

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN BIOTECNOLOGÍA Y BIOINGENIERÍA

CURSO 2022-23

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNANDEZ DE ELCHE

USO DE UN ENTORNO REALISTA (STREETLAB) PARA LA EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL SONIDO EN LA ORIENTACIÓN Y MOVILIDAD DE PERSONAS CON PATOLOGÍAS VISUALES (SIMULADAS)

Autor: Joel Alejandro Cueva Garcés

Tutor académico: Dr. Eduardo Fernández Jover

Co-tutor: Roberto Morollón Ruiz

D. Eduardo Fernández Jover, Catedrático de Biología Celular, presidente del departamento de Histología y Anatomía de la Universidad Miguel Hernández de Elche y director del Instituto de Bioingeniería.

CERTIFICA

Que el presente trabajo titulado:

“USO DE UN ENTORNO REALISTA (STREETLAB) PARA LA EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL SONIDO EN LA ORIENTACIÓN Y MOVILIDAD DE PERSONAS CON PATOLOGÍAS VISUALES (SIMULADAS)”

y que constituye la Memoria del Trabajo Fin de Máster en Biotecnología y Bioingeniería, que presenta:

JOEL ALEJANDRO CUEVA GARCÉS

ha sido realizado bajo su supervisión en el Instituto de Bioingeniería, cumpliendo todos los requisitos necesarios.

Y para que así conste, se expide y firma el presente certificado en Elche a 04 de septiembre de 2023

Fdo.: Prof. Eduardo Fernández Jover.



AGRADECIMIENTOS

La culminación de este trabajo no habría sido posible sin el apoyo, colaboración, ánimos y participación de numerosas personas, es por ello por lo que presentar el trabajo sin destacar y agradecer su trabajo sería injusto.

En primer lugar, a mi tutor, Eduardo Fernández Jover, quien me ha permitido realizar con total libertad el trabajo, pero siempre bajo su experimentada tutela y orientación. *Gracias* Eduardo.

A todos mis compañeros del laboratorio de neuroingeniería biomédica, en especial a Roberto, Pedro y Gema, ya no solo por su incansable ayuda, sino también por amenizar las largas jornadas de trabajo. *De nuevo muchas gracias.*

A todos los voluntarios que me han prestado su ayuda indispensable para realizar el trabajo. *Gracias.*

A mis amigos, quienes me han mostrado su apoyo incondicional, *mil gracias.*

Por último, a mi familia, que siempre ha creído en mí, incluso a veces más que yo mismo. Y me ha enseñado que el esfuerzo y dedicación es la base de todo logro. *Mis más sinceros agradecimientos.*

Resumen

El estudio se centra en expandir los enfoques tradicionales de la orientación y movilidad (O&M) para personas con patologías visuales, mediante la inclusión del sonido como variable en los experimentos, que además realizamos en el StreetLab (SL). El objetivo busca descifrar la influencia del sonido en la destreza y desempeño en la ejecución de las tareas de O&M, para lo cual es necesario el desarrollo de un protocolo experimental, el uso de herramientas para la cuantificación de parámetros asociables a la destreza y desempeño, la comparación entre condiciones auditivas, etc.

También es importante remarcar que en el presente estudio no se ha contado con pacientes reales, sino que se presentaron 32 voluntarios a la realización de los experimentos (todo bajo consentimiento informado) de O&M. Los experimentos consistían en la realización de rutas (con trayecto de ida y vuelta) en diferentes condiciones visuales y en cada uno de los 4 grupos una condición auditiva diferente. Las condiciones visuales fueron: **visión normal, baja visión y muy baja visión**. Por su lado, las condiciones auditivas fueron: **silencio, sonido ambiente, combinación de sonidos y sonido preferencial**.

Para la recogida de datos nos servimos principalmente de dos elementos: la pulsera *Empática E4*, para el monitoreo de las constantes fisiológicas; y un sistema de cámaras de grabación que nos permite su posterior tratamiento de *body tracking* mediante *Yolov8*, una inteligencia artificial de reconocimiento de objetos.

Tras el procesamiento de los datos pudimos determinar que solo la condición de muy baja visión tenía un importante efecto en el desempeño de las tareas (efecto en colisiones, ayudas, velocidad). Por su parte, de las condiciones auditivas solo sonido ambiente presentó una influencia significativa en el número de ayudas para la orientación requeridas por los participantes.

El trabajo ha concluido con resultados interesantes para el campo de estudio: pues ha consolidado un protocolo experimental que permite la integración de una variable auditiva para el estudio, que hasta el momento no había sido testada en SL; determina el impacto de suponer el sonido y las simulaciones visuales en la O&M en contexto de simulación; el desarrollo producido en los sistemas de detección y procesamiento de *body tracking* ha permitido importantes análisis, no antes efectuados, en el StreetLab. Además, el estudio puede dar lugar a consiguientes investigaciones como comparaciones entre los experimentos en simulación y con pacientes reales, o comparación entre la influencia del sonido y la iluminación.

Palabras clave: O&M, sonido, *body tracking*, patologías visuales, EDA

Abstract

The study aims to expand traditional approaches to orientation and mobility (O&M) for individuals with visual impairments by incorporating sound as a variable in experiments conducted in StreetLab (SL). The objective is to decipher the influence of sound on skill and performance in O&M tasks. To achieve this, an experimental protocol development is necessary, along with the utilization of tools for quantifying parameters associated with skill and performance, as well as comparisons between auditory conditions.

It is important to note that this study did not involve real patients; instead, 32 volunteers participated in the O&M experiments, all under informed consent. The experiments consisted of routes (round trips) performed under different visual conditions and, in each of the four groups, a different auditory condition was applied. The visual conditions included normal vision, low vision, and very low vision. On the other hand, the auditory conditions comprised silence, ambient sound, a combination of sounds, and preferred sound.

For data collection, two main elements were employed: the Empatica E4 wristband for monitoring physiological parameters and a system of recording cameras enabling subsequent body tracking using Yolov8, an artificial intelligence object recognition system.

The work has concluded with interesting results for the field of study: it has consolidated an experimental protocol that allows the integration of an auditory variable for the study, which until now had not been tested in SL; determines the impact of sound and visual simulations on O&M in simulation context; The development in body tracking detection and processing systems has allowed important analyses, not previously carried out, in the StreetLab. Furthermore, the study can lead to subsequent investigations such as comparisons between experiments in simulation and with real patients, or comparison between the influence of sound and lighting.

Key words: O&M, sound, body tracking, impaired vision, EDA

ÍNDICE

ABREVIATURAS ¹	1
ÍNDICE FIGURAS	2
ÍNDICE TABLAS Y GRÁFICAS	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 LA VISIÓN	4
1.1.1 VISION NORMAL	4
1.1.2 PATOLOGÍAS VISUALES	6
1.1.3 INTERVENCIONES DE RECUPERACIÓN VISUAL	8
1.2 ORIENTACIÓN Y MOVILIDAD (O&M)	10
1.2.1 RELEVANCIA DE LA O&M EN PERSONAS CON DISCAPACIDADES VISUALES	10
1.2.2 LOS ESTUDIOS DE ORIENTACIÓN Y MOVILIDAD	11
1.3 EL SONIDO	12
1.3.1 PAPEL DEL SONIDO EN LA PERCEPCIÓN ESPACIAL Y LA MOVILIDAD	12
1.3.2 ESTUDIOS PREVIOS SOBRE LA INFLUENCIA DEL SONIDO EN LA O&M	13
1.3.3 RELEVANCIA DEL ESTUDIO DEL SONIDO EN EL CONTEXTO DEL STREETLAB	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 HIPOTESIS	14
3. MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1 CRONOGRAMA	15
3.2 MATERIALES	15
3.2.1 STREETLAB	15
3.2.2 GAFAS DE SIMULACIÓN DE PATOLOGÍAS	18
3.2.3 PULSERA EMPÁTICA	18
3.3 MÉTODOS	19
3.3.1 DISEÑO DEL ESTUDIO	19
3.3.2 PROCESAMIENTO Y OBTENCIÓN DE LOS DATOS	22
3.3.3 GESTIÓN DE VOLUNTARIOS	25
4. RESULTADOS	26
4.1 BODY TRACKING	26
4.1.1 NUMERO DE COLISIONES Y AYUDAS	30
4.1.2 TIEMPO Y VELOCIDAD DE EJECUCIÓN	32

4.2	<i>EDA/GSR</i>	33
4.3	VALORACIÓN Y PERCEPCIÓN DE LOS PARTICIPANTES	34
5.	DISCUSIÓN	36
5.1	SOBRE EL PALNTEAMEINTO EXPERIMENTAL: LIMITACIONES Y CONSIDERACIONES	36
5.2	EFFECTOS DEL SONIDO EN LA ORIENTACIÓN Y MOVILIDAD	37
5.3	IMPACTO DE LAS CONDICIONES VISUALES	37
5.4	RELEVANCIA DE ASPECTOS NUEROPSICOLÓGICOS	37
5.5	POSIBILIDADES FUTARAS.....	38
6.	CONCLUSIONES	39
7.	BIBLIOGRAFÍA	41
8.	ANEXOS	45



ABREVIATURAS¹

ANOVA	, del inglés <i>Análisis of variance</i>
EDA	, del inglés <i>Electrodermal Activity</i>
GSR	, del inglés <i>Galvanic Skin Response</i>
IA	, inteligencia artificial
LV	, del inglés <i>low vision, baja vision</i>
NV	, del inglés <i>normal vision, vision normal</i>
O&M	, del inglés <i>orientation and mobility</i> , orientación y movilidad
OMS	, Organización Mundial de la Salud
RP	, retinitis pigmentaria
SL	, del inglés <i>Street Lab</i> ,
VLV	, del inglés <i>very low vision, muy baja vision</i>
VR	, del inglés <i>virtual reality</i>



¹ Siguiendo las recomendaciones de la IUPAC-IUB, las abreviaturas utilizadas en este trabajo han sido elegidas en su versión inglesa. Abbreviations and Symbols for Chemical Names of Special Interest in Biological Chemistry: Revised Tentative Rules (1965), IUPAC-IUB Combined Commission on Biochemical Nomenclature, J. Biol. Chem. 1965 241: 527

