportar la percepción de distancia, como lo es el reporte verbal, utilizamos un enfoque multimodal para el diseño del setup experimental para medir PAD en experimentos que se describirán a continuación.

El desarrollo de los dispositivos experimentales implicó una gran variedad de pruebas, a fin de verificar la confiabilidad y robustez del diseño. Por ejemplo, se han realizado diversas pruebas comparativas para comprobar cuál era el grado de precisión de percepción auditiva y visual de distancia. En el proceso de diseño de los dispositivos experimentales fue contundente evidenciar que, a pesar de presentar a los sujetos información visual muy escasa (pequeños LEDs luminosos), las claves visuales influyeron de forma notable la PAD.

En el primer caso, se expondrá un trabajo que estudia la influencia que tienen las claves visuales y el contexto visual en la PAD. Luego veremos las características, implementación y ventajas de un nuevo dispositivo experimental utilizado para realizar experimentos de percepción de distancia diseñado desde un enfoque multimodal. Finalmente, se expondrán resultados de una investigación multimodal en el sentido opuesto; es decir, de qué manera el contexto auditivo afecta la percepción visual de distancia.

## 7. EL ROL DE LA VISIÓN EN LA PERCEPCIÓN AUDITIVA DE DISTANCIA

### 7.1. Resumen

Como vimos en el capítulo anterior, en los humanos la interacción multisensorial es una importante estrategia para mejorar la detección de estímulos de diferente naturaleza y reducir la variabilidad de las respuestas. Hemos visto que la presencia de información visual afecta la percepción auditiva en el plano horizontal (acimut), pero pocas son las investigaciones que estudian la influencia de la visión en la Percepción Auditiva de Distancia (PAD). En general, los datos obtenidos de estos estudios son contradictorios y no definen completamente la manera en la cual las pistas visuales afectan la distancia aparente a una fuente sonora. En este trabajo se realizaron experimentos de percepción auditiva de distancia en humanos, incluyendo y excluyendo pistas visuales. Los resultados muestran que la distancia aparente a una fuente es afectada por la presencia de información visual y que el sujeto puede retener en su memoria una representación del entorno para después mejorar la PAD. Los resultados de este estudio se expondrán de forma resumida ya que han sido explicados en detalle en una Tesis anterior, titulada *Espacialidad y Estructura Sonora en la Música Electroacústica* (Calcagno, 2013). Todos los resultados aquí expuestos fueron publicados en la revista "Perception" en el año 2012 (Calcagno et al., 2012).

### 7.2. Introducción

Estudios previos apuntaron al estudio de la influencia de la visión sobre la precisión de la localización auditiva. La mayoría de estos trabajos se centran en la localización angular de las fuentes sonoras y muy pocos abordan la influencia de la visión en la PAD. Como hemos visto, un trabajo pionero en el estudio de este tema fue publicado por Gardner (1968). Su dispositivo experimental consistía de cinco parlantes alineados, ubicados a diferentes distancias y apuntando al sujeto experimental, el cual estaba situado dentro de una cámara anecoica. Los resultados mostraron que aunque el estímulo solo fue reproducido por el parlante más lejano al sujeto, todos los participantes, sin excepción, reportaron que el sonido provenía del parlante más cercano (el único que los sujetos podían ver). Gardner llamó a este efecto como "efecto de proximidad de la imagen". En 1980, Mershon et al. estudiaron el mismo fenómeno pero en condiciones semireverberantes. Ellos concluyeron que el efecto de proximidad de la imagen opera similarmente tanto en entornos anecoicos como en reverberantes. Aún más, reportaron que la distancia a la fuente sonora puede ser sobrestimada o subestimada, dependiendo

de la posición del objetivo visual (en este caso un parlante falso – Mershon et al., 1980).

Con el fin de reexaminar este efecto, Zahorik (2001) realizó experimentos utilizando un dispositivo similar al de Gardner (1968) en un entorno semireverberante. Sus resultados mostraron que la presencia de múltiples pistas visuales (condición con los ojos destapados) incrementaba la precisión de la PAD y disminuía la variabilidad de los juicios, comparados con los resultados obtenidos bajo las mismas condiciones pero sin pistas visuales (condición donde los sujetos tenían los ojos tapados). De este modo, Zahorik no observó el efecto de proximidad de imagen reportado en los trabajos anteriores. Sin embargo, la respuesta obtenida por Zahorik muestra una comprensión considerable a partir de 2 metros. Como en el experimento original realizado por Gardner, en el experimento de Zahorik los participantes podían observar solamente el primer parlante del dispositivo durante la tarea perceptual. Por lo tanto, es posible que la imagen del primer parlante pueda haber influido en la respuesta, más aún cuando el sonido proviene de fuentes lejanas. También vale la pena señalar que Zahorik usó un dispositivo con cinco parlantes en línea, un arreglo que puede proveer pistas auditivas extras debido al filtrado (sombra acústica).

El objetivo de este capítulo es estudiar si la PAD puede ser afectada mediante la presencia de pistas visuales que otorguen información de distancia pero evitando que los oyentes vean la fuente sonora con el fin de evitar posibles artefactos relacionados con el efecto de proximidad de la imagen. Para este propósito, se realizaron experimentos en un entorno real y semi reverberante, en la oscuridad (en presencia y ausencia de pistas visuales mínimas), usando un parlante móvil que permite reproducir estímulos sonoros en varias distancias. De esta manera, las pistas acústicas potenciales, producidas por el filtrado de la señal mencionado, fueron removidas.

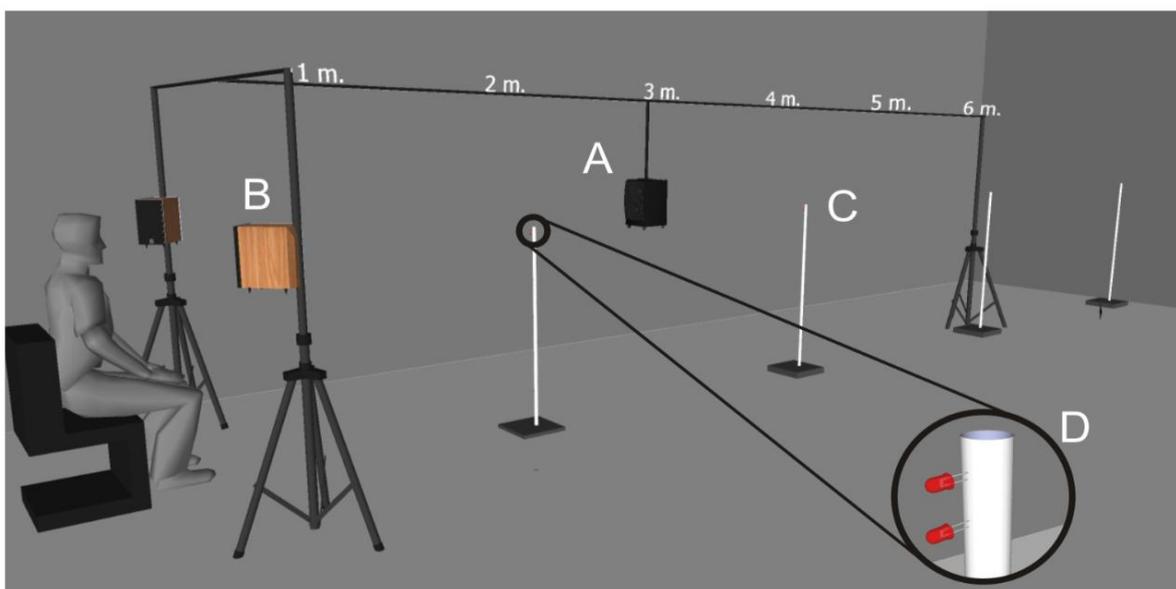
### **7.3. Métodos generales**

Se realizaron tres experimentos diferentes (ver Tabla 7.1). Primero, se realizó un experimento de PVD que actuó como control del dispositivo, y que fue tomado como base para el uso de pistas visuales de referencia en los experimentos subsecuentes. Luego, fueron realizados experimentos de PAD con dos grupos de sujetos, en la oscuridad, tanto en presencia como en ausencia de pistas visuales mínimas. En el tercer y último experimento, se estudia como el conocimiento a priori de un ambiente específico afecta a la PAD.

Todos los experimentos fueron realizados en un entorno semireverberante de 12x7x3 metros (largo x ancho x alto) cuyas paredes estuvieron recubiertas de paneles absorbentes (espuma de poliuretano piramidal de 50 mm) el piso alfombrado y el techo

tenía paneles acústicos de fibra de vidrio. El tiempo de reverberación promedio de la sala fue de 0.49 segundos en el lugar donde se ubicó el sujeto (T30 a 1kHz, medido mediante el método MLS). El ruido de fondo de la sala, medido en el lugar donde se ubica el sujeto, sin ningún tipo de estímulo sonando fue de 19 dBa (RION NL-32).

Un total de 32 voluntarios (24 hombres y 8 mujeres) participaron en los experimentos. Los voluntarios eran estudiantes de grado y graduados de la Licenciatura en Composición con Medios Electroacústicos. El rango de las edades fue de los 21 a los 42 años (edad media, 27.68 años).



**Figura 7.1:** Modelo en tres dimensiones del dispositivo experimental. (A) parlante móvil; (B) sistema de enmascaramiento; (C) pistas visuales usadas en el experimento; (D) pistas visuales, formadas por pares de LEDs rojos localizados verticalmente y separados 4cm.

Las pistas visuales de referencia fueron montadas en postes de metal de 1.2 metros de alto, y localizadas a 2, 4, 6 y 8 metros del participante, formando una línea paralela (20 cm a la derecha) al riel por donde se mueve el parlante. Estas pistas visuales consistían en un par de LEDs rojos (estándar de 3mm, 18 mca) orientados verticalmente y separados 4 cm entre sí. Antes de entrar en la sala, todos los participantes fueron informados de las condiciones en las que harían el experimento. Fueron utilizadas tres diferentes condiciones de pistas visuales de referencia:

Condición i: Sin pistas visuales;

Condición ii: Con dos pistas visuales localizadas a 4 y 8 metros;

Condición iii: Con 4 pistas visuales localizadas a 2, 4, 6 y 8 metros.

Los estímulos visuales empleados en el experimento 1 consistieron de un par de LEDs verdes (3 mm, 18 mca) localizados verticalmente, separados 4 cm entre sí y ubicados a la altura de los ojos de los sujetos. Estas pistas estuvieron ubicadas a seis distancias (D) diferentes: D = 1, 2, 3, 4, 5 y 6 metros.

Los estímulos auditivos empleados en los experimentos 2 y 3 consistieron de ráfagas de ruido blanco de 500 ms de duración (ancho de banda medido entre 50 Hz y 20Khz  $\pm$  2 Hz) con una envolvente de amplitud al inicio y al final de aproximadamente 50 ms. Las señales fueron generadas en Matlab y reproducidas mediante una placa de sonido a una frecuencia de muestreo de 44.1Khz, con una resolución de 24 bits. El nivel de presión sonora de los estímulos fue de 70 dBA, medido en la posición donde el oyente realizaría la tarea y con la fuente sonora ubicada a 1 m (RION NL-32). Por esto, la intensidad fue una importante pista durante el experimento. Entre prueba y prueba se presentó un sonido enmascarante en los parlantes ubicados a los lados del participante (Figura 7.1b). El contenido espectral, la duración y la intensidad de este sonido (12 segundos, 70 dBA medidos en la ubicación del participante) fueron ajustados de manera que enmascarara completamente el sonido producido por el desplazamiento del parlante de prueba sobre el riel. Dos segundos después de terminar este sonido enmascarante, se presentaba el estímulo auditivo a través del parlante de prueba. Bajo estas condiciones los oyentes contaron al menos con dos importantes pistas de PAD: la intensidad y la relación de energía entre el sonido directo y el sonido reverberante (D/R). Debido a las distancias utilizadas en este experimento (de 1 a 6 metros) las pistas binaurales y espectrales de PAD no estaban disponibles de forma significativa (ver Zahorik et al. 2005).

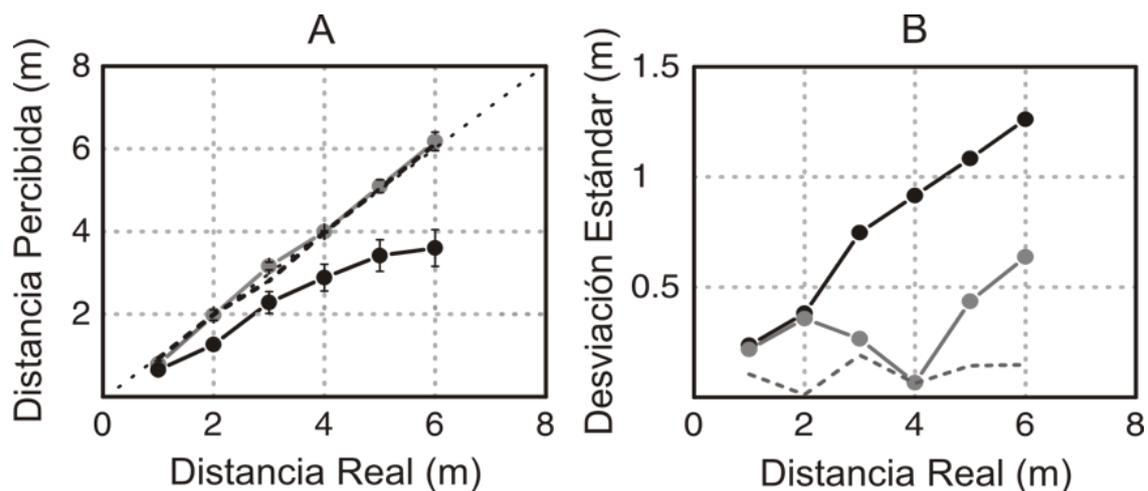
| Experimentos   | Condición   |
|--|---|
| <b>1: Percepción Visual de Distancia</b><br><b>Sin conocimiento previo de la sala</b>            | i (sin pistas visuales)<br>ii (dos pistas visuales)<br>iii (cuatro pistas visuales) |
| <b>2: Grupo A: Percepción Auditiva de Distancia</b><br><b>Sin conocimiento previo de la sala</b> | i (sin pistas visuales)<br>ii (dos pistas visuales)<br>iii (cuatro pistas visuales) |
| <b>3: Grupo B: Percepción Auditiva de Distancia</b><br><b>Sin conocimiento previo de la sala</b> | iii (cuatro pistas visuales)<br>i (sin pistas visuales)                             |
| <b>4: Percepción Auditiva de Distancia</b><br><b>Con conocimiento previo de la sala</b>          | i (sin pistas visuales)   |

**Tabla 7.1.** Resumen de todos los experimentos y condiciones, listados en el orden en que fueron realizados.

## 7.4. Resultados

### 7.4.1. Experimento 1

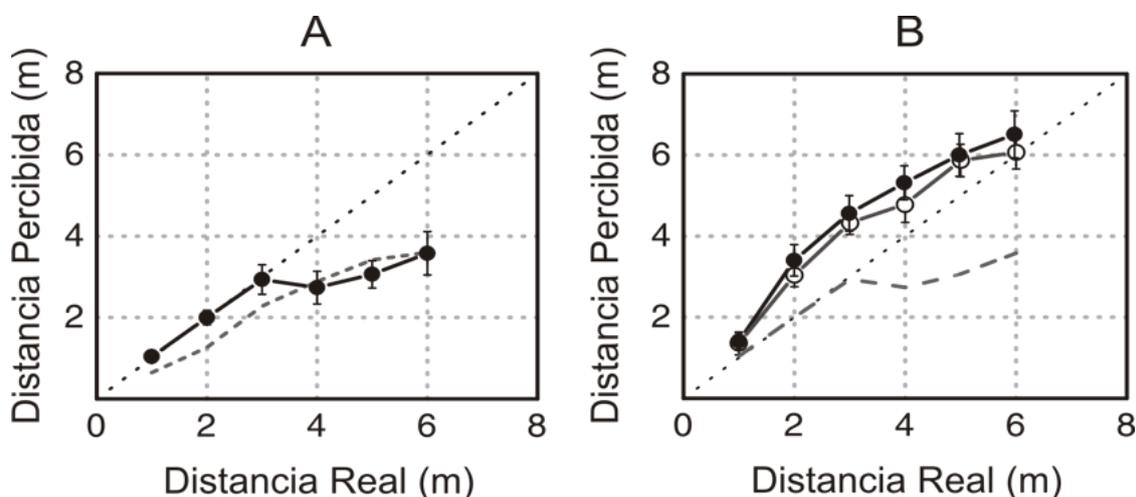
En la Figura 7.2 A se puede observar que en ausencia de pistas visuales la distancia a la fuente real fue subestimada para distancias mayores a 1 metro. Sin embargo, este resultado no concuerda con estudios previos, los cuales reportan una sobrestimación de la respuesta para distancias menores a 3 metros (Gogel, 1961; Philbeck y Loomis, 1998). Cuando el experimento fue realizado en presencia de dos pistas visuales localizadas a 2 y 4 metros del participante las respuestas fueron muy precisas. La respuesta bajo la condición iii fue significativamente más lineal que la obtenida en la condición sin pistas visuales (condición i). La Figura 7.2 B muestra la variabilidad de los datos para las condiciones i, ii y iii. Se puede observar que cuando el experimento se realizó sin pistas visuales la variabilidad de la respuesta fue significativamente mayor que la obtenida con pistas visuales (excepto cuando se compara con la condición ii, donde esto ocurre solamente para distancias mayores a 2 metros). Este último resultado es consistente con estudios pasados (Philbeck y Loomis, 1998), donde se obtuvo menor variabilidad en la respuesta bajo condiciones con múltiples pistas visuales que la obtenida en ausencia de las mismas.



**Figura 7.2. A: PVD (s/conocimiento previo de la sala):** Valor medio de los juicios de distancia sin pistas visuales (condición i, círculos negros), con 2 pistas visuales a 4 y 8 m del participante (condición ii, círculos grises), y 4 pistas visuales a 2, 4, 6 y 8 m del participante (condición iii, línea negra discontinua). **B:** Desviación estándar de los juicios de distancia: condición i (círculos negros), condición ii (círculos grises) y condición iii (línea negra discontinua).

### 7.4.2. Experimento 2

Este experimento fue realizado para examinar si la presencia de pistas visuales puede mejorar la PAD. Para el primer grupo de participantes (grupo A, n =8) las pistas visuales fueron usadas en la misma secuencia que en el experimento 1: condición i (sin pistas visuales), condición ii (dos pistas visuales localizadas a 4 y 8 metros) y condición iii (cuatro pistas ubicadas a 2, 4, 6 y 8 metros). Para el segundo grupo de participantes (grupo B, n = 8), se testeó la condición iii primero y luego la condición i. En este experimento, para fuentes sonoras más lejanas que 3 m, las distancias percibidas fueron sustancial y progresivamente subestimadas. Sin embargo, la respuesta fue muy precisa para las tres distancias más cercanas al participante. Con el fin de comparar la respuesta entre las modalidades visual y auditiva bajo condiciones similares, en la Figura 7.3 A se muestran los resultados obtenidos en el experimento 1 sin pistas visuales (línea gris de trazos cortos, condición i, del experimento de PVD). Esta comparación no presentó diferencias significativas entre ambos grupos para ninguna de las distancias, con excepción en los dos metros. En la Figura 7.3 la respuesta fue significativamente menos compresiva que la respuesta obtenida sin pistas visuales. Nuestros resultados muestran que en presencia de pistas visuales, la distancia a la fuente sonora es sobrestimada.

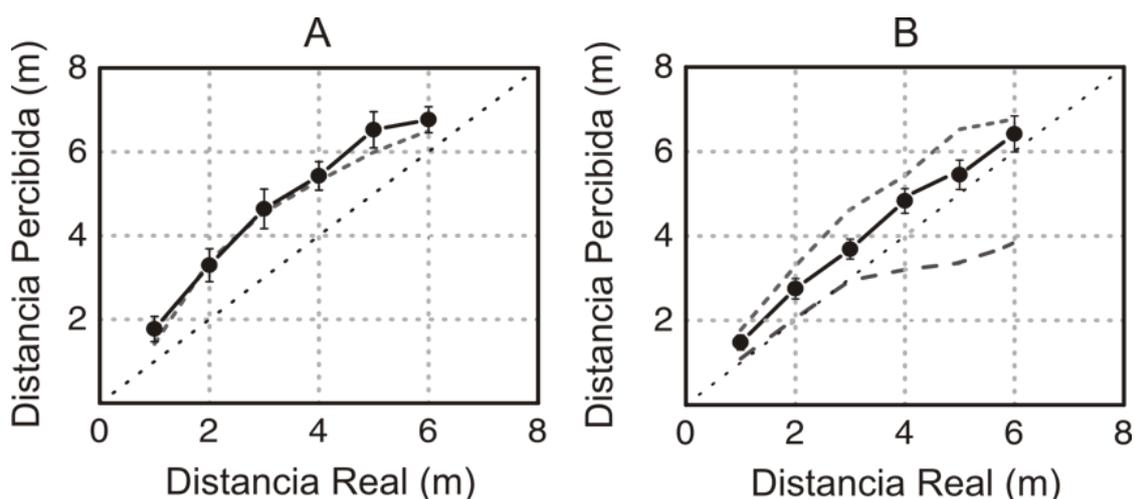


**Figura 7.3. A: Grupo A: PAD (s/conocimiento previo de la sala):** Valor medio de los juicios de distancia sin pistas visuales (condición 1, círculos negros). Línea gris discontinua: resultados obtenidos en el experimento 1 (condición i para visión). **B:** Valor medio de los juicios de distancia como una función de la distancia real obtenida con dos (condición ii, círculos blancos) y cuatro pistas visuales (condición i, para percepción auditiva de distancia).

En la Figura 7.4 A se muestran los resultados obtenidos para el grupo B. Este experimento fue realizado para excluir la posibilidad de que los resultados obtenidos en presencia de pistas visuales para el grupo A no se hayan producido por un efecto de aprendizaje (dado que las tareas fueron realizadas en forma secuencial). Bajo estas

condiciones la respuesta de los participantes no fue significativamente diferente que la obtenida para el grupo A en las mismas condiciones. Es importante notar que la respuesta fue significativamente menos compresiva que la respuesta sin pistas visuales.

En la Figura 7.4 B (círculos negros) se muestran los resultados obtenidos sin pistas visuales (condición i) para los participantes que previamente habían participado en el experimento con cuatro pistas visuales (grupo B). Sorpresivamente, la respuesta fue más precisa que la obtenida por el grupo A bajo la misma condición. La respuesta en ausencia de pistas visuales para el grupo B no difiere significativamente de los resultados obtenidos previamente en presencia de pistas visuales (condición iii) en ninguna de las distancias testeadas

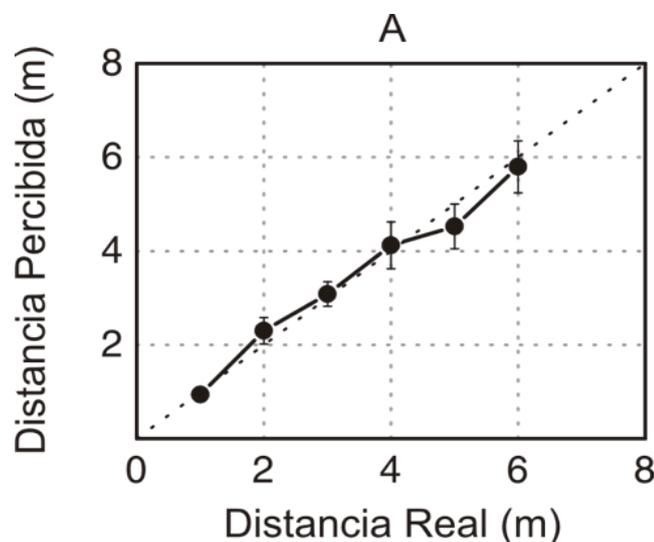


**Figura 7.4. grupo A: PAD (sin conocimiento previo de la sala).** **A:** Valor medio de los juicios de distancia como una función de la distancia real obtenida con 4 pistas visuales (condición iii, círculos negros). Línea gris clara discontinua: resultados obtenidos para el grupo bajo las mismas condiciones. **B:** Valor medio de los juicios de distancia sin pistas visuales (condición i, círculos negros). La línea gris clara discontinua: respuesta obtenida con cuatro pistas visuales (condición iii) por los participantes del grupo A. Línea gris oscura discontinua: respuesta obtenida sin pistas visuales (condición i) por los participantes del grupo A.

### 7.4.3. Experimento 3

El propósito de este experimento fue evaluar si el conocimiento previo de un ambiente específico afecta la PAD. A los participantes (7 hombres y 1 mujer) se les permitió conocer la sala donde se realizaría el experimento, con las luces prendidas, durante 5 minutos, antes de realizar la tarea. Sin embargo, estos no fueron informados sobre las dimensiones de la sala. Luego de esta inspección visual los participantes fueron llevados a una sala adyacente donde fueron instruidos sobre lo que debían realizar

durante el experimento. Este experimento fue realizado con los mismos procedimientos que el experimento anterior, pero utilizando solamente la condición i (sin pistas visuales). Sorpresivamente, la respuesta obtenida bajo estas condiciones fue muy precisa en todas las distancias testeadas, y fueron más precisas que las del experimento 2, para todas las condiciones testeadas (Fig. 7.5).



**Figura 7.5. PAD (con conocimiento previo de la sala).** (A) Valor medio de los juicios de distancia como una función de la distancia real obtenida con sin pistas visuales para participantes que pudieron ver la sala antes del experimento (condición i, n=8, círculos negros).

## 7.5. Conclusiones

Los resultados obtenidos soportan la hipótesis de que la presencia de información visual afecta la percepción auditiva de distancia. Para la condición sin pistas visuales, se observó un comportamiento similar al reportado en varios estudios previos. La respuesta se incrementa linealmente cuando la distancia de la fuente está en un rango cercano, pero converge a un cierto límite cuando la distancia de la fuente se incrementa más allá de los 3 metros. Cuando el experimento fue realizado en presencia de pistas visuales, se observaron al menos dos efectos: 1) la distancia a la fuente sonora fue sobrestimada en cinco de las seis distancias testeadas; 2) la compresión obtenida sin pistas visuales fue significativamente revertida. En adición, los resultados muestran que la información visual obtenida por los participantes durante el experimento puede ser guardada en la memoria para ser utilizada, minutos más tarde, como una referencia espacial en experimentos que se realizan a posteriori sin pistas visuales. Estos resultados sugieren que un posible rol de la visión en la PAD es obtener información confiable acerca de las características espaciales (dimensiones) del lugar donde se producen los acontecimientos auditivos (en

este caso los cambios en la distancia de la fuente), con el fin de calibrar la información que proviene de las señales auditivas relacionadas con PAD (en su mayoría relativas) y asignar un valor de distancia a la fuente de sonido percibido dentro de este espacio.

## **7.6. Referencias Bibliográficas**

Calcagno, E. R., Abregú, E. L., Eguía, M. C. y Vergara, R. The role of vision in auditory distance perception. *Perception* 41, 175–192 (2012).

Gardner, M. B. Proximity image effect in sound localization. *Journal of the Acoustical Society of America* 43, 163 (1968).

Gogel, W. C. Convergence as a cue to absolute distance. *Journal of Psychology* 52, 287-301 (1961).

Loomis J. M., Klatzky R. L., Philbeck J. W. y Golledge R. G. Assessing auditory distance perception using perceptually directed action. *Perception & Psychophysics* 60, 966-980 (1997).

Mershon D. H., Desaulniers D. H., Amerson T. L. y Kiefer S. A. Visual capture in auditory distance perception: proximity image effect reconsidered. *Journal of Auditory Research* 20, 129 -136 (1980).

Philbeck J. W. y Loomis J. M. Comparison of two indicators of perceived egocentric distance under full-cue and reduced-cue conditions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 23, 72-85 (1997).

Zahorik P. Estimating sound source distance with and without vision. *Optometry y Vision Science* 78, 270-275 (2001).

Zahorik P., Brungart D. S. y Bronkhorst A. W. Auditory distance perception in humans: a summary of past and present research. *Acta Acustica united with Acustica* 91, 409-420 (2005).

## **8. EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE RESPUESTA DE LOCALIZACIÓN DIRECTA PARA MEDIR LA PERCEPCIÓN AUDITIVA DE DISTANCIA**

### **8.1. Resumen**

El reporte verbal es el método de respuesta más usado en experimentos psicofísicos de Percepción Auditiva de Distancia (PAD). En general, los resultados obtenidos con este método muestran un sesgo sustancial y una alta variabilidad. El propósito de este capítulo es evaluar la idoneidad de una metodología de acción directa para medir la percepción auditiva de distancia de fuentes sonoras ubicadas en el campo lejano. Para esto diseñamos un setup experimental que les permite a los participantes indicar la distancia a la cual perciben la fuente sonora mediante una marca visual móvil. Denominamos a este método Cross Modal Direct Location, porque involucra un sistema de respuesta que utiliza la modalidad visual, mientras que el estímulo presentado es auditivo. Para estudiar la idoneidad del método comparamos las respuestas obtenidas entre el método de Cross Modal Direct Location y el de Reporte Verbal.

### **8.2. Introducción**

La Percepción Auditiva de Distancia (PAD) ha sido estudiada por más de un siglo usando diferentes metodologías, entornos acústicos (tanto reales como virtuales) y estímulos. Como hemos mencionado, sabemos que la PAD depende de la integración de diferentes indicios: intensidad del sonido, relación de energía directo/reverberante, contenido espectral, diferencias binaurales y conocimiento previo de la fuente, entre otras (ver Zahorik, 2005 ; Calcagno et al., 2014; para una revisión completa de estos tópicos).

En la mayoría de los estudios de PAD, el reporte de los participantes muestra un gran sesgo y alta variabilidad. Típicamente, los reportes de distancia son sobrestimados respecto a las fuentes cercanas menores a 3 metros, mientras que las respuestas son subestimadas sustancial y progresivamente para distancias mayores a 3 metros (Loomis et al., 1998; Bronkhorst y Houtgast, 1999; Zahorik, 2002; Fontana y Rocchesso, 2008; Kearney et al., 2012; Parseihian et al., 2014). La relación no lineal compresiva entre la localización de la fuente y la respuesta es reflejada en un exponente menor a uno cuando los resultados son ajustados a una función de potencia (media = 0.54, reportado por Zahorik et al., 2005).

En general, existe consenso en que las respuestas compresivas observadas en los experimentos de PAD tienen un origen perceptual (Zahorik, 2005) en vez de ser inducidas por el método de respuesta. Una de las hipótesis postulada por la literatura es que, en entornos reverberantes, la relación D/R tiende a ser constante para distancia más grandes

que cierto umbral conocido como “*horizonte auditivo*” (Zahorik et al., 2005; Bronkhorst y Houtgast, 1999). Si se tiene en cuenta que la relación D/R es considerada como una pista de distancia relevante, la disminución de su variación haría que los cambios en la distancia de la fuente en ese rango fueran indistinguibles.

Apoyando esta idea, Loomis et al. (1998) mostró que la naturaleza compresiva de la respuesta se mantuvo al realizar los experimentos utilizando dos métodos de respuesta diferentes: el Reporte Verbal (RV), en el cual el sujeto debe expresar verbalmente la respuesta usando escalas de distancia explícitas, como metros o pies; y métodos de acción directa, en los que se utiliza una acción para indicar la distancia percibida, (como por ejemplo caminar a ciegas, apuntar, lanzar un objeto, etc.). Por último, los experimentos de Percepción Visual a Distancia (PVD) han demostrado que las respuestas obtenidas utilizando métodos similares mostraron un sesgo y una variabilidad más baja que los observados en los experimentos de PAD, apoyando la idea de que el origen de este efecto se debe a factores perceptivos específicos de la modalidad auditiva (Loomis et al., 2002; Loomis et al., 1998).

Sin embargo, varios estudios recientes sugieren que los métodos experimentales influyen en la respuesta obtenida tanto en la PAD como en la PVD. Por ejemplo, Andre y Rogers (2006) compararon el RV y el método de caminar a ciegas para medir la respuesta de PVD, y mostraron que estos últimos son consistentemente más precisos que los RVs. Además, Ashmead et al. (1995) utilizaron el método de caminar a ciegas para medir las curvas de PAD y obtuvieron respuestas más precisas que las típicamente reportadas usando RV. Finalmente, Brungart et al. (2000) realizaron experimentos de PVD y PAD en el campo cercano (distancia <1 m) comparando el RV con otros tres métodos de Localización Directa (LD) e indirecta. El método LD consistió en reportar la distancia percibida colocando un sensor de seguimiento electromagnético montado en la punta de una vara. Los autores encontraron que el método LD fue superior (mostrando un sesgo y variabilidad más pequeños) que los RVs en ambas modalidades. Los autores concluyeron que el método LD parece ser una respuesta más natural que el RV, ya que no se requiere ninguna transformación mental, además de que los sujetos pueden usar sus propios puntos de referencia anatómicos para determinar la ubicación del objetivo.