ÍNDICE FIGURAS

-Figura 1: Ejemplo de un cuadro clásico de Snellen	8
-Figura 2: Conceptos asociados a la visión funcional y la función visual	9
-Figura 3: Ejemplo de la visión con cataratas	10
-Figura 4: Ejemplo de la visión con RP	10
-Figura 5: Esquema de las posibles terapias de recuperación visual y los estadios en los que son aplicables	11
-Figura 6: Principales enfoques para el diseño de prótesis visuales	12
-Figura 7: Corredor simple	14
-Figura 8: corredor complejo	14
-Figura 9: Plano de StreetLab del IB de la UMH	15
-Figura 10: Cronograma de trabajo	21
-Figura 11: Imágenes StreetLab	22
-Figura 12: Imágenes apartamento	22
- Figura 13: Posibles configuraciones de mapas	23
- Figura 14: Captura de la visión de las camaradas de grabación	23
- Figura 15: Gafas de simulación	24
- Figura 16: Esquema técnico de la pulsera Empática E4	25
-Figura 17: Configuraciones de ruta seleccionadas para el estudio	26
-Figura 18: Puntos de referencia concretos	26
-Figura 19: Obstáculos utilizados	27
-Figura 20: Extracto de la base de datos recogida por la <i>Empática E4</i>	30
-Figura 21: Fragmento de parámetros recogidos a tiempo real por la <i>Empática E4</i>	30
-Figura 22: Esquema de la base de datos utilizada en el body tracking	32
-Figura 23: Panel demostrativo de las rutas realizadas por mapas, y condiciones visuales y auditivas	35
-Figura 24: Comparativas de las velocidades medias por condición visual y condición auditiva	40
-Figura 25: Esquema de la base de datos para el análisis de GSR	40
-Figura 26: Valoración de los participantes en cuanto a la dificultad de visión normal	42
-Figura 27: Valoración de los participantes en cuanto a la dificultad de baja visión	42
-Figura 28: Valoración de los participantes en cuanto a la dificultad de muy baja visión	42

ÍNDICE TABLAS Y GRÁFICAS

-Tabla 1: Patrones de distribución de obstáculos	27
-Tabla 2: Contabilización del número de experimentos realizados en el ensayo	28
-Tabla 3: Resultados test de Tukey	39
-Tabla 4: Media de los valores EDA según la condición auditiva	41
-Gráfica 1: Desplazamiento en X	34
-Gráfica 2: Desplazamiento en Y	34
-Gráfica 3: Comparación del número de colisiones entre las diferentes condiciones auditivas para muy baja visión	37
-Gráfica 4: Comparación del número de colisiones entre las diferentes condiciones auditivas para muy baja visión	38
-Gráfica 4: Promedio de colisiones y ayudas por condiciones visuales auditivas	38



1. INTRODUCCIÓN

En esta memoria titulada “USO DE UN ENTORNO REALISTA (STREETLAB) PARA LA EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL SONIDO EN LA ORIENTACIÓN Y MOVILIDAD DE PERSONAS CON PATOLOGÍAS VISUALES (SIMULADAS)” se presenta un estudio realizado en el marco del Trabajo de Fin de Máster (TFM).

La memoria consta de una introducción a los conceptos vinculados al proyecto y el estado del arte de estos, los objetivos e hipótesis planteados para el TFM, el plan de trabajo utilizado para desarrollar el proyecto con sus consecuentes resultados, discusión y conclusiones.

1.1 LA VISIÓN

La visión, como componente esencial del sistema sensorial humano, desempeña una función primordial en la vida cotidiana, ya que nos permite percibir el mundo que nos rodea y realizar una gran variedad de actividades. La visión nos permite realizar una gran variedad de actividades, como leer, conducir, caminar, ver películas, entre otras. Además, la visión es esencial para mantener la independencia y la seguridad en la vida diaria, ya que nos permite detectar peligros y evitar accidentes (Ayton *et al.*, 2020) (Aleman *et al.*, 2021).

Desde un enfoque científico, la visión es un proceso complejo que involucra la captación de la luz por parte del ojo, la transformación de la información visual en señales eléctricas y la transmisión de estas señales al cerebro para su procesamiento y análisis. (<https://www.nei.nih.gov/learn-about-eye-health/healthy-vision/how-eyes-work>) (<https://webvision.med.utah.edu>).

1.1.1 VISION NORMAL

La visión normal está establecida en una agudeza visual correspondiente a un 20/20 en el test de Snellen Chart (Phung *et al.*, 2016). La prueba Snellen Chart se utiliza para medir la agudeza visual, que es la capacidad de una persona para ver detalles finos y distinguir objetos a diferentes distancias. La agudeza visual se expresa como una fracción, donde el numerador indica la distancia a la que una persona puede ver con claridad y el denominador representa la distancia a la que una persona con visión normal puede ver con claridad la misma letra (Figura 1).

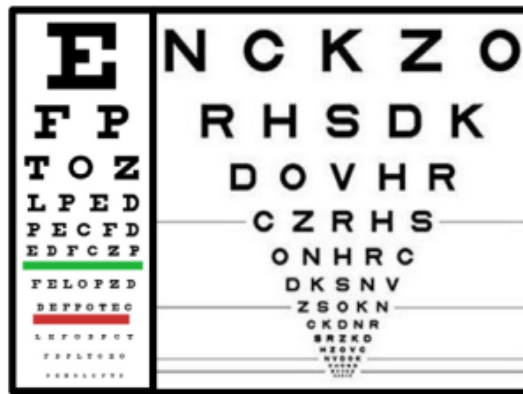


Figura 1: Ejemplo de un cuadro clásico de Snellen. (Bennet *et al.*, 2019)

Ahora bien, cuando hablamos de visión no podemos quedarnos en lo superficial pues es necesario diferenciar dos elementos fundamentales: la función visual y la visión funcional. La función visual se entiende como la habilidad y eficiencia del sistema ocular para detectar, procesar y responder a estímulos visuales. Esta función engloba diversos aspectos objetivos de la visión, tales como la agudeza visual, el campo visual, la sensibilidad al contraste, la percepción del color, entre otros (**Figura 2A**). Específicamente, la función visual describe cómo operan los ojos y el sistema visual en términos de fisiología y neurología. (Colenbranden, 2005)

Por su parte, la visión funcional, se relaciona con cómo un individuo utiliza su capacidad visual en actividades cotidianas y contextuales. Va más allá de las capacidades objetivas del ojo y del sistema visual, y se enfoca en cómo una persona aplica, adapta o compensa su visión en situaciones reales y prácticas. Dentro de este campo encontramos el reconocimiento de objetos, la navegación, la lectura, etc (**Figura 2B**). (Colenbranden, 2005)

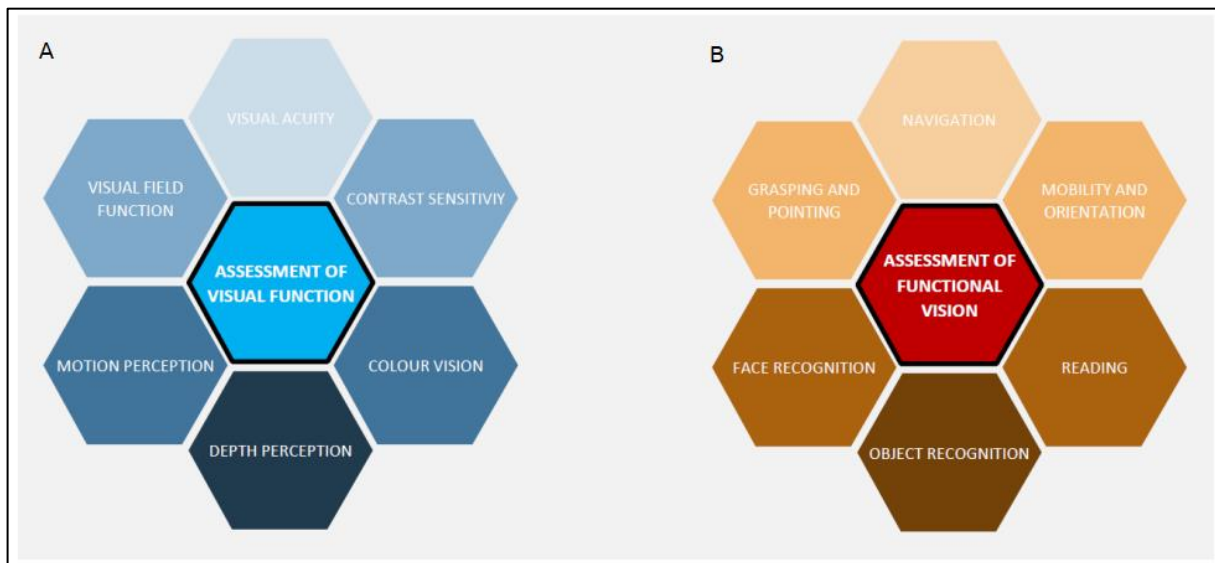


Figura 2: A, conceptos asociados a la visión funcional. B, conceptos asociados a la función visual.
(Manual de StreetLab, 2020)

1.1.2 PATOLOGÍAS VISUALES

Como ya hemos visto la visión supone un aspecto fundamental en la vida cotidiana de las personas si a esto le sumamos la alta incidencia que tiene en la población mundial las patologías relacionadas con la visión, el estudio de esta se convierte una investigación fundamental para el mantenimiento o aumento de la calidad de las personas. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima más 2.200 millones de personas que padecen de discapacidad visual, si bien la edad supone un factor de riesgo fundamental ya advierten que la pérdida de la visión puede afectar a las poblaciones más jóvenes también. De hecho, la primera causa de estas patologías son producto de errores de refracción no corregidos, y 1000 millones de estos casos podrían haberse evitado aplicando un tratamiento adecuado (OMS, 2020).

En el contexto de este estudio, dos de las patologías visuales que merecen especial atención son las cataratas y la retinitis pigmentaria.

CATARATAS

En el caso de las cataratas, nos encontramos con la principal patología causante de la ceguera a nivel mundial, de ahí la gran relevancia de su estudio. La enfermedad se caracteriza por la opacidad del cristalino (Figura 3) cursando esto con una disminución en la función visual, por una visión borrosa, pérdida de la visión periférica, sensibilidad a la luz, entre otros síntomas (Lancet, 2021).

Las cataratas suelen ser causadas por el envejecimiento natural del cristalino, lo que se conoce como cataratas relacionadas con la edad. Sin embargo, también pueden ser causadas por lesiones oculares, enfermedades como la diabetes, el uso prolongado de ciertos medicamentos, la exposición excesiva a la radiación ultravioleta y factores genéticos (Bonyadi *et al.*, 2019) (Shiels and Hejtmancik, 2019).



Figura 3: Ejemplo de visión con cataratas (National Eye Institute, 2019)

RETINITIS PIGMENTARIA (RP)

Por su parte, la retinitis pigmentosa o pigmentaria (RP), es la distrofia retiniana más frecuente con una prevalencia de 1 cada 4500 personas sanas y afecta a aproximadamente a 1,5 millones de personas en todo el mundo (Lancet, 2020).

La RP engloba a un grupo heterogéneo de enfermedades hereditarias y degenerativas de la retina caracterizadas por la muerte progresiva de los fotorreceptores. La mayoría provocan la muerte de los bastones, que implica un deterioro de la visión nocturna y una pérdida de la visión periférica conocida como visión en túnel (Figura 4).

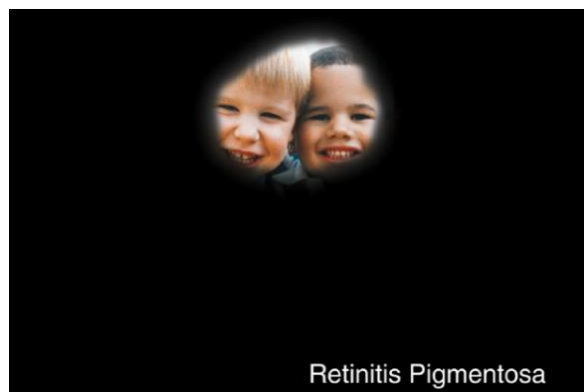


Figura 4: Ejemplo de visión con RP. (National Eye Institute, 2019)

En la actualidad, la RP es una enfermedad degenerativa de la retina que no tiene cura. Sin embargo, se dispone de algunas opciones y enfoques terapéuticos para intentar frenar su avance y mejorar la calidad de vida de los pacientes. Entre ellos se pueden encontrar la suplementación nutricional (Berson *et al.*, 2012), la terapia con células madre (Mandai *et al.*, 2017), la terapia génica (Cehajic-Kapetanovic *et al.*, 2020) o los implantes retinianos y las prótesis, aunque no son eficaces para todos los pacientes.

1.1.3 INTERVENCIONES DE RECUPERACIÓN VISUAL.

La pérdida o degeneración de la visión vemos que es un problema a la orden del día, que más allá de los costes económicos que supone, es un empeoramiento cualitativo de la calidad de vida de aquellos que la padecen. Es por ello, que la ciencia y la medicina buscan soluciones ante esta situación: las estrategias de recuperación visual. Es evidente que las posibles terapias aplicables a la degeneración de los fotorreceptores dependerán en gran medida del estado de la enfermedad (Figura 5).

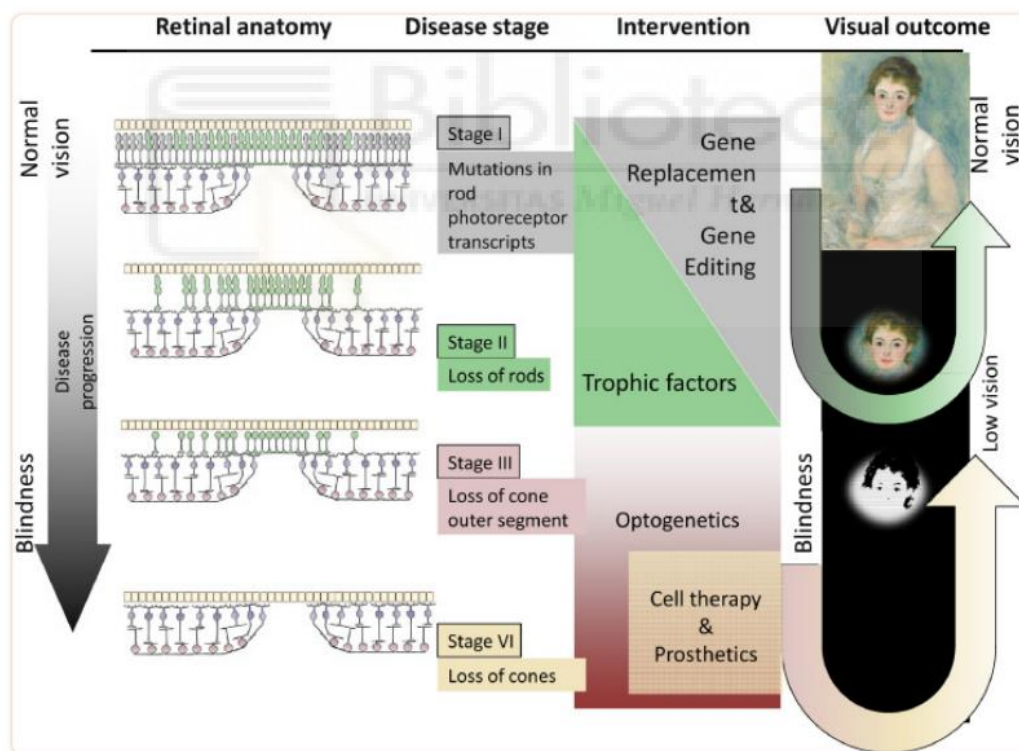


Figura 5: Esquema de las posibles terapias de recuperación visual y los estadios en los que son aplicables. (Sahel *et al.*, 2021).

Conforme se puede apreciar en la **Figura 5**, en etapas avanzadas de la enfermedad, el empleo de prótesis se convierte en una terapia útil, si bien, cabe destacar que las prótesis pueden ser utilizadas en diferentes escenarios (**Figura 6**).

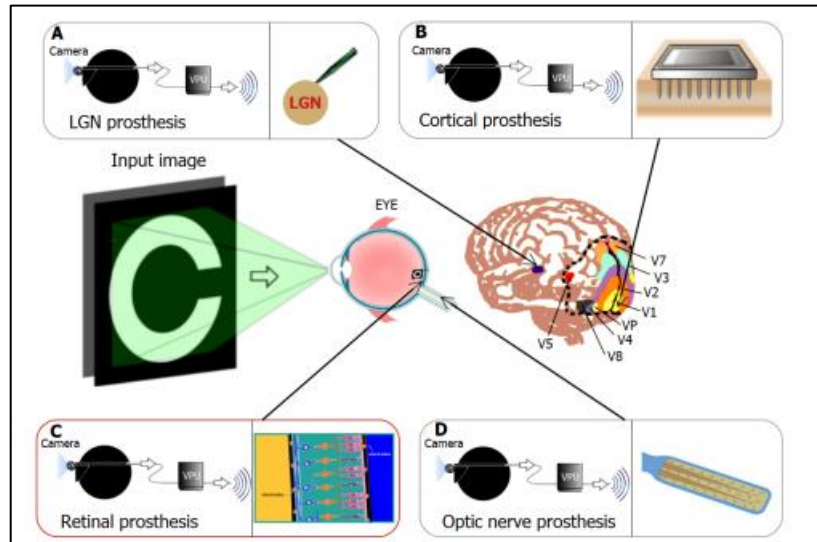


Figura 6: Principales enfoques para el diseño prótesis visuales. En general, todos los enfoques comparten un conjunto común de componentes: una cámara para capturar imágenes, generalmente montada en gafas; una unidad de procesamiento de video (VPU) que transforma la escena visual en patrones de estimulación eléctrica y transmite esta información a través de un enlace de radiofrecuencia al dispositivo implantado, y una matriz de electrodos implantada en algún nivel de las vías visuales que debe ubicarse cerca de las neuronas objetivo. (Sanchez-Garcia *et al.*, 2022)

Aunque se están dando grandes avances en estos campos de investigación ([buscar bibliografía que respalde esto](#)) siguen siendo multitud los casos donde la recuperación visual o la detención de la pérdida visual son inviables. Es por ello, que sigue siendo fundamental estudiar como podemos ofrecer a estas personas alternativas para mejorar su calidad de vida. Vinculado a esto aparece el amplio campo de la orientación y la movilidad.

1.2 ORIENTACIÓN Y MOVILIDAD (O&M)

La orientación denota la habilidad de procesar la información captada a través de los sentidos, incluida la vista, para establecer nuestra posición en relación con el entorno que nos rodea. Por otro lado, la movilidad abarca la competencia de un individuo para moverse de manera organizada, segura y eficiente en el espacio circundante. Por consiguiente, una movilidad eficaz engloba la capacidad de detectar y evitar obstáculos, adaptarse a cambios de nivel y otras particularidades del entorno que pueden surgir durante el trayecto, requiriendo una interacción adecuada entre estrategias visuales y cognitivas (Chang *et al.*, 2019).

Por su parte, la navegación espacial engloba el conjunto de cambios psicológicos a través de los cuales un individuo adquiere, guarda, recuerda y descifra información sobre ubicaciones y características del entorno. Se logra a través de diversas estrategias, como seguir señales sensoriales, ejecutar secuencias de acciones o emplear representaciones internas del espacio. Este proceso cognitivo está relacionado con la memoria, el aprendizaje, la planificación, la atención y la toma de decisiones. Todo esto refleja la necesidad de dar un enfoque desde la neuropsicología a la hora de plantear experimentos que involucren la orientación y movilidad, entendida en su conjunto como navegación (Jacobson, 1998).

Tanto la orientación como la movilidad, y en consecuencia la navegación, desempeñan un papel crucial al evaluar la calidad de vida, especialmente en aquellos que enfrentan discapacidades, como las visuales, que abarcan desde una merma hasta la pérdida completa de la capacidad de ver.

La discapacidad visual tiende a limitar la movilidad en estos individuos, lo que puede tener un impacto negativo en su bienestar general. Esto puede resultar en una disminución de la independencia, aislamiento social, depresión, reducción de la actividad física, deterioro cognitivo y un aumento en la tasa de mortalidad (Virgili and Rubin, 2010).

1.2.1 **RELEVANCIA DE LA O&M EN PERSONAS CON DISCAPACIDADES VISUALES**

Las pruebas de orientación y movilidad son valiosas para brindar a pacientes con discapacidad visual la oportunidad de desarrollar nuevas habilidades que compensen la falta de información visual. Estas pruebas les permiten mejorar su independencia de movimiento al usar otros sentidos como el oído y el tacto, y al emplear dispositivos como bastones largos o de apoyo.

El objetivo principal de estas pruebas es ayudar a los pacientes con baja visión a moverse de manera segura en su entorno, tanto en casa como al aire libre. Estas pruebas ofrecen instrucción sobre cómo enfrentar los desafíos de la pérdida de visión para fomentar un estilo de vida

independiente. Dado su potencial en la capacitación de estos pacientes, los estudios de orientación y movilidad son una opción beneficiosa para un enfoque multidisciplinario.

Evaluar el rendimiento de los pacientes en estas pruebas permite comprender el impacto de la pérdida visual y evaluar la efectividad de estrategias de rehabilitación visual, incluyendo restauración o sustitución visual.