A diferencia del campo cercano, donde se utilizó una variedad de métodos de acción directa, el método más utilizado en experimentos de PAD en campo lejano es el RV (Bronkhorst y Houtgast, 1999; Zahorik, 2001 y 2002; Calcagno et al., 2012) que, como se mencionó anteriormente, parece ser menos preciso que las estimaciones de acción directa. La falta de uso de métodos de acción directa en el campo lejano podría estar motivada por el hecho de que las distancias estimadas están fuera del alcance del oyente, requiriendo dispositivos más complicados, y con frecuencia cediendo a tareas experimentales más lentas y complicadas. Los RV se han utilizado no sólo en los estudios

auditivos sino también en los de percepción visual a distancia (Andre y Rogers, 2006; Da Silva, 1985; Loomis et al., 1998). Su ventaja radica en que reduce el consumo de recursos ya que la tarea es muy simple y, bajo ciertas condiciones, es un método preciso para estimar las distancias. Sin embargo, la principal desventaja de las RV es que el método se ve afectado por la información del contexto ambiental (Andre y Rogers, 2006; Iosa et al., 2012).

En este trabajo, hemos probado un método de LD que elude las desventajas típicas de su tipo. Mediante éste método, para reportar la distancia percibida los participantes usan un control remoto manual para mover un marcador visual (conformado por dos LEDs) que se desplaza paralelamente a la línea que une al oyente y la fuente de sonido. Denominamos este método *Cross Modal Direct Location* (CMDL) ya que el procedimiento de respuesta involucra la modalidad visual, mientras el estímulo se presenta a través de la modalidad auditiva. CMDL es muy similar al usado en un estudio de PAD realizado por Fontana y Rocchesso (2008). Sin embargo, en nuestro caso introdujimos varios cambios que facilitan la tarea tanto para el participante como para el experimentador. Además, Fontana y Rocchesso (2008) estudiaron el efecto de exagerar la señal acústica de reverberación manteniendo la señal de intensidad prácticamente constante con la distancia de la fuente. Desafortunadamente, los autores no utilizaron este método para medir la PAD en condiciones más naturales, haciendo difícil comparar sus resultados con estudios previos que utilizaron otros métodos.

Con el objetivo de estudiar la respuesta de PAD obtenida mediante el RV en comparación al método de CMDL, se realizaron una serie de experimentos de PAD en un entorno semi-reverberante real, utilizando estímulos de banda ancha (ruido blanco) presentados en el campo lejano desde diferentes distancias.

### **8.3. Métodos generales**

#### *Entorno experimental*

Todos los experimentos se realizaron en una sala semi-reverberante (longitud: 12.1 m, ancho: 6.9 m, altura: 3 m). El tiempo medio de reverberación de la habitación (T<sub>30</sub>, Ponderación A medida con el método MLS) es 0.45 s respecto a la posición del participante. El ruido de fondo de la habitación en esa posición fue de 19 dBA (RION NL-117 32).

#### *Participantes*

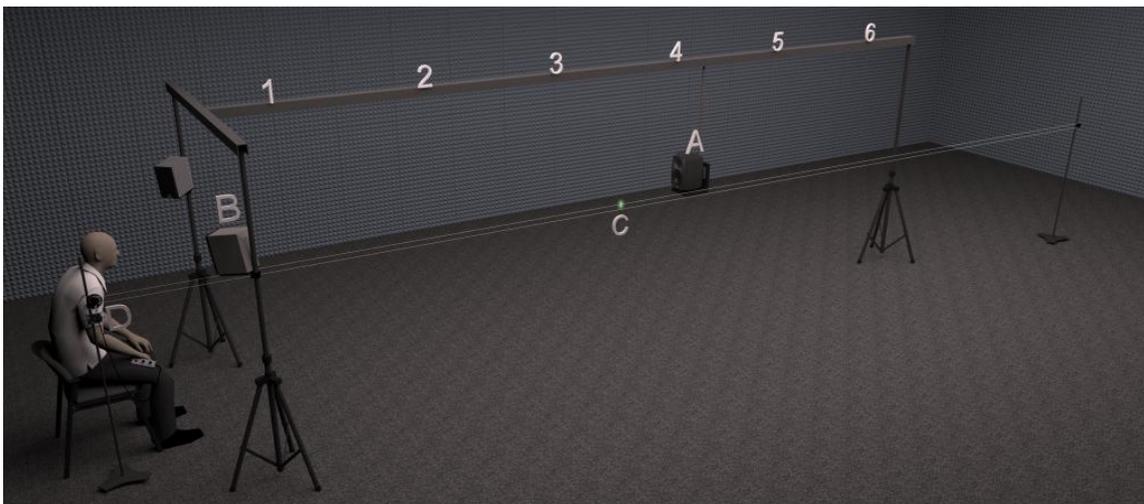
Participaron 32 voluntarios (26 hombres, con edades comprendidas entre 18 y 35 años). La mayoría de los voluntarios (~ 75%) eran estudiantes de la Escuela de Artes de la Universidad Nacional de Quilmes. Todos los participantes informaron una visión normal (o corregida) y una audición normal. Ninguno de los participantes tenía conocimiento previo de la sala de pruebas ni de sus dimensiones.

#### *Dispositivo experimental y estímulos auditivos y visuales*

El montaje experimental consistió en un altavoz (Genelec 8020B, bi-amplificado 50W) situado delante del participante, a 1.2 m por encima del nivel del piso. La fuente sonora estuvo libre de moverse suspendida a lo largo de un riel metálico de 6 m de longitud (Fig. 8.1A). La fuente de sonido se movió manualmente permitiendo que el estímulo se presentara a diferentes distancias del participante ( $D$ ). El parlante fue controlado por una interfaz de audio estéreo (PreSonus AudioBox 2x2 USB). El estímulo auditivo consistió en ráfagas de ruido blanco de 500 ms (ancho de banda medido de 0.05 a 20 kHz). El nivel sonoro del estímulo se fijó a un nivel confortable, de aproximadamente 70 dBA, medido en la posición del participante con la fuente localizada a  $D=1$  m. Entre los ensayos, se presentó un sonido de enmascaramiento a través de dos altavoces situados a ambos lados del participante (Fig. 8.1B) a un nivel similar al del estímulo, con el fin de enmascarar cualquier ruido posible relacionado con el procedimiento de movimiento del altavoz. Dos segundos después del final del sonido de enmascaramiento, el estímulo auditivo fue presentado a través del parlante de prueba.

El método de respuesta CMDL consistió en un sistema mediante el cual el participante podía mover (usando un control remoto manual) un marcador visual que se mueve paralelo a las posiciones posibles del altavoz (20 cm a la derecha), a la altura de la cabeza del oyente (Fig 8.1 C). El valor máximo posible de la respuesta fue de 8,5 m medido desde la posición del oyente. El marcador visual consistió en un par de LEDs verdes (estándar, 3mm) situados verticalmente y separados 4 cm entre sí. La distancia comprendida entre el participante y el marcador visual se midió con un codificador óptico conectado directamente a una interfaz de un microcontrolador Arduino Duemilanove. El sistema permitió una resolución espacial de aproximadamente 5 mm. Todos los experimentos se realizaron en completa oscuridad y los participantes no pudieron ver ningún objeto en la sala durante el procedimiento.

La intensidad de los LEDs fue ajustada para evitar iluminar las superficies de la habitación. Además, para evitar reflejos en el parlante, el mismo fue cubierto con un material opaco no reflectante, y los LEDs estuvieron cubiertos con una funda para asegurar la iluminación direccionada y focalizada hacia la posición del participante.



**Figura 8.1.** Modelo tridimensional del montaje experimental. (A) parlante móvil, (B) sistema de enmascaramiento; (C) marcador visual móvil formado por un par de LEDs verdes (estándar, 3 mm) situados verticalmente a 4 cm entre sí.

## 8.4. Experimento 1

### 8.4.1. Procedimiento

El propósito de este experimento fue comparar RV y CMDL como métodos de respuesta para medir la PAD en el campo lejano. Los participantes se dividieron en dos grupos. La mitad de los participantes (Grupo A,  $n = 8$ ) emplearon RV como método de respuesta, utilizando una escala de metros con una precisión de un decimal. La otra mitad (Grupo B,  $n = 8$ ) empleó el método CMDL descrito anteriormente. Antes de entrar en la sala de pruebas, cada participante fue instruido sobre la tarea que debían realizar. A continuación, el participante fue cegado (mediante un antifaz) y conducido a la sala de pruebas, en donde estuvo sentado en una silla situada en el punto cero. El procedimiento consistió en presentar el estímulo auditivo ( ruido blanco de 500 ms de duración,) en una de las seis distancias posibles ( $D = 1, 2, 3, 4, 5$  y  $6$  m), para luego pedirle al participante que indicara la distancia aparente egocéntrica a la fuente sonora. En el caso del Grupo B (CMDL), los sujetos fueron instruidos para mover un marcador visual usando un control manual desde el punto cero hasta la distancia en la que percibían la fuente de sonido. Antes de realizar la prueba, se le pidió al sujeto que explorara el rango completo de posiciones (8.5 m) para el marcador visual. Cada distancia de ensayo se repitió tres veces en orden aleatorio, dando como resultado un total de 18 ensayos por bloque. Luego de cada ensayo, los participantes fueron instruidos para mover el marcador visual de nuevo al punto cero. Sólo se recogió una respuesta por ensayo, y los participantes no recibieron ninguna información sobre sus respuestas.

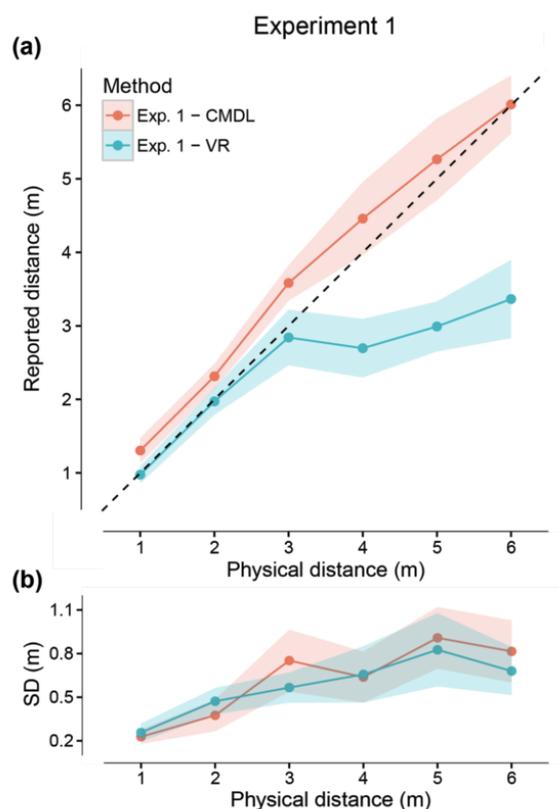
#### 8.4.2. Resultados

La Figura 8.2 a muestra los juicios de distancia subjetiva media ( $\pm$  SEM) obtenidos con ambos métodos de respuesta, en función de la distancia física (la media y los intervalos de confianza se muestran en la Tabla 8.1, Exp. 1 CMDL y RV). Los datos de un participante del Grupo B fueron excluidos del análisis debido a un fallo en la recolección de las respuestas durante el experimento. La distancia percibida bajo ambas condiciones de respuesta muestra diferencias menores para  $D \leq 3$  m. Además, la respuesta con RV muestra una compresión para distancias situadas a  $D > 3$  m mientras que para CMDL la respuesta es lineal para el rango completo de distancias testeadas.

Se analizaron las diferencias entre ambas curvas mediante un ANOVA split-plot aplicado a la respuesta, con "distancia objetivo" (6 niveles, intra sujetos) y "método de respuesta" (2 niveles, entre sujetos) como factores fijos. Consistentemente con la inspección visual de los resultados, la prueba produjo un efecto significativo de ambos factores [distancia:  $F(2,86, 37,2) = 70,6$ ,  $p = 3,48 \times 10^{-15}$ ,  $\eta^2_p = 0,845$ ; Método de respuesta:  $F(1, 13) = 10,0$ ,  $p = 7,4 \times 10^{-3}$ ,  $\eta^2_p = 0,436$ ] y su interacción [ $F(2,86, 37,2) = 10,6$ ,  $p = 4,49 \times 10^{-5}$ ,  $\eta^2_p = 0,449$ ]. Debido a la presencia de una fuerte interacción entre de factores, también probamos la diferencia para cada distancia por separado. Se encontraron diferencias significativas entre los métodos para los dos objetivos más alejados (two tailed, t-test de dos muestras con corrección secuencial Holm-Bonferroni para seis comparaciones, 5 m:  $t(13) = 3,60$ ,  $p = 0,0032 < 0,01$ , Cohen's  $d_s = 1,86$ ; 6 m:  $t(13) = 3,89$ ,  $p = 0,0018 < 0,0083$ ,  $d$  de Cohen = 2,02).

Para explorar en profundidad estas diferencias, se calculó el rango de respuesta porcentual, definido como la diferencia entre reportes de las distancias máximas y mínimas, normalizado por el rango de distancia física. Se analizaron tres rangos físicos de distancia: 1-6 m, 1-3 m y 3-6 m. Estos rangos fueron elegidos sobre la base del cambio aparente con la distancia de la pendiente en la curva de respuesta promedio, y están en línea con estudios previos sobre PAD que mostraron subestimación de la fuente después de 3 m (Calcagno, et al., 2012). Se encontraron diferencias significativas (t-test de dos muestras, corregido con Holm-Bonferroni para tres comparaciones) para el rango de respuestas completo (1-6 m) [ $t(13) = 3,96$ ,  $p = 1,6 \times 10^{-3} < 0,025$ , Cohen's  $d_s = 2,2$ ], con rangos de respuesta más amplios para CMDL que para RV ( $M = 95,1\%$  frente a  $M = 52,0\%$ ). En cuanto a los dos rangos más cortos (1-3 m y 3-6 m), encontramos diferencias significativas para el rango de 3-6 m [ $t(13) = 5,85$ ,  $p = 5,7 \times 10^{-3} < 0,017$ ,  $d$  de Cohen = 3,25], con un rango de respuesta más amplio para CMDL que para RV ( $M = 84,6\%$  vs.  $M = 37,2\%$ ), pero no para 1-3 m [ $t(13) = 1,09$ ,  $p = 0,89$ ,  $d$  de Cohen = 0,6]. De estos resultados observamos que las diferencias de precisión para ambos métodos se observan después de 3 m, lo cual evidencia diferencias en la compresión de respuesta.

Finalmente, se analizó la variabilidad en la respuesta entre los ensayos. La Figura 8.2b muestra la desviación estándar (DS) promediada entre los sujetos (+/- SEM) como una función de la distancia de la fuente. Aunque el número de ensayos por condición fue bajo (3 ensayos), el número de sujetos ( $n = 8$ ) y las condiciones experimentales (6 distancias x 2 métodos de respuesta) pueden compensar los bajos grados de libertad en la medición del SD para cada objetivo. Los datos muestran un patrón claro, que se confirma mediante la aplicación de un ANOVA (la misma prueba que con la respuesta media): la variabilidad intra-sujeto aumenta con la distancia [ $F(5, 65) = 5,37, p = 3,43 \times 10^{-4}, \eta^2_{\{2\}} P = 0,292$ ] y no es estadísticamente diferente entre métodos de respuesta [ $F(1, 13) = 0,081, p = 0,78, \eta^2 P = 6,18 \times 10^{-3}$ ]. Las variabilidades no muestran interacción aparente [ $F(5, 65) = 0,307, p = 0,91, \eta^2 p = 0,23$ ]. En conclusión, la respuesta con ambos métodos dio como resultado la misma variabilidad intra-sujeto.



**Figura 8.2.** Resultados del Experimento 1. (a) respuestas subjetivas promedio de percepción auditiva de distancia (+/- SEM) obtenidas con el método CMDL (rojo) y RV (cian), como una función de distancia a la fuente. Las líneas negras punteadas indican una performance perfecta (respuesta = distancia correcta). b) Promedio intra-sujetos (+/- SEM) de la DS individual para cada distancia de método de respuesta.

### 8.4.3. Discusión

Los resultados obtenidos en Experimento 1 muestran que las respuestas obtenidas con CMDL fueron más verídicas (menos sesgadas y menos comprimidas) con respecto a las obtenidas con RV (Figura 8.2a). Las RVs fueron consistentes con los resultados previos obtenidos en nuestro laboratorio bajo las mismas condiciones experimentales (Calcagno et al., 2012), con respuestas que muestran un incremento lineal para distancias cortas y luego se presentan casi constantes cuando la distancia de la fuente  $D$  se incrementa más allá de 3 m. La principal diferencia entre ambos métodos es que, para  $D > 3$  m, las RV mostraron un fuerte sesgo negativo, mientras que con CMDL no lo hicieron. Esto se refleja en la interacción significativa en la respuesta  $y$ , más específicamente, en las diferencias en las respuestas para  $D > 3$  m. Una posible causa de este efecto se puede encontrar en la disminución de los valores tanto del rango de respuesta de 3 a 6 m como del exponente de la función de potencia de RV en comparación con el obtenido con CMDL (ver Tabla 1). La compresión de la respuesta observada con RV fue similar a la informada por Zahorik et al. (2005) en un meta análisis de 21 estudios previos de PAD ( $M = 0,65$  vs  $M = 0,54$ , respectivamente), y también a la obtenida por Calcagno, et al. (2012) ( $M = 0,55$ , IC del 95% [0,54, 0,56]). Por el contrario, CMDL mostró una respuesta media con un mínimo sesgo y compresión. Los resultados obtenidos son compatibles con muchos estudios de PAD (Ashmead et al., 1995; Brungart et al., 2000) y VDP (Brungart et al., 2000; Andre y Rogers, 2006) en los que los métodos de acción directa produjeron respuestas más verídicas que las obtenidas con RV.

Varios estudios previos (Zahorik, 2001; Calcagno et al., 2012) han mostrado que la información ambiental visual reduce tanto el sesgo como la compresión de las respuestas verbales en experimentos de PAD. En este contexto, no sabemos cuánto de la mejora en la precisión de la respuesta observada con el método CMDL se debe al método de respuesta en sí, o a la información espacial visual adicional disponible cuando se utiliza el dispositivo CMDL. Además, no sabemos con certeza cuán precisos son los participantes en la estimación de la distancia al marcador visual móvil. Es decir, ¿saben los participantes la distancia real a la que se encuentra el marcador visual cuando responden con el método de CMDL? Para comprobar esto, realizamos un segundo experimento para responder a ambas preguntas.

### 8.5. Experimento 2

Con el objetivo de responder a cada una de las preguntas planteadas en la sección anterior, el experimento 2 se dividió en dos partes. En primer lugar, se estudió la PVD al objetivo móvil utilizado durante CMDL. Para ello, los participantes ( $n = 8$ ) fueron instruidos

para desplazar el marcador visual desde el punto cero ( $D = 0$ ) a una distancia indicada verbalmente por el experimentador (que estaba sentado a la derecha del participante, a una distancia de 1 m). De esta forma, pudimos medir la relación entre la distancia física indicada por el experimentador y la distancia estimada por el participante utilizando el marcador visual móvil. Inmediatamente después de completar la primera tarea, y sin abandonar el asiento, los participantes realizaron una tarea de PAD usando el RV como método de respuesta. Esta segunda tarea apunta a saber si la información espacial visual, proporcionada por el marcador visual durante la primera tarea, pudo influir en las estimaciones mediante RV durante el experimento de ADP.

### **8.5.1. Procedimientos**

Previamente a entrar a la sala de pruebas cada participante fue instruido sobre la tarea a realizar. Luego, se le vendaron los ojos y se lo llevó a la sala de pruebas, donde fue sentado en una silla situada en el punto cero. El experimento se llevó a cabo en completa oscuridad y el participante mantuvo los ojos descubiertos para que sólo pudiera ver el marcador visual móvil (durante la primera tarea). Antes de la primera prueba, se pidió al participante que empleara el control manual para mover el marcador visual a lo largo de su rango completo (8,5 m). Para ambas tareas, las distancias objetivo fueron  $D = 1, 2, 3, 4, 5$  y  $6$  m. Cada distancia objetivo se repitió tres veces en orden aleatorio, dando un total de 18 ensayos por bloque. Tanto el montaje experimental como la localización de los objetivos fueron los mismos que en el experimento anterior.

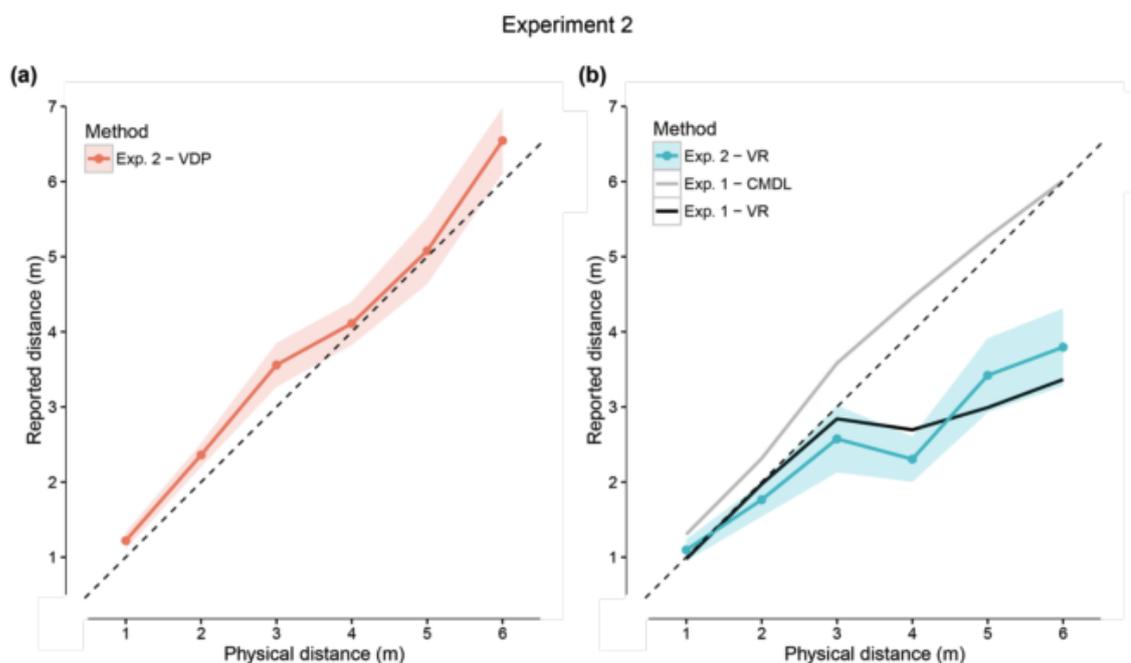
### **8.5.2. Resultados**

En la Figura 8.3a se muestran las posiciones finales de las claves visuales en función de la distancia indicada por el experimentador. Cada punto de datos corresponde a la media entre los sujetos ( $\pm$  SEM). La respuesta media muestra un sesgo mínimo, como puede confirmarse ajustando una función de potencia de la forma  $Y = aX^b$  a los datos. Los parámetros resultantes se corresponden a la relación:  $Y = X$  ( $R^2 = 0.986$ ;  $a = 1.242$  y  $b = 0.909$ ). Esta respuesta estuvo menos sesgada que las obtenidas en estudios previos de PVD en la oscuridad (Philbeck y Loomis, 1997; Calcagno et al., 2012). Una posible causa para tal diferencia es que los sujetos utilizaron algunas de las señales dinámicas adicionales disponibles cuando el marcador visual se está moviendo directamente lejos o hacia el observador. Además, es posible que el uso del control manual haya aportado información temporal extra. El hecho de que la velocidad del marcador móvil fuera relativamente constante implica que la duración de la respuesta fue proporcional al desplazamiento del marcador. Esta información temporal puede haber ayudado a los sujetos a mejorar su rendimiento estimando el tiempo necesario para llevar el marcador

visual a distancias más cortas (donde la respuesta es más precisa), y luego extrapolando a distancias mayores. De ser cierto este caso, los sujetos pueden haber necesitado un cierto número de ensayos para adquirir la información de la velocidad del marcador y, al mismo tiempo, pueden haber mejorado la respuesta cuando se familiarizaron con las características móviles del dispositivo. A su vez, esto también habría producido un cambio (recalibración) de la respuesta entre los ensayos. Con el fin de probar esta hipótesis, se aplicó un ANOVA bidireccional, con factores fijos "distancia objetivo" (6 Niveles) y "número de prueba" (3 niveles). La prueba mostró un efecto no significativo ni para el "número de ensayo" [ $F(2, 14) = 1,20, p = 0,33, \eta^2 P = 0,146$ ] ni la interacción entre el "número de ensayo" y "Distancia objetivo" [ $F(3.84, 26.9) = 0.995, p = 0.42, \eta^2 P = 0,124$ ], sugiriendo que no hubo recalibración de la respuesta durante el experimento. Además, la mayoría de los sujetos respondieron realizando diversas aproximaciones (entre 3 y 4) del marcador visual antes de llegar a su posición final, lo que está en contradicción con una respuesta gobernada puramente por información temporal. Aunque no se midió la estructura detallada de la respuesta, esta observación cualitativa sugiere que las señales visuales (en lugar de temporales) representó la principal fuente de información empleada por los sujetos durante la tarea.

La Figura 8.3b muestra el promedio de las estimaciones de distancia auditiva subjetiva (+/- SEM) obtenidos con RV (durante la segunda tarea) en función de la distancia a la fuente (la media y los intervalos de confianza se muestran en la Tabla 8.1, Exp. 2 RV). La respuesta sigue de cerca la obtenida con RV en Experimento 1. Para probar si la información visual disponible en la primera parte del experimento influyó en los de RV, comparamos los resultados obtenidos con el RV en los experimentos 1 y 2 (ANOVA split-plot con "distancia objetivo" y "experimento" como factores fijos dentro y entre sujetos, respectivamente). No se encontraron diferencias significativas entre los experimentos [experimento:  $F(1, 14) = 0,002, p = 0,96, \eta^2 P = 1,31 \times 10^{-4}$ ]; Experimento x distancia objetivo:  $F(2,1, 29,3) = 1,40, p = 0,26, \eta^2 p = 0.091$ ], lo cual indica que la información proporcionada por la tarea de calibración anterior (tanto las señales visuales como la propia calibración) no modificaron la respuesta de PAD obtenida inmediatamente después con RV. También analizamos la compresión de la respuesta de PAD ajustando funciones de ley de potencia  $Y = aX^b$  a las respuestas individuales. Los parámetros fueron similares a las obtenidas para la respuesta de Exp. 1 ( $R^2 = 0,857; A = 1,114$  y  $b = 0,654$ ). El exponente no mostró diferencias significativas cuando se comparó con el obtenido en Exp. 1 RV [ $t(14) = 0,157; P = 0,88, d$  de Cohen =  $0,078$ ]. La única diferencia encontrada (T-test de dos muestras, Holm-Bonferroni corregido por tres comparaciones) entre estas dos condiciones fue para el intervalo de respuesta porcentual para distancias más altas (3-6 m), donde hubo un aumento en el Exp. 2 en comparación con Exp. 1 [ $M = 59,7\%$  vs  $M = 37,2\%; T(14) = 3,23, p = 0,006 < 0,017, d$  de Cohen =  $1.11$ ].

Finalmente, se analizó la variabilidad intra-sujeto de los RVs (por medio del SD individual). El patrón es muy similar al obtenido en el experimento anterior, con el SD aumentando con la distancia de una manera aparentemente lineal. Comparamos los resultados con la RV de Exp. 1 (ANOVA con las mismas características que para la respuesta media). Se encontró un efecto significativo de la distancia objetivo [F (2,97, 41,6) = 4,66,  $p = 6,9 \times 10^{-3}$ ,  $H_2 p = 0,25$ ], pero no hubo diferencias significativas en el experimento [experimento: F (1,14) = 0,87,  $p = 0,37$ ,  $\eta^2 p = 0,058$ ]; Experimento x distancia objetivo: F (2,97, 41,6) = 0,117,  $p = 0,95$ ,  $\eta^2 p = 8,3 \times 10^{-3}$ ] por lo tanto, concluimos que la información proporcionada por el método CMDL durante la primera tarea no modificó la variabilidad intra-sujeto de los RVs en la siguiente tarea de PAD.



**Figura 8.3.** Resultados del Experimento 2. a) Resultados de la tarea de PVD para cada distancia indicada por el experimentador. b) respuestas de PAD obtenidas en el experimento 2 con RV (cian) comparadas con la CMDL (gris) y RV (negro) y las respuestas obtenidas en el experimento 1. Ambas figuras muestran la respuesta subjetiva +/- SEM. La línea negra punteada indica una performance perfecta (respuesta = distancia correcta).

### 8.5.3. Discusión

Los resultados de la primera tarea demuestran que el método CMDL proporciona a los participantes la información necesaria para saber la distancia dónde se encuentra el marcador visual. Varios estudios previos han indicado que la información espacial visual puede almacenarse en la memoria y luego utilizarse en experimentos realizados en la

oscuridad (Loomis et al., 1998, Andre y Rogers, 2006; Calcagno et al., 2012). Si la respuesta observada con CMDL en el Experimento 1 fue inducida por la información espacial visual proporcionada por el marcador móvil, se esperaría que la información obtenida en la primera parte del Experimento 2 afecte la respuesta del RV medida en la siguiente tarea de PAD. Sin embargo, este no fue el caso.

Este resultado no coincide con lo que se informó en trabajos anteriores donde la información visual ambiental indujo respuestas de RV más precisas (Calcagno et al., 2012). La principal diferencia entre las condiciones visuales utilizadas aquí y en este estudio anterior reside en el número y la complejidad de las señales visuales presentadas en cada caso. Tal vez la mayor cantidad de referencias visuales en Calcagno et al. (2012) facilitó la memorización del contexto visual, logrando una memoria más robusta de la sala donde ocurrieron los hechos. Sin embargo, no sabemos exactamente cuál es el efecto de tal memoria espacial en la información visual proporcionada por el dispositivo CMDL. La escasez de referencias visuales durante la manipulación del marcador visual móvil podría haber dificultado mantener la información visual espacial en la memoria durante todo el experimento.

Con el fin de minimizar la influencia de la memoria en la respuesta RV, se realizó un tercer experimento donde, para cada ensayo, los participantes realizaron un informe mediante CMDL, seguida inmediatamente por un RV.

## **8.6. Experimento 3**

El objetivo de este experimento fue comprobar si las señales visuales proporcionadas por el método CMDL influyen en las respuestas de RV cuando cada método se emplea en ensayos sucesivos. Con este fin, se realizó un experimento de PAD en el que los métodos de respuesta fueron intercalados.

### **8.6.1. Procedimientos**

Un grupo de sujetos ( $n = 8$ ) realizó un experimento de PAD empleando sucesivamente los métodos CMDL y RV, es decir, en un ensayo, el sujeto respondió con CMDL, y en el siguiente ensayo con RV. Este diseño nos permitió minimizar los efectos de la memoria de un método de respuesta a la otra. Bajo esta restricción, cada combinación de posición y método de respuesta fue presentado al azar tres veces, dando un total de 36 ensayos ( $6 \times 2$  métodos de respuesta  $\times 3$  ensayos = 36 ensayos). Tanto la configuración experimental como la ubicación de los objetivos fueron las mismas que en los experimentos previos.

La Figura 8.4 muestra la respuesta media (+/- SEM) obtenida en el Experimento 3 con ambos métodos (la media y los intervalos de confianza se muestran en la Tabla 8.1, Exp. 3 CMDL y RV). Al igual que el Experimento 1, el rango de la respuesta fue mayor con CMDL que con el RV (RV:  $M = 3,10$  m frente a CMDL:  $M = 4,77$  m). Aunque los participantes usaron CMDL y RV secuencialmente, las respuestas con ambos métodos mostraron un patrón similar al observado en Exp. 1. Sin embargo, en comparación con los resultados del Exp. 1 (líneas gris y negro en la Fig. 8.4), las respuestas de CMDL se presentan más sobrestimadas, y los RVs parecen menos compresivos.