Aunque los estudios de orientación y movilidad tienen un impacto significativo en la calidad de vida de los pacientes con discapacidad visual, actualmente no existe una herramienta estandarizada para medir el rendimiento de los participantes en la realización de tareas. Pero las más utilizadas son: número de colisiones, número de ayudas para la orientación, velocidad y tiempo de ejecución de las tareas.

1.2.2 LOS ESTUDIOS DE ORIENTACIÓN Y MOVILIDAD

Los estudios clásicos en este campo, o al menos en lo que a ejecución de rutas se refiere, se ha centrado en la realización de trayectos en línea recta en corredores simples (Figura 7) o complejos (Figura 8) con diferentes distancias y condiciones ambientales. Pero estos escenarios si bien muy útiles en su momento, en la mayoría de las ocasiones no reflejaban la realidad de las tareas o situaciones cotidianas a las que se deben enfrentar los pacientes de patologías visuales (Finger et al., 2016).

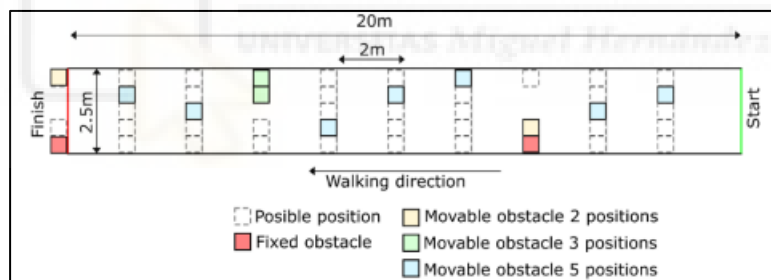


Figura 7: corredor simple. (Manual StreetLab, 2020)

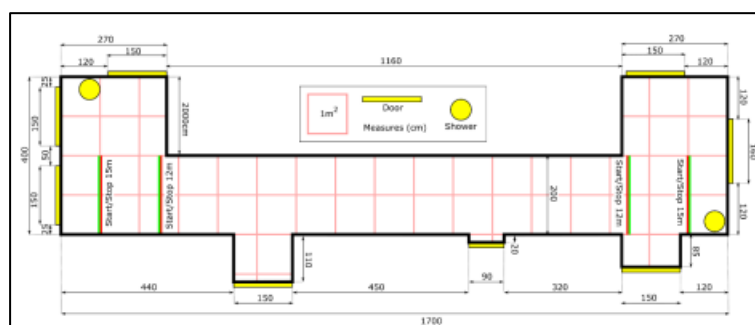


Figura 8: Corredor complejo. (Manual StreetLab, 2020)

Sin embargo, el desarrollo tecnológico está abriendo la puerta a escenarios totalmente nuevos en el campo del estudio de la O&M. Por un lado, vemos como cada vez son más utilizados sistemas de realidad virtual (VR) (Nau *et al.*, 2014) o realidad ampliada (de Ruyter *et al.*, 2022), y por otro, como laboratorios pioneros en el campo de la rehabilitación visual están desarrollando espacios realistas denominados StreetLab: StreetLab en el Instituto de la Visión de Paris, <https://www.streetlab-vision.com/en/>; StreetLab en el Instituto de Bioingeniería (IB) de la Universidad Miguel Hernández (UMH) de Elche, <https://catedraretinosis.org/street-lab/> (Figura 9). (Kumaran *et al.*, 2020) (Val Calvo *et al.*, 2022) (Agathos *et al.*, 2020)

Estos avances están suponiendo una mejora increíble en el entrenamiento de la orientación y movilidad de personas con patologías visuales pues permiten la realización de tareas cotidianas en ambientes realistas, pero con una capacidad de control ambiental que no ofrecen los experimentos en entornos reales.

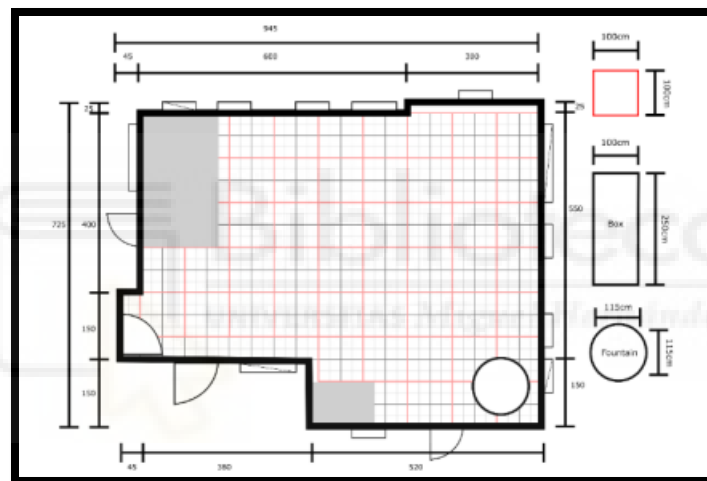


Figura 9: Plano del StreetLab del IB de la UMH. (Manual de StreetLab, 2020)

1.3 EL SONIDO

1.3.1 PAPEL DEL SONIDO EN LA PERCEPCIÓN ESPACIAL Y LA MOVILIDAD

El sonido nos puede proporcionar información sobre la distancia, ubicación y dirección de objetos y personas, y de igual manera nos puede ayudar a detectar posibles obstáculos o peligros (Xiong *et al.*, 2022). Pese a que el sonido suele quedar relegado a un segundo plano respecto de la visión en los experimentos de orientación y movilidad, su importancia y relevancia se manifiesta de manera más clara en las personas con patologías visuales (Müller *et al.*, 2023). La falta de percepción de estímulos visuales potencia la necesidad de servirse del resto de sentidos para realizar una navegación segura e independiente, y es aquí donde el sonido muestra su capacidad informativa (Chundury *et al.*, 2022).

Es tal la necesidad humana de adaptarse ante las adversidades que a través de la plasticidad cerebral se muestra como pacientes con deficiencias de visión han convertido viejas conexiones neuronales dedicadas al procesamiento visual a conexiones involucradas en otras tareas como la audición (Alfaro *et al.*, 2015).

1.3.2 ESTUDIOS PREVIOS SOBRE LA INFLUENCIA DEL SONIDO EN LA O&M

En el campo de la orientación y movilidad los estudios dedicados exclusivamente a la evaluación de la influencia del sonido en el desempeño de tareas de navegación son escasos. Se han solido centrar más en el apoyo que puede brindar el sonido en el entrenamiento para una navegación segura (Sánchez *et al.*, 2010) (Seki and Sato, 2010) o de como ciertos sonidos son necesarios a modo de alerta, por ejemplo, el ruido de los coches eléctricos (Kim *et al.*, 2012). O de como el sonido puede ser utilizado en dispositivos de asistencia en la movilidad (Hu *et al.*, 2022) (Bharadwaj *et al.*, 2019).

1.3.3 RELEVANCIA DEL ESTUDIO DEL SONIDO EN EL CONTEXTO DEL STREETLAB

En el contexto del StreetLab, como campo totalmente emergente los estudios actuales se han centrado más en protocolizar los experimentos y en primeras aproximaciones de como aplicamos las tareas de O&M en este entorno. Esto abre la puerta a introducir nuevos elementos y variables de estudio en el entorno del SL, pero con la necesidad de generar nuevos protocolos que permita la replicabilidad de estos experimentos. Entre estos aspectos todavía por investigar en el contexto del SL encontramos: La inclusión de variables como el sonido o la intensidad de iluminación, el movimiento de los obstáculos, la comparación y replicabilidad de estos entornos en VR.

En el caso de este estudio nos centramos en la implementación y estudio de la variable del sonido.

2. OBJETIVOS

El trabajo presenta un objetivo primario, que consiste en realizar una evaluación del efecto del sonido en la orientación y movilidad de personas con patologías visuales (simuladas) en un entorno realista (StreetLab). Para ello se plantearon los siguientes objetivos subsidiarios:

- Establecer un protocolo experimental para la inclusión de la variable del sonido en los estudios de O&M.
- Uso del *body tracking* para la obtención de parámetros determinantes de la destreza de navegación.
- Evaluación de la eficiencia del sonido en la percepción espacial
- Comparación de estrategias de navegación en diferentes condiciones auditivas
- Evaluar el impacto de aspectos psicofisiológicos, como el estrés, en el desempeño de las tareas

2.1 HIPOTESIS

Las hipótesis que se plantean para el trabajo son:

- La condición auditiva de sonido ambiente presentará datos similares al control
- La condición auditiva de combinación de sonidos presentará peores datos que el resto de los grupos
- La condición auditiva de sonido preferencial presentará mejores resultados que el resto de los grupos
- En cuanto a las condiciones visuales, solo muy baja visión, tendrá un efecto significativo en el desempeño de las tareas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CRONOGRAMA

El plan de trabajo para la elaboración del proyecto se dividió en las diferentes tareas:

- **TAREA 1:** Elección de la temática concreta del trabajo.
- **TAREA 2:** Búsqueda bibliográfica introductoria.
- **TAREA 3:** Reuniones particulares con el tutor.
- **TAREA 4:** Búsqueda de artículos clínicos.
- **TAREA 5:** Lectura de la bibliografía.
- **TAREA 6:** Elaboración del plan de experimentos.
- **TAREA 7:** Realización de los experimentos.
- **TAREA 8:** Procesamiento de los resultados
- **TAREA 9:** Redacción del trabajo.
- **TAREA 10:** Elaboración de los materiales para la defensa del trabajo.
- **TAREA 11:** Entrega y presentación del trabajo de fin de máster.



Figura 10: Cronograma de trabajo.

3.2 MATERIALES

3.2.1 STREETLAB

Los experimentos de O&M se realizaron en el StreetLab, lo que permite tener el control de ciertas variables como la temperatura, la iluminación, etc. Esto ha facilitado que los resultados estén más acotados a los parámetros variables que contemplamos: la visión y el sonido. Aunque, también, hay que tener en cuenta que el desempeño de las tareas está directamente influenciado

por la persona que la realiza, y el estado de esta, para poder evaluar esta influencia haremos mediciones de frecuencia cardiaca y GSR.

El SL es un entorno de 100m² que recrea de manera realista una calle y un apartamento (Figura 12), con elementos decorativos como puertas, ventanas, tiendas, cajeros, etc (Figura 11). Dentro del SL se cuenta con 3 cajas prefabricadas que permite diferentes configuraciones del espacio, denominadas *mapas* (Figura 13), cada uno de estos mapas, nos permite generar diferentes *rut*as, estas rutas se pueden configurar de tal manera que cumplan con requerimientos de distancia, giros, etc.



Figura 11: Imágenes StreetLab. (Manual StreetLab, 2020).

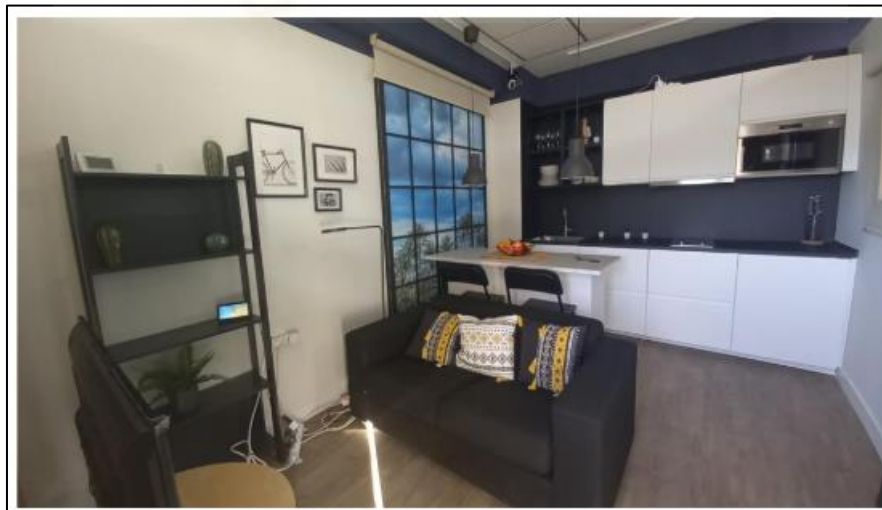


Figura 12: Imagen apartamento. (Manual StreetLab, 2020).



Figura 13: Posibles configuraciones de mapas. (Manual StreetLab, 2020).

SISTEMA DE CÁMARAS

El StreetLab está equipado con un sistema de cámaras de grabación (**Figura 14**) que habilita un análisis posterior de los experimentos, posibilitando la cuantificación de variables como las colisiones, el número de ayudas para la orientación y el procesamiento del *body tracking*, entre otros aspectos relevantes. La disposición estratégica de estas cámaras proporciona una perspectiva completa y exhaustiva del entorno, si bien es cierto para nuestros análisis nos hemos bastado con 4 cámaras cubren los trayectos de nuestras rutas.



Figura 14: Captura de la visión de las cámaras de grabación. Pese a que el SL cuenta con más perspectivas y cámaras las utilizadas en el experimento han sido estas cuatro que cubren la totalidad de los trayectos.

SISTEMA DE AUDIO

Nuestro espacio de trabajo cuenta de manera nativa con un sistema de emisión de audio, el cual está vinculado a las cámaras y aun sistema de proximidad, pero dado que eso no cumplía con los requerimientos de nuestro plan de experimento, se ha desarrollado un nuevo sistema de audio.

El plan experimental requiere, por un lado, poder desvincular la emisión del audio del sistema de cámaras y su detección de proximidad de personas. Por otro lado, emitir sonidos a voluntad desde diferentes puntos de la sala, de tal manera que se pueda reproducir un único sonido, varios sonidos a la vez o en determinados momentos una u otra pista de audio.

El nuevo sistema de audio consiste en tres altavoces independientes (uno de ellos inalámbrico) a los cuales nos podremos conectar vía bluetooth, y situar en diferentes puntos del SL en base a las necesidades de nuestras condiciones auditivas y rutas.

3.2.2 GAFAS DE SIMULACIÓN DE PATOLOGÍAS

Debido a que no hemos trabajado con pacientes reales, las patologías visuales han sido generadas mediante unas gafas que simulan la visión con las cataratas (Figura 15A) y con retinitis pigmentaria (Figura 15B). Estas gafas ya han sido utilizadas en otros ensayos (Soto, 2022).

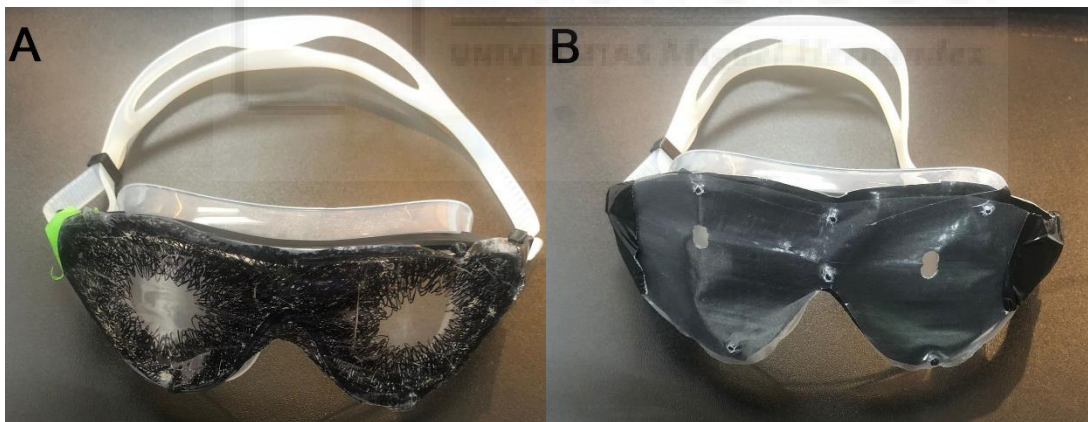


Figura 15: A, Gafas de simulación de cataratas. B, gafas de simulación de RP.

3.2.3 PULSERA EMPÁTICA

Dado que uno de los aspectos relevantes en este estudio era poder dotar de un enfoque desde la neuropsicología del desempeño en la realización de las tareas y ejercicios de O&M, se decidió utilizar la pulsera comercial *Empática E4* para el monitoreo de constantes fisiológicas (frecuencia cardíaca y GSR). La pulsera consta de 4 sensores (fotopletismografía, actividad electrodérmica, acelerómetro y termopila de infrarrojos), que nos permite recoger nuestros datos de interés. (Figura 16). La

Empática E4 ha sido testada en diversos estudios de monitoreo de constantes fisiológicas (Rao *et al.*, 2023) (Weale *et al.*, 2023)

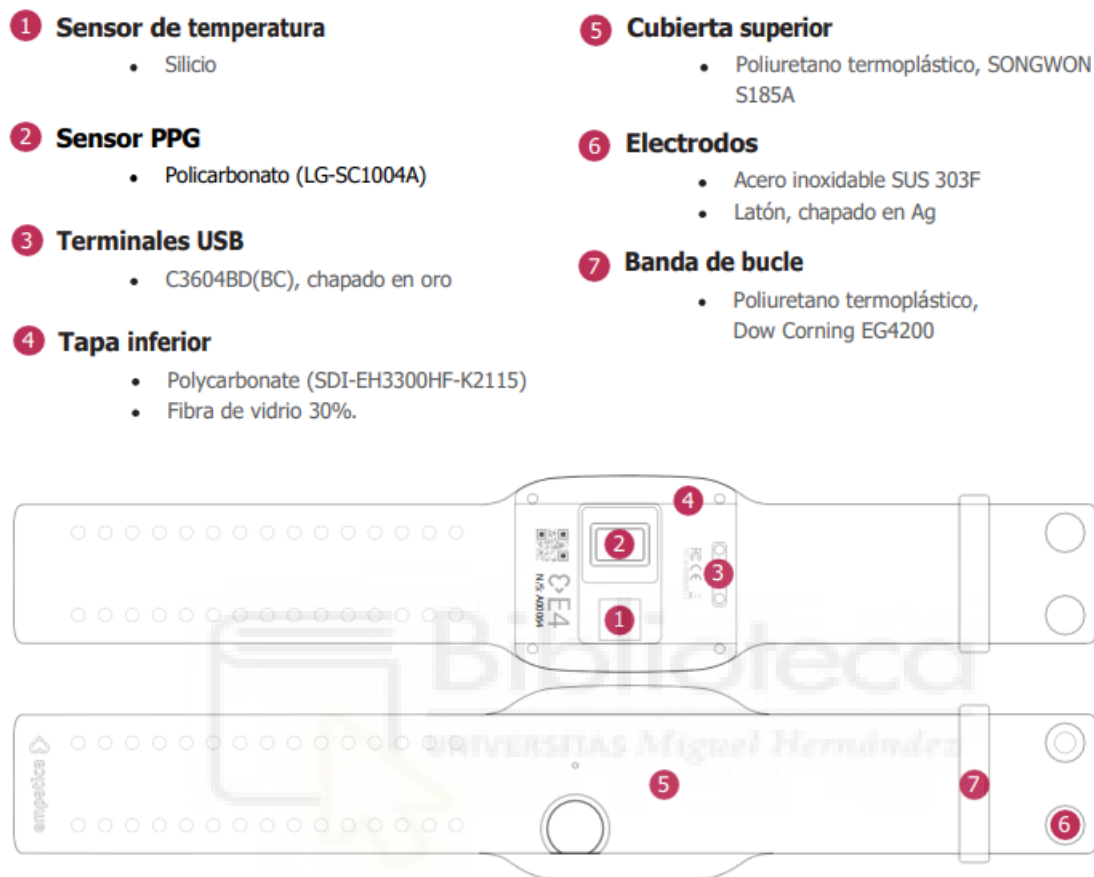


Figura 16: Esquema técnico de la pulsera Empática E4.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 DISEÑO DEL ESTUDIO

En base a lo que ya planteábamos en el apartado 2 el objetivo de nuestra investigación reside en la evaluación del impacto del sonido en la O&M de voluntarios con simulación de patologías visuales, para lo cual es fundamental la elaboración de un protocolo experimental adecuado.

Como ya introducíamos, los experimentos se han llevado a cabo en el StreetLab, permitiendo esto tener mayor control de las condiciones. Dentro de todas las posibilidades de experimentos de O&M que ofrece el SL optamos por la realización de 3 rutas de 15 metros y con 2-3 giros de 90º (Figura 17), estas rutas constituyen trayectos de ida y vuelta. A los participantes más allá de las indicaciones

genéricas de inicio y fin de las rutas se les dieron puntos concretos que permitían asegurar la distancia de 15m de las rutas (Figura 18), siendo para la ruta 1, puerta azul->Maceta tienda; para la ruta 2, puerta azul->ventana verde; y para la ruta 3, farola->puerta tienda. También cabe mencionar que, dado que a los participantes no se les indicaba previamente la ruta que deben ejecutar, simplemente los puntos de partida y fin, se pusieron barreras físicas que impedían la realización de las rutas por los tramos más cortos.