Se analizó la diferencia entre los métodos de respuesta mediante un ANOVA con "distancia objetivo" y "método de respuesta" como factores fijos. El análisis mostró un efecto significativo de ambos factores principales [distancia objetivo:  $F(1.37, 9.6) = 26.95$ ,  $p = 2.45 \times 10^{-4}$ ,  $\eta^2_p = 0.794$ ; Método de respuesta:  $F(1, 7) = 8.59$ ,  $p = 0.022$ ,  $\eta^2_p = 0.551$ ] y la interacción  $F(5, 35) = 7.19$ ,  $p = 1.2 \times 10^{-4}$ ,  $\eta^2_p = 0.507$ ]. Debido a la presencia de una fuerte interacción, se comparó la respuesta a través de los métodos de cada distancia por separado. Se obtuvieron diferencias significativas para todas las distancias, excepto para el objetivo localizado a 2 m [ t-test de pares de muestras con corrección de Holm-Bonferroni para seis comparaciones; 1 m:  $t(7) = 3,39$ ,  $p = 0,0060$ ; 3 m:  $t(7) = 3,05$ ,  $p = 0,018$ ; 4 m:  $t(7) = 3,46$ ,  $p = 0,011$ ; 5 m:  $t(7) = 3,56$ ,  $p = 0,0092$ ; 6 m:  $t(7) = 3,95$ ,  $p = 0,0056$ ].

A continuación, analizamos la compresión de la respuesta. En este experimento ninguno de los intervalos de respuesta porcentual fue diferente de forma significativa entre los métodos sugiriendo un efecto menor en la compresión de la respuesta. Además, ambos métodos fueron bien ajustados por funciones de ley de potencia de la forma  $Y = aX^b$  (CMDL:  $R^2 = 0.968$ ; a: 1.916; b: 0.737; VR:  $R^2 = 0.917$ ; a: 1.263; b: 0.728), con exponentes similares [t (7) = 0,120,  $p = 0,91$ ,  $d_z$  de Cohen = 0,045].

Finalmente, se analizó el error de la respuesta. La SPE indicó que la respuesta CMDL fue sistemáticamente sobrestimada, mientras que los RV fueron ligeramente subestimadas [CMDL:  $M = 38,6\%$ , IC del 95% [6,64, 70,5]; RV:  $M = -9,04\%$ , IC del 95% [-43,4, 25,3]; Muestra de dos pares, t-test de dos colas,  $t(7) = 2,83$ ,  $p = 0,025$ ,  $d$  de Cohen = 0,99]. El UPE, por otra parte, era muy similar para ambos métodos [CMDL:  $M = 48,2$ , 95% CI [23.3, 73.1]; RV:  $M = 49,1$ , IC del 95% [41,6, 56,7]; prueba t de muestras pareadas,  $t(7) = 0,084$ ,  $p = 0,93$ ,  $d = 0,030$ ].

| Distancia Física (m) |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                      | 1                    | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    | 6                    |
| Experiment           | $M(m)$               | $M(m)$               | $M(m)$               | $M(m)$               | $M(m)$               | $M(m)$               |
|                      | $[CI](m)$            | $[CI](m)$            | $[CI](m)$            | $[CI](m)$            | $[CI](m)$            | $[CI](m)$            |
| Exp. 1 VR            | 0.98<br>[0.75, 1.21] | 1.97<br>[1.62, 2.32] | 2.84<br>[2.10, 3.58] | 2.70<br>[1.92, 3.47] | 2.99<br>[2.33, 3.65] | 3.37<br>[2.32, 4.41] |

|                    |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Exp. 1 CMDL</b> | 1.30<br>[0.97, 1.63] | 2.31<br>[1.99, 2.64] | 3.58<br>[3.11, 4.05] | 4.46<br>[3.48, 5.43] | 5.26<br>[4.18, 6.35] | 6.01<br>[5.24, 6.79] |
| <b>Exp. 2 VR</b>   | 1.10<br>[0.82, 1.37] | 1.77<br>[1.33, 2.20] | 2.58<br>[1.70, 3.45] | 2.30<br>[1.72, 2.89] | 3.42<br>[2.46, 4.39] | 3.80<br>[2.78, 4.81] |
| <b>Exp. 3 VR</b>   | 1.77<br>[0.64, 1.71] | 2.30<br>[1.33, 3.28] | 2.58<br>[1.56, 3.59] | 3.33<br>[1.97, 4.70] | 3.73<br>[2.24, 5.23] | 4.16<br>[2.38, 5.95] |
| <b>Exp. 3 CMDL</b> | 1.88<br>[1.16, 2.60] | 3.23<br>[2.38, 4.09] | 3.89<br>[2.85, 4.93] | 4.97<br>[3.85, 6.09] | 5.94<br>[4.95, 6.92] | 6.54<br>[5.26, 7.82] |

**Tabla 8.1:** Promedio de los reportes verbales de distancia entre-subjetos y el intervalo de confianza. (CI es el 95% de intervalo de confianza)

### 8.6.2. Discusión

De manera similar al Experimento 1, los resultados del Experimento 3 muestran diferencias entre ambos métodos de respuesta, reflejados como efectos significativos en la respuesta global tanto del método de respuesta como de su interacción con la distancia al objetivo. Estos resultados sugieren que las diferencias observadas en el Experimento 1 se debieron al método de la respuesta en lugar de los cambios en la calibración dependientes de la información visual proporcionada por el dispositivo CMDL. Sin embargo, una diferencia del Experimento 1, ni la compresión ni el intervalo de respuesta mostraron diferencias significativas entre los métodos, siendo una posible causa que ambos métodos se hayan influenciado entre sí. Por ejemplo, en el Experimento 3, RVs mostraron menos compresión que en el Experimento 1 ( $M = 0,728$  frente a  $M = 0,654$ , respectivamente) mientras que la respuesta CMDL fue más compresiva que en el Experimento 1 ( $M = 0,737$  frente a  $M = 0,875$ , respectivamente). El hecho de haber entrelazado ambos métodos de respuesta en ensayos sucesivos pudo haber causado una asociación entre las señales acústicas relacionadas con la distancia de la fuente (idénticas para ambas condiciones de respuesta) y la representación perceptiva inherente a cada metodología, influyendo así en la calibración de la respuesta en cada caso (CMDL induciendo respuestas menos compresivas en RV, y RV induciendo más respuestas de mayor compresión en CMDL). Sin embargo, debido a la alta variabilidad de las respuestas, no podemos ser concluyentes sobre la solidez de este efecto. Quizás la alternancia entre los métodos de respuesta forzó a los participantes a recalibrar constantemente su percepción, siendo ésta la causa del aumento de la variabilidad.

Si las diferencias entre RV y CMDL observadas en el Experimento 1 se debieron a la presencia de información espacial visual durante la tarea CMDL, el uso sucesivo de ambos métodos debería haber mejorado notablemente las RVs. Sin embargo, esto no se observó. Teniendo en cuenta este resultado y el obtenido en Experimento 2, se concluye que las diferencias observadas en las respuestas obtenidas con CMDL y RV se debieron

principalmente a factores inherentes a los propios métodos de respuesta y no a factores externos relacionados con la información visual espacial proporcionada por el marcador visual móvil durante CMDL.

### **8.7. Discusión general**

El objetivo principal de este estudio consistió en evaluar la eficacia del método CMDL propuesto para medir las estimaciones de PAD de fuentes localizadas en el campo lejano. El experimento 1 mostró que en el caso de CMDL las respuestas fueron significativamente menos sesgada y menos compresiva que los RVs. Este resultado está en línea con numerosos estudios previos de PAD y PVD, donde los métodos de acción directa mostraron respuestas menos sesgadas que las obtenidas con informes verbales (Brungart et al., 2000; Andre y Rogers, 2006).

Los resultados del Experimento 2 mostraron que los participantes fueron precisos en la localización del marcador visual a una distancia expresada verbalmente por el experimentador. Este resultado muestra que, al responder mediante el método de CMDL, los participantes parecían saber con exactitud la distancia real al marcador visual. Esto significa que al usar el dispositivo CMDL los participantes tuvieron acceso a información visual espacial (por ejemplo, que la habitación tiene al menos 8,5 m de longitud) que no estaba disponible para los participantes que respondieron verbalmente. Sin embargo, los resultados de los experimentos 2 y 3 mostraron que esta información tiene poca influencia sobre la respuesta obtenida con RVs. En esta línea, los RVs de los experimentos 2 y 3 no mostraron diferencias significativas para ninguna de las variables (respuesta, compresión y rango de respuesta) obtenidas con el mismo método en el Experimento 1. Si la información visual proporcionada por el dispositivo CMDL (y no el método en sí) fue responsable de la respuesta robusta y más precisa observada en Exp. 1, se habría esperado que esta información influenciara fuertemente los RVs en ambos Experimentos 2 y 3, situación que no se observó. Los resultados combinados de los Experimentos 2 y 3 sugieren que las diferencias observadas entre los métodos del Experimento 1 no fueron inducidos por la información espacial adicional obtenida durante el uso del dispositivo CMDL.

Las diferencias observadas entre las respuestas de RV y CMDL podrían deberse a cambios en la distancia percibida inducida por el método o a cambios en la calibración de la distancia reportada. Los resultados obtenidos aquí no nos permiten ser concluyentes ya que los resultados sugieren una mezcla de ambos factores. Por ejemplo, el hecho de que las respuestas obtenidas con CMDL y RV muestran una interacción significativa (Experimentos 1 y 3) sugiere que ambos métodos de respuesta usan las señales disponibles de manera diferente y construyen representaciones subyacentes funcionalmente distintas. Las diferencias en la compresión y el rango de respuesta que se

observaron en Experimento 1 también sugieren que ambos métodos están controlados por representaciones funcionalmente distintas.

Por otra parte, la presencia de varios factores sugieren que las diferencias entre el RV y CMDL se deben a diferencias en la calibración de la respuesta. En primer lugar, la variabilidad observada con ambos métodos fue muy similar, lo que indica que la tarea fue igualmente difícil en ambos casos. En segundo lugar, los estudios previos de PVD han reportado que la precisión de respuesta es más afectada por los factores ambientales para el método de RVs que para métodos de localización directa (Andre y Rogers, 2006; Woods et al., 2009), lo cual sugiere que los RVs necesitan más referencias espaciales para calibrar correctamente la percepción de distancia. De hecho, estudios previos de PAD mostraron respuestas precisas de RVs en presencia de múltiples fuentes de información del contexto visual (Zahorik, 2001; Calcagno et al., 2012). Estos resultados sugieren que los participantes son capaces de percibir la distancia a la fuente con precisión, pero necesitan referencias espaciales para percibir las correctamente. Una de las principales diferencias entre los dos métodos es que los informes CMDL no requieren ninguna transformación mental de la ubicación de destino: es decir, el participante sólo necesita localizar el marcador móvil en la ubicación percibida de la fuente de sonido. Por el contrario, el RV requiere que el participante calcule mentalmente un valor explícito para la ubicación percibida de la fuente de sonido. Este paso podría conducir a errores en la calibración de la respuesta, especialmente en la oscuridad, donde la escasez de señales visuales de referencia aumenta la incertidumbre en cuanto a la representación de la ubicación del objetivo.

Según resultados anteriores obtenidos por Calcagno et al. (2012) y Zahorik (2001) esperábamos que la información espacial proporcionada por el marcador visual móvil afecte los RVs. Sin embargo, esto no se observó en los Experimentos 2 ni 3. Diversos factores podrían explicar estos resultados contradictorios. En primer lugar, en Calcagno et al. (2012) se utilizaron como marcas visuales objetivos fijos situados a distancias conocidas por el participante. Dichos objetivos se iluminaron durante todo el experimento y por lo tanto sirvieron como una referencia fija permanente para calcular la distancia percibida. En segundo lugar, el estudio de Zahorik se realizó bajo condiciones de pistas espaciales completas y por lo tanto los RVs fueron influenciados por fuentes de información visual más numerosas y complejas, en comparación de las que podría obtenerse aquí mediante el dispositivo CMDL.

En Calcagno et al. (2012), la hipótesis de que el RV mejora las respuestas debido a la presencia de información visual podría ocurrir debido a la relación entre el tamaño de la sala y la calibración de los RVs. Más tarde, Kolarik et al. (2013) apoyaron esta hipótesis mostrando una correlación positiva entre la respuesta de la PAD y el tamaño de la habitación percibida a través de señales de reverberación. En nuestro caso, al mover el

marcador visual CMDL, los participantes obtuvieron información visual relacionada con la longitud de la habitación. Además, en el Experimento 2, el experimentador informó explícitamente (mediante un informe verbal) la distancia máxima a estimar (6 m). Sin embargo, el conocimiento de la distancia mínima que tenía la habitación (la distancia máxima a la que podía colocarse el marcador visual móvil) fue insuficiente para inducir cambios en los RVs. Ante esta evidencia contradictoria, creemos que se necesitan más estudios para dilucidar la influencia de las señales visuales y el conocimiento del tamaño de la sala sobre la PAD.

Creemos que el CMDL es un método interesante para medir la PAD, ya que parece ser una respuesta natural, dado que no se requiere ninguna transformación mental de la ubicación del objetivo y los sujetos pueden usar sus propios puntos de referencia anatómicos (Brungart et al., 2000). Por otra parte, la CMDL tiene grandes ventajas en relación a otros métodos de acción directa utilizados en el campo lejano. En primer lugar, el participante no tiene que levantarse para indicar la distancia percibida, lo que facilita enormemente la tarea. Esto es fundamental para medir la PAD en personas que tienen dificultad para moverse, y también permite que el tiempo de respuesta sea más rápido para los participantes sanos. En segundo lugar, el dispositivo CMDL facilita la tarea y permite la recolección automática de datos experimentales, posibilitando experimentos con un mayor tamaño de muestra. En tercer lugar, CMDL puede ser replicado fácilmente en condiciones idénticas en diferentes entornos. El método propuesto en este trabajo comprende una tarea flexible para los participantes, reduciendo el agotamiento y la falta de concentración durante el experimento, además de permitir una medición continua de las distancias estimadas y acceso rápido a los datos experimentales.

Por último, de acuerdo con los resultados presentados en este trabajo, CMDL permite una percepción precisa de la posición de una fuente de sonido, incluso en la oscuridad, reduciendo el efecto del entorno de prueba. Sin embargo, una de las limitaciones del método CMDL aquí presentado es que las pruebas deben ser realizadas en completa oscuridad, mientras que para la mayoría de los métodos basados en RV es suficiente con la visión oclusiva del participante. Este último requisito limita el método a entornos cerrados y complica el papel del experimentador durante el procedimiento.

Un inconveniente general en el estudio de la PAD es la falta de consenso sobre la metodología utilizada para medir las respuestas de los oyentes. Esta heterogeneidad metodológica dificulta claramente la comparación de los resultados obtenidos en los diferentes estudios. Unificar los criterios por los que se mide la PAD sería un paso muy importante en la comprensión de este tema de investigación.

## **8.8. Referencias bibliográficas**

Andre, J. y Rogers, S. Using verbal and blind-walking distance estimates to investigate the two visual systems hypothesis. *Attention, Perception, and Psychophysics* 68(3), 353-361 (2006).

Ashmead, D. H., Davis, D. L., y Northington, A. Contribution of listeners' approaching motion to auditory distance perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 21(2), 239 (1995).

Bronkhorst, A. W., y Houtgast, T. (1999). Auditory distance perception in rooms. *Nature*, 397(6719), 517-520.

Brungart, D. S., Rabinowitz, W. M., y Durlach, N. I. Evaluation of response methods for the localization of nearby objects. *Attention, Perception, y Psychophysics* 62(1), 48-65 (2000).

Calcagno, E. R., Abregú, E. L., Eguía, M. C. y Vergara, R. O.. The role of vision in auditory distance perception. *Perception*, 41(2), 175-192 (2012).

Calcagno, E. R., Abregu, E. L., Vergara, R. O. Revisión de los aspectos más relevantes en el estudio de la percepción auditiva de distancia. *Revista Interamericana de Psicología* 48, 3-12 (2014).

Da Silva, J. A. Scales for perceived egocentric distance in a large open field: Comparison of three psychophysical methods. *The American Journal of Psychology*, 119-144. (2014).

Fluitt, K., Mermagen, T. y Letowski, T. Auditory distance estimation in an open space. In *Soundscape Semiotics - Localization and Categorization*. Edited by Herve Glotin, Publisher: Intech (1985).

Fontana, F., y Rocchesso, D. Auditory distance perception in an acoustic pipe. *ACM Transactions on Applied Perception* 5(3), 16 (2008).

Iosa, M., Fusco, A., Morone, G., y Paolucci, S. Walking there: environmental influence on walking-distance estimation. *Behavioural Brain Research* 226(1), 124-132 (2012).

Kearney, G., Gorzel, M., Rice, H., y Boland, F. Distance perception in interactive virtual acoustic environments using first and higher order ambisonic sound fields. *Acta Acustica united with Acustica* 98(1), 61-71 (2012).

Kolarik, A. J., Pardhan, S., Cirstea, S., y Moore, B. C. Using acoustic information to perceive room size: effects of blindness, room reverberation time, and stimulus. *Perception* 42(9), 985-990 (2013).

Kolarik, A. J., Moore, B. C., Zahorik, P., Cirstea, S., y Pardhan, S. Auditory distance perception in humans: a review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss. *Attention, Perception, y Psychophysics* 78(2), 373-395 (2016).

Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Philbeck, J. W., y Golledge, R. G. Assessing auditory distance perception using perceptually directed action. *Attention, Perception, y Psychophysics* 60(6), 966-980. (1998).

Loomis, J. M., Philbeck, J. W., y Zahorik, P. Dissociation between location and shape in visual space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 28(5), 1202 (2002).

Parseihian, G., Jouffrais, C., y Katz, B. F. Reaching nearby sources: comparison between real and virtual sound and visual targets. *Frontiers in Neuroscience* 8, 269 (2014).

Philbeck, J. W. y Loomis, J. M. Comparison of two indicators of perceived egocentric distance under full-cue and reduced-cue conditions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 23(1), 72 (1997).

Woods, A. J., Philbeck, J. W., y Danoff, J. V. The various perceptions of distance: an alternative view of how effort affects distance judgments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 35(4), 1104. (2009).

Zahorik, P. Estimating sound source distance with and without vision. *Optometry y Vision Science* 78(5), 270-275 (2001).

Zahorik, P. Assessing auditory distance perception using virtual acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America* 111(4), 1832-1846, (2002).

Zahorik, P., Brungart, D. S. y Bronkhorst, A. W. Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research. *Acta Acustica united with Acustica* 91(3), 409-420 (2005).

## 9. EL CONTEXTO AMBIENTAL AUDITIVO AFECTA LA PERCEPCIÓN VISUAL DE DISTANCIA

En este capítulo mostramos que la Percepción Visual de Distancia (PVD) está influenciada por el contexto ambiental auditivo a través de señales relacionadas con la reverberación. Realizamos dos experimentos de PVD en dos salas oscuras con tiempos de reverberación extremadamente diferentes: una cámara anecoica y una sala reverberante. Los resultados del primer experimento muestran que los sujetos asignados a la sala reverberante sobrestimaron la distancia de los objetivos en comparación a los sujetos asignados a la cámara anecoica. Además, se encontró una correlación positiva entre la distancia máxima percibida y el tamaño de la habitación (percibida auditivamente). Se realizó un segundo experimento en el que los mismos sujetos del Experimento 1 fueron intercambiados entre habitaciones. Se encontró que los sujetos conservaron las respuestas del experimento anterior siempre que fueran compatibles con la percepción del ambiente en el que se encontraban; caso contrario, la distancia percibida estuvo sesgada en función de los límites de la habitación (percibidos auditivamente). Los resultados de ambos experimentos mostraron que el ambiente auditivo puede influir en la PVD, presumiblemente a través de señales de reverberación relacionadas con la percepción del tamaño de la habitación.

### 9.1. Introducción

La percepción visual de la distancia egocéntrica a un objetivo (Percepción Visual a Distancia, o PVD) se ha estudiado desde los tiempos de Leonardo da Vinci (1651) hasta nuestros días, donde sigue siendo objeto de numerosos y diversos estudios. La PVD ha sido estudiada en espacios exteriores e interiores en condiciones de campo abierto y de laboratorio, utilizando tanto entornos virtuales y como ambientes reales (Cutting y Vishton, 1995; Howard, 2012). Como hemos visto en el Capítulo 5, las escenas visuales contienen muchas fuentes de información diferentes (binoculares y monoculares) de distancia tales como: tamaño relativo, interposición, declinación angular, perspectiva, paralaje de movimiento, disparidad binocular y convergencia, entre otros (Semmlow y Heerema, 1979; Sousa et al., 2010). La evidencia acumulada ha demostrado que, en ambientes bien iluminados, donde hay múltiples señales visuales disponibles, la PVD es bastante precisa para objetivos de hasta 20 m de distancia (Thomson, 1983; Fukusima et al., 1997). Sin embargo, cuando las señales visuales están restringidas (por ejemplo, mediante la reducción de la iluminación ambiental), la percepción es menos precisa (Gogel, 1961; Philbeck y Loomis, 1997). Este último resultado sugiere que la información proporcionada por el lugar donde se localiza el sujeto y el objetivo, que denominamos *información*

*contextual medioambiental*, también puede influir en la percepción de objetos y eventos que se presentan en él.

En esta línea, y como hemos visto, estudios recientes han demostrado que, incluso en presencia de múltiples señales visuales, la PVD puede ser influenciada por el contexto ambiental visual. Además, la PVD de objetos familiares en entornos naturales está condicionada por la estructura del campo visual circundante (Stefanucci et al., 2005; Lappin et al., 2006). Por ejemplo, Lappin et al. (2006), mostró que tanto la exactitud como la precisión de los juicios de distancia mostraron diferencias utilizando tres tipos de ambientes con múltiples señales visuales: un vestíbulo, un pasillo y un espacio abierto con césped. Además, Witt et al. (2007) demostró que, tanto en espacios interiores como en exteriores, el espacio influye en la PVD más allá del tipo de objetivo utilizado. Finalmente, Stefanucci et al. (2005) reportaron que la PVD puede ser influenciada por la inclinación del terreno: los participantes percibieron la distancia a los objetivos a mayores distancias en terreno escarpado que en terreno plano. Estos estudios demuestran que las fuentes de información que brinda el contexto espacial sirven como complemento de las claves de PVD clásicas.

Es interesante analizar la influencia del contexto ambiental en la PDV dentro del marco de las teorías perceptivas de integración y combinación sensorial (Proffitt, 2008). Como vimos en el Capítulo 6, la integración sensorial se refiere al procesamiento de información sobre el mismo aspecto (redundante) de alguna propiedad ambiental: en la PVD, este hecho se da en las distintas señales de distancia proporcionadas por el objetivo visual. Por otro lado, la combinación sensorial se refiere al procesamiento de información sobre aspectos complementarios (no redundantes) de las propiedades ambientales observadas: en este caso, estaría representada por la información proporcionada por el medio ambiente, los objetos circundantes, y por conocimiento previo, entre otros. Estas fuentes de información son recolectadas por nuestro cerebro con el objetivo de reducir la incompletitud inherente de nuestra percepción del mundo. Curiosamente, tanto la integración como la combinación sensorial son estrategias útiles para permitir la cooperación e interacción entre las diferentes modalidades perceptivas especialmente cuando una modalidad no es suficiente para producir estimaciones robustas.

Un ejemplo reconocido de integración audiovisual es el efecto ventrílocuo, en el que la presencia de un estímulo visual localizado polariza la localización en ángulo de una fuente de sonido (Bingham, 1998; Rieser, 1995). Como vimos en el Capítulo 6 este tipo de integración también se ha demostrado para visual-propioceptivo (Bruggerman y Warren, 2010), visual-táctil (Bingham et al., 2014) y visual-háptico (Ernst y Bulthoff, 2004) interacciones.

En cuanto a la combinación sensorial multimodal, estudios recientes han demostrado que la información contextual puede afectar la percepción de la distancia auditiva de

manera multimodal. Por ejemplo, Calcagno et al. (2012) demostraron que la información visual sobre contextual aumenta la precisión de los juicios de distancia auditiva incluso cuando la fuente de sonido no es visible. Los resultados de este estudio también muestran que la PAD es significativamente mejor si se permite a los participantes observar la sala experimental antes de realizar el experimento de PAD en completa oscuridad. Como vimos en los capítulos anteriores, en este estudio se planteó la hipótesis de que la distancia percibida a la fuente sonora es calibrada por información relacionada con el tamaño de la sala experimental. Dicha hipótesis se encuentra en línea con un estudio de Gajewsky et al. (Recanzone, 1998; Lewald, 2002), en donde se reportó que la representación del espacio circundante puede servir como una referencia espacial estructurada en la cual se integran las señales de distancia. Como consecuencia, el marco de referencia proporcionado por el entorno puede contribuir a la escala de distancia percibida, restringiendo o ampliando la respuesta de estimación de distancia. En un artículo reciente, Kolarik et al. (2013) reafirmaron esta hipótesis observando una correlación positiva entre la distancia perceptiva auditiva y la percepción del tamaño de la sala también mediante la modalidad auditiva. Los resultados de este estudio sugieren que el contexto auditivo ambiental también influye en la percepción auditiva de la distancia.

La información del contexto auditivo (asociada principalmente a la información brindada por la reverberación) ha demostrado ser útil para la percepción del espacio circundante. Por ejemplo, los oyentes humanos pueden reconocer de forma precisa fotografías de habitaciones mediante sus correspondientes grabaciones binaurales (Hay, 1965). Además, se ha reportado que sujetos con los ojos vendados pueden distinguir el tamaño de una habitación utilizando el voz hablada y otros sonidos reflejados por las superficies (Pavani, 2000). Diversos estudios han encontrado una relación directa entre la reverberación y la percepción del tamaño de una sala: mayor tiempo de reverberación se asocia constantemente con salas más grandes (Alais y Burr, 2004; Ernst y Banks, 2002; Gajewski, 2014). En resumen, aunque no seamos conscientes de ello, en la experiencia cotidiana los humanos empleamos una gran cantidad de información auditiva para percibir el entorno, complementando la información de otros sentidos.

De acuerdo a la evidencia presentada, nos preguntamos si la distancia percibida a un objetivo visual puede ser influenciado por la información del contexto ambiental procedente de la modalidad auditiva. Por ejemplo, si la información visual del entorno afecta la percepción de la distancia a un objeto auditivo, ¿podría ser verdadero su opuesto? En otras palabras, ¿es posible, bajo ciertas condiciones, obtener una representación del entorno a través de la información auditiva, que a su vez influya en la PVD?

Para responder estas preguntas investigamos si el contexto ambiental auditivo influye en la distancia percibida de los objetos luminosos ubicados en dos salas con tiempos de reverberación extremadamente diferentes: una cámara anecoica y una habitación



(línea roja y flechas). También se muestran las estaciones experimentales y el diseño del montaje experimental en ambas salas.

## 9.2. Procedimientos experimentales

### 9.2.1. Entornos de prueba

El estudio se realizó en el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia (LAL) de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC-BA). El LAL tiene dos habitaciones con tiempos de reverberación muy diferentes (ver Tabla 9.1): (a) una cámara anecoica (media  $T = 0.12$  s) y (b) una habitación reverberante (media  $T = 3.9$  s).

| Banda (Hz)              | $T_{20}$ (s)        |                 |
|-------------------------|---------------------|-----------------|
|                         | Cámara Reverberante | Cámara Anecoica |
| 50                      | 7.95                | -               |
| 63                      | 7.58                | -               |
| 80                      | 5.92                | 0.42            |
| 100                     | 5.58                | 0.24            |
| 125                     | 5.18                | 0.23            |
| 160                     | 5.39                | 0.24            |
| 200                     | 4.43                | 0.14            |
| 250                     | 4.64                | 0.10            |
| 315                     | 4.57                | 0.17            |
| 400                     | 4.17                | 0.10            |
| 500                     | 3.78                | 0.12            |
| 630                     | 3.78                | 0.12            |
| 800                     | 3.70                | 0.08            |
| 1000                    | 3.81                | 0.08            |
| 1250                    | 3.89                | 0.09            |
| 1600                    | 3.78                | 0.09            |
| 2000                    | 3.33                | 0.11            |
| 2500                    | 2.95                | 0.09            |
| 3150                    | 2.58                | 0.09            |
| 4000                    | 2.15                | 0.09            |
| 5000                    | 1.75                | 0.10            |
| 6300                    | 1.43                | 0.09            |
| 8000                    | 1.03                | 0.10            |
| 10000                   | 0.80                | 0.10            |
| Mean across 400-1250 Hz | 3.86                | 0.10            |

**Tabla 9.1:** Tiempo de reverberación medido ( $T_{60}$ ) para la cámara anecoica y la reverberante en la posición donde los sujetos se encontraban sentados.

La cámara anecoica tenía un volumen igual a 7,00 x 6,90 x 5,90 m (longitud x ancho x altura) y un espacio de trabajo libre igual a 5,40 x 5,30 x 4,30 m. La sala reverberante era un poliedro irregular de siete superficies, aproximadamente equivalente a una caja rectangular de 7 x 8 x 4 m de tamaño, con un volumen igual a 189 m<sup>3</sup>. Para detalles exactos de ambas cámaras ver (Sandvad, 1999; McGrath et al., 1999). Ambas habitaciones estaban ubicadas en el mismo pasillo presentando sus puertas enfrentadas (ver Fig. 9.1). Dos montajes experimentales idénticos fueron montados uno en cada habitación, situado en la misma posición relativa con respecto a la puerta.

### **9.2.2. Participantes**

Un total de setenta y cinco voluntarios (19 mujeres y 56 hombres) participaron en los experimentos. Ninguno tuvo conocimiento previo de las salas de experimentación o de las instalaciones, ni se informó de ninguna característica de las habitaciones. Todos los sujetos fueron naive para los propósitos del estudio, tenían una visión normal o corregida a la normal (50 y 25 sujetos, respectivamente) e informaron no tener problemas auditivos. Las edades oscilaron entre 19 y 50 años (promedio = 25.0 años, s = 5.9 años). Los experimentos fueron realizados con el consentimiento escrito de cada sujeto, siguiendo el Código de Ética de la Asociación Médica Mundial (Declaración de Helsinki) y aprobados por el Comité de Ética de la Universidad Nacional de Quilmes. Todos los participantes informaron por escrito su consentimiento y no recibieron ningún pago por su tiempo. Los participantes fueron reclutados a través de anuncios distribuidos a través de grupos de correo electrónico o diversas redes sociales.

Los participantes fueron asignados aleatoriamente a dos grupos: los sujetos asignados al Grupo 1 realizaron el Experimento 1 en la cámara anecoica (n = 37) mientras que los sujetos asignados al Grupo 2 lo realizaron en la habitación reverberante (n = 38). En el Experimento 2, los sujetos se intercambiaron entre habitaciones: los sujetos del Grupo 1 realizaron el Experimento 2 en la sala reverberante, mientras que los sujetos del Grupo 2 lo realizaron en la cámara anecoica. Por esta razón, nos referimos al Grupo 1 como A → R, y al Grupo 2 como R → A.

### **9.3. Procedimiento experimental general**

Cada participante fue recibido por el experimentador en el hall de entrada (punto A en la figura 9.1) y llevado a la sala de recepción (B) donde recibió instrucciones iniciales sobre la tarea. Las instrucciones fueron escritas con el fin de controlar la variabilidad en la comprensión de la tarea por los sujetos. En este punto, y con el fin de inducir la familiaridad con el objetivo, el participante fue capaz de tocar y ver un modelo idéntico de los objetivos visuales empleados en la tarea. El conocimiento previo del objetivo podría servir como una señal para la distancia visual, dado el principio de la distancia de tamaño

invariancia (Mershon, 1989). De esta manera, el experimentador le vendó los ojos al participante en la sala de recepción (B) para luego ser llevado a la habitación asignada para el Experimento 1 (C o D), donde estuvo sentado en la posición cero. Después de que el participante se ubicó en la silla experimental, el experimentador salió de la habitación y las luces se apagaron, permaneciendo de esta forma hasta la finalización del experimento.

La línea roja de la Figura 9.1 indica la trayectoria recorrida por los sujetos desde que fueron recibidos hasta que fueron despedidos después de completar todo el experimento. Para que los participantes de ambos grupos siguieran un trayecto similar fue fundamental que ambas habitaciones estuvieran situadas frente a frente, sumado a la idéntica ubicación de las instalaciones dentro de cada habitación. Este hecho permitió minimizar las diferencias en la información propioceptiva a través de las distintas condiciones.

Antes de iniciar el experimento, se pidió al participante que se quite la venda de los ojos. Con el fin de exponer el sujeto a las características acústicas de la sala, se reprodujo una grabación con las instrucciones del experimento a través de un altavoz situado a 70 cm delante del participante, a una altura de 1 m. El dispositivo experimental también tenía un micrófono en la sala permitiendo la comunicación en tiempo real entre el experimentador y el participante. Estudios anteriores han demostrado que las señales de voz son estímulos efectivos con el fin de inducir un sentido espacial del medio ambiente a través de la audición (Alais y Burr, 2004; Calcagno et al., 2012).

La luminancia de cada objetivo se ajustó a un valor de 0,18 lux medido a una distancia de 10 cm (radiómetro portátil ILT 1400-A, International Light Technologies Inc.). Este valor, por una parte, aseguró que los blancos fueran claramente distinguibles y, por otra, impidió la iluminación de cualquier otra superficie en las habitaciones (por ejemplo, paredes, piso, etc). Los objetivos también fueron rodeados con tela opaca negra, con el fin de minimizar la iluminación de tales superficies. Además, para asegurarse de que cada habitación fue percibida totalmente oscura, después de la adaptación del ojo, dos experimentadores realizaron, como si fueran sujetos, el procedimiento completo en ambas salas. Finalmente, a cada participante se le pidió que informara sobre cualquier fuente de luz en la sala además de los objetivos. Ninguno de los participantes informó la presencia de fugas de luz no deseadas durante el experimento.

Los estímulos visuales utilizados fueron unos cuadrados de acrílico, de tamaño 5 x 5 cm. Cada objetivo fue iluminado por cuatro LEDs montados en su parte posterior la cual proporcionaba luz difusa. Los estímulos se colocaron delante del participante ( $0^\circ$  acimut) a una altura de 1,50 m (aproximadamente la altura de la cabeza del sujeto, con una elevación aproximada de  $0^\circ$ ). El sistema experimental consistió en una matriz lineal de cinco estímulos visuales, situados a  $D = 2, 3, 4, 5$  y 6 metros de la posición del sujeto (Figura 9.1). Cada estímulo fue montado sobre un soporte metálico. Para evitar la obstrucción visual entre los estímulos, se utilizaron para mover los objetivos fuera de la

línea de visión del participante. El ruido blanco (500 ms de duración) se presentó a través del altavoz antes de cada ensayo, con el fin de enmascarar ruido de los servomotores, lo que podría actuar como una señal para la distancia objetivo. El sonido enmascarante también contribuyó a exponer el sujeto a las características acústicas de la habitación. Los blancos fueron encendidos sólo después de que alcanzaron su posición final y duraron 2 segundos.

Después de cada presentación, se le pidió a los participantes que expresaran verbalmente la distancia aparente al objetivo visual. Las respuestas fueron registradas en una computadora y transcritas manualmente en una hoja de datos por el experimentador (que permaneció fuera de la sala hasta la finalización del procedimiento, véase la Fig. 9.1). Cada objetivo se presentó cinco veces por cada distancia de prueba (25 ensayos en total) en orden aleatorio. Los participantes realizaron una sola respuesta verbal por ensayo y no recibieron ninguna información sobre la corrección de sus respuestas. Después de completar la tarea de PVD, el sujeto fue vendado y devuelto a la sala de recepción (B). Allí completó un formulario con su estimación de largo, ancho y alto de la habitación donde se realizó el experimento. Después de completar este formulario, el sujeto se volvió a taparse los ojos y se introdujo en la otra habitación asignada para el Experimento 2, donde se repitió idénticamente el procedimiento (incluyendo la reproducción de las instrucciones a través del altavoz).

#### **9.4. Métodos de estadística**

Todos los datos se analizaron considerando un nivel de significación del 5%. Las curvas visuales de percepción de distancia obtenidas en las dos salas se compararon mediante análisis de varianza en el logaritmo de las respuestas, con los factores "distancia objetivo" (dentro de los sujetos) y "sala" (entre o dentro de los sujetos, Caso) como factores fijos. Los datos del Experimento 1 se compararon entre los grupos, mientras que los datos del Experimento 2 se compararon con los datos del Experimento 1 dentro de cada grupo. En el caso de que la esfericidad fue violada, los valores de p reportados corresponden a los obtenidos después de aplicar la corrección de Greenhouse-Geiser (observe que las violaciones de la esfericidad sólo pueden ocurrir para "distancia objetivo" y para la interacción entre "distancia objetivo", pero no para "habitación"). Los datos de tamaño de la habitación individual se compararon entre las habitaciones por medio de t-tests, la hipótesis nula de que las respuestas en la sala de reverberación fueron más pequeñas (en comparación con los grupos), igual o mayor que las respuestas en la cámara anecoica. La hipótesis nula para estos análisis se derivó de pruebas anteriores que asocian la reverberación más alta con un mayor tamaño de la habitación percibida, como se describe en la Introducción. Los datos se transformaron en el registro antes de la

prueba, con el fin de lograr la igualdad de varianza a través de la distancia objetivo. Dado que la sustracción entre dos números en log-scale corresponde al logaritmo de su relación en escala lineal [i.e.,  $\log(x_A) - \log(x_B) = \log(x_A/x_B)$ , (Eq. 1)], (Eq. Entre el tamaño de la habitación (en escala de log) se transformaron en "relaciones reverberantes a anecoicas" medias, calculadas como  $e^t$  (diferencia de medias reportada por la prueba t). Esta magnitud se puede interpretar fácilmente ya que se espera que sea mayor que uno en caso de rechazo de la hipótesis nula. El post-análisis en las curvas de PVD se realizó mediante t-test pareadas en t de las respuestas log individuales, siendo la hipótesis nula igual a la de los datos del tamaño de la sala. La hipótesis nula en este caso se derivó de nuestra hipótesis de que la distancia objetivo en la sala reverberante se percibirá más lejos que en la cámara anecoica. La significancia se controló mediante el procedimiento de Holm-Bonferroni (Gajewski et al., 2014) para cinco comparaciones: dado que había cinco distancias objetivo, cinco es el número máximo de comparaciones posibles entre ambas salas.

## **9.5. Resultados**

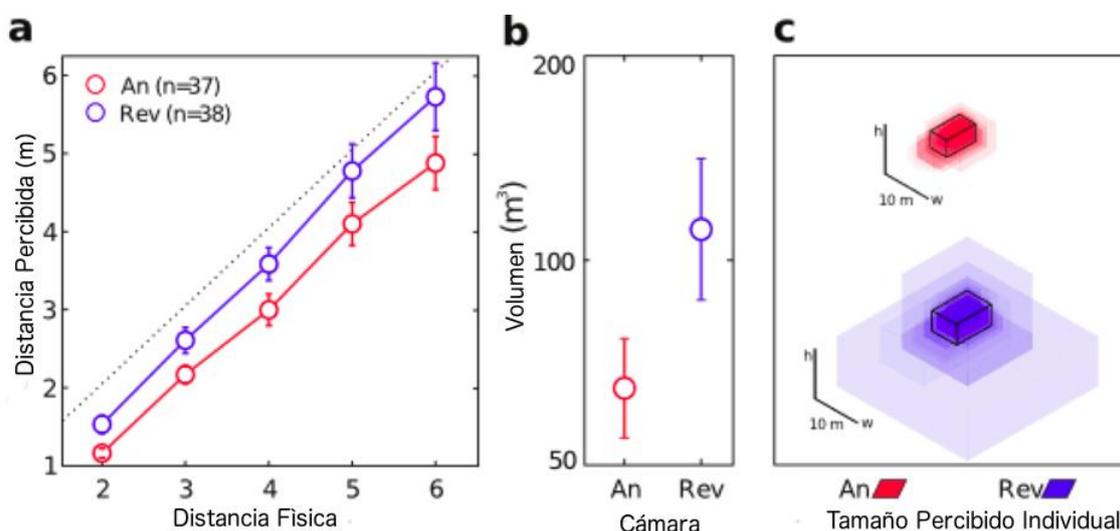
### **9.5.1. Experimento 1**

Los sujetos fueron asignados al azar a una de las dos habitaciones: una cámara anecoica (Grupo 1,  $n = 37$ , tiempo de reverberación medio  $T = 0,12$  s) y una habitación reverberante (Grupo 2,  $n = 38$ ;  $T = 3,9$  s; S1). Ninguno de los sujetos tuvo conocimiento previo de ninguna de las dos salas de experimentación o sus dimensiones. Se les presentó a los sujetos como claves visuales unos cuadrados luminosos de tamaño  $5 \times 5$  cm, situados a distancias  $D = 2, 3, 4, 5$  y  $6$  m (medidos desde el asiento del sujeto). La luminosidad de la clave visual se ajustó para evitar que cualquier superficie de la habitación fuese iluminada. De esta manera nos aseguramos que, durante la tarea, los participantes sólo pudieran ver los objetivos visuales. En cada ensayo, los sujetos debían reportar verbalmente la distancia percibida al objetivo. Las instrucciones, reproducidas a través de un altavoz, así como los informes verbales de los participantes, fueron algunos de los estímulos auditivos utilizados para exponerlos a las características acústicas de cada sala.

La Figura 9.2a presenta la distancia media percibida ( $\pm$  SEM) como una función de la distancia al objetivo para ambos grupos. En ambas habitaciones la respuesta fue casi lineal y las pendientes fueron bastante similares (cámara anecoica:  $0,94 \pm 0,08$ ; sala de reverberante:  $1,06 \pm 0,10$ ). Además, ambos grupos subestimaron la distancia al objetivo para todas las distancias de prueba. Curiosamente, los participantes que realizaron el experimento en la sala reverberante (Grupo 2) percibieron los objetivos visuales a mayor distancia que los participantes asignados a la cámara anecoica (Grupo 1). Por ejemplo, las

claves visuales situadas a 5 y 6 m difirieron en 68 y 85 cm respectivamente, dando como resultado una diferencia relativa de aproximadamente 17%. La significancia estadística de esta diferencia se evaluó mediante un ANOVA de medidas repetidas sobre los logaritmos de las respuestas, lo que reveló un efecto significativo de la habitación [F (1,73) = 4,11, p = 0,046] y de la distancia objetivo [F (4, 292) = 627, p <0,001] pero no de su interacción [F (4, 292) = 0,97, p = 0,37].

Con el objetivo de probar si existe una relación entre la PVD y la percepción del tamaño de la habitación, después de completar la tarea de PVD le pedimos a los participantes que estimen el tamaño de la habitación (ver *Métodos* para más detalles). Los resultados se representan en la Figura 9.2b (volumen percibido medio de la habitación) y Figura 9.2c (largo, ancho y altura percibidas media y la individual). La sala reverberante se percibió significativamente mayor que la cámara anecoica [t (73) = 1,83, p = 0,0355, razón media = 1,71]. Con el objetivo de comprobar esta asociación, también se analizó la correlación entre el tamaño de la habitación percibida y la máxima distancia percibida (MDP) en escala log-log (véase [39]). Se obtuvo una correlación significativa positiva entre la MDP y el volumen percibido en ambas salas (cámara anecoica: r = 0,48, p = 0,0029, sala reverberante: r = 0,65, p = 1,2 x 10<sup>-5</sup>)



**Figura 9.2:** Resultados del Experimento 1. A) Curvas visuales de percepción de distancia para ambas salas en el Experimento 1. Se muestran respuestas medias (+/- SEM) en función de la distancia al objetivo: cámara anecoica (An) como sala roja y reverberante (Rev) en azul. La línea negra punteada indica un rendimiento perfecto. B) Volumen percibido medio (+/- SEM) para cada habitación. C) Cada caja transparente corresponde a las dimensiones individuales percibidas (anchura, longitud y altura) para cada condición (cámara anecoica: sección superior, en rojo; sala reverberante: sección inferior, en azul). Para cada habitación, la caja en líneas negras sólidas representa el promedio de cada dimensión (tomada por separado) entre los sujetos.

### 9.5.2. Experimento 2

Se realizó un segundo experimento para estudiar si el contraste auditivo, dado por la exposición consecutiva a dos habitaciones con características auditivas extremadamente diferentes, tuvo efecto en la percepción del tamaño de la habitación y, por lo tanto, en la distancia percibida de los objetivos visuales. Para ello, los sujetos del Grupo 1 repitieron la tarea de PVD, pero en la sala reverberante (es decir, pasaron de la cámara anecoica a la sala reverberante, a la que se hará referencia como A → R) mientras que los sujetos del Grupo 2 repitieron la tarea de PVD en la cámara anecoica (es decir, pasaron de la sala reverberante a la cámara anecoica, denominada R → A). El Experimento 2 se realizó pocos minutos después de completar el Experimento 1, siguiendo exactamente el mismo procedimiento que en la primera habitación (ver *Métodos*), y con los mismos sujetos. En particular, las instrucciones de la tarea se repitieron a través del altavoz, al igual que antes en el Experimento 1. En este punto, los sujetos fueron capaces de experimentar el fuerte contraste auditivo entre ambas salas debido a sus tiempos de reverberación extremadamente diferentes. Las respuestas también se hicieron verbalmente, contribuyendo así a la experiencia auditiva del entorno.

De manera similar al Experimento 1, se observó un efecto significativo de la habitación sobre el tamaño de la habitación percibida (Fig. 9.3c: volumen promedio percibido de la habitación, y Figura 9.3d: longitud, ancho y altura percibidos). Independientemente del orden de exposición, los sujetos dentro de cada grupo percibieron la habitación reverberante de mayores dimensiones que la cámara anecoica [Grupo 1, A→R:  $t(36) = 5.47$ ,  $p = 1.8 \times 10^{-6}$ , razón media = 3,02; Grupo 2, R→A:  $t(37) = 3.85$ ,  $p = 2.3 \times 10^{-4}$ , razón media = 1.64]. Por otra parte, la comparación entre los grupos mostró que, en la segunda exposición, la sala reverberante se percibió con mayores dimensiones que la cámara anecoica [ $t(73) = 3,26$ ,  $p = 8,40 \times 10^{-4}$ , razón media = 2,89]. Es interesante notar que la diferencia fue mayor que la reportada en el Experimento 1 (razón media = 1,71), lo que sugiere que la exposición previa a una habitación con características acústicas opuestas influye en la percepción del tamaño de la habitación.

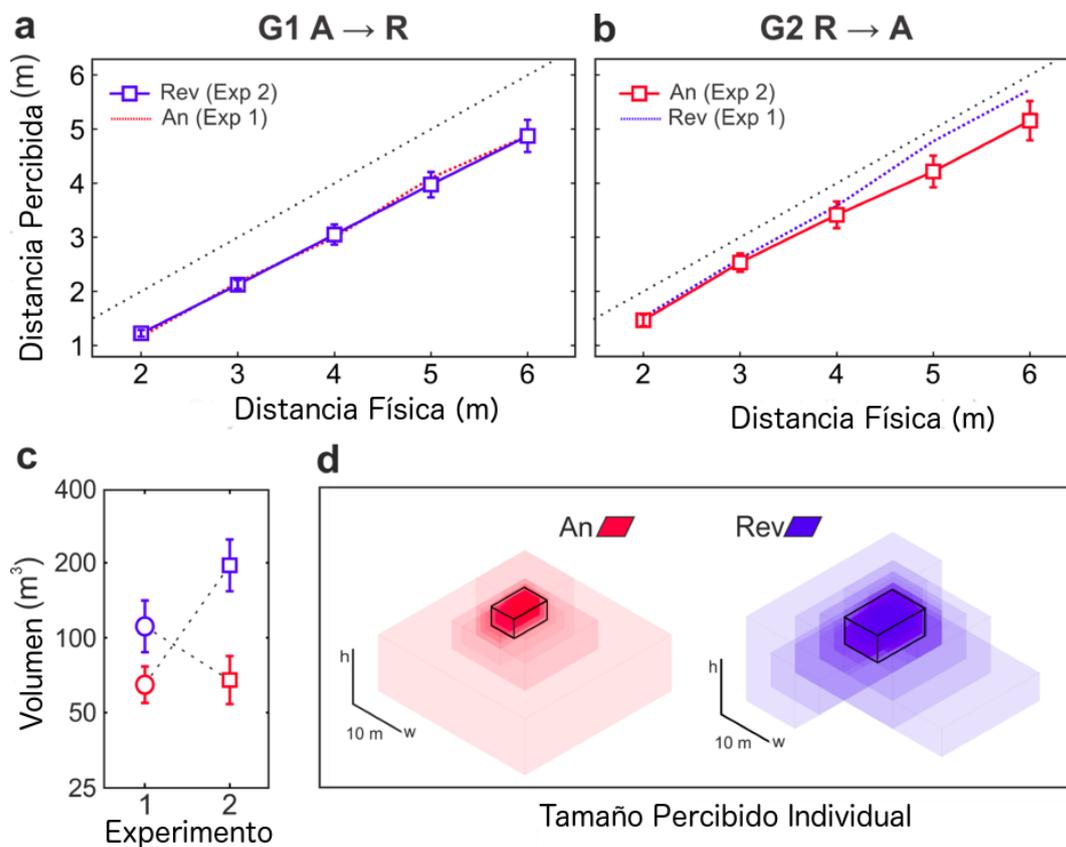
El paso siguiente consistió en analizar si el tamaño de la habitación percibido tenía alguna influencia en la PVD. La Figura 9.3 muestra la distancia media percibida (+/- SEM) como una función de la distancia objetivo para el Grupo 1 (A → R, Figura 9.3a) y 2 (R → A, Figura 9.3b). Comparamos la respuesta de cada grupo con las respuestas obtenidas por sí mismas en el Experimento 1 mediante el análisis de varianza de medidas repetidas. Contrariamente al Experimento 1, la sala no mostró un efecto significativo sobre la PVD. Los participantes de cada grupo percibieron los objetivos a distancias similares en comparación a las reportadas en el Experimento 1 [Grupo 1:  $F(1,36) = 0,0273$ ,  $p = 0,87$ ; Grupo 2:  $F(1,37) = 4,06$ ,  $p = 0,051$ ]. La distancia al objetivo fue significativa [Grupo 1:  $F(4,144) = 379$ ,  $p < 0,001$ ; Grupo 2:  $F(4,148) = 430$ ,  $p < 0,001$ ], mientras que la interacción

entre el espacio y la distancia objetivo no fue significativa [Grupo 1:  $F(4,144) = 1,41$ ,  $p = 0,24$ ; Grupo 2:  $F(4, 148) = 1,97$ ,  $p = 0,12$ ].

Aunque no observamos una diferencia global en la respuesta de PVD en ninguno de los grupos, si observamos que los sujetos del Grupo 2 ( $R \rightarrow A$ ) tienden a comprimir sus respuestas para los dos objetivos más alejados, lo cual podría ser la causa de la significancia marginal obtenida en la ANOVA para la sala ( $p = 0,051$ ) para este grupo. Los resultados muestran que las claves visuales situadas a  $D = 5$  y  $6$  m se percibieron más lejanas en la habitación reverberante que en la cámara anecoica [ $5$  m:  $t(37) = 2,76$ ,  $p = 0,0045 < 0,01$ , razón media =  $1,12$ ;  $6$  m:  $t(37) = 2,39$ ,  $p = 0,011 < 0,02$ , razón media =  $1,10$ ; ambas comparaciones tuvieron su importancia después de aplicar la corrección de Holm-Bonferroni para comparaciones múltiples.

A continuación probamos la asociación entre MDP y el volumen percibido de la habitación. Curiosamente, el MDP correlacionó positivamente con el volumen percibido para el Grupo 2 ( $R \rightarrow A$ , cámara anecoica,  $r = 0.67$  con  $p = 4.7 \times 10^{-6}$ ) pero no correlacionó con el Grupo 1 ( $A \rightarrow R$ , sala reverberante,  $p = 0.18$ ; Véase la Figura 9.4). Este último resultado es consistente con la presencia (en el Grupo 2) y ausencia (en el Grupo 1) de un efecto del contexto ambiental auditivo en la PVD, a pesar de que ambos grupos fueron capaces de percibir diferencias de tamaño entre salas.

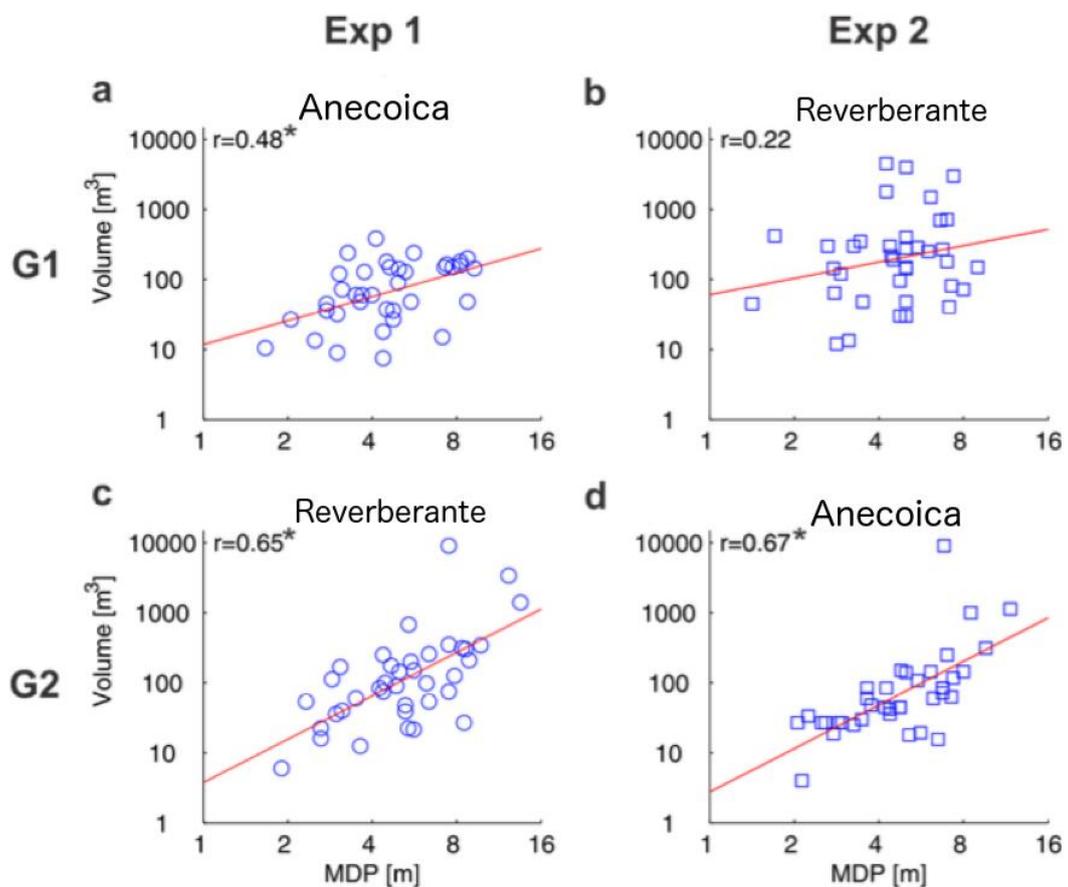
Con el objetivo de explicar estas observaciones, se planteó la hipótesis de que una vez que el sujeto se acostumbra a la tarea (durante el Experimento 1), el cambio del entorno auditivo (durante el Experimento 2) podría ser insuficiente para cambiar la distancia percibida en el anterior sesión, a menos que exista una contradicción entre la respuesta anterior (especialmente en distancias más largas) y la percepción presente del espacio. Esta hipótesis podría explicar el efecto diferencial observado para los sujetos del Grupo 2 ( $R \rightarrow A$ ), lo cuales pasaron de la sala reverberante a la anecoica y, por lo tanto, experimentaron una reducción del espacio percibido. Es posible además que las distancias percibidas más lejanas en la habitación reverberante durante el Experimento 1 pudieran estar más allá de los límites percibidos de la cámara anecoica durante el Experimento 2 y, por lo tanto, no podrían ser posibles. Los sujetos del Grupo 1, en cambio, experimentaron una expansión del espacio percibido y, por lo tanto, todas las distancias anteriormente percibidas fueron posibles bajo su percepción actual de la habitación, permaneciendo así inalteradas.



**Figura 9.3:** Resultados del Exp. 2 y comparación con el Exp. 1. a) Curvas de distancia (respuesta media  $\pm$  SEM en función de la distancia al objetivo) para el Grupo 1. Los sujetos pasaron de la cámara anecoica (Exp. 1, línea punteada) a la Reverberante (Exp. 2, línea continua). B) igual que el anterior para el Grupo 2. Los sujetos pasaron de la sala reverberante (Exp. 1, línea punteada) a la cámara anecoica (Exp. 2, línea continua). C) Promedio de volumen percibido para cada habitación en ambos experimentos. Los datos de cada grupo se unieron con líneas punteadas. D) Cada caja transparente corresponde a las dimensiones individuales percibidas (anchura, longitud y altura) de cada condición (cámara anecoica: sección izquierda, en rojo, sala reverberante: sección derecha, en azul). Para cada habitación, la caja en líneas negras sólidas representa el promedio de cada dimensión (tomada por separado) entre los sujetos.

Esta hipótesis fue probada mediante el cálculo del porcentaje de sujetos cuya distancia máxima percibida fue mayor que la longitud informada de la habitación. Nos referiremos a esta magnitud como índice de incompatibilidad:  $MDP \geq Longitud$ . Aplicando esta fórmula a los datos obtenidos para cada grupo en cada una de las habitaciones, obtuvimos un valor basal para los índices de incompatibilidad. Es decir, el porcentaje de respuestas obtenidas en cada habitación donde la MDP fue mayor que la longitud percibida. Esto dio como resultado un valor relativamente bajo (media = 14,7% con IC del 95% =  $\pm$  3,4%). A continuación, aplicamos la fórmula a los datos de cada grupo en ambas salas:  $MDP (Exp. 1) \geq Longitud (Exp. 2)$ . Para el Grupo 1 (A  $\rightarrow$  R) obtuvimos un

valor igual a 8,1%, el valor más bajo entre las condiciones. Estos sujetos mantuvieron las respuestas de PVD entre salas pero informaron un aumento del tamaño de la habitación percibido en el Experimento 2 con respecto al Experimento 1. Siguiendo nuestra hipótesis, todas las distancias percibidas en el Experimento 1 fueron posibles en la sala más grande reportada en Experimento 2. Por el contrario, los sujetos del Grupo 2 (R → A) mostraron valor más alto de todas las condiciones. Este valor también fue significativamente diferente en comparación con el valor basal [ $t(3) = 8,18, p = 0,0038$ ]. Esto implica que las distancias máximas reportadas en el Experimento 1 fueron mayores que la longitud percibida de la sala en el Experimento 2, lo que las hace contradictorias con la habitación percibida. Esto hace plausible que, durante el Experimento 2, los sujetos del Grupo 2 comprimieron sus respuestas para los dos objetivos más alejados a fin de hacerlos coincidir con el tamaño auditivo percibido del nuevo cuarto. De hecho, el índice de incompatibilidad de los sujetos del Grupo 2 en la cámara anecoica fue del 13,2%, lo cual indica que efectivamente ajustaron sus respuestas al tamaño de la habitación percibida bajo la nueva condición.



**Figura 9.4.** *Distancia máxima percibida individual (DMP) vs volumen de la sala percibido para ambos grupos (filas) en el experimento 1 y 2 (columnas). Para cada condición, reportamos el coeficiente de correlación entre ambas magnitudes. Todos los grupos mostraron una correlación positiva con la excepción del grupo 1 en la cámara anecoica (Experimento 2). La línea roja indica el mejor ajuste lineal para los datos.*

## 9.6. Discusión

Los experimentos aquí presentados demuestran que el contexto auditivo afecta a la distancia percibida de las claves luminosas ubicadas en un entorno de completa oscuridad. En el Experimento 1 los participantes ubicados en la sala reverberante percibieron todos los objetivos más alejados que los ubicados en la cámara anecoica. Esta observación de diferencias de PVD la atribuimos a las diferencias acústicas entre ambas salas. Tal afirmación se basa en las condiciones controladas del experimento: (i) los sujetos no tuvieron conocimiento previo de las características de la habitación y se encontraban en la misma posición relativa dentro de cada habitación; (ii) las distancias de prueba y los montajes fueron idénticos en ambas salas; y (iii) las habitaciones estuvieron situadas una frente a la otra, por lo que la información propioceptiva adquirida por los sujetos fue idéntica.

El efecto del ambiente auditivo en la PVD parece ser inducido por diferencias en las señales de reverberación relacionadas con la percepción auditiva del tamaño de la habitación. De forma consistente, los sujetos percibieron la habitación reverberante de mayor tamaño que la habitación anecoica. Este resultado concuerda con muchos estudios previos que informaron una correlación positiva entre el nivel de reverberación y percepción de tamaño de la habitación (Alais y Burr, 2004; Gajewsky, 2014). La hipótesis de la relación entre el tamaño de la habitación percibido y la percepción de la distancia se encuentra presente en diversos estudios (Radeau, 1974; Alais y Burr, 2004; Gajewsky, 2014). En esta línea, Kolarik et al. (2013) encontraron una correlación positiva entre la percepción de la distancia auditiva y la percepción auditiva del tamaño de la habitación a través de señales de reverberación.

Siguiendo este razonamiento argumentamos que, en las condiciones utilizadas en los experimentos, la falta de conocimiento previo de la sala, combinada con la ausencia completa de señales visuales ambientales, indujo a los participantes a calibrar su respuesta (distancia percibida) a una habitación cuyo tamaño podría percibirse utilizando principalmente la modalidad auditiva. En primer lugar, esta hipótesis es apoyada por el hecho de que los objetivos fueron percibidos a una mayor distancia en la sala que se percibió con mayores dimensiones. En segundo lugar, encontramos que la distancia

percibida del objetivo más distante y el volumen percibido de la habitación estuvieron correlacionados positivamente.

En el Experimento 2, los sujetos de ambos grupos repitieron la misma tarea de PVD, pero en la otra sala de pruebas. Con base en los hallazgos obtenidos en el Experimento 1, esperábamos que los sujetos informaran las distancias percibidas de acuerdo con el nivel de reverberación de cada habitación, asignando distancias más largas a medida que aumentaba la reverberación. De hecho, esperábamos un mayor efecto de la sala en la PVD debido al alto contraste auditivo experimentado después de los vestuarios. Sin embargo, esto no se observó. Al comparar los resultados dentro de cada grupo, los sujetos no ajustaron sistemáticamente sus respuestas al nivel de reverberación de la sala, a pesar de que percibieron diferencias significativas en el volumen de la habitación al pasar de una habitación a la otra. En cambio, los sujetos respondieron casi de la misma manera en que lo hicieron en el Experimento 1.

Una posible explicación de este resultado es que incluso cuando los resultados del Experimento 1 muestran que el contexto auditivo influyó en la respuesta, la distancia percibida fue modulada principalmente por las señales visuales proporcionadas por los objetivos. Por lo tanto, es posible que, como los sujetos realizaron la tarea en la primera sala, se desarrolló una fuerte asociación entre las señales visuales y la percepción de distancia. Dado que tanto los objetivos como las distancias de prueba fueron idénticos en ambos experimentos, y que en general las señales visuales son más confiables que las auditivas, es posible que el cambio del contexto auditivo durante la segunda exposición podría ser insuficiente para cambiar la asociación anterior entre las señales visuales y las respuestas. Esto podría haber sido favorecido también por la familiarización previa con el estímulo (ver *Métodos*), y por el corto intervalo de tiempo entre experimentos.

Para que sucediera lo antedicho, los participantes debieron retener en su memoria estas asociaciones durante el tiempo transcurrido entre el final del Experimento 1 y el comienzo del Experimento 2. Estudios previos de PVD han reportado que la información visual relacionada con la distancia a un objeto puede almacenarse con precisión en la memoria. Por ejemplo, los sujetos pueden ver a un objetivo a una distancia de hasta 20 m o más, y luego caminar hasta ella de manera bastante precisa con los ojos vendados (Thomson, 1983, Fukusima et al., 1997). Finalmente, Calcagno et al. (2012) mostró que los sujetos pueden almacenar en su memoria una representación visual del entorno que mejora, minutos después, la percepción de distancia de fuentes sonoras. Estos resultados sugieren que es posible que la información visual obtenida en el Experimento 1 afecte la respuesta durante el Experimento 2. Una pregunta interesante que surge de este hecho es ¿cuánto tiempo esta información puede ser almacenada en memoria antes de degradarse?. No sabemos qué resultados se podrían haber obtenido si el Experimento 2

se hubiese realizado unas horas o pocos días después del Experimento 1. Se necesitan estudios adicionales para conocer el curso temporal de este efecto.

Es interesante observar que las únicas discrepancias entre el Experimento 1 y el Experimento 2 fueron observadas en las respuestas de los sujetos del Grupo 2 (R → A). Estos sujetos mantuvieron sus respuestas sólo para los más próximos (2-4 m), pero no para los más alejados (5-6 m), los cuales se percibieron significativamente más cerca en la cámara anecoica que en la sala reverberante. Los sujetos de este grupo informaron una disminución del tamaño de la habitación en la cámara anecoica (comparada con la reportada previamente en la sala reverberante en el Experimento 1) lo suficiente como para ser incompatibles con las distancias más lejanas percibidas previamente en el Experimento 1. Esto se reflejó claramente en el análisis de incompatibilidad entre MDP y el tamaño de la habitación percibida, para el cual el Grupo 2 mostró el mayor valor del índice de incompatibilidad entre las condiciones. Dado este hecho, hipotetizamos que los sujetos retuvieron sus respuestas de la tarea anterior de PVD siempre que fueran compatibles con la actual percepción actual del entorno, es decir, los objetivos deberían ser percibidos dentro de la habitación percibida, caso contrario, la PVD estará sesgada hacia los límites percibidos de la habitación.