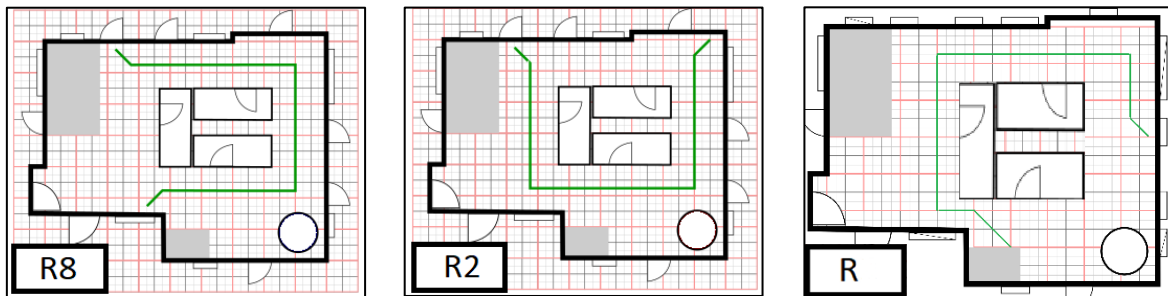


Figura 17: Configuraciones de ruta seleccionadas para el estudio. R8, en esta ruta el punto de origen es la cafetería y el punto de destino la tienda. R2, en esta ruta el punto de origen es la cafetería y el de destino la estación de autobuses. R, el punto de origen de esta ruta es la estación de autobuses y el de destino la tienda.



Figura 18: Puntos de referencia concretos.

Los obstáculos utilizados en los ensayos fueron estandarizados a la altura de la cadera (**Figura 19**). Y se elaboraron tres patrones de disposición (**Tabla 1**) (entre izquierda, centro y derecha) de tal manera de que, por un lado, pudiesen darse estos patrones de manera aleatoria así los participantes no memorizaban la distribución de los obstáculos, pero, por otro lado, hacia que al finalizar los experimentos el cómputo total de obstáculos a izquierda centro y derecha fuera el mismo.

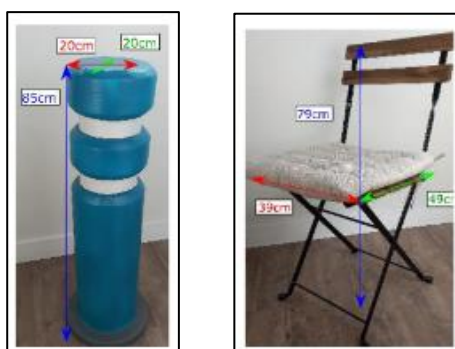


Figura 19: Obstáculos utilizados en los experimentos. (Manual de StreetLab).

	DISPOSICIÓN OBSTÁCULOS		
	DISPOSICIÓN 1	DISPOSICIÓN 2	DISPOSICIÓN 3
DISTANCIA ENTRE OBST	~3M	~3M	~3M
UBICACIÓN OBST	IZQ-CEN-DER	DER-IZQ-CEN	DER-CEN-IZQ
Nº OBST	5 (2 IZQ, 2 CEN, 1 DER)	5 (2 DER, 2 IZQ, 1 CEN)	5 (2 DER, 2 CEN, 1 IZQ)
TIPO DE OBST	A NIVEL DE CADERA	A NIVEL DE CADERA	A NIVEL DE CADERA

Tabla 1: Patrones de distribución de obstáculos.

En cuanto a la visión, contamos con 3 condiciones visuales: **visión normal** o *normal vision (NV)*, en esta condición las tareas se realizan con la visión sin modificaciones más allá de las gafas de vista de los propios voluntarios, lo que podemos entender como visión corregida ≈ visión normal; **baja visión** o *Low vision (LW)*, aquí mediante unas gafas simulamos la visión producida por cataratas; **muy baja visión** o *very low vision (VLV)*, en este grupo la simulación se realiza de la retinitis pigmentaria.

Por su parte las condiciones auditivas, que a su vez conforman los grupos de participantes, son: silencio, sonido ambiente, combinación de sonidos y sonido preferencial. En la condición de **silencio** los voluntarios realizan las tareas encomendadas sin ningún tipo de sonido. En **sonido ambiente**, las rutas se realizan con la emisión de un sonido ambiente de ciudad en bucle. La **combinación de**

sonidos supone la emisión simultanea de tres pistas de audio (sonido ambiente de ciudad, tráfico intenso y obras) durante la realización del experimento. Por último, la condición de **sonido preferencial**, en la cual, en el punto de destino está emitiéndose durante el trayecto un único sonido asociable a estas localizaciones, de tal manera que, si la ruta inicia en la cafetería y finaliza en la estación de autobús, en la ida, sonará tráfico en la zona de la estación y en la vuelta sonido ambiente de cafetería en la misma.

En resumen, los participantes debían realizar la totalidad de los experimentos bajo una sola condición auditiva, pero recorriendo las tres condiciones visuales y las tres rutas. Entonces, cada participante comenzaba en la ruta 1 en la condición NV, continuaba con las siguientes condiciones visuales hasta finalizar las correspondientes a esa ruta, y así pasaban a la siguiente ruta. Cada vez que se cambiaba de condición visual la disposición de obstáculos era modificada aleatoriamente entre los tres patrones establecidos. La totalidad del experimento era filmada por el sistema de cámaras para su posterior análisis y monitoreada con la pulsera *Empática E4*. Este planteamiento experimental nos ha permitido obtener un total de 18 repeticiones por participantes y un global de 576 (Tabla 2).

CÓMPUTO DE EXPERIMENTOS POR INDV	1 INDV X 3 RUTAS x 2 TRAYECTOS X 3 CONDICIONES VISUALES = 18
CÓMPUTO DE EXPERIMENTOS GLOBAL	32 INDV X 3 RUTAS x 2 TRAYECTOS X 3 CONDICIONES VISUALES X 1 CONDICION SONORA = 576

Tabla 2: Contabilización del número de experimentos realizados en el ensayo.

3.3.2 PROCESAMIENTO Y OBTENCIÓN DE LOS DATOS

BODY TRACKING

Una de las vías de obtención de datos relevantes para el ensayo se basa en el uso del sistema de cámaras de grabación con el que cuenta el SL, gracias a los videos obtenidos se puede realizar un procesamiento a posteriori. Por un lado, se contabilizarán parámetros habituales en los experimentos de O&M como: número de colisiones con obstáculos, numero de ayudas para la orientación, tiempo de ejecución de la tarea, velocidad de marcha. Por otro lado, se le aplicara el sistema desarrollado de *body tracking*

El sistema de *body tracking* consta fundamentalmente de 3 elementos: 2 códigos de programación (en lenguaje Python) y un sistema de Inteligencia Artificial (IA) de reconocimiento de objetos. El primero de los códigos (“calibrado”) consiste en un calibrado de los puntos de referencia de las cámaras garantizando así que el posterior procesamiento de los videos se realice de manera congruente con las dimensiones reales del entorno. En segundo lugar, el segundo código (“extrac_data”) contiene distintos módulos dedicados a transformaciones matemáticas y al procesamiento de video, siendo el componente crucial la integración del programa *YOLOV8*, una IA especializada en la detección de objetos. A través de esta integración, se logra el reconocimiento de individuos en los videos capturados, lo cual habilita la obtención de trayectorias precisas de cada participante en cada una de las repeticiones realizadas.

EMPÁTICA E4

Como ya comentábamos para la recogida de datos vinculados a constantes fisiológicas nos servíamos de la pulsera comercial *Empática E4*, la cual llevaban puesta los participantes durante la realización de los experimentos. Los datos eran recogidos a tiempo real gracias a la app desarrollada por la propia empresa para el uso profesional de la pulsera (E4 realtime), a la cual mediante una cuenta personal vinculas vía bluetooth tu dispositivo móvil y la pulsera, esto permite un seguimiento instantáneo (Figura 20). Luego estos datos son almacenados en la propia base de datos (E4 connect) de la cuenta personal para tener acceso a los datos una vez finalizada la sesión (Figura 21).

En concreto el dato de interés para el ensayo es el GSR (Galvanic Skin Response) o EDA (Electrodermal Activity), parámetro fisiológico que mide la conductancia de la piel. La conductancia de la piel hace referencia a la capacidad de la piel para conducir la electricidad. El EDA es nuestro parámetro de interés porque ha demostrado tener una elevada correlación con el estrés (Navea et al., 2019), ya que una de las primeras respuestas del sistema nervioso ante el aumento del estrés es la sudoración (Ohimi et al., 2009) que aumenta la humedad en la piel y por lo tanto la conductancia.

Time	Duration	Device	Session			
11 Aug 2023 - 18:41 UTC+02:00	0h 32m 17s	A024F5 E4 3.3	1774085	View	Download	Delete
11 Aug 2023 - 18:17 UTC+02:00	0h 23m 9s	A024F5 E4 3.3	1774079	View	Download	Delete
20 Jul 2023 - 18:20 UTC+02:00	0h 26m 19s	A024F5 E4 3.3	1766469	View	Download	Delete
18 Jul 2023 - 19:56 UTC+02:00	0h 22m 33s	A024F5 E4 3.3	1765375	View	Download	Delete
18 Jul 2023 - 19:30 UTC+02:00	0h 23m 37s	A024F5 E4 3.3	1765358	View	Download	Delete
11 Jul 2023 - 19:02 UTC+02:00	0h 32m 17s	A024F5 E4 3.3	1762456	View	Download	Delete

Figura 20: Extracto de la base de datos recogida por la Empática E4.



Figura 21: Fragmento de parámetros recogidos a tiempo real por la Empática E4.

3.3.3 GESTIÓN DE VOLUNTARIOS

Como en el estudio no se cuenta con pacientes reales para realizar los experimentos se contó con un total de 32 voluntarios, con una distribución de sexo homogénea y edades comprendidas entre los 20-30 años. A estos voluntarios se les distribuyó aleatoriamente en 4 grupos en base a la condición auditiva.

Independientemente del grupo asignado cada voluntario debía realizar las mismas pruebas de orientación y movilidad, como se explica en el punto 3.3.1. Los participantes recibían previo al experimento una breve explicación del estudio, una presentación del entorno de los ensayos (SL), una explicación de las tareas que debían realizar y se les respondía cualquier duda que pudieran tener.

Como los experimentos se han realizado en simulación de las patologías visuales fue necesario realizar una búsqueda, y cribado, de voluntarios. Para contabilizar el número total, y datos personales (nombres, edad, sexo, etc.) de los voluntarios se utilizó un formulario de participación, que a su vez se utilizó como formulario de exclusión. Los criterios de exclusión fueron los siguientes: padecer de patologías o deficiencias que afecten a la movilidad, padecer patologías o deficiencias cognitivas que no permitieran comprender adecuadamente las tareas encomendadas, padecer patologías o deficiencias visuales (se permitía el uso de gafas, entendiendo esta condición como visión corregida \approx visión normal).