Esta hipótesis es apoyada por el análisis de correlación entre MDP y el volumen percibido de la habitación. Los sujetos del Grupo 2 ajustaron las distancias percibidas en el Experimento 1 (al menos para los dos objetivos más alejados) a una habitación cuyo tamaño percibido fue menor y, por lo tanto, muestran un coeficiente de correlación positivo entre ambas variables. Por otro lado, la ausencia de correlación para los sujetos del Grupo 1 resume el hecho de que los participantes fueron capaces de percibir diferencias de tamaño entre ambas salas sin asociar el tamaño del cuarto con las distancias reportadas previamente. El mismo resultado se observó en la correlación entre la pendiente de la respuesta y el volumen percibido de la habitación. Estos resultados concuerdan con la hipótesis de que, durante la segunda exposición, los participantes sólo percibieron cambios en la distancia del objetivo cuando fue incompatible con el tamaño de la habitación percibida.

## **9.7. Conclusiones**

El efecto del contexto ambiental visual en la PVD ha sido reportado en varios estudios recientes (He et al., 2004; Iosa et al., 2012). Sin embargo, a diferencia de estudios anteriores, nuestros resultados muestran que la interacción entre el objeto visual y el entorno puede conformarse de una manera multimodal. Por otra parte, ninguno de los estudios anteriores consideró explícitamente el tamaño percibido del lugar en el que se realizó la tarea como factor influyente en la percepción visual a distancia. El único

antecedente similar es el estudio de Kolarik et al. (2013) donde se observó una correlación positiva entre la distancia de una fuente y el tamaño percibido de una habitación a través de la modalidad auditiva. Aunque se necesita un estudio adicional para evaluar completamente esta relación, consideramos que los resultados aquí expuestos sugieren de forma robusta que la PVD depende de la percepción del tamaño del entorno donde se realiza el experimento.

En varios estudios anteriores se han demostrado interacciones audiovisuales multimodales. Cuando la información redundante acerca de alguna característica de un objetivo proviene de diferentes sentidos (integración multisensorial, véase: Proffit, 2008), la información se fusiona de tal manera que se conforma una percepción multisensorial coherente. Diversos estudios multimodales recientes han demostrado que ninguna modalidad tiene preponderancia sobre otras, sino que las percepciones unimodales se combinan teniendo en cuenta la calidad de la información proporcionada por cada una de ellas. Bajo las condiciones aquí utilizadas, las señales visuales del contexto se degradan hasta el punto de que la visión no da información sobre el contexto espacial. En consecuencia, los sujetos no tuvieron otra opción que crear una representación del entorno utilizando otras modalidades, utilizando principalmente señales auditivas.

Consideramos que el efecto aquí descrito es moderado (del orden del 20%), especialmente si se tiene en cuenta que el experimento se realizó bajo condiciones de reverberación muy diferentes y en ausencia de referencias visuales otorgadas por la sala. Presumiblemente, si el experimento se hubiera hecho en una habitación normalmente iluminada, la información visual habría anulado el efecto del entorno auditivo. Sin embargo, nuestros resultados argumentan que la información del contexto ambiental, obtenida a través de la modalidad auditiva, puede crear una representación espacial del entorno y que la misma puede servir como marco de referencia para la localización de objetivos percibidos a través de una modalidad sensorial diferente. Estudios previos de percepción auditiva de distancia han mostrado una relación similar entre la percepción del objeto y la del ambiente pero, en esos casos, el entorno visual influyó en la distancia perceptiva auditiva de una fuente. Por lo tanto, es razonable esperar un efecto similar en la percepción de distancia de la información espacial obtenida de otra modalidad sensorial (por ejemplo, propioceptivo).

La relación multimodal aquí observada puede servir como un modelo para entender de qué manera el cerebro codifica la información espacial a partir de varios sentidos. Por ejemplo, podría ayudar a guiar los experimentos con el objetivo de entender si los mapas cerebrales se forman en un área común del cerebro donde todas las modalidades contribuyen o si, en cambio, cada modalidad sensorial forma un mapa en una zona del cerebro específica a tal fin. La idea de un contexto ambiental multimodal en el que cada modalidad sensorial contribuye a construir nuestra percepción del entorno también podría

utilizarse para mejorar el realismo de los entornos de realidad virtual. Sin embargo, se necesitan más investigaciones para comprender el alcance y las limitaciones de este tipo de interacción multimodal, así como la influencia de otras modalidades en la percepción visual a distancia.

## 9.8. Referencias bibliográficas

Alais, D., y Burr, D. The ventriloquist effect results from near-optimal bimodal integration. *Current biology* 14(3), 257-262 (2004).

Bingham, G. P., y Pagano, C. C. The necessity of a perception–action approach to definite distance perception: Monocular distance perception to guide reaching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 24(1), 145 (1998).

Bingham, G. P., Pan, J. S., y Mon-Williams, M. A. Calibration is both functional and anatomical. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 40(1), 61 (2014).

Blake R. y Sekuler R. *Perception*, 5th edition. New York: McGraw-Hill (2006).

Bruggeman, H., y Warren, W. H. The direction of walking—but not throwing or kicking—is adapted by optic flow. *Psychological science* (2010).

Bülthoff, I., Bülthoff, H., y Sinha, P. Top-down influences on stereoscopic depth-perception. *Nature neuroscience* 1(3), 254-257 (1998).

Cabrera, D., Jeong, D., Kwak, H. J., Kim, J. Y., y Duckjingu, J. (2005, July). Auditory room size perception for modeled and measured rooms. In *Internoise, the 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 7-10 August 2005.

Calcagno, E. R., Abregú, E. L., Eguía, M. C. y Vergara, R. O. The role of vision in auditory distance perception. *Perception* 41(2), 175-192. (2012).

Coats, R. O., Pan, J. S. y Bingham, G. P. Perturbation of perceptual units reveals dominance hierarchy in cross calibration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 40(1), 328 (2014).

Creem-Regehr, S. H., y Kunz, B. R. Perception and action. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science* 1(6), 800-810 (2010).

Cutting, J.E., y Vishton, P. M. Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In: *Handbook of Perception and Cognition*, Vol 5; Perception of Space and Motion. W. Epstein and S. J. Rogers, Eds., Academic Press, San Diego, CA, 69–117 (1995).

Da Vinci, L. *Trattato Della Pittura Di Leonardo Da Vinci*. Scritta da Raffaello du Fresne. Paris: Langlois (1651).

Elliott, D. Continuous visual information may be important after all: A failure to replicate Thomson (1983). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 12. 388-391 (1986).

Ernst, M. O., y Banks, M. S. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870), 429-433 (2002).

- Ernst, M. O., y Bühlhoff, H. H. Merging the senses into a robust percept. *Trends in cognitive sciences* 8(4), 162-169 (2004).
- Foley, J. M. Binocular distance perception. *Psychological review* 87(5), 411 (1980).
- Fukusima, S. S., Loomis, J. M. y Da Silva, J. A. Visual perception of egocentric distance as assessed by triangulation. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance* 23(1), 86-100 (1997).
- Fukusima, S. S., Loomis, J. M. y Da Silva, J. A. Visual perception of egocentric distance as assessed by triangulation. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance* 23(1), 86-100 (1997).
- Gajewski, D. A., Philbeck, J. W., Wirtz, P. W. y Chichka, D. Angular declination and the dynamic perception of egocentric distance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 40(1), 361-377. doi: 10.1037/a0034394, (2014).
- Gajewski, D. A., Wallin, C. P., y Philbeck y Gaze, J. W. Behavior and the perception of egocentric distance. *Journal of visión* 14(1), 1-19 (2014).
- Giuliano, H. G., Velis, A. G. y Méndez, A. M. The reverberation chamber at the Laboratorio de Acústica y Luminotecnia of the Comisión de Investigaciones Científicas. *Applied Acoustics* 49(1), 71-83 (1996).
- Gogel, W. C. Convergence as a cue to absolute distance. *The Journal of Psychology* 52(2), 287-301. (1961).
- Hameed, S., Pakarinen, J., Valde, K. y Pulkki, V. Psychoacoustic cues in room size perception. In *Audio Engineering Society Convention 116*. Audio Engineering Society (2004).
- Hay, J. C., Pick Jr, H. L. y Ikeda, K. Visual capture produced by prism spectacles. *Psychonomic science* 2(1-12), 215-216 (1965).
- He, Z. J., Wu, B., Ooi, T. L., Yarbrough, G. y Wu, J. Judging egocentric distance on the ground: Occlusion and surface integration. *Perception* 33(7), 789-806 (2004).
- Holm, S. A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian journal of statistics*, 65-70 (1979).
- Howard, I. P. *Perceiving in Depth, Volume 3: Other Mechanisms of Depth Perception*, Oxford Psychology Series (2012).
- Iosa, M., Fusco, A., Morone, G. y Paolucci, S. Walking there: environmental influence on walking-distance estimation. *Behavioural brain research* 226(1), 124-132. (2012).
- King, A. J. Visual influences on auditory spatial learning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 364(1515), 331-339 (2009).
- Kolarik, A. J., Pardhan, S., Cirstea, S. y Moore, B. C. Using acoustic information to perceive room size: effects of blindness, room reverberation time, and stimulus. *Perception* 42(9), 985-990 (2013).
- Lappin, J. S., Shelton, A. L. y Rieser, J. J. Environmental context influences visually perceived distance. *Perception y psychophysics* 68(4), 571-581 (2006).
- Lewald, J. Rapid adaptation to auditory-visual spatial disparity. *Learning y Memory* 9(5), 268-278 (2002).

- Loomis, J. M. Looking down is looking up. *Nature*, 414(6860), 155-156 (2001).
- Loomis, J. M. y Knapp, J. M. Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. *Virtual and adaptive environments* 11, 21-46 (2003).
- Loomis, J. M., Da Silva, J. A., Fujita, N. y Fukusima, S. S. Visual space perception and visually directed action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 18(4), 906 (1992).
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Philbeck, J. W. y Golledge, R. G. Assessing auditory distance perception using perceptually directed action. *Attention, Perception, y Psychophysics* 60(6), 966-980 (1998).
- Loomis, J. M. y Philbeck, J. W. Measuring perception with spatial updating and action. In: *Embodiment, Ego-space, and Action*, R. L. Klatzky, B. MacWhinney, and M. Behrman, Eds., Psychology Press, New York, 1–43 (2008).
- McGrath, R., Waldmann, T., y Fernström, M. Listening to rooms and objects. In *Audio Engineering Society Conference: 16th International Conference: Spatial Sound Reproduction*. Audio Engineering Society (1999).
- Mershon, D. H., Ballenger, W. L., Little, A. D., McMurtry, P. L., y Buchanan, J. L. Effects of room reflectance and background noise on perceived auditory distance. *Perception* 18(3), 403-416 (1989).
- Ono, H., Rogers, B. J., Ohmi, M. y Ono, M. E. Dynamic occlusion and motion parallax in depth perception. *Perception* 17(2), 255-266 (1988).
- Pan, J. S., Coats, R. O., y Bingham, G. P. Calibration is action specific but perturbation of perceptual units is not. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 40(1), 404 (2014).
- Pavani, F., Spence, C., y Driver, J. Visual capture of touch: Out-of-the-body experiences with rubber gloves. *Psychological science* 11(5), 353-359 (2000).
- Philbeck, J. W., y Loomis, J. M. Comparison of two indicators of perceived egocentric distance under full-cue and reduced-cue conditions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 23(1), 72 (1997).
- Proffitt, D. R. An action-specific approach to spatial perception. Embodiment, ego-space, and action. 179-202 (2008).
- Proffitt, D.R. y Caudek, C. Depth perception and the perception of events. In: *Handbook of Psychology: Vol. 4 Experimental Psychology*, A. F. Healy and R. W. Proctor, Eds., Wiley, New York, 213–236 (2002).
- Qian, N. Binocular disparity and the perception of depth. *Neuron* 18(3), 359-368 (1997).
- Radeau, M., y Bertelson, P. The after-effects of ventriloquism. *The Quarterly journal of experimental psychology*, 26(1), 63-71 (1974).
- Recanzone, G. H. Rapidly induced auditory plasticity: the ventriloquism aftereffect. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 95(3), 869-875. (1998).
- Rieser, J. J., Pick, H. L., Ashmead, D. H., y Garing, A. E. Calibration of human locomotion and models of perceptual-motor organization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 21(3), 480 (1995).

Sandvad, J. Auditory perception of reverberant surroundings. *The Journal of the Acoustical Society of America* 105(2), 1193-1193 (1999).

Semmlow, J. L. y Heerema, D. The role of accommodative convergence at the limits of fusional vergence. *Investigative ophthalmology y visual science*, 18(9), 970-976 (1979).

Sousa, R., Brenner, E. y Smeets, J. B. J. A new binocular cue for absolute distance: Disparity relative to the most distant structure. *Vision research*, 50(18), 1786-1792 (2010).

Stefanucci, J. K., Proffitt, D. R., Banton, T. y Epstein, W. Distances appear different on hills. *Perception y Psychophysics* 67(6), 1052-1060 (2005).

Thomson, J. A. Is continuous visual monitoring necessary in visually guided locomotion? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 9(3), 427 (1983).

Thomson, J. A. Is continuous visual monitoring necessary in visually guided locomotion?. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 9(3), 427 (1983).

Velis, A. G., Giuliano, H. G., y Méndez, A. M. The anechoic chamber at the Laboratorio de acústica y luminotecnia CIC. *Applied Acoustics* 44(1), 79-94 (1995).

Welch, R. B. *Perceptual modification: Adapting to altered sensory environments*. Elsevier (2013).

Witt, J. K., Stefanucci, J. K., Riener, C. R. y Proffitt, D. R. Seeing beyond the target: Environmental context affects distance perception. *Perception*, 36(12), 1752-1768 (2007).

Wu, B., Ooi, T. L., y He, Z. J. Perceiving distance accurately by a directional process of integrating ground information. *Nature* 428(6978), 73-77 (2004).

Zahorik, P. Estimating sound source distance with and without vision. *Optometry & Vision Science* 78(5), 270-275 (2001).

## 10. INTERDISCIPLINA ENTRE CIENCIA Y ARTE

### 10.1. Introducción

Este capítulo se propone abordar las problemáticas respecto al manejo del espacio sonoro desde una perspectiva artística y multidisciplinaria. A tal fin, se revisarán los aspectos creativos que tuvieron, como eje central, la utilización de la información proveniente del ámbito científico como disparador del proceso artístico-musical. Durante el período comprendido entre el año 2011 y 2016 he realizado una serie de obras, en distintos formatos de difusión, lo cual representó un espacio de emisión de hipótesis y banco de pruebas en relación directa con mi investigación en el campo científico.

Es imprescindible indicar que el análisis de las obras aquí expuestas no intenta abordar el concepto y las técnicas compositivas utilizadas desde una perspectiva didáctica y/o paradigmática respecto a los efectos psicofísicos y multimodales descritos en los capítulos anteriores. Por el contrario, el objetivo del análisis se centra en evidenciar la aplicación artística de la información proveniente del ámbito científico, la cual representó una referencia de gran impacto en el imaginario artístico de cada caso, además de servir como eje común y estructural para la realización de cada una de las obras. Cada obra ocupa un ámbito particular respecto al contexto y al período de producción artística, así como también su medio de difusión (obra escénica, instalación sonora, escultura y música instrumental).

De acuerdo a lo antedicho, el objetivo de este capítulo es realizar un estudio artístico descriptivo de cada obra en particular, revisando cuáles fueron los métodos de realización y los efectos que se pretenden en el espectador. De esta manera, se busca que, en futuros trabajos, este tipo de enfoque pueda ayudar a la creación de nuevas teorías normativas de análisis y prácticas compositivas del espacio sonoro. Para cada obra se realizará una descripción general del marco conceptual utilizado. Además se revisarán las estrategias compositivas y los puntos de contacto con la información proveniente del campo científico. Finalmente, se procederá a la descripción detallada de las tecnologías electrónico-digitales utilizadas en cada obra.

Las obras que se expondrán en éste capítulo se detallan a continuación:

#### **Indicaciones para el contacto con Mundos Suprafísicos**

(2012 - Pieza para ensamble Instrumental)

#### **Los océanos tienen oídos**

(2012 - Pieza para ensamble Instrumental)

## **LEJOS**

(2014 - obra escénica performática)

## **Búcaro de Secretos**

(2013 - Instalación Sonora)

## **Crisálida**

(2015 - Escultura Sonora)

### **10.2. Piezas para ensamble instrumental (2012)**

*Indicaciones para el contacto con Mundos Suprafísicos*

*Los océanos tienen oídos*

En el año 2011, mediante el apoyo de la editorial musical MELOS (Bs. As., Argentina), tuve la oportunidad de trabajar conjuntamente con el ensamble *Compañía Oblicua*, dirigida por el Mtro. Marcelo Delgado. De esta colaboración surgieron dos piezas instrumentales para ensamble de cámara llamadas "*Indicaciones para el contacto con Mundos Suprafísicos*" y "*Los océanos tienen oídos*" (para una revisión detallada de la partitura, ver *Anexos*). Estas piezas fueron estrenadas por la Compañía Oblicua el 4 de Julio del 2012, en el salón Auditorio de la Biblioteca Nacional (Buenos Aires, Argentina). La distribución instrumental estuvo ajustada a la disposición sugerida por el ensamble, como se puede ver en la Figura 10.1.



**Figura 10.1.** *Ensamble Compañía Oblicua (dir. Marcelo Delgado). Disposición instrumental para el estreno de las piezas para grupo de cámara *Indicaciones para el contacto con Mundos Suprafísicos* Y *Los océanos tienen oídos* (4 de Julio del 2012, en el salón Auditorio de la Biblioteca Nacional, Buenos Aires, Argentina)*

El orgánico de estas piezas para ensamble instrumental estuvo formado por:

Clarinete en Bb / Clarinete Bajo en Bb

Saxo Soprano en Bb / Saxo Tenor en Bb

Fagot / Contrafagot

Percusión

3 Woodblocks

3 Temple blocks

3 Cencerros

Platillos (Crash, Chino)

Tam Tam

Bongó

3 Toms

Gran Caja

Vibráfono

Violín

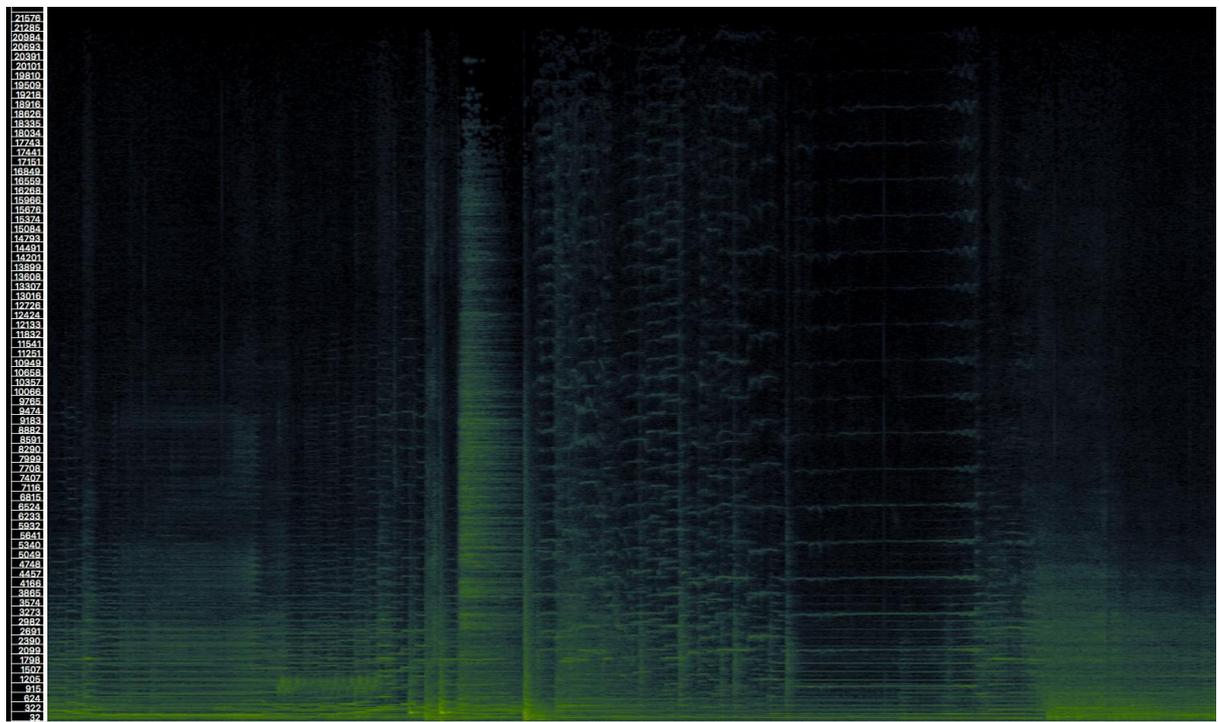
Viola

Cello

### **10.3. Marco teórico y realización**

Paralelamente a la composición de estas piezas para ensamble instrumental, en el año 2012 realicé una serie de experimentos psicofísicos en el Laboratorio de Percepción Sonora (LAPSo) referente al rol del ancho de banda espectral en la percepción auditiva de distancia. El objetivo de este estudio hizo foco en examinar los efectos de la frecuencia del estímulo sonoro y el ancho de banda espectral para los sonidos producidos por las fuentes sonoras. Mediante este trabajo se estudió el efecto del contenido espectral de un estímulo sobre la percepción auditiva de distancia, en un entorno semi reverberante. Los resultados del experimento mostraron claramente que el contenido espectral de una señal sonora afecta de manera sensible a la PAD (Spiousas et al., 2017). En primer término, se aprecia que la PAD es más precisa cuando en respuesta ante a un sonido con contenido espectral complejo (es decir, Ruido Blanco o Rosa) que respuesta a estímulos de tonos puros. Además, se concluyó que la influencia del ancho de banda depende directamente de la zona del espectro donde el estímulo presenta mayor información. Es decir, que para estímulos centrados en frecuencias por debajo de 1Khz (500Hz y 1Khz inclusive) se necesita un mayor ancho de banda para acercarse a respuestas similares a las obtenidas usando ruidos como estímulo. Por otro lado, para frecuencias encima de 1Khz (2Khz y 4Khz) se logran mejores performances con anchos de banda menores (ver Spiousas et al. para una revisión ampliada).

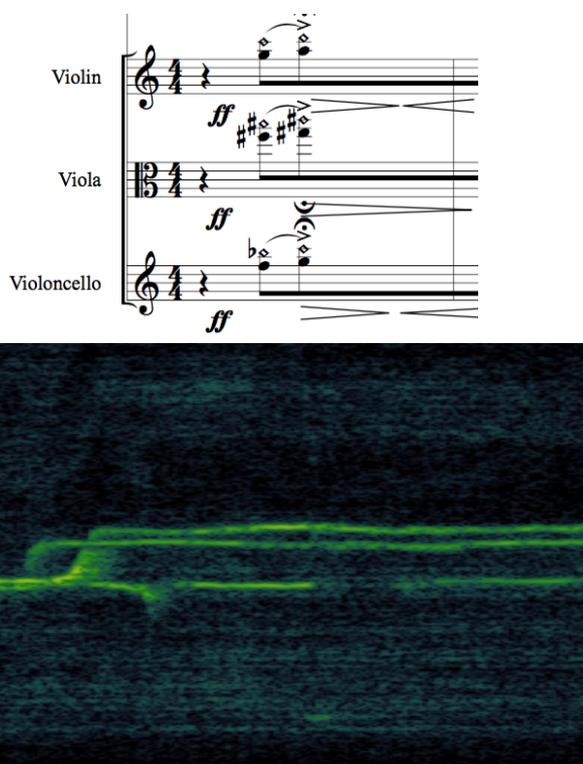
The image displays a musical score for a symphony orchestra, divided into two parts: F (Animado) and G (Lento/Largo). Part F includes instruments like Bass B.C., T. Sax., Bsn., Woodb., Cocos, Cenc., Plat., Tam, Bongo, Toms, G.C., Vib., Vin., Vla., and Vc. Part G includes Bass B.C., T. Sax., Bsn., Woodb., Cocos, Plat., Tam, Bongo, Toms, G.C., Vib., Vin., Vla., and Vc. The score shows various musical notations, dynamics, and performance instructions.



**Figura 10.2:** Los océanos tienen oídos. Transición ruido de banda ancha - sonido armónico - banda de ruido. Compás 28 a 32.

A partir de estos resultados se utilizaron dos conceptos que constituyeron el eje central para la composición de las piezas instrumentales. En primer lugar se planteó que, de acuerdo al contenido espectral de un conjunto de fuentes sonoras fijas, es posible generar un marco espacial en un ámbito entre lo definido y lo difuso, respecto a la PAD de

la fuentes sonoras. En segundo lugar, controlando las características espectrales de cada plano de la textura, se planteó la posibilidad de establecer una relación de jerarquía, en referencia a una textura figura-fondo, de manera dinámica. De esta manera, de acuerdo a las referencias utilizadas, se diseñó una escala tímbrica en un ámbito que abarque desde espectros similares a tonos puros (senoidales), pasando por distintas bandas de ruido hasta llegar al ruido de banda ancha.



**Figura 10.3:** Instrucciones para el contacto con mundos suprafísicos: Banda de ruido inarmónica en registro sobre-agudo.

Según el marco teórico mencionado, se estableció un plan espacial teniendo en cuenta la percepción en distancia de cada plano de la textura. Para realizar esto se diseñó una escala compuesta, a modo general, por tres tipos de elementos: tonos puros (percibidos en distancia con mucha variabilidad), banda de ruido (variabilidad condicionada a la ubicación en el espectro) y ruido de banda ancha (poca variabilidad). De esta forma, según el tipo de señal sonora y sus características espectrales, cada uno de los elementos constitutivos de la textura presentó distintos grados de variabilidad perceptiva en distancia, según cada caso.

Si bien las técnicas instrumentales utilizadas no representan un enfoque novedoso de ejecución instrumental, es importante destacar que el cambio de paradigma radica en que las técnicas extendidas utilizadas no fueron concebidas como meros elementos efectistas

sino que, por el contrario, tuvieron la finalidad de producir modificaciones en el espectro de cada instrumento en particular, o de los distintos planos de la textura en general.

A la luz de lo antedicho, la aplicación de la información proveniente de los estudios psicofísicos, referente al rol del ancho de banda espectral en la PAD, tuvo una gran relevancia al momento de concebir y realizar las piezas instrumentales aquí expuestas. El enfoque abordado me permitió trabajar con un marco de referencia que amplió de forma contundente mis conocimientos técnicos, compositivos e instrumentales, así como también sentar las bases para el futuro desarrollo de nuevos criterios compositivos instrumentales.

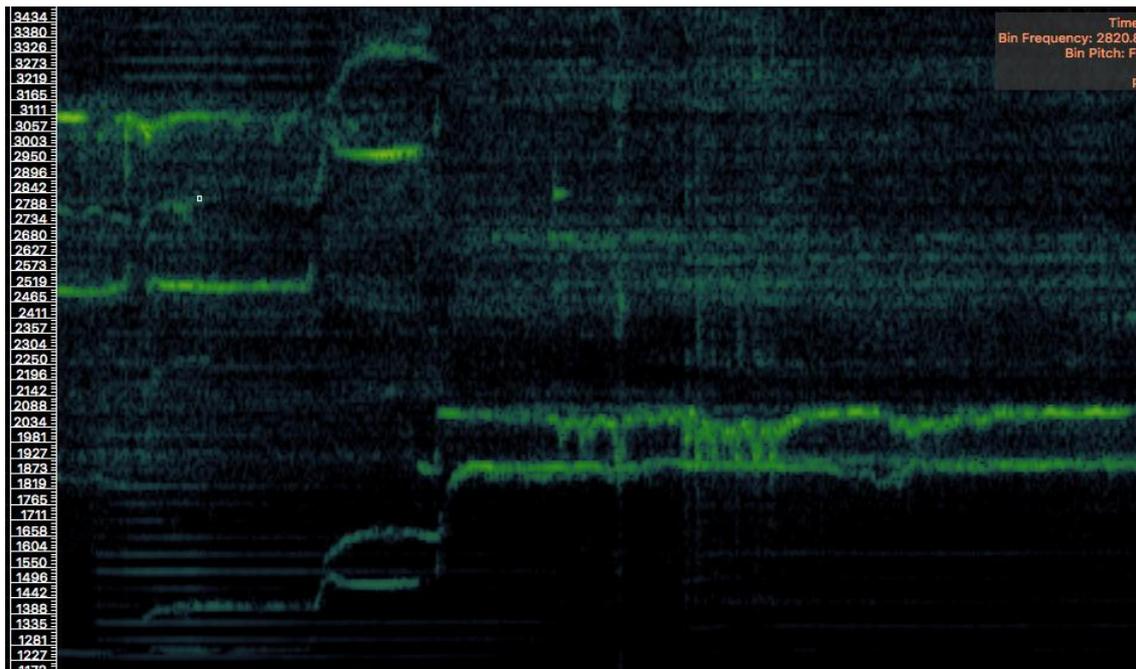
17 *ord* *sull pont*

Vln. *p* *ord* *sull pont*

Vla. *p* *ord* *sull pont*

Vc. *p* *ord* *sull pont*

*p* - *d* - *i* - *m* - *p* - *o* - *c* - *e* - *a* - *p* - *o* - *c* - *e*



**Figura 10.4:** Los océanos tienen oídos: Compás 17. Proceso y transición, banda de ruido armónica a inarmónica.

#### 10.4. Instalación sonora: BÚCARO DE SECRETOS

#### 10.4.1. Introducción

*Búcaro de Secretos* (2013) es una Instalación Sonora Generativa, de realización y composición colectiva, siendo los autores los artistas sonoros Damián Anache, Ezequiel Abregú y Martín Matus. La obra fue encargada para el evento de inauguración de la librería *Nota al pie* de la Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes (Buenos Aires, Argentina). El estreno de la instalación tuvo lugar el día 11 de abril de 2013 (Fig. 10.5).

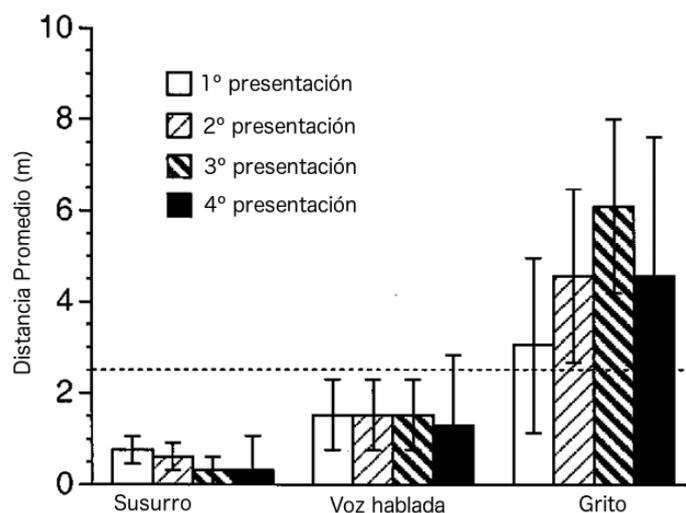
La forma de abordar la composición de la obra parte de la idea de la música generativa. Se diseñó un algoritmo computacional, en el entorno Pure Data, utilizando un sistema de reglas a fin de crear una estructura o textura sonora en donde los resultados sonoros sean únicos cada vez. *Búcaro de Secretos* utiliza como dispositivo de reproducción un arreglo de 8 parlantes con una distribución uniforme y circular. La obra articula texturas propias de la música electroacústica y textos de Erik Satie, utilizando criterios estéticos propios de la corriente *ambient*. En esta línea estética, el discurso sonoro intenta satisfacer al oyente en dos niveles: ofrece un entorno de confort auditivo y, al mismo tiempo, brinda una materia de interés en una situación de escucha atenta de la música. Ambas condiciones funcionan en simultáneo sin condicionar una recepción u otra.



**Figura 10.5:** Estreno de *Búcaro de Secretos*, 11 de abril de 2013, Universidad Nacional de Quilmes (Bs. As. Argentina).

#### 10.4.2. Marco teórico y realización

Para la realización uno de los elementos principales de *Búcaro de Secretos* se utilizó como punto de referencia un estudio realizado por Philbeck y Mershon (2002). En este trabajo se investigó cómo el nivel de producción de voz puede influenciar en la PAD. A tal fin, los autores examinan si esta influencia se debe a la experiencia adquirida ante la exposición del estímulo a largo plazo en contraste a la experiencia a corto plazo, obtenida por una única exposición al estímulo. Los autores concluyen que la distancia egocéntrica puede estar influenciada no sólo por la intensidad del estímulo, sino también por el conocimiento previo de la fuente sonora, pudiendo comparar los niveles de presión sonora con una estimación interna modulada por la familiaridad con el estímulo. Para demostrar esto, Philbeck y Mershon realizaron un experimento utilizando como estímulos grabaciones de voz hablada. A tal fin, utilizaron tres niveles de producción de voz: susurro, habla normal y grito. Los resultados de este estudio mostraron que, de forma sistemática y clara, los oyentes reportaron los distintos tipos de producción de voz (susurro: más cercano, habla normal, grito: más lejano) a diferentes distancias (Fig. 10.6). Incluso, esta situación ocurrió en la primera presentación del estímulo, en donde no influía el conocimiento previo del estímulo y la estimación de distancia de la fuente sonora al comparar entre los distintos niveles de producción de voz. En primer lugar, los resultados muestran que el efecto de la familiaridad con el estímulo proviene de la experiencia a largo plazo con los sonidos del habla, en lugar de comparar la intensidad de los estímulos. En segundo lugar, la estimación de distancia fue influenciada por la combinación de dos tipos de familiaridad: 1) la experiencia a largo plazo, adquirida previamente al experimento, y 2) la experiencia a corto plazo, obtenida durante la presentación de los estímulos en el experimento.



**Figura 10.6:** Distancias promedio, mostrando los datos de las presentaciones 1 a 4 para los tres niveles de producción de voz. La barra de error representa el +1 rango semi-intercuartil. La barra punteada horizontal indica la distancia física del parlante ( $n = 192$ ).

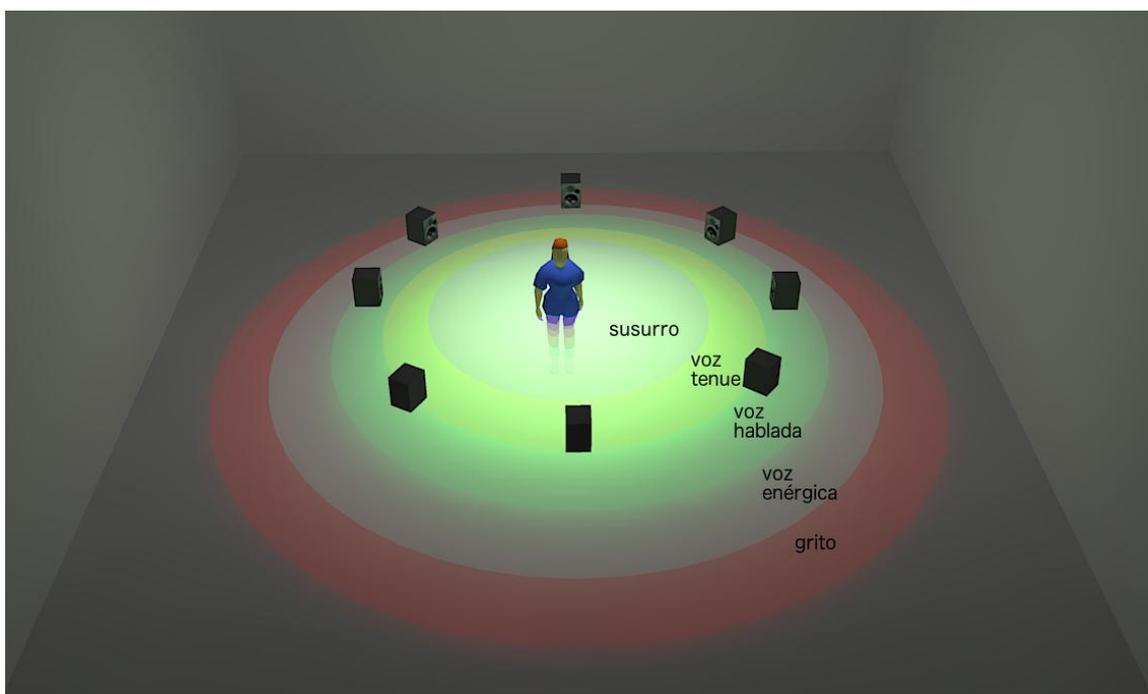
Para la realización de *Búcaro de Secretos* se utilizaron grabaciones de distintos fragmentos “*Cuadernos de un mamífero*”, libro del compositor francés Erik Satie (2006). En esta particular obra, Satie intenta conectar la palabra poética con su inherente componente sonoro. Estructurado en cuatro apartados y un añadido autobiográfico, este recopilatorio de notas (que el autor escribió a lo largo de su vida) engloba sus impresiones acerca de la poesía y de la música. De esta manera, las partituras se convierten en un texto poético-musical al incluir una serie de anotaciones que pretenden crear una atmósfera que oriente al intérprete y ante las cuales, como lectores, sentimos perplejidad al ver transgredidos los recursos formales propios de la escritura musical. Las «Indicaciones de carácter» que propone son del tipo: “*Ligero, pero decente*”, “*Moderado y muy aburrido*”, “*Ignorar la propia presencia*” o, “*Haga como yo*”.

Siguiendo con los aspectos relevantes de la realización de *Búcaro de Secretos*, a partir de los resultados expuesto por Philbeck y Mershon se planteó un diseño del espacio sonoro sobre la base la siguientes premisas:

- 1) *Utilizando distintos niveles de producción de voz es posible modular la distancia aparente de una fuente sonora fija.*
- 2) *Si esto es así, sin la utilización de un software de espacialización, será posible generar distintos planos espaciales en cuanto a la PAD.*

Expandiendo la metodología utilizada por Philbeck y Mershon (2002), se estableció una escala de 5 niveles de producción de voz: Susurro, Voz Tenue, Habla Normal, Voz

Enérgica y Grito. En base a este plan, se realizó un diseño de composición espacial para la distribución de los cinco niveles de producción de voz. Como mencionamos en el Capítulo 1, en el espacio virtual de la música electroacústica, la posición y expansión espacial del sonido no se encuentra condicionada a la disposición de los parlantes. En el caso del plan espacial utilizado, el objetivo hace foco en construir cinco zonas correspondientes a cada nivel de producción de voz. Para realizar esto, se utilizó un arreglo de 8 parlantes, distribuidos de forma circular y uniforme, como se muestra en la Figura 10.7.



**Figura 10.7:** Esquema para el diseño del arreglo de 8 parlantes para la instalación sonora “Búcaro de Secretos” y la distribución espacial de las voces de acuerdo a su tipo de producción.

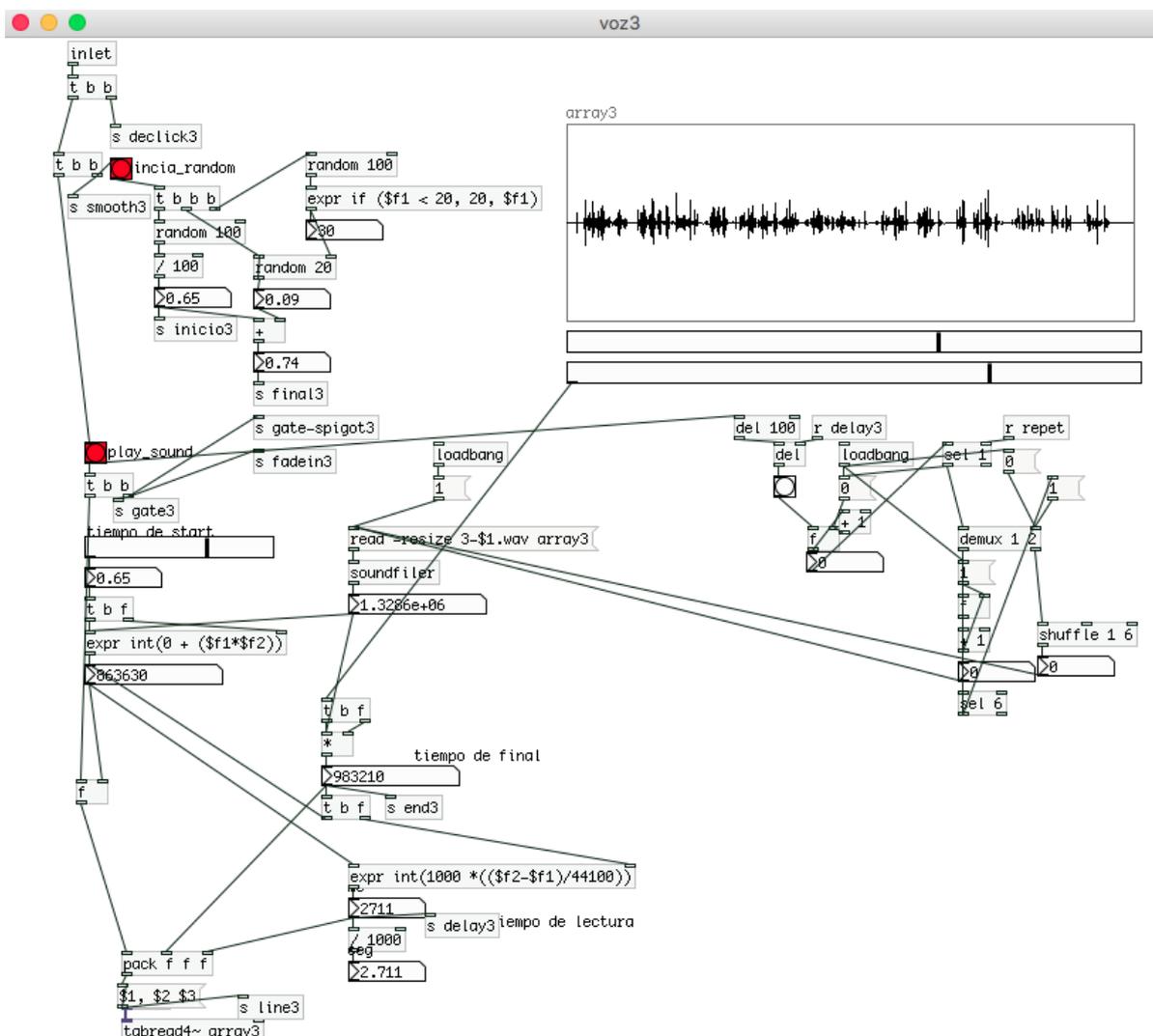
Como herramienta de espacialización básica y sistema de composición algorítmica se desarrolló un software en el entorno Pure Data (Fig. 10.8). Mediante el algoritmo desarrollado se controlaron dos parámetros fundamentales: 1) el intervalo temporal entre cada una de las reproducciones de la voz, 2) la distribución espacial en el arreglo de ocho parlantes.

En el primer caso, el intervalo de tiempo entre las voces se especificó teniendo en cuenta tres tipos de textura: a) *Aislada*, en donde no hubo superposición de voces de ningún tipo; b) *Superposición por igual tipo de producción de voz*, en donde un mismo tipo de producción de voz puede ocurrir en simultáneo; y c) *Gradiente*, donde se producía una secuencia de voces contiguas, de acuerdo a la escala de 5 tipos de producción de voz (por

ejemplo, según la escala establecida, en el caso de un tipo de voz tenue, sólo puede ser sucedida por una voz hablada o susurrada).

En el segundo caso, para la distribución espacial se creyó conveniente la utilización del concepto de fuente fija de referencia planteado en el Capítulo 4. Por este motivo, las voces no presentan desplazamientos circulares u oblicuos sino que ocurren sólo en un parlante, a fin de acentuar aún más el desplazamiento aparente de las fuentes sonoras en distancia.

Queda en evidencia que el enfoque utilizado para la construcción del espacio sonoro de *Búcaro de Secretos* no se concentra en la exactitud de reproducción de los indicios del entorno acústico virtual utilizado. Por el contrario, el objetivo se centra en la construcción de un discurso sonoro que posea cierta independencia de la tecnología de reproducción y espacialización utilizada, manipulando los indicios perceptivos involucrados en la PAD a fin de establecer lo que podríamos llamar “*espacialización perceptiva*”.



**Figura 10.8:** *ejemplo de parte del módulo utilizado para el tratamiento de las voces de Búcaro de Secretos. (software desarrollado en el entorno Pure Data).*

## **10.5. Obra escénica: LEJOS**

### **10.5.1. Introducción**

LEJOS se estrenó el 17 de Julio de 2014 en la sala principal del teatro Beckett (Buenos Aires, Argentina), y hasta la fecha cuenta con más de 30 presentaciones en distintas salas y festivales de Argentina (Fig. 10.9). LEJOS es una obra en donde la danza, el teatro, la performance y el sonido se conjugan en el cuerpo de una actriz, quién busca en su memoria los cuerpos de las representaciones biográfico-ficticias de su pasado. En LEJOS se produce una indagación sobre cómo habitar un espacio vacío y librar el cuerpo de la memoria, en un intento por transformar los mecanismos de representación. Se trata de una investigación donde el pasado, como un conjunto de legados personales y generacionales, es presentado simbólicamente como un ruido, el cual se desarrolla según la relación de temporalidad no lineal entre pasado y presente , vinculando cuerpo , memoria y representación . La respiración , utilizada como dispositivo escénico y generador del ruido , pretende invocar un cuerpo del pasado, sin pretender personificar ficciones o recrear memorias físicas . La respiración constituye además el texto de LEJOS, resignificando el silencio (la ausencia de sonido entre las respiraciones) como un espacio para ser vivenciado, escuchado y amplificado.

De esta manera, LEJOS constituye una investigación multidisciplinaria , combinando teatro, performance, artes visuales y sonoras . Desde el inicio del proceso creativo de la obra, el desafío consistió en trabajar sobre los umbrales perceptivos de la respiración y el silencio, en el desdoblamiento del espacio escénico-acústico y en los puntos de transición en donde un símbolo o sonido puede ser una cosa u otra dependiendo del contexto . En particular, desde el punto de vista del tratamiento sonoro de la obra, la idea de la memoria como ruido fue abordada como un concepto clave para la composición del espacio sonoro. En este marco , el tratamiento del silencio y el ruido actúan como un marco espacial y temporal (el cual también se conecta con el pasado del personaje ), constituyendo un conector crucial entre el aspecto simbólico de la obra y el pasado ficticio de la actriz.



**Figura 10.9:** Estreno de *LEJOS*, Teatro Beckett, el 17 de Julio de 2014 (Buenos Aires, Argentina). Foto: Mariana Roveda.

### 10.5.2. Marco teórico y realización

Para el diseño y composición sonora de *LEJOS* se emplearon distintos procedimientos sobre la base de dos conceptos explicados en el Capítulo 4:

- a) La Composición multi-capa del espacio sonoro en distancia (Maconie, 1989), la cual se refiere a la construcción y procesamiento del material sonoro de la obra, y
- b) La Perspectiva Auditiva (Chowning, 1991), la cual refiere la concepción y diseño del espacio sonoro de *LEJOS*.

En el primer caso, como vimos en el Capítulo 4 el objetivo comprende componer un espacio sonoro de varias capas imbricadas en distancia, componiendo con distintos planos o texturas en simultáneo. Para realizar esto fue necesario caracterizar cada una de las capas utilizando timbres específicos según el caso. De esta manera se clasificaron las capas según sus características de producción y/o procesamiento:

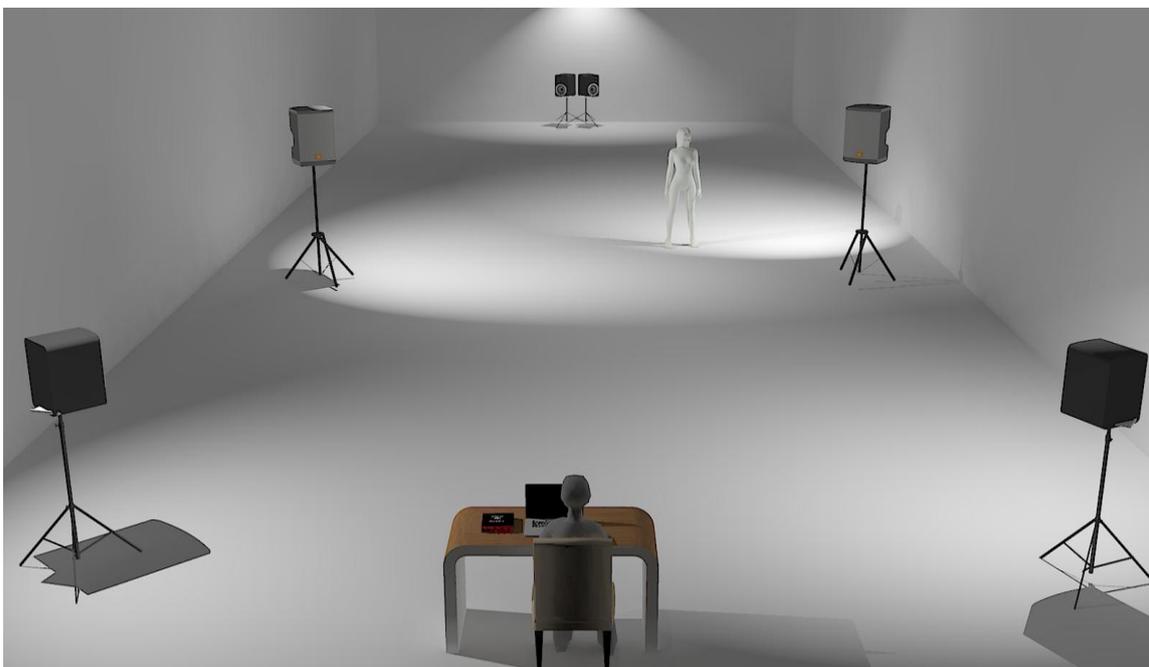
Capa 1: Distintos tipos de respiración de la actriz,

Capa 2: Sonidos producidos por la acción de la actriz en escena (golpes, pasos, voz hablada),

Capa 3: Procesamiento en tiempo real de los distintos tipos de respiraciones y acciones,

Capa 4: grabación, procesamiento y reproducción del material de la capa 1 y 2.

Además, para la realización de esta última capa se utilizaron distintos registros de audio de casi 3 meses de ensayo. La razón de esto radica en que luego de varias escuchas sobre el material, surgió la idea de trabajar con la memoria sonora de la obra, capturando (mediante micrófonos direccionales) el sonido producido en escena para luego aplicar diversos procesos en tiempo real (filtrado, retardos, síntesis cruzada y espacialización). Tales procesos interactuaron con la memoria sonora de cada performance (los distintos sonidos producidos *in situ* por la actriz), amplificando y modulando cada una de las capas sonoras, trabajando así con la memoria sonora de la obra como una retroalimentación constante. Por ejemplo, un texto hablado puede modular una capa minutos más tarde y el ruido de la respiración puede transformarse en la capa de fondo de la próxima acción. De esta manera fue posible capturar las características acústicas de determinados materiales sonoros, así como también espacializar o deconstruir cada capa de formas simples o complejas.



**Figura 10.10:** Esquema de la disposición de parlantes para la obra escénica LEJOS. Dos cajas de mayores dimensiones, ubicadas a ambos lados del escenario (PA), dos cajas de menores dimensiones ubicadas detrás de la platea y dos cajas juntas ubicadas detrás de la escenografía.

Por otro lado, pensar un tipo de construcción multi-capa implicó abordar la idea de la Perspectiva Auditiva. El concepto de Perspectiva ha sido estudiado en sus aspectos técnicos, estéticos y simbólicos (Panofsky, 1999) naturalmente desde el sentido de la visión. Sin embargo, como hemos visto, muchas de las ideas derivadas de estos estudios pueden aplicarse de igual modo al espacio sonoro; por ejemplo, lo que refiere Cassier al espacio visual: “La percepción desconoce el concepto de infinito, se encuentra unida ya desde el principio a determinados límites de la facultad perceptiva, a la vez que a un campo limitado y definido del espacio”. De acuerdo a lo antedicho, desde el punto de vista del espacio sonoro de LEJOS, se planteó un diseño espacial sobre la base de dos objetivos:

*a) construir un punto de expansión (respecto al espacio sonoro) que trascienda el espacio físico del espacio de acción de la escena y de la sala.*

*b) expandir la acción sonora de la escena a toda la sala mediante un entorno híbrido, que contemple señales acústicas reales y virtuales.*

Para realizar esto, se utilizó una arreglo de 6 parlantes, distribuidos como se muestra en la Figura 10.10. La disposición de parlantes responde a los requerimientos del diseño sonoro de la obra, buscando expandir la acción sonora de la escena por fuera de los límites físicos y del sistema de reproducción mediante parlantes (ver Fig 10.10). Para esto se contó con dos cajas de mayores dimensiones, ubicadas a ambos lados del escenario (PA), dos cajas de menores dimensiones ubicadas detrás de la platea y dos cajas juntas ubicadas detrás de la escenografía.

Finalmente, con el objetivo de garantizar una construcción multi-capa clara, se utilizaron diferentes combinaciones de parlantes para reforzar la percepción de cada capa. Además, cada combinación de parlantes determinó un espacio en particular sobre el cual procesar y modular las cualidades de las capas involucradas. A continuación se detallan los principales usos de las combinaciones de parlantes en relación a cada una de las capas de la textura:

| <b>Combinación de Parlantes</b>         | <b>Función / Capa</b>   |
|---|---|
| <b>Fuera de escena</b>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sonidos de respiración</li> <li>- Interferencias con voces y sonidos de la acción de escena</li> <li>- Amplificación de los sonidos generados por la actriz.</li> </ul>  |
| <b>Fuera de Escena + Cajas traseras</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Indicios del entorno reverberante virtual (ecos temprano, tiempos de reverberación reverberación densa, etc)</li> <li>- Proceso de los sonidos de respiración</li> </ul> |

|                       |  |
|-----------------------|--|
|                       | - Proceso de los sonidos producidos por la actriz  |
| <b>PA</b>             | Música grabada y diseño sonoro   |
| <b>PA + Cajas</b>     | Música grabada<br>- Proceso de los sonidos de respiración<br>- Proceso de los sonidos producidos por la actriz   |
| <b>Cajas Traseras</b> | - Interferencia con voces y sonidos de la acción de escena<br>- Música grabada<br>- Proceso de los sonidos de respiración<br>- Proceso de los sonidos producidos por la actriz |

Es importante mencionar que, desde el inicio, se contempló que la construcción del espacio sonoro de LEJOS debía adaptarse a las características (tanto acústicas como arquitectónicas) de las diferentes salas de presentación. De acuerdo a esta idea, para garantizar una implementación plausible de las técnicas de composición multi-capa (y de Perspectiva Acústica descritas anteriormente) se utilizaron, según el caso, distintos tipos de técnicas de microfoneo del ambiente y del espacio de acción, así como también el uso de refuerzo sonoro mediante parlantes.

LEJOS representó un espacio ideal para desarrollar e implementar distintos conceptos y técnicas constructivas del espacio sonoro referentes a la composición multi-capa y la Perspectiva Acústica, lo cual representó un aspecto muy relevante de la dramaturgia de la obra y que sirvió además para crear un estrecho diálogo entre el espacio de acción y el sonoro. De esta manera, LEJOS plantea un importante precedente de investigación en las artes escénicas, el cual hace referencia a un corpus novedosos de hipótesis de trabajo y procesos creativos que involucran al sonido como un eje conductor de la dramaturgia de la obra.

## **10.6. Escultura sonora: CRISÁLIDA**

### **10.6.1. Introducción**

*Crisálida* es una Escultura Sonora Interactiva (Fig. 10.1) que relaciona la sustentabilidad, el vínculo del humano con su entorno y los procesos que éste genera a través del tiempo. Los autores de la escultura son la escultora Carla Colombini y los artistas sonoros Martín Matus y Ezequiel Abregú. La escultura tendrá su primera presentación en Noviembre 2017, en el Centro de Arte Sonoro de la Casa Nacional del Bicentenario (Bs. As., Argentina).

*Crisálida* consiste en una escultura elaborada, en su mayor parte, utilizando una gran cantidad de materiales de desechos tecnológicos (cerca de 40 kg) (Fig. 10.2). Desde un punto

de vista simbólico, se propone una postura crítica y reflexiva sobre el tratamiento de los desechos provenientes de la tecnología, incentivando desde el arte a una reflexión sobre la problemática del medio ambiente y la sustentabilidad. En este marco, la obra propone una proyección simbólica de la problemática existente entre los humanos y sus desechos tecnológicos, develando así un espacio de correlación directa entre el ámbito urbano contemporáneo y sus basurales. El consumo desmedido de productos de última generación, la evolución cultural dependiente de la tecnología, las estrategias de obsolescencia programada y la falta de controles y políticas sobre el tratamiento de los residuos tecnológicos generan un nuevo tabú en las sociedades urbanas: los basureros tecnológicos. Debido al aumento exponencial de estos sitios tenemos, como consecuencia, la expansión de sus límites invadiendo progresivamente nuestro espacio urbano.

*Crisálida* pretende realizar, desde el arte, una mirada reflexiva sobre esta problemática, concentrándose en tres ejes principales:

- 1) *Arte y tecnología*, proponiendo una posible solución al problema reutilizando desechos tecnológicos como materiales para la realización de la escultura.
- 2) *Reflexión crítica*, que reafirme los valores referentes a la manera de relacionarse con la ciudad, el entorno natural y la tecnología, y
- 3) *Sustentabilidad*, postulándonos como parte de una generación que actúa para satisfacer sus necesidades de forma consciente y sustentable.



**Figura 10.1:** Modelo 3D del emplazamiento y ubicación de la escultura *Crisálida*.

### 10.6.2. Marco teórico y realización

Crisálida fue concebida como una instalación sonora interactiva. Para la realización se diseñó una interfaz que comprende de 3 etapas.

La primera consiste en un sistema de sensado de detección de movimiento. Para implementar esto, se utilizaron cuatro sensores infrarrojos (PIR) conectados a una placa de control *Arduino*. Mediante los sensores se determina, de forma aproximada, la cantidad de personas que contemplan la escultura, pudiendo también estimar la posición relativa del espectador.

La segunda etapa contempla el uso de un software de composición generativa, programado en el entorno Pure Data, el cual se utiliza para recibir y procesar los datos obtenidos de los sensores. Por cuestiones de espacio y practicidad, la plataforma elegida para ejecutar el software fue el mini ordenador *Raspberry Pi* (V1, model B).

En la tercera etapa se implementó la reproducción de sonidos grabados, provenientes del registro y posterior sonificación de los datos obtenidos de sensor de energía electromagnética (EMF detector). Dentro de la escultura se implementó un sistema multicanal octofónico utilizando parlantes FRFR (Full Range Flat Response) de pequeñas dimensiones, ubicados y distribuidos de forma asimétrica dentro del cuerpo de la escultura.

El resultado sonoro final está dado por la interacción con la escultura, la cual contempla la cantidad de movimiento y el número de espectadores que estén observando la *Crisálida*. De acuerdo a los distintos tipos de interacción con el espectador, se determinaron 3 tipos de “estados” de la obra:

a) *Estado de Reposo*: En caso de que haya poco movimiento alrededor de la escultura, o la ausencia de espectadores, la escultura se encuentra en la modalidad de reposo, de donde emergen tenues y lejanos sonidos desde su interior.

b) *Estado Interactivo*: De acuerdo a la cantidad de movimiento ocurrido y posición del espectador en las cercanías de la ubicación de la escultura, la textura sonora tendrá comportamientos espaciales más caóticos, erráticos y con más presencia.

c) *Estado transitivo*: Cuando los sensores detectan un movimiento considerable, habrá un periodo de transición, de 1 a 2 minutos, entre el estado de reposo y el interactivo.

El tratamiento sonoro de la escultura *Crisálida* aborda, desde un punto de vista imaginario y proyectual, el concepto de *horizonte y escenario acústico*. Como vimos en el Capítulo 3, la relación Directo Reverberante (D/R) es sólo relevante cuando un entorno contiene superficies reflectantes, y es particularmente interesante como indicio de distancia absoluta (por ejemplo, que puede ser independiente de la intensidad de la fuente

sonora). En un estudio realizado por Bronkhorst (1999) se concluyó que los oyentes pueden utilizar la relación D/R como pista auditiva predominante de distancia. Como hemos visto en el Capítulo 3, se ha demostrado de forma robusta que la PAD en entornos reverberantes es compresiva, y que este límite actúa como una suerte de horizonte acústico, el cual no es constante pero depende de las características acústicas del entorno (Bronkhorst, 1999). En otro estudio, Larsen et al. (2008) mostró que las propiedades acústicas consideradas importantes para la relación D/R se hacen relativamente constantes a grandes distancias. Larsen describió este hecho como una propiedad ineludible de la acústica de la sala, responsable del efecto de horizonte acústico. Siendo así, este efecto impondría un límite máximo para la distancia máxima percibida.

En el marco de lo antedicho, como punto de partida del proceso creativo fueron postuladas las siguientes preguntas: ¿Cómo se percibiría el horizonte acústico de un espacio sin estar inmerso en él?. Siendo espectador de dicho espacio, ¿Cómo se percibe el comportamiento de un entorno reverberante y su relación D/R en función del horizonte acústico?



**Figura 10.2:** *Escultura Sonora Crisálida, realizada por Carla Colombini, Martín Matus y Ezequiel Abregú*

Como vimos en el Capítulo 5, mediante la modalidad visual definimos el espacio que nos rodea. En este caso, se contempló un paralelismo con lo que ocurre con la modalidad auditiva, donde nuestro cerebro también crea imágenes sonoras a través de los sonidos del entorno. En nuestro caso, tenemos consciencia del espacio sonoro de la escultura que contemplamos pero, al mismo tiempo, no estamos inmersos en dicho espacio, dado que la escultura está concebida como un espacio autónomo en sí mismo. Desde el punto de vista escultórico existen barreras que nos impiden ver lo que hay en un determinado espacio si nos encontramos fuera del mismo. De la misma manera que existen barreras físicas que delimitan espacios, existen fronteras acústicas que limitan nuestra escucha a los sucesos sonoros que se estén produciendo dentro de un espacio determinado, siendo este caso los límites establecidos por el objeto escultórico. Estas fronteras sonoras son difíciles de

definir en *Crisálida*, ya que varían respecto al contexto en el que nos encontremos y de que forma interactuamos con el objeto escultórico.

En *Crisálida*, el concepto de *horizonte* es utilizado para determinar, desde un punto de vista simbólico, la distancia existente entre el espectador y las fuente sonoras que acurren dentro del espacio de la escultura. De esta manera , el horizonte acústico determina la barrera que delimita los sonidos que están incluidos y excluidos en el espacio determinado por el objeto escultórico . Cuando en un determinado lugar de la escultura se están produciendo diversos eventos sonoros al mismo tiempo, tendremos distintos canales auditivos. Dichos canales pretenden definir un entorno acústico virtual , el cual acontece dentro de la escultura, definiendo un *escenario acústico*, una región interna de la escultura.

### 10.7. Referencias bibliográficas

Bronkhorst A. W. y Houtgast, T. Auditory distance perception in rooms. *Nature* 397, 517-520 (1999).

Chowning, J. *Music from Machines: perceptual fusion and auditory perspective*. Laber-Verlag, Hamburg, 231-244 (1991).

Panofsky, E. *La perspectiva como forma simbólica*. Tusquets Ed. (1999)

Larsen, E., Iyer, N., Lansing, C. R. y Feng, A. S. On the minimum audible difference in direct-to-reverberant energy ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America* 124, 450–461 (2008).

Maconie, Robin (ed.): *Stockhausen on music*. London, Marion Boyars (1989).

Philbeck J. W. y Mershon D. H.: Knowledge About Typical Source Output Influences Perceived Auditory Distance. *Journal of the Acoustical Society of America* 111, 1980-83 (2002).

Satie E., *Cuadernos de un Mamífero*. Ed Acantilado. España. (2006).

Spiousas I., Etchemendy P., Eguia M. C., Calcagno E. R., Abregú E. A. y Vergara R. O. Sound spectrum influences auditory distance perception of sound sources located in a room environment. *Frontiers in Psychology* (2017).