Además, se solicita a los voluntarios firmar una hoja de consentimiento informado, para su uso de datos personales y la realización de los experimentos. Y, por último, para obtener un *feedback* de la percepción de los voluntarios sobre la dificultad de las tareas y sus niveles de estrés en las diferentes condiciones se les entregó un formulario que debían cumplimentar una vez finalizados los experimentos, para a posteriori comparar con los datos obtenidos mediante la *Empática E4*.

4. RESULTADOS

4.1 BODY TRACKING

Para el procesamiento de body tracking partimos de las grabaciones, de las 4 cámaras, realizadas para cada sesión. Los 4 puntos de vista de las cámaras nos permiten un seguimiento del recorrido de los pacientes a lo largo de todo el SL. A partir de estas 4 pistas de videos se realizó una sincronización y recorte (mediante el programa Shotcut) de los mismos para la ida y la vuelta de cada ruta, de cada mapa, para todos los participantes (un total de 2304 recortes). Estos recortes constituyen nuestra base de trabajo (con una estructura representada en la **Figura 22**) para el análisis.

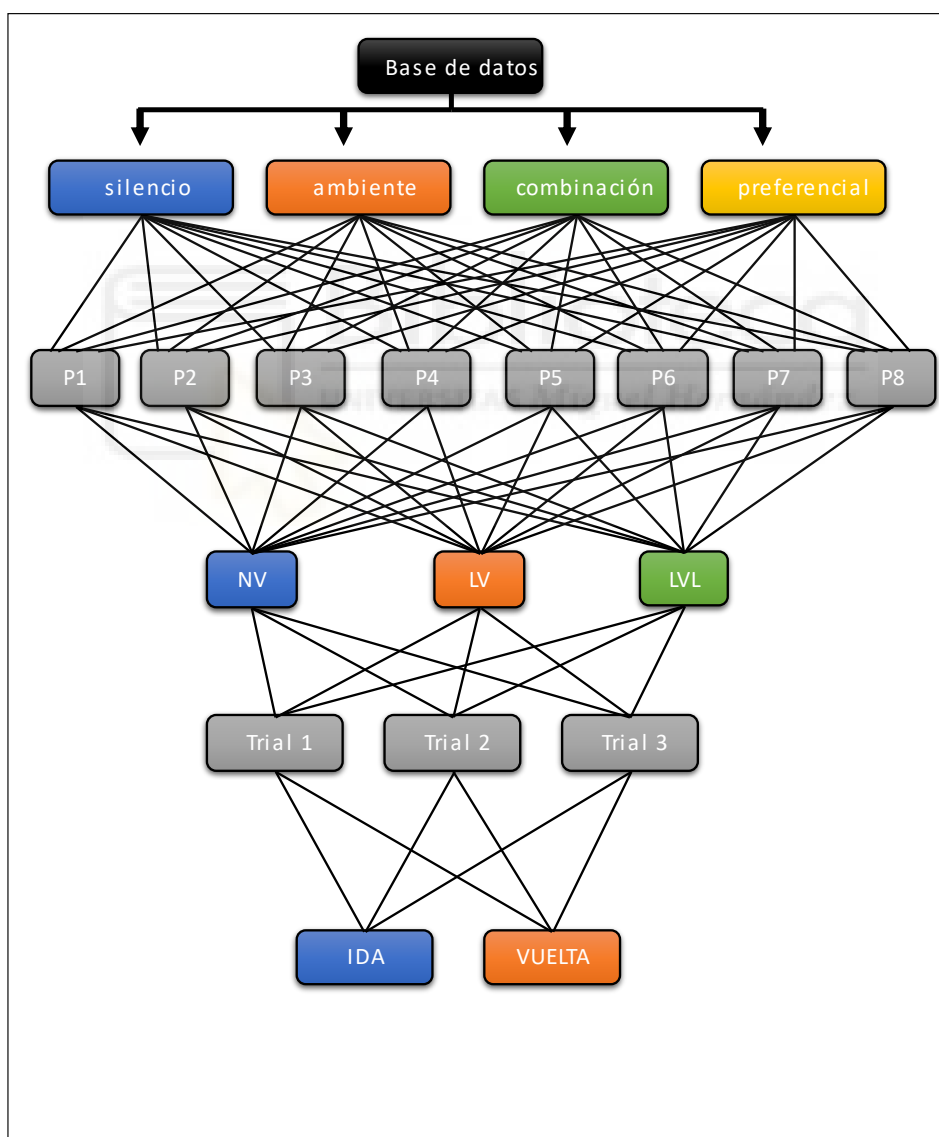
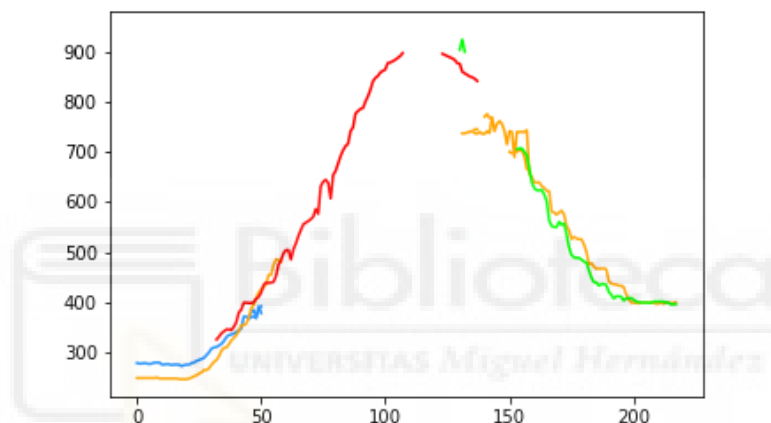
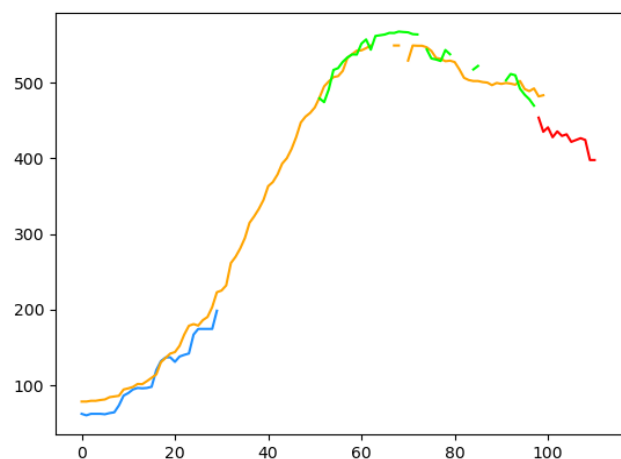


Figura 22: Esquema de la base de datos utilizada en el body tracking.

Estos 4 videos nos ofrecen una visión en 3D del recorrido que realizan los pacientes en cada trayecto, pero es necesario que transformemos estos datos al plano en 2D, para poder obtener una visión cenital del recorrido realizado. Para que la transformación se hiciera de manera fiel a la realidad se desarrolló un *script* “calibrado” que nos permitía seleccionar los puntos de referencia que se tomarían para la transformación en cada video. Una vez calibrado el sistema se desarrolló el código “extract_data” en el aplicamos la IA *YOLOV8*, que haría un reconocimiento y seguimiento de los participantes en los videos, este seguimiento será superpuesto en el plano del SL, dándonos así una visión del recorrido realizado por los participantes (Figura 23) y su desplazamiento en los ejes X e Y (Cm/15FPS) (Gráfica 1).



Gráfica 1: Desplazamiento en X.



Gráfica 2: Desplazamiento en Y.

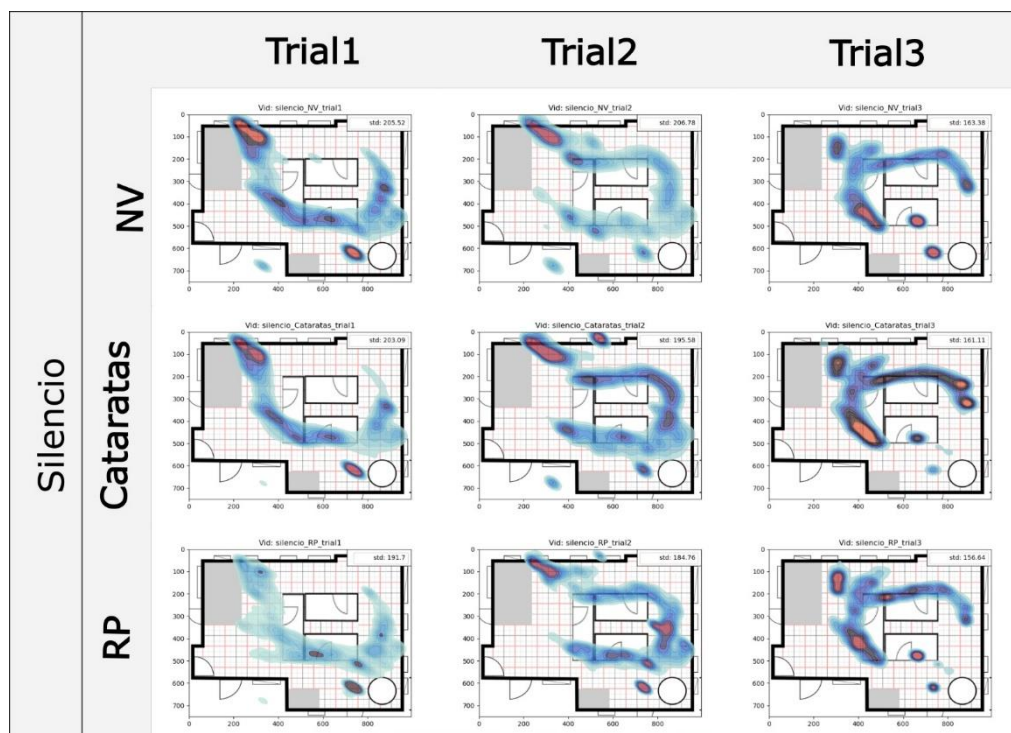


Figura 23A: Panel demostrativo del body tracking para las diferentes condiciones visuales y los diferentes mapas, en silencio.