## 11. ENTREVISTAS SOBRE EL USO DEL ESPACIO SONORO Y LA PERCEPCIÓN DE DISTANCIA

### 11.1. Introducción

Hacia el final de mi investigación sobre la Percepción de Distancia, entre los años 2015 y 2016, realicé una investigación de campo primario mediante una serie de entrevistas a siete profesionales y artistas argentinos, especialistas en distintas disciplinas artísticas y técnicas: composición musical, orquestación, interpretación, mezcla y mastering de audio. Dichas entrevistas hicieron foco en la utilización y concepción del espacio sonoro en general y, en particular, en cómo los entrevistados aplicaban distintos criterios y estrategias para manejar la distancia auditiva en su actividad profesional. Entre otros, uno de los objetivos de este estudio fue revisar las similitudes y diferencias entre el conocimiento proveniente de la actividad profesional de cada uno de los entrevistados y la información proveniente de la psicofísica experimental, referida a la percepción de distancia. De esta manera, evidenciando la correlación existente entre la información proveniente de la propia experiencia profesional en relación a la reportada en los estudios psicofísicos, se buscó acercarse al uso de la distancia desde una perspectiva práctica y factible (no experimental) en el marco de diversas necesidades artísticas en el ámbito profesional cotidiano, con el fin de obtener nuevas variables y maneras de abordar la distancia auditiva.

Los resultados obtenidos brindaron elementos y datos muy relevantes que avalaron (y en ocasiones, expandieron) las teorías y conclusiones expuestas en esta tesis. Las entrevistas se realizaron, en la mayoría de los casos, en el ambiente de trabajo “natural” de los entrevistados: estudios de grabación, mezcla o mastering, estudios de creación y salas de ensayo.

El diseño de la investigación se basó en una serie de 12 preguntas, las cuales se formularon con el fin de abordar el tema de la distancia partiendo de conceptos generales sobre el uso del espacio sonoro hasta llegar aspectos particulares de la percepción auditiva de distancia (Ver Capítulo 3 para más detalles).

A continuación, se detallan las preguntas efectuadas a cada entrevistado.

*1) Desde un punto de vista general, según su opinión ¿es importante el uso de la espacialidad en su actividad? ¿Por qué?*

*2) ¿Cuales son las técnicas más relevantes que utiliza para el tratamiento espacial de la música?*

3) Desde un punto de vista general, según su opinión ¿es relevante el uso de la profundidad/distancia en la música? ¿Por qué?

4) Hablando de su producción musical/profesional, ¿es relevante el uso de la profundidad/distancia en la música? ¿Por qué?

5) En la música que produce/mezcla/masteriza (o la actividad que realiza). ¿Qué parámetros controla o tiene en cuenta en el tratamiento espacial respecto a la Distancia?

6) ¿Cree que es posible cambiar la distancia aparente de una fuente sonora fija? ¿De qué manera?

7) ¿Por qué cree que en la escritura tradicional musical se contempla la altura, el tiempo, la intensidad, pero no una notación para controlar la ubicación espacial en Distancia?

8) ¿Tiene/usa alguna manera de poder especificar mediante notación el tratamiento espacial en Distancia?

9) ¿Conoce el concepto de Perspectiva Auditiva?

a. en caso afirmativo: ¿Podría detallar su conocimiento sobre la Perspectiva Auditiva?

b. en caso negativo: ¿A que le remite o que le sugiere el concepto de Perspectiva Auditiva?

10) ¿Cómo considera que estos indicios pueden afectar nuestra Percepción de Distancia en la música/mezcla/mastering/composición (dependiendo de la actividad del entrevistado)?

a. Intensidad

b. Características espectrales

c. Conocimiento previo o familiaridad

d. Reverberación de la Sala

e. Relación D/R Reverberación

f. Modalidad Visual

g. Distancia real de la fuente sonora vs distancia aparente.

11) *¿Qué obras artísticas considera paradigmática respecto al tratamiento de distancia?*

12) *Según su conocimiento, ¿Cuáles son los antecedentes históricos más relevantes en el uso de la distancia como factor relevante en relación a su actividad?*

A continuación se detallan la/los participante/s en este estudio:

**Patricia Martínez** (44 años): Compositora, artista interdisciplinaria, pianista e investigadora.

**Julio Martín Viera** (74 años): Compositor. Profesor de Composición e Instrumentación y Orquestación (UNLP).

**Gustavo Basso** (59 años): Ingeniero en Telecomunicaciones especializado en Acústica. Docente investigador en la Universidad Nacional de La Plata.

**Andrés Mayo** (58 años): Ingeniero en Electrónica (UTN) especializado en grabación, mezcla y mastering.

**Daniel Ovie** (43 años): Ingeniero de Sonido y diseño de equipamiento para audio profesional.

**Oswaldo Suárez** (57 años): Compositor. Arreglador. Profesor de Composición e Instrumentación y Orquestación.

**Luis Arias** (76 años): Compositor. Profesor de Composición e Instrumentación y Orquestación

A continuación se expondrán los principales temas abordados en las entrevistas, estableciendo como hilo conductor las ideas de cada caso particular, en búsqueda de un análisis más profundo de las respuestas y opiniones que surgen de la subjetividad del entrevistado.

## **11.2. Sobre la importancia del uso del espacio sonoro**

A modo general, el punto de partida de este estudio tuvo como objetivo revisar qué grado de importancia tiene el espacio sonoro en la especialidad o actividad de cada entrevistado.

Sorprendentemente, las respuestas obtenidas indican que, a pesar de representar un ámbito demasiado abarcativo, el uso del espacio es un parámetro sonoro en igualdad de importancia al resto de los parámetros involucrados de uso común (ej: ritmo, armonía, timbre). En este sentido, la compositora Patricia Martínez afirma que considera el tratamiento del espacio sonoro *“como un elemento o material compositivo más, ya que no es algo que se “agrega” sino, en mi caso, ya es parte mismo de la identidad del material, en el caso de obras electroacústicas, tanto como de la música instrumental”*.

Como vimos en el Capítulo 1, en el ámbito instrumental el uso del espacio como variable compositiva tiene varios siglos en su haber. Hemos visto que, desde el período renacentista, los espacios en donde se ejecutaban obras musicales comienzan a ser relevantes. En referencia a este hecho histórico del uso del espacio, el compositor Luis Arias sostiene que *“a partir de los renacentistas empieza a generalizarse la idea de la espacialidad. Y también esto es un hecho realmente importante también en el romanticismo, dado que fue un elemento de la música muy relevante. Quizás, en siglos anteriores, la orquesta sinfónica grande no existía, posiblemente haya habido menos consciencia de los compositores que la espacialidad tenía importancia. Creo que a partir de los románticos (en particular los post-románticos) empezó a tener importancia clara. Y más todavía cuando llega el atonalismo o el politonalismo, o el desarrollo de la tonalidad extendida. O sea, ¿Cómo vas a concebir que alguien haya compuesto “La consagración de la primavera” si no tenía, aunque sea intuitivamente, la noción del espacio?”*.

Siguiendo con la idea del espacio desde un punto de vista tradicional, y en particular mediante el uso de la orquesta o grupos sinfónicos, podemos pensar que la disposición instrumental juega un rol muy importante en cuanto a la distribución de las distintas familias y grupos instrumentales. Por ejemplo, para lograr un buen equilibrio en cuanto a lo que se percibe en la distancia, habría que considerar el tipo de proyección e intensidad de cada grupo instrumental, en general, y de cada instrumento en particular. De acuerdo a esta idea, el compositor Julio Viera dice que *“si tuviese un grupo de instrumentos, todos dispersos, no habría una unidad respecto a la percepción de la fuente sonora, es decir, un punto de referencia. En cambio, ubicados de determinada manera, uno percibe una fuente lógica de donde proviene el sonido. Por otra parte, en la orquesta sinfónica, por ejemplo, hay ciertos instrumentos que conviene adelantarlos, dada su características de proyección sonora. Desde ya, hay instrumento que son más potentes, tienen más sonoridad en relación a otros. Por eso, los metales atrás y más adelante las maderas”*.

Podemos observar que las respuestas sobre el uso del espacio puede depender de muchos factores y criterios, presentando muchas variables posibles y dependiendo del tipo

de música, del planteo del/la compositor/a, e incluso del entrenamiento auditivo que posea la audiencia. Haciendo referencia a este hecho, Gustavo Basso nos dice que *“hay obras donde la espacialidad es muy poco importante, por ejemplo la música basada en lo que es la relación altura/tiempo. Por ejemplo, el arte de la fuga de Bach. Ahí, que esté la espacialidad o no...es una obra que perfectamente puede ser mono!. Ahí la obra pasa por la estructura de relaciones entre las notas y los intervalos, no porque las notas vengan de un sitio u otro. El mismo Bach, por ahí en una obra como “La Pasión según San Mateo”, necesita espacialidad ya que tiene doble coro y doble orquesta. Si la oímos bien armada y planteada en una iglesia como la de Lepzig o la de San Marcos en Venecia (o la de San José en La Plata), con dos coros y dos orquesta, la obra resulta impresionante. Se puede oír también en mono, pero no tenés el diálogo de partes del texto que maneja Bach. Después hay obras donde el espacio forma parte estructural del espacio musical. Por ejemplo, Prometeo de Luigi Nono. Sin ningún tipo de duda, sin espacio no existe Prometeo. No es la obra.”*

De esta forma podemos inferir que no es posible encontrarnos con una única respuesta respecto a la importancia del espacio sonoro, dado que, al parecer, cada obra podría sugerir qué herramientas son necesarias para realizar un análisis efectivo ya que utilizar criterio único de análisis del espacio no sería efectivo. Dado este hecho, todo parece indicar que cada obra requiere el uso de una herramienta de análisis particular, respecto al espacio sonoro, y que criterio tendría pertinencia a tal fin. De acuerdo a este hecho, Basso concluye que *“la respuesta sobre el espacio es esa: un abanico de respuestas infinitas. La música es estética, y es cultural. No existe la “buena acústica” o el “buen espacio” para la música. Va a depender de lo que se quiera hacer”*.

En el ámbito del tratamiento del espacio desde un punto de vista técnico (no por ello menos creativo), remitirnos a un proceso en particular convierte nuevamente la respuesta respecto al uso del espacio en algo muy abarcativo. Esto se debe en gran parte a que la espacialidad como concepto, más allá de que es fundamental (por ej: en una mezcla de audio), es algo que idealmente debería ser aplicado a toda la cadena de producción, y no reducir el tratamiento del espacio en una etapa en particular. Apoyando esta idea, el Ingeniero Andrés Mayo afirma que *“si uno intenta representar, espacialmente, la música que se está registrando o capturando, me parece que el concepto de producción tiene que hacerlo desde el principio hasta el final. De hecho, desconfío de los procedimientos que solamente aplican el concepto del espacio sonoro al final de la cadena. Tiene que estar claro desde el principio para delinear el trabajo. Y eso no vale solamente para la espacialidad, sino para todo el proceso”*.

### 11.3. Sobre las técnicas utilizadas para el tratamiento del espacio sonoro

Cuando hablamos de las técnicas aplicadas al manejo del espacio debemos evaluar, en primera instancia, cuales son los elementos con los que contamos para realizar esta tarea, ya que hay instrumentos o fuentes sonoras que se prestan más a dar distintas perspectivas en comparación de otros que poseen características inherentes que resisten a su contextualización espacial. Sumado a esto, debemos tener en cuenta una serie de factores involucrados en el proceso de la obra, como pueden ser las posibilidades técnicas, las ubicaciones espaciales específicas en la composición (tanto fijas como en movimiento), las herramientas de espacialización durante la performance y, si los hubiera, el movimiento de los intérpretes en escena. En este escenario, no sería raro encontrarnos con situaciones en donde se produce un cruce entre aspectos técnicos (propios del tratamiento de la señal sonora en estudio) con técnicas y criterios compositivos musicales.

Como ejemplo de lo antedicho, Osvaldo Suárez hace referencia al manejo del espacio en la música instrumental desde un uso particular del espacio en el eje horizontal: *“con el tiempo, empecé a usar el espacio casi como una polaridad, y como una especie de centro. Tener espacialidad me posibilita tener una música que se situara en un lugar, a la izquierda o la derecha, y eso generaba una especie de polo de impresión. Una especie de micropolifonía, que yo sentía en un sector determinado, que puede ser una corredera hacia un costado, la música empieza correrse ahí, luego va parar allí (...) es el caso de mi obra que se llama Hologramas (para 24 clarinetes), donde justamente lo que trato de hacer es que a través del volumen se genere una impresión de movimiento de acuerdo a la posición del ejecutante”*.

También se presenta el caso en donde existen conexiones entre la música electroacústica y la instrumental, en donde se busca abordar la espacialidad de, por ejemplo, una orquesta sinfónica a partir de técnicas y criterios propios de la música electroacústica. Como ejemplo de este cruce, Luis Arias se refiere a su obra *Fonosíntesis I* (1964): *“es una de las primeras obras concebida desde la espacialidad, incorporando elementos que después apliqué en otras obras, y que en el fondo también tendían a esa idea. En Fonosíntesis I me acerco mucho a la música de Ligeti de esa época, de la época de *Atmósferas* (una obra que a mí me empezó a cambiar mi forma de pensar). Era la búsqueda de sonoridades de tipo electroacústico a través de los instrumentos. Es la primera búsqueda que pensé en la espacialidad de manera directa (...) Mi idea era salir del multiserialismo, que me parecía un camino cerrado. O sea, intuía que se iba a comer a sí mismo, que fue finalmente lo que pasó”*.

En correlación con la importancia del espacio sonoro, tenemos una variedad de posibles respuestas respecto a qué técnicas utilizar a la hora de diseñar un espacio sonoro efectivo. Por ejemplo, puede darse el caso de tener fuentes (instrumentos o parlantes)

repartidas en un espacio real determinado. O también, contrario a esta idea, existe el caso en donde la espacialidad se plantea de modo virtual o artificial, en donde el espacio se recrea mediante un algoritmo matemático. En el primer caso, lo esencial es el espacio en donde se realiza la obra y de qué manera se distribuyen las fuentes sonoras. También será relevante tener en cuenta las características direccionales de las fuentes. De acuerdo a este hecho, Gustavo Basso afirma que *“en la época pre música electroacústica había teorías sobre el espacio, pero que surgían de personas no músicos (como por ejemplo Athanasius Kircher). De hecho el espacio en la acústica se maneja desde la época de los griegos (...). A nivel práctico, el antecedente más directo de occidente (que conozco) son los madrigales antifonales de Gabrieli en Venecia, que usaban especialmente la catedral de San Marcos que tiene dos coros laterales para hacer texturas contrapuntísticas responsoriales. Y ahí sí el espacio es vital, porque si no tenés el espacio no entendés cómo se compone esa obra. La idea es que haya un contrapunto espacial, además del musical”*.

En el segundo caso dependerá en menor medida de las características acústica del espacio físico y, dado este hecho, como situación ideal sería deseable disponer de un lugar “neutro” desde el punto de vista acústico, con el fin de evitar la superposición de indicios auditivos espaciales. Finalmente, también dependerá del arreglo de parlantes que se utilice, así como también del algoritmo de mezcla aplicado.

Desde un punto de vista de la realización técnica, tenemos una gran cantidad de variables involucradas en el manejo del espacio sonoro en sistemas de grabación y reproducción. Quizás una de las más relevantes sea la que refiere al tratamiento espectral de las fuentes sonoras, como es el caso de la ecualización. Respecto a esta técnica, Daniel Ovie afirma que *“cuando el balance es bueno en la ecualización enseguida percibimos la apertura del audio, que se expande en el campo estéreo o surround tipo 5.1. De todas maneras, esto tiene mucho que ver con las herramientas que se utilizan. Por ejemplo, con un conversor de alta calidad se produce un efecto tridimensional que con otros conversores no se logra. En este caso, el conversor tiene un sonido que es mucho más fiel a la fuente. Estamos hablando de conversores de primera línea, como las marcas Forssell o Lavry (...) y creo que tiene que ver por la exactitud de la fase que manejan estos equipos: escucho que en todo el rango de frecuencias está todo mucho mejor en fase. Otros conversores pierden en eso”*. Y si bien la reflexión de Ovie respecto al uso de técnicas referidas al manejo del espacio sonoro en apariencia contempla un punto de vista meramente técnico, en realidad no es así. Ovie afirma que el punto de partida de su trabajo del espacio siempre es artístico: *“Me baso más en lo que me pasa con la música porque, al fin y al cabo, siempre estamos hablando de música. ¿Qué te pasaba cuando escuchabas música a los 5 años? ¿Que me pasaba emocionalmente en ese momento?. Siempre trato de preguntarme y plantearme esto espacialmente. No tenía conocimientos*

*técnicos en esos años, pero pasaba algo que me gustaba. Ahí es a donde apunto. Yo voy equalizando en base a lo que voy sintiendo, básicamente. Y de ahí en más construyo el espacio. No pienso en casi nada técnico, pero a la vez soy super técnico”.*

#### **11.4. Sobre la importancia y las técnicas relativas al uso de la distancia auditiva**

Como vimos en los Capítulos 1 y 3, la distancia es un parámetro más de la ubicación espacial de la fuente y que, en comparación con el eje vertical y el horizontal, se le ha dado menos importancia. Sin embargo, como consecuencia del desarrollo de nuevos dispositivos de reproducción audiovisual, el uso de la distancia ha cobrado relevancia. Por ejemplo, Basso se refiere a que *“la distancia, como parámetro, se ha convertido en algo relevante, sobre todo en producción multimedia y el cine, en donde es muy importante que espectador oiga a una persona que esté disparando a 100 metros de distancia del supuesto punto de escucha. No alcanza que provenga de algún lugar en el plano horizontal. Y ahí me parece que el parámetro de distancia, que es muy complejo al depender de muchos indicios, es muy importante en ese tipo de medio audiovisual”.*

Siguiendo con la importancia del uso de la distancia en sistemas de reproducción audiovisuales, tenemos el caso de la distribución espacial a partir del efecto panorámico (técnica para enviar una señal de audio en un medio estéreo o multicanal) en un formato de audio surround, como puede ser el sistema 5.1. En este dispositivo es necesario crear un espacio sonoro convincente. Siendo este el caso, en principio habría que determinar dónde se quiere ubicar la fuente sonora que uno quiere representar y qué porcentaje de señal directa se concentra en ese punto. Por otro lado, hay que determinar qué porcentaje llega al oyente de forma secundaria, como es el caso de las reflexiones tempranas de la sala, la reverberación densa, retardos, etc. Mayo comenta su experiencia en el sistema 5.1 respecto a los criterios utilizados para lograr una representación del espacio virtual plausible: *“Una técnica bastante utilizada, y que me gusta en particular, es trabajar con cámaras (reverberadores) que van exclusivamente a un determinado punto del espacio virtual. O sea, son cámaras direccionales, donde puedo situar un elemento, por ejemplo a 100°, con respecto al punto de escucha (...) ¿Que es lo que voy a obtener como salida (output) de esa reverb? Además de la señal directa, señales que representen indicios acústicos de la sala virtual. Esto se combina con un efecto de delay, que no debería tener el mismo tiempo de retardo tanto en el canal izquierdo y como el derecho. Esto se hace para lograr una sensación de estéreo en los parlantes traseros, y que se perciba una apertura espacial (...) Por supuesto que no es la misma información que la señal frontal directa, dado que tenemos mayor distancia, menos brillo y un poco más de cámara”.*

Siguiendo con otros sistemas de reproducción contemporáneos, los cuales representan importantes herramientas para abordar el parámetro de la distancia, tenemos el caso del sistema llamado Wave Field Synthesis (WFS). Se trata de una técnica de renderizado de audio, caracterizado por la posibilidad de crear un entorno acústico virtual muy realista. Este sistema produce frentes de onda sintetizados por una gran cantidad de parlantes, ubicados en línea horizontal, en donde la localización de la fuente no depende de la localización del oyente. Respecto al WFS, Basso comenta su experiencia ocurrida en un concierto en el estudio 4 de la Maison de Radio France (radio-televisión francesa) donde usó la técnica de WFS como sistema de espacialización: *“había escuchado antes el WFS y no me había convencido. Teóricamente el WFS me parecía excelente. Pero en este concierto lo escuché como debió ser, por primera vez en mi vida. Las frecuencias por debajo de 400Hz están hechos por subwoofers. Pero, ¿Qué diferencia hay entre el WFS y sistemas como ambisonic o intensity panning?: Todos los sistemas tradicionales codifican la distancia para ser interpretado por un punto privilegiado de la audiencia. (...) Con WFS podés recorrer todo el espacio de representación como si estuviera la fuente real. Me pareció que es un cambio de paradigma de reproducción acústica. Porque lo que se genera no son tanto las ondas sonoras de fuentes ubicadas en algún sitio determinado, sino el frente de onda que esa fuente genera. Y se reproducen en la línea de parlantes frontales. Me parece que ahí la distancia está muy bien codificada, cosa que nunca oí en un sistema de parlantes en una ubicación privilegiada”*.

En otro ámbito, en la música instrumental el uso de la distancia siempre presenta una estrecha relación con la sala donde acontece el discurso musical. Julio Viera reflexiona sobre dicha relación afirmando que *“si un cuarteto de cuerdas toca en un lugar inmenso, y el espectador se encuentra muy alejado del escenario, no será percibido igual que si el espectador está mucho más próximo. Por eso, para un cuarteto de cuerdas es preferible una sala apropiada a la música de cámara. Si uno está en el Teatro Colón, y estás en la última fila (donde todo se escuchará más difuso), no es lo mismo que estar en las primeras filas de la platea baja. Y este hecho podría atentar contra las intenciones del compositor al concebir la distancia como factor estructural del discurso”*.

Además del espacio donde acontece el discurso musical, varios de los entrevistados (sobre todo los compositores) coincidieron que es muy relevante tener en cuenta el orgánico y la disposición espacial de los instrumentos en la escena. En este sentido, Arias se refiere a que un punto de partida para abordar los distintos planos en distancia puede ser desde la orquestación: *“tratando de pensar en planos diferentes en consecuencia de tener planos espaciales en distancia, mediante la organización de los timbres por familias o por grupos”*. En esta misma línea, Suárez se refiere a la posibilidad de generar centros de anclaje o polaridades de acuerdo a las distintas disposiciones instrumentales, refiriéndose a su ensamble de cámara (del cual es director): *“Como tenía un grupo chico,*

*según como planteaba el arreglo, hacía cambiar de lugar a los músicos, sobre todo los clarinetes (...). Por ejemplo, organizar un grupo de clarinetes y flautas distinto al de los metales, por una cuestión de homogeneidad tímbrica y sobre todo cuando buscaba una homogeneidad mayor a la que el grupo instrumental me ofrecía (...)*”.

Un poco en contraposición al hecho de otorgar a la orquestación y la disposición instrumental un rol relevante e indiscutible, podemos pensar que estos factores pueden ser afectados de forma contundente por las características acústicas del recinto, incluso llegando al punto de atentar contra la forma “ideal” de escucha de la música. En este sentido Viera afirma que *“uno como compositor piensa de manera ideal para que la música se escuche “correctamente” en un lugar “correcto”. Pero hay un problema: por más que el compositor trabaje cada uno de los planos de forma ideal, si la música ocurre en una sala inadecuada, se va a escuchar de forma inadecuada. Por ejemplo, en el Lincoln Center (EEUU) hay una sala sinfónica, una de ópera y otra para música de cámara. Por otro lado, en el teatro Colón se han escuchado muchas veces cuarteto de cuerdas, dúos, incluso conciertos de piano sólo.... Pero es un teatro de ópera! Es un espacio pensado para otra cosa. Ni siquiera fue concebido para conciertos”*.

Siguiendo con las técnicas utilizadas en distintos ámbitos profesionales, nos encontramos con una multiplicidad de situaciones en función de la actividad profesional de los entrevistados. Desde la mirada de Ovie, una de los aspectos más importantes para abordar el uso de la distancia depende de cuanta información acústica tenga asociada la fuente sonora: *“¿Como opera el aire? A medida que te vas desplazando en distancia hay una ecualización natural: va a perder agudos, y los graves son los que más “avanzan” en distancia. Es como una imagen, le sacás brillo y perdés el contorno de la figura. Por otro lado, si la señal acontece dentro de una sala, la pregunta que surge es ¿Qué está pasando con las reflexiones? ¿Está más cerca del sonido directo o no? Por ejemplo, grabando cuerdas esto lo hacía directamente en la toma, tratando de lograr la distancia en la toma cruda, de acuerdo a la posición de micrófono, ver cual es la espacialidad del lugar y de la fuente. Creo que de esa forma a mí es la que más me rindió, en comparación a hacer un proceso de postproducción”*.

#### **11.5. Sobre los métodos de notación para indicar planos en distancia**

Es sabido de que, actualmente, en la escritura tradicional musical se contemplan distintos parámetros técnicos y expresivos, como pueden ser la altura tonal, el tempo musical y la intensidad, entre otros. Pero no existe una convención sobre la notación o codificación espacial clara, y mucho menos para el parámetro de distancia. Hay quienes sugieren que no sería necesaria una nueva notación para la distancia, como es el caso de Suárez que afirma que *“seguiría con la idea de que con la escritura tradicional es posible*

*realizar diferencias en profundidad*<sup>6</sup>. Esto puede ser cierto si consideramos que la partitura, además de ser una guía para el logro de una obra que no puede ser abarcada totalmente, sugiere el concepto espacial de la música. Continuando esta idea, Martínez dice que *“sacar la conclusión de que estos parámetros no fueron tomados en cuenta también influye la falta de documentación sobre la práctica real de la música (...) Por ejemplo, hay obras de Monteverdi, que al indicarse “Eco”, la tradición de la época ya suponía que esas voces o instrumentos, debían estar alejados de los otros”*. Quizás la documentación y conocimiento del estilo puedan dar, aunque no de una forma detallada, conceptos claros sobre el tratamiento de distintos planos respecto a la distancia en el espacio musical. Por ejemplo, Basso se refiere a que para *“ensamblar y dirigir la sinfonía N°4 de Beethoven necesitás tener en cuenta dos siglos de historia: la transmisión oral, la música que oíste, oír en salas particulares diseñadas especialmente para esas obras, en donde los músicos saben cómo tienen que apretar con el arco los violines, como soplar los oboes, etc. Es decir: la partitura no tiene nada de información en ese aspecto. Es más, la partitura tiene sólo dos parámetros: altura tonal y duración. No tempo, no altura espectral, nada”*.

#### **11.6. Sobre el concepto de Perspectiva Auditiva**

En general, el concepto de Perspectiva Auditiva resultó ser el que más variabilidad de interpretaciones presentó, ya sea por subjetividades o por desconocimiento del término. Por ejemplo, Arias dice que: *“desde el punto teórico me parece interesante, pero desde el punto vista práctico es casi impracticable. O sea, se necesitaría un espacio gigante para poder aplicar el concepto”*. Por otro lado, Viera concibe el término claramente ligado *“al modo de pensar el espacio musical, pero que también no es una variable absoluta, ya que está condicionada a la ubicación del oyente”*.

Como vimos en el Capítulo 4, el término de *Perspectiva Auditiva* hace alusión a la percepción de distancia utilizando únicamente la modalidad auditiva. En una fuente natural, por ejemplo en el caso de que un trombonista que se aleje tocando, hay una cantidad de indicios auditivos que coinciden: decrecimiento de la intensidad, cambio espectral a medida que se aleja la fuente, relación D/R y reflexiones de la sala. Continuando con esta idea, Basso afirma que no es tarea sencilla representar de forma virtual cada uno de los indicios involucrados en la PAD: *“cuando se quiere imitar lo que sucede en distancia en la realidad con una fuente virtual, ahí empiezan los líos. Sucede que en el proceso de representación (y muchas veces sucede por desconocimiento) que de repente algún indicio no es coherente. No coincide con los otros indicios. Y ese conflicto termina dando como resultado que no hay ninguna distancia”*.

Y el problema se acentúa aún más cuando nos encontramos con sistemas de codificación binaural (por ejemplo, sonido para realidad virtual y videojuegos). Ante esta

problemática, Mayo hace referencia a las técnicas empleadas dentro de su estudio para conseguir un imagen espacial plausible: *“los auriculares, como se sabe desde hace años, permiten escuchar mucho más que dos canales, permitiendo percibir un espacio en 360° ...utilizando sólo dos canales!. La Perspectiva Auditiva está absolutamente enriquecida por el uso de técnicas que, hasta hace menos de 10 años, no tenían ninguna aplicación práctica y ahora son viables. Esto está muy explotado en el campo de sonido para videojuegos y realidad virtual. Pero esa perspectiva auditiva ahora se hace mucho más compleja, porque si antes, en el sistema estéreo, tenía una batería tomada con 15 micrófonos ya de por sí era una mezcla suficientemente compleja, y que había que resolver para darle una identidad en el espacio sonoro. En el sonido para realidad virtual, si giro la cabeza, esa batería se convierte en un punto en el espacio, y ahí necesito una mezcla mono que, en función del giro de la cabeza, me dé mayor o menor volumen, sumado a la interacción con otros indicios involucrados”.*

## 12. CONCLUSIONES FINALES

Desde un punto de vista general, esta tesis ha tenido como objetivo principal realizar una investigación multidisciplinaria sobre el estudio perceptivo del espacio en la música a partir de la información proveniente de los estudios científicos sobre la naturaleza, características y percepción de las pistas auditivas y visuales involucradas en la estimación de distancia. De acuerdo a este objetivo se desarrolló un plan de trabajo que contempló la realización de una serie de revisiones sobre la percepción auditiva y visual de distancia, además de diversos estudios en el campo de la psicoacústica experimental y, finalmente, la producción de obras de arte en estrecha relación con la información proveniente del ámbito científico.

Hemos visto que en el ámbito científico, a diferencia de los estudios de percepción espacial en acimut y elevación, la Percepción Auditiva de Distancia (PAD) es la que menos atención ha recibido por parte de los investigadores. Una de las posibles causas de este hecho es que la PAD involucra una gran cantidad de indicios y variables que dependen tanto del estímulo sonoro como de las características del contexto visual y auditivo. En reiteradas ocasiones hemos concluido que la mayoría de las pistas de PAD son dependientes de algún tipo de referencia (visual y/o auditiva) o conocimiento previo del contexto para obtener una percepción espacial coherente y efectiva. Al mismo tiempo, en el Capítulo 3 también hemos visto casos en los que ciertos indicios (como la relación directo/reverberante) que pueden modular la PAD sin necesidad de comparar información proveniente de experiencias previas (llamadas pistas absolutas).

Como hemos visto, un gran número de estudios de PAD reportan que la distancia percibida a una fuente sonora es particularmente subestimada en distancias mayores a 2 metros del oyente (Zahorik, 2005; Kolarik et al., 2013). Una posible respuesta a este hecho podría estar determinado por la incidencia de lo que se denomina *horizonte auditivo* (Bronkhorst, 2002) el cual ocurre cuando el campo acústico reverberante domina completamente el campo directo. Sin embargo, existe una gran cantidad de evidencia que demuestra que nuestra percepción de los indicios, proporcionados por un entorno determinado, depende de la integración multisensorial. De acuerdo a este hecho, es esperable que la PAD pueda ser modificada tanto cuantitativa como cualitativamente por la presencia de información proveniente de otras modalidades.

En el Capítulo 7 se expone un trabajo (Calcagno et al., 2012) donde mostramos que la presencia de información visual afecta directamente la PAD, lo cual sostiene la hipótesis de que la información visual brindada por el contexto puede servir como una referencia de gran impacto a la hora de estimar la distancia a un objetivo, además de ofrecer información sobre las dimensiones de la sala en la que se desarrolla el experimento. Este hecho sugiere que esta información, proveniente de la modalidad visual, facilita la calibración de

la PAD dentro de un espacio determinado. Por último, es interesante observar que en este estudio se sugiere que la información brindada por la reverberación del recinto puede contribuir a conformar una imagen mental bastante clara del tamaño del recinto y que, por lo tanto, que este hecho puede ayudar a calibrar las demás pistas asociadas a espacio determinado. De esta manera, en la línea de investigación sobre la integración multisensorial, estos resultados representaron un antecedente de gran relevancia y sentaron las bases para la realización de un estudio sobre cómo la Percepción Visual de Distancia (PVD) puede ser afectada por el contexto auditivo, en particular por la información relacionada con la reverberación de un recinto.

De acuerdo a estos antecedentes, y advirtiendo que el reporte verbal ha sido el método de respuesta más utilizados en estudios de PAD, se consideró importante utilizar un enfoque multimodal (involucrando la modalidad visual y auditiva) para el diseño de un setup experimental que sirviera para estudiar la eficacia de una metodología de acción directa para medir la PAD en el campo lejano (llamado *Cross Modal Direct Location*, o CMDL). Los resultados de este estudio mostraron que, utilizando la metodología propuesta, las respuestas fueron significativamente menos sesgadas y menos compresivas en comparación a otros estudios de PAD que utilizaron como método de respuesta el RV. Estos resultados mostraron una estrecha correlación con otros tipos de métodos de acción directa (Brungart et al., 2000; Andre y Rogers, 2006). Además, los resultados mostraron que esta diferencia entre métodos podría deberse a los cambios de en la calibración de la respuesta de la distancia percibida inducida por sistema de medición. En el caso de la CMDL, la información visual proporcionada por el dispositivo fue el responsable de la respuesta robusta y precisa en comparación a las RVs, lo cual sugiere que el RV necesita mayor cantidad de referencia espaciales del contexto (sobre todo visuales) para calibrar correctamente la PAD. Diversos estudios (Zahorik, 2001; Calcagno, 2012) apoyan este hecho mostrando que las respuestas de RVs fueron más eficientes y precisas ante la presencia de múltiples pistas del contexto visual. Por este motivo, uso del método CMDL pudo haber mejorado la calibración de la PAD debido a que los participantes no necesitaron realizar una transformación mental a una medida en metros referente a la ubicación del objetivo, representando un método interesante y confiable para medir la PAD.

En la misma línea de los estudios multimodales mencionados, los resultados del trabajo expuesto en el Capítulo 9 mostraron que, ante la falta de señales visuales que den información del entorno, el contexto auditivo afectó de forma contundente la PVD, además de que la sala reverberante se percibió significativamente de mayores dimensiones que la cámara anecoica. En concordancia a este hecho, los sujetos ubicados en la cámara reverberante percibieron todos los objetivos visuales más alejados que en la cámara anecoica. Esto parece indicar que el contexto auditivo afectó la PVD debido a la

información proveniente de la reverberación, la cual estuvo asociada directamente con la percepción del tamaño del recinto en el cual se desarrolló el experimento. Además de apoyar esta hipótesis, los resultados son concordantes con otros estudios relacionados a la estimación del tamaño en relación al nivel de reverberación de un recinto (Kolarik et al., 2013; Cabrera et al., 2005) y presentan una correlación positiva entre la distancia más lejana reportada por los participantes y la estimación del tamaño del recinto en función de la información ofrecida por la reverberación. Este hecho podría deberse a que ante la falta de información visual del entorno, los sujetos debieron utilizar información proveniente de la modalidad auditiva para crear una representación mental del tamaño del recinto, lo cual incidió directamente en las respuesta de estimación de distancia al objetivo visual.

En otro ámbito, hemos visto que en el panorama musical actual el espacio sonoro puede representar una importante elemento estructural en el discurso y que, para construir una espacialidad convincente, es necesario contemplar tanto aspectos artísticos como perceptivos. En el caso particular de la PAD, hemos visto que involucra una variedad de indicios acústicos y no-acústicos, los cuales pueden afectar de manera contundente el manejo del espacio en la música. Sin embargo, a pesar de que el uso consciente del espacio en la música cuenta con varias décadas de desarrollo, el manejo del plano de la distancia dista mucho de estar resuelto. Advirtiendo este hecho, uno de los principales objetivos de esta tesis hizo foco en abordar esta problemática desde una perspectiva artística y multidisciplinaria, lo cual representó un trabajo sin referentes a nivel local. Es interesante observar que cada una de las obras expuestas en el Capítulo 10 tuvieron como eje principal del proceso creativo a la información proveniente del ámbito científico respecto al estudio de la PAD. Esto no sólo representó un eje común y estructural para la realización de la serie de obras analizadas, sino que también pudo constatarse la posible aplicación de las técnicas compositivas en distintos ámbitos y dispositivos de difusión (ensamble instrumental, obra escénica-performática, instalación sonora, escultura sonora). En el caso particular de las piezas instrumentales "*Instrucciones para el contacto con mundo suprafísicos*" y "*Los océanos tiene oídos*", adoptar como herramientas compositivas las características del ancho de banda espectral en la PAD utilizando instrumentos acústicos representó en sí mismo un problema ya que, como vimos, no es sencillo manipular de manera aislada los indicios involucrados utilizando instrumentos acústicos. Además, en una situación de concierto con público, a esta problemática se le suma el hecho de que la información visual (del entorno y de la ubicación de la fuente) podría atentar contra la intención de generar distintos planos y trayectorias en distancia. Sin embargo, el enfoque utilizado para la composición de las piezas instrumentales representó un marco de referencia decisivo para desarrollar cada elemento de la textura, con características espectrales bien definidas, utilizando un conjunto de técnicas extendidas instrumentales específicas, lo cual acentuó la intención de situar cada plano de la textura

en un lugar bien definido en distancia. Por otro lado, debemos tener en cuenta que la traslación literal de la información proveniente del ámbito científico respecto al ancho de banda espectral en la PAD podría no ser efectiva en todos los casos. Esto se debe a que, a pesar de ser robustos, los resultados experimentales suelen ser dependientes de las características acústicas de la sala. Sin embargo, en una situación de reproducción de música grabada, a través de parlantes, la incidencia del entorno podría ser minimizada.

Por otra parte, un caso interesante se da en la instalación *Búcaro de Secretos*, la cual tuvo una fuerte correlación con un estudio de Philbeck y Mershon (2002) en donde el tipo de espacialización utilizada y la construcción del espacio sonoro en distancia no se centró en el tipo de sistema de espacialización utilizado, sino que se optó por generar un espacio virtual a partir de la experiencia y conocimiento previo de las fuentes sonoras (en este caso, mediante la utilización de voces humanas). Esto podría representar un cambio de paradigma en cuanto construcción de la espacialidad de una obra ya que, en el caso de *Búcaro de Secretos*, el espacio sonoro y los distintos planos generados en distancia poseen bastante independencia de la tecnología de reproducción, lo cual abre las puertas a un interesante campo de investigación a futuro.

Un caso paradigmático de cómo la percepción de distancia puede estructurar el diseño del espacio sonoro y de la acción performática se da en la obra LEJOS, en donde se pusieron en juego los conceptos de composición multi-capa en distancia y el de Perspectiva Acústica. En esta obra se implementaron soluciones técnicas y discursivas que respondieron no sólo a necesidades artísticas sino también a la aplicación práctica de información proveniente de estudios perceptivos. De acuerdo esto, fue fundamental conocer de qué manera un ambiente determinado (en este caso, la sala de teatro) contribuía o contradecía la construcción de distintos planos en distancia. Advirtiendo este hecho, resultó efectivo realizar un proceso de expansión sonora de las características acústicas de la sala, en donde convivieron señales reales y virtuales para conformar un espacio sonoro (híbrido) y performático unificado. Un aspecto interesante del proceso de aplicación del marco teórico utilizado en una obra escénica fue no dejar de lado el criterio e imaginario empírico para evaluar la efectividad de las técnicas empleadas para el manejo del espacio sonoro. De acuerdo a esta idea, en muchos casos se apeló a forzar los diseños y sistemas empleados para ampliar y exagerar aún más el efecto deseado. Como ejemplos de lo antedicho podemos mencionar, entre otros: la ampliación del rango dinámico en un ámbito entre lo sutil y lo estruendoso, el diseño no uniforme (no geométrico) del sistema de espacialización de parlantes, la amplificación y distribución de los sonidos producidos en escena, utilización de parlantes de distintos tamaños y el refuerzo de sonido. Esta interesante problemática artística resultó muy efectiva, la cual estuvo en correlación directa con métodos muy difundidos en distintas obras escénicas, en

donde el diseño del espacio de acción y performático responden a criterios sobre cómo el espectador percibe el espacio que el artista le propone.

Como hemos visto en la mayoría de los casos, para que sean efectivos, los estudios perceptivos de distancia se han desarrollaron en entornos diseñados y modificados a tal fin, situación que difiere ampliamente con lo que ocurre en espacios destinados a la producción sonora y la exhibición de obras de arte. Esto quedó reflejado en el Capítulo 11, en donde los entrevistados manifestaron de forma unánime la equivalente importancia que tienen tanto las intenciones artísticas como la percepción del oyente, siendo esto último lo que finalmente importa. Dado este hecho, la aplicación de la información proveniente de los estudios perceptivos podría estar sujeta a adaptar el entorno en donde transcurre la obra o bien adaptar el planteo espacial de la obra al contexto. En primer lugar, modificar o controlar la información del entorno para que la percepción de los indicios de distancia sean coherentes y eficaces. En segundo lugar, utilizar un entorno híbrido (real y virtual) que sea lo suficientemente flexible como para que el entorno no atente contra el manejo del espacio sonoro que se quiera implementar.

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren conclusiones con múltiples perspectivas y un marco de referencia novedoso en cuanto a la utilización del espacio en un contexto artístico. La revisión de los avances en el ámbito científico y la información adquirida en el desarrollo de este trabajo contribuyen a una manera efectiva de utilizar un marco teórico de referencia que pueda adquirir una resignificación con fines creativos y que el artista pueda hacer uso del mismo para interactuar e intervenir en el proceso de realización de una obra. Por otro lado, el enfoque abordado en esta tesis puede resultar de gran utilidad a la hora de aplicar nuevos criterios de análisis, tanto discursivos como taxonómicos, más abarcativos respecto al uso del espacio, contemplando no sólo el aspecto sonoro sino también el aporte que proporcionan otros factores no sonoros.

Finalmente, además de conformar una contundente fuente de información de aplicación en el ámbito artístico, los resultados obtenidos en esta tesis representaron un importante aporte en el campo de psicofísica experimental a nivel local e internacional. Prueba de ello son las seis publicaciones, con referato, en distintas revistas especializadas en mecanismos fisiológicos y perceptivos. Dado este hecho, el trabajo realizado en esta tesis representa una investigación multidisciplinaria pionera en Argentina, contribuyendo al conocimiento científico sobre la Percepción Visual y Auditiva de Distancia, integrando aspectos psicofísicos, biológicos y artísticos. Además de aportar información fundamental para el área de estudio, los resultados obtenidos podrían ayudar a delimitar la interrelación de factores cognitivos y perceptuales subyacentes.

### **12.1. Referencias bibliográficas**

- Andre, J. y Rogers, S. Using verbal and blind-walking distance estimates to investigate the two visual systems hypothesis. *Attention, Perception, y Psychophysics* 68(3), 353-361 (2006).
- Bronkhorst, A. W. y Houtgast, T. Auditory distance perception in rooms. *Nature*, 397, 517-520 (1999).
- Brungart, D. S., Rabinowitz, W. M., y Durlach, N. I. Evaluation of response methods for the localization of nearby objects. *Attention, Perception, y Psychophysics* 62(1), 48-65. (2000).
- Cabrera, D., Jeong, D., Kwak, H. J., Kim, J. Y. y Duckjin-gu, J. (2005, July). Auditory room size perception for modeled and measured rooms. In *Internoise, the 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 7-10 August 2005.
- Calcagno, E. R., Abregú, E. L., Eguía, M. C. y Vergara, R. The role of vision in auditory distance perception. *Perception* 41(2), 175-192 (2012).
- Calcagno, E. R., Abregú, E. L., Eguía, M. C., y Vergara, R. (2012). The role of vision in auditory distance perception. *Perception* 41(2), 175-192 (2001).
- Kolarik, A. J., Pardhan, S., Cirstea, S. y Moore, B. C. Using acoustic information to perceive room size: effects of blindness, room reverberation time, and stimulus. *Perception*, 42(9), 985-990 (2013).
- Philbeck, J. W. y Mershon, D. H. Knowledge About Typical Source Output Influences Perceived Auditory Distance. *Journal of the Acoustical Society of America* 111, 1980-83 (2002):
- Zahorik, P. Auditory display of sound source distance. *Proceedings of the 8th International Conference on Auditory*. Kyoto, Japan, 239-243 (1999).
- Zahorik, P. Estimating sound source distance with and without vision. *Optometry y Vision Science*, 78(5), 270-275 (2001).
- Zahorik, P., Brungart, D. S. y Bronkhorst, A. W. Auditory Distance Perception in Humans: A Summary of Past and Present Research. *Acta Acustica united with Acustica*, 91, 409-420 (2005).

## 13. ANEXOS

### 13.1. Artículos publicados en el marco de esta tesis

Calcagno, E. R., **Abregú E. L.**, Eguía M. C. y Vergara, R. O. The Role of Vision in Auditory Distance Perception. *Perception* 41, 175-192 (2012).

Versión Online: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22670346>

**Abregú E. L.**, Calcagno, E. R. y Vergara, R. O. La distancia como factor estructural de la música. *Revista Argentina de Musicología* No 12-13, 379-400 (2012).

Versión Online: [http://www.aamusicologia.org.ar/wp-content/uploads/2017/06/12-13\\_art\\_13.pdf](http://www.aamusicologia.org.ar/wp-content/uploads/2017/06/12-13_art_13.pdf)

Calcagno, E. R., **Abregú, E. L.** y Vergara, R. O. Revisión de los aspectos más relevantes en el estudio de la percepción auditiva de distancia. *Interamerican Journal of Psychology*, Vol. 48, N°1 3-12 (2014).

Versión Online: <https://journal.sipsych.org/index.php/IJP/article/view/240>

Etchemendy, P. E., Spiouzas, I., Calcagno, E. R., **Abregu, E. L.**, Eguia, M. C., Vergara, R. O. Direct-location versus verbal report methods for measuring auditory distance perception in the far field. *Behavior Research methods*. Vol 49, 1-14 (2017).

Versión Online: <https://link.springer.com/article/10.3758%2Fs13428-017-0939-x>

Etchemendy, P. E., **Abregu, E. L.**, Calcagno, E. R., , Eguia, M. C., Vechiatti, N., Iasi, F., Vergara, R. O. Auditory environmental context affects visual distance perception. *Scientific Reports*. N° 7 (2017).

Versión Online: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-06495-3>

Spiouzas I., Etchemendy P., Eguia M. C., Calcagno E. R., **Abregú E. L.** y Vergara R. O. Sound spectrum influences auditory distance perception of sound sources located in a room environment. *Frontiers in Psychology*. (2017).

Versión Online: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2017.00969/full>

Dos piezas para ensamble instrumental

*Instrucciones para el contacto con mundos suprafísicos*

*Los océanos tienen oídos*

# Indicaciones Para el Contacto con Mundos Suprafísicos

Score

Ezequiel Abregú  
2011

**Lento y Rubato**

Clarinet in B $\flat$

Soprano Sax

Bassoon

**Lento y Rubato**

Woodblocks

Cocos

Cencerros

Platillos

Tam Tam

Bongo

Toms

Gran Caja

Vibraphone

**Lento y Rubato**

Violin

Viola

Violoncello

The score is written in 4/4 time. The woodwind section (Clarinet in B $\flat$ , Soprano Sax, Bassoon) plays a melodic line starting with a quarter rest, followed by a quarter note G $\sharp$  (written as F $\sharp$  in the key signature), which then sustains. Dynamics range from *pp* to *mf*. The percussion section (Woodblocks, Cocos, Cencerros, Platillos, Tam Tam, Bongo, Toms, Gran Caja) has rests in the first two measures and a single note in the third measure. The Vibraphone plays a chord of G $\sharp$  major (F $\sharp$ , G $\sharp$ , A $\sharp$ ) in the third measure with a forte (*f*) dynamic. The string section (Violin, Viola, Violoncello) plays a melodic line starting with a quarter rest, followed by a quarter note G $\sharp$  (written as F $\sharp$  in the key signature), which then sustains. Dynamics range from *ff* to *pp*.

5 *poco accel.*

B♭ Cl. *pp*

S. Sax. *pp*

Bsn. *pp*

5 *poco accel.*

Woodb.

Cocos

Cencerros

Plat.

Tam

Bongo

Toms

G.C.

Vib. *f*

5 *poco accel. - - - - -*

Vln. *ff*

Vla. *ff* *poco accel. - - - - -*

Vc. *ff* *poco accel. - - - - -*

8

*rit.*

B♭ Cl. *mf* *rit.* *p* *mf*

S. Sx. *mf* *rit.* *p* *mf*

Bsn. *mf*

8

*rit.*

Woodb.

Cocos

Cencerros

Plat.

Tam

Bongo

Toms

G.C.

Vib. *ff* *rit.*

Vln. *ff* *rit.* *morendo*

Vla. *ff* *rit.* *morendo*

Vc. *ff* *morendo*

**A Più Mosso** **Molto Accel.**

**A Più Mosso** **Molto Accel.**

|           |           |          |          |
|-----------|-----------|----------|----------|
| Woodb.    | <i>ll</i> | <b>2</b> | <b>4</b> |
| Cocos     |           | <b>4</b> | <b>4</b> |
| Cencerros |           | <b>4</b> | <b>4</b> |
| Plat.     | <i>ll</i> | <b>4</b> | <b>4</b> |
| Tam       |           | <b>2</b> | <b>4</b> |
| Bongo     | <i>ll</i> | <b>4</b> | <b>4</b> |
| Toms      | <i>ll</i> | <b>2</b> | <b>4</b> |
| G.C.      |           | <b>4</b> | <b>4</b> |
| Vib.      |           | <b>4</b> | <b>4</b> |

**A Più Mosso** **Molto Accel.**

**A Più Mosso** **Molto Accel.**

**B Rubato** ♩ = 52 ca. *rit.*

B♭ Cl. *f* *rit.*

S. Sx. *f* *rit.*

Bsn. *f* *rit.* *mp*

**B Rubato** ♩ = 52 ca. *rit.*

Woodb. *14*

Cocos

Cencerros

Plat. *14*

Tam *14*

Bongo *14*

Toms *14*

G.C.

Vib. *14* *mf* *rit.* *mp*

**B Rubato** ♩ = 52 ca. *rit.* *mp*

Vln. *mf* *rit.* *mp*

Vla. *mf* *rit.* *mp*

Vc. *mf* *rit.* *mp*

17

B♭ Cl.

S. Sx.

Bsn.

dejar sonando hasta donde alcance el aire

pp

17

Woodb.

Cocos

Cencerros

Plat.

Tam

Bongo

Toms

G.C.

Vib.

mp

p

17

Vln.

ord

sull pont

p

ord

sull pont

17

Vla.

ord

sull pont

p

ord

sull pont

17

Vc.

p

ord

sull pont

**C Poco Animato**

B♭ Cl. *mp* *mf*

S. Sx. *mp* *poco* *mf*

Bsn. *p*

**C Poco Animato**

Woodb. 21

Cocos

Cencerros

Plat. 21

Tam 21

Bongo 21

Toms 21

G.C.

Vib. 21 *mp* *mf*

**C Poco Animato**

Vln. *mp* *mf*

Vla.

Vc.

Detailed description: This page contains musical notation for three systems. The first system includes B♭ Clarinet, Saxophone, and Bassoon. The B♭ Clarinet and Saxophone parts start with a mezzo-piano (*mp*) dynamic and transition to mezzo-forte (*mf*) later in the piece. The Saxophone part includes a 'poco' marking. The Bassoon part starts with a piano (*p*) dynamic and features a triplet of eighth notes. The second system lists various percussion instruments: Woodblock, Cocos, Cencerros, Platillo, Tam, Bongo, Toms, and Gong/Cymbal, with a '21' marking above the first five. The Vibraphone part starts with a mezzo-piano (*mp*) dynamic and transitions to mezzo-forte (*mf*). The third system includes Violin, Viola, and Violoncello. The Violin part starts with a mezzo-piano (*mp*) dynamic and transitions to mezzo-forte (*mf*). The Viola and Violoncello parts are marked with a mezzo-forte (*mf*) dynamic.

**D**  $\text{Ab}$  Poco Più Mosso  $\text{♩} = 60$

B $\flat$  Cl. *f* *mp*

S. Sx. *f* *mp*

Bsn. *f* *mp*

**D** Poco Più Mosso  $\text{♩} = 60$

|           |               |               |
|-----------|---------------|---------------|
| Woodb.    | 6             | 2             |
| Cocos     | $\frac{6}{4}$ | $\frac{2}{4}$ |
| Cencerros | $\frac{6}{8}$ | $\frac{4}{8}$ |
| Plat.     | 4             | 4             |
| Tam       | $\frac{4}{6}$ | $\frac{4}{2}$ |
| Bongo     | 4             | 4             |
| Toms      | $\frac{6}{6}$ | $\frac{4}{2}$ |
| G.C.      | 4             | 4             |
| G.C.      | 6             | 2             |
| G.C.      | 4             | 4             |

Vib.

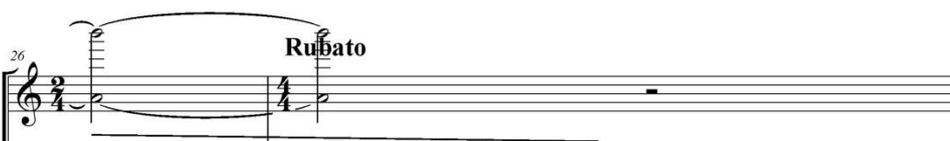
**D** Poco Più Mosso  $\text{♩} = 60$

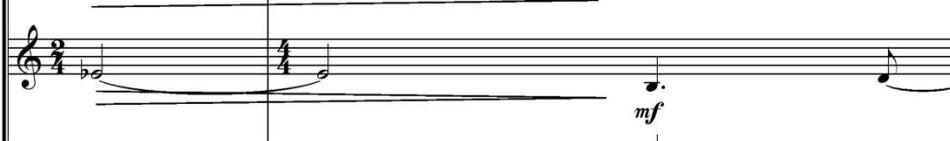
Vln. *ff* *sull pont*

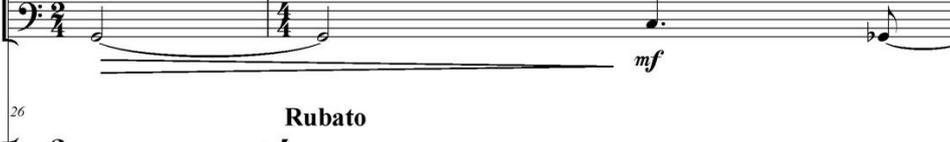
Vla. *ff* *sull pont*

Vc. *ff* *sull pont*

26 **Rubato**

B $\flat$  Cl. 

S. Sx. 

Bsn. 

26 **Rubato**

|           |   |   |
|-----------|---|---|
| Woodb.    | 2 | 4 |
| Cocos     |   |   |
| Cencerros |   |   |
| Plat.     | 4 | 4 |
| Tam       |   |   |
| Bongo     | 4 | 4 |
| Toms      | 2 | 4 |
| G.C.      | 4 | 4 |
| Vib.      | - | 4 |

26 **Rubato**

Vln. 

Vla. 

Vc. 



30

B♭ Cl.

S. Sx.

Bsn.

30

Woodb.

Cocos

Cencerros

Plat.

30

Tam

30

Bongo

30

Toms

30

G.C.

30

Vib.

30

Vln.

Vla.

Vc.

30

subtone

pp

subtone

pp

p

f

mp

pp

f

mp

pp

f

mp

pp

# Los Océanos Tienen Oídos

Score

Ezequiel Abregú  
2011

**Lento** (♩ = 48 ca.)

The score is divided into two systems. The first system includes Bass Clarinet in B $\flat$ , Tenor Sax, and Bassoon, all with whole rests. The second system includes Woodblocks, Cocos, Cencerros, Platillos, Tam Tam, Bongo, Toms, Gran Caja, and Vibraphone. The Bongo part has a rhythmic pattern with a dynamic marking of *sf* and a performance instruction: '- presion' followed by a series of 'x' marks and '+ presion', with the note 'mutear con la mano' below. The Vibraphone part has an 'arco' marking. The third system includes Violin, Viola, and Violoncello. The Violin part starts with a *pizz* marking and a dynamic of *sfz*, followed by a crescendo to *ff* and then a decrescendo to *pp*. The Viola part has an 'arco' marking and a dynamic of *f*. The Violoncello part has a *sfz* marking and a dynamic of *ff*. The overall tempo is **Lento** (♩ = 48 ca.).

Woodblocks 4  
Cocos 4  
Cencerros 4  
Platillos 4  
Tam Tam 4  
Bongo 4  
Toms 4  
Gran Caja 4

Vibraphone arco

**Lento** (♩ = 48 ca.)

Violin *pizz* *sfz* +SP → +ST

Viola *sfz* *pizz.* arco ST → +SP → +ST

Violoncello *sfz* *ff* *pp*

- presion → + presion  
mutear con la mano

**A** subtone Glissando de Armónicos **Più Mosso** rit. -----

Ass B♭ Cl. *pp* *f* rit. -----

T. Sx. rit. -----

Bsn. rit. -----

**A** **Più Mosso** rit. -----

Woodb.

Cocos

Cenc. *pp* *mf*

Plat. *mf*

Tam

Bongo

Toms *mf* frotar el parche con los dedos irregularmente

G.C.

Vib.

**A** (dejar sonar) **Più Mosso** rit. ----- ord

Vln. pizz.sull III *pp* *f* SP *rit.* ----- ord

Vla. pizz.sull II (dejar sonar) *pp* *f* SP *rit.* ----- ord

Vc. *p* *f* +ST *rit.* -----

The image shows a musical score for the piece 'Los Océanos Tienen Oídos'. It is divided into three systems of staves. The first system includes Bass B♭ Clarinet, Tenor Saxophone, and Bassoon. The second system includes Woodwind Bass, Cocoyama, Conga, Platillo, Tambores, Bongos, Tom-toms, and Gong. The third system includes Violin I, Violin II, and Violoncello. The score is marked with dynamics such as *pp*, *f*, *mf*, and *p*, and includes performance instructions like 'subtone', 'Glissando de Armónicos', 'frotar el parche con los dedos irregularmente', and 'ord'. The tempo is marked 'Più Mosso' and the piece concludes with a 'rit.' (ritardando) marking.

The musical score is divided into three systems, each with a tempo change from **Tempo I** to **Più Mosso**. The first system includes Bass B♭ Cl., T. Sx., and Bsn. The second system includes Woodb., Cocos, Cenc., Plat., Tam, Bongo, Toms, and G.C. The third system includes Vln., Vla., and Vc. The score features various dynamic markings such as *fp*, *mf*, *f*, *p*, and *ppp*, as well as performance instructions like *rit.*, *arco*, *pizz.*, *cresc.*, and *T*. The piece concludes with a *rit.* marking.

**B** Tempo I *slap* **Largo** (♩ = 40 ca.) poco accel.

Mass B♭ Cl. *f*

T. Sx. *stacc.* *p*

Bsn. *fp*

**B** Tempo I **Largo** (♩ = 40 ca.) poco accel.

Woodb. *mp*

Cocos *mp*

Cenc. *f*

Plat. *f*

Tam

Bongo *f*

Toms *f*

G.C.

Vib.

**B** Tempo I (pizz.) **Largo** (♩ = 40 ca.) poco accel.

Vln. *p* *ff* +SP

Vla. *ff* +SP ord

Vc. *ff* *cresc.*

**C Largo** (♩ = 40 ca.) poco accel.

Glissando de Armónicos

mp *cresc.*

♣ Bass B♭ Cl.

T. Sx.

Bsn.

**C Largo** (♩ = 40 ca.) poco accel.

Woodb.

Cocos

Cenc.

Plat. *ll* "campana" (mutear con la mano y dejar resonar)

Tam. *ll*

Bongo *ll*

Toms *ll*

G.C. *ll*

Vib. *ll*

+ presión

mutear con la mano

**C Largo** (♩ = 40 ca.) mf poco accel.

Vln. *f* SP → ord. *mp*

Vla. *f* SP → ord. *mp*

Vc. *f* SP → ord. *mp*

**Tempo I**

14 *mf* *mp* poco rit. gliss

Bass B♭ Cl.

T. Sax.

Bsn.

**Tempo I**

14 poco rit.

Woodb.

Cocos

Cenc.

Plat. "campana" "campana"

Tam

Bongo

Toms

G.C.

Vib. *Rec. mp*

**Tempo I**

14 poco rit. pizz. arco+SP sull I ord.

Vln. *f*

Vla. *mf*

Vc. *mf*

**D Largo** (♩ = 40 ca.)

Glissando de Armónicos

mp

stacc.

p

Woodb. 17

Cocos

Cenc.

Plat. 17

Tam

Bongo 17

Toms 17

G.C.

Vib. 17

**D Largo** (♩ = 40 ca.)

ord

(pizz.)

Open

p

sull IV

mp

sull III senza vib

mp

**Più Mosso**

20

Bass B $\flat$  Cl.

T. Sx.

Bsn.

20

Woodb.

Cocos

Cenc.

Plat.

Tam

Bongo

Toms

G.C.

Vib.

Vln.

Vla.

Vc.

*mp* *mf*

*mp* *mf*

*mp*

frotar

trémolo rápido e irregular

*p* *mf*

**Più Mosso**  
ST → +SP → **E** → ord

sull III senza vib

*f* *f*

23

Bass B $\flat$  Cl.

*mf*

frull.

T. Sax.

frull.

Bsn.

23

Woodb.

23

Cocos

Cenc.

Plat.

23

Tam

~~bordó~~

Bongo

23

Toms

23

G.C.

23

Vib.

*f*

*f*

+ST

23

Vln.

*pp*

Vla.

Vc.



**G** **Lento** (♩ = 48 ca.) **poco rit.** **Largo** (♩ = 40 ca.)

♩ Bass B♭ Cl. *mp*

T. Sx.

Bsn. *mp*

**G** **Lento** (♩ = 48 ca.) **poco rit.** **Largo** (♩ = 40 ca.)

Woodb. <sup>28</sup>

Cocos

Cenc.

Plat. <sup>28</sup>

Tam <sup>28</sup>

Bongo <sup>28</sup> frotar el parche con los dedos irregularmente

Toms <sup>28</sup>

G.C. *f*

Vib. <sup>28</sup>

**G** **Lento** (♩ = 48 ca.) **poco rit.** **Largo** (♩ = 40 ca.)

Vln. *p* *f* *p* presión de arco

Vla. *mp* *f* *p* presión de arco

Vc. *mp* *f* *p* presión de arco

The musical score is arranged in a system with the following instruments and parts:

- Bass B♭ Cl.:** Starts at measure 30 with a *f* dynamic. A *poco accel.* instruction is placed above the staff, and a *gliss* instruction is placed below the staff.
- T. Sax.:** Starts at measure 30 with a *f* dynamic. A *gliss* instruction is placed below the staff.
- Bsn.:** Starts at measure 30 with a *f* dynamic. A *gliss* instruction is placed below the staff.
- Woodb., Cocos, Cenc., Plat.:** These instruments have empty staves.
- Tam:** Starts at measure 30 with a *f* dynamic. A *poco accel.* instruction is placed above the staff.
- Bongo:** Starts at measure 30 with a *f* dynamic.
- Toms:** Starts at measure 30 with a *f* dynamic.
- G.C.:** Starts at measure 30 with a *f* dynamic. A *mf* dynamic is marked at measure 31, and a *mp* dynamic is marked at measure 32.
- Vib.:** Starts at measure 30 with a *f* dynamic. A *mp* dynamic is marked at measure 32.
- Vln.:** Starts at measure 30 with a *f* dynamic. A *poco accel.* instruction is placed above the staff. A *mp* dynamic is marked at measure 31, and a *ord* instruction is placed below the staff.
- Vla.:** Starts at measure 30 with a *f* dynamic. A *mp* dynamic is marked at measure 31, and a *ord* instruction is placed below the staff.
- Vc.:** Starts at measure 30 with a *f* dynamic. A *mp* dynamic is marked at measure 31, and a *ord* instruction is placed below the staff.



**H Rit. al fine poco a poco**

Ass B $\flat$  Cl. *mp*

T. Sx.

Bsn. *mp* gliss

**H Rit. al fine poco a poco**

Woodb. <sup>35</sup>

Cocos

Cenc.

Plat. <sup>35</sup> dejar sonar

Tam <sup>35</sup>

Bongo <sup>35</sup> *mf* frotar el parche con los dedos irregularmente

Toms <sup>35</sup>

G.C. <sup>35</sup>

Vib. <sup>35</sup>

**H Rit. al fine poco a poco**

Vln. *f* *mp* sull IV

Vla. *f* *mp* poco a poco gliss

Vc. *f* *mp*

38

Bass B $\flat$  Cl. *mf* gliss

T. Sax. gliss

Bsn. gliss *mf*

38

Woodb.

Cocos

Cenc.

Plat. *mf* dejar sonar

Tam

Bongo *mf*

Toms *mf*

G.C. *mf*

38

Vib. *mf*

38

Vln. *mf*

Vla. *mf*

Vc. poco a poco gliss *mf*

The musical score is divided into three systems. The first system includes Bass B♭ Cl., T. Sax., and Bsn. The second system includes Woodb., Cocos, Cenc., Plat., Tam, Bongo, Toms, and G.C. The third system includes Vib., Vln., Vla., and Vc. The T. Sax. part features a glissando. The Toms part has a complex rhythmic pattern with a *p* dynamic. The Vln. and Vla. parts have a *poco a poco gliss* instruction and dynamic markings of *p* and *pp*. The Vc. part has a rhythmic accompaniment with *p* and *pp* dynamics. Rehearsal marks *41* are present at the beginning of each system.