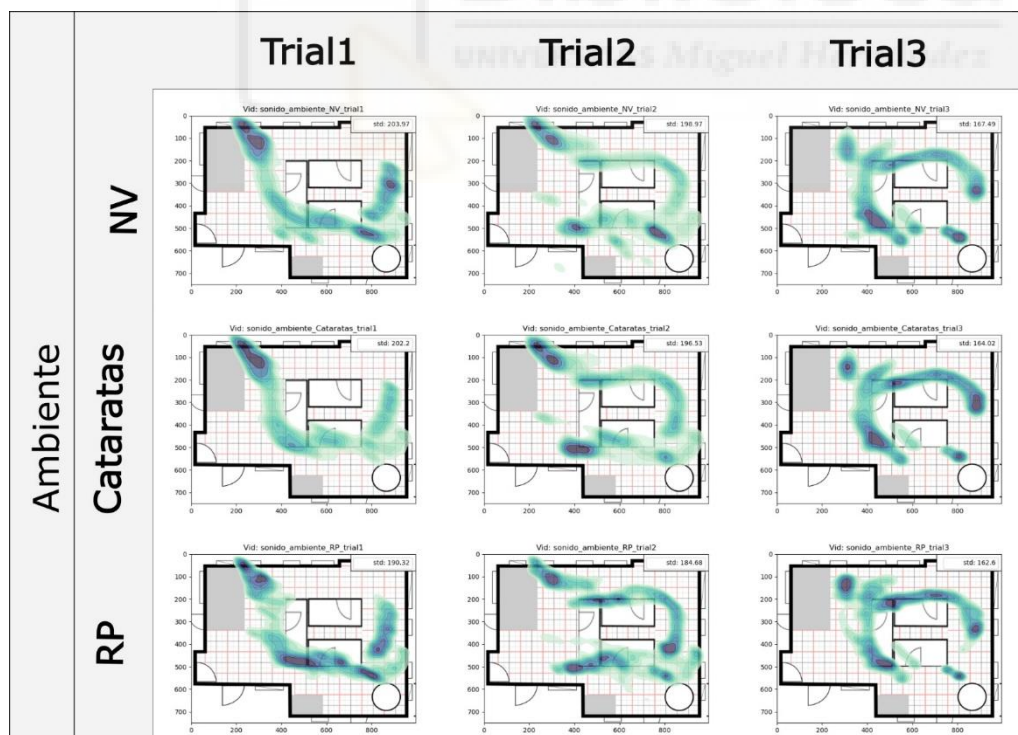


Figura 23B: Panel demostrativo del body tracking para las diferentes condiciones visuales y los diferentes mapas, en sonido ambiente.

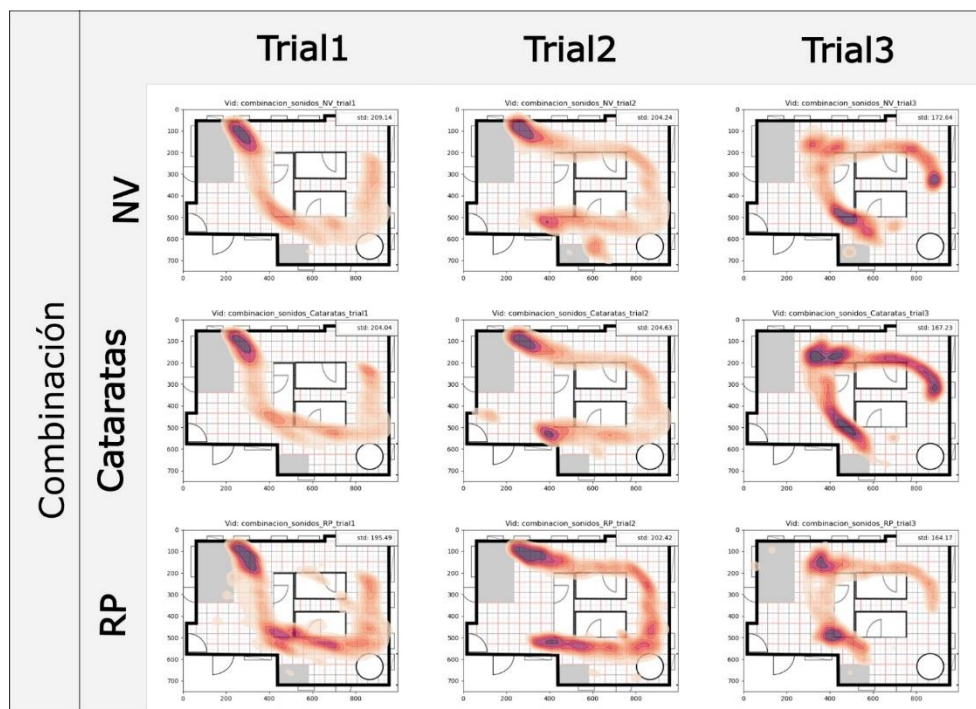


Figura 23C: Panel demostrativo del body tracking para las diferentes condiciones visuales y los diferentes mapas, en combinación de sonidos.

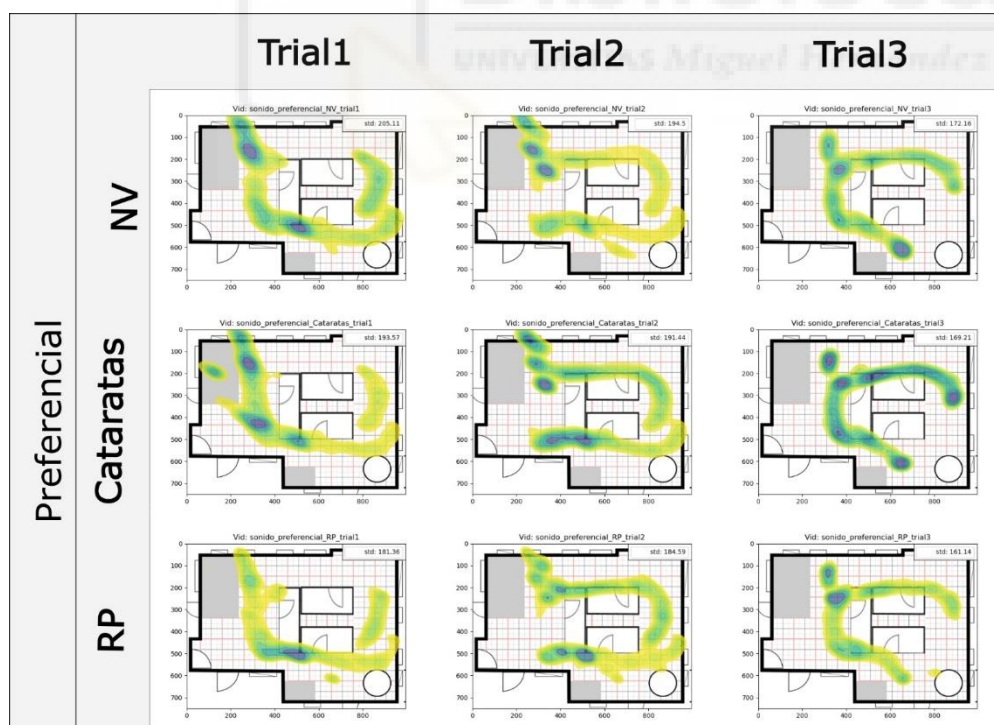


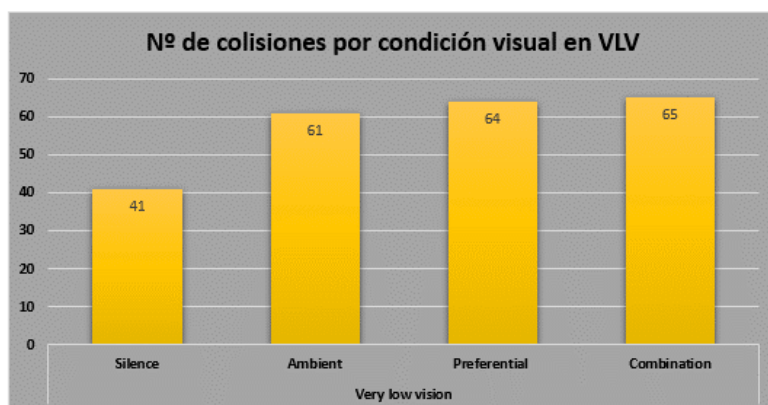
Figura 23B: Panel demostrativo del body tracking para las diferentes condiciones visuales y los diferentes mapas, sonido preferencial

En la Figura 23 encontramos un panel demostrativo del body tracking para las diferentes condiciones visuales, auditivas y los diferentes mapas. La figura presenta unas dimensiones de 4x3x3, donde encontramos las diferentes condiciones auditivas (silencio, ambiente, combinación y preferencial), condiciones visuales (NV, LV y VLV) y las configuraciones de mapas. Las imágenes son mapas de densidad donde quedan reflejadas todas las repeticiones realizabas en cada una de las condiciones. En estos gráficos de densidad observamos la representación de todos y cada uno de los trayectos realizados para cada ruta en cada condición visual y para cada grupo de condición auditiva.

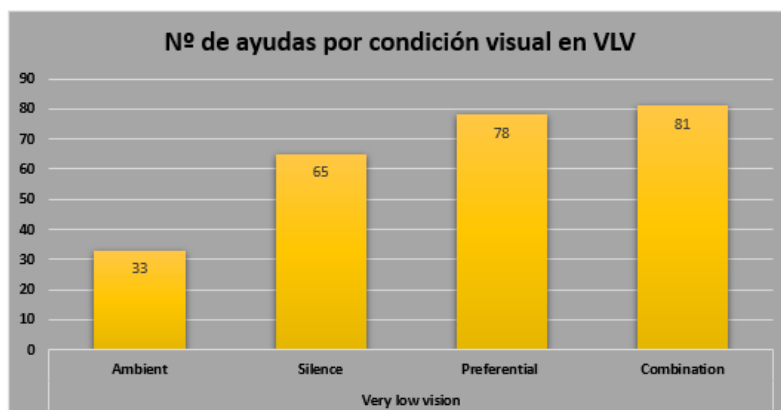
En estos resultados nos brindan la posibilidad de observar la distribución, dispersión o lo erráticos que han sido los participantes al realizar las rutas, esta comparativa se da mediante la desviación estándar. Dado que este tipo de análisis son muy novedosos todavía quedan muchos aspectos de interese por explorar.

4.1.1 NUMERO DE COLISIONES Y AYUDAS

El número de colisiones, entendidas como impactos o contactos no deseados con los obstáculos, se obtuvo mediante una contabilización a tiempo real en el experimento y mediante una revisión en los videos. Es importante destacar que para las condiciones visuales de **visión normal** y **baja visión** ningún participante sufrió ninguna colisión por ello los análisis referidos a colisiones se realizan solo para condición visual de **muy baja visión** y para las cuatro condiciones sonoras. Los datos obtenidos del total de colisiones por condiciones se muestran en la **gráfica 2**. El procesamiento del número de ayudas ha sido igual que en el caso del número de colisiones, los datos se muestran en la **gráfica 3**.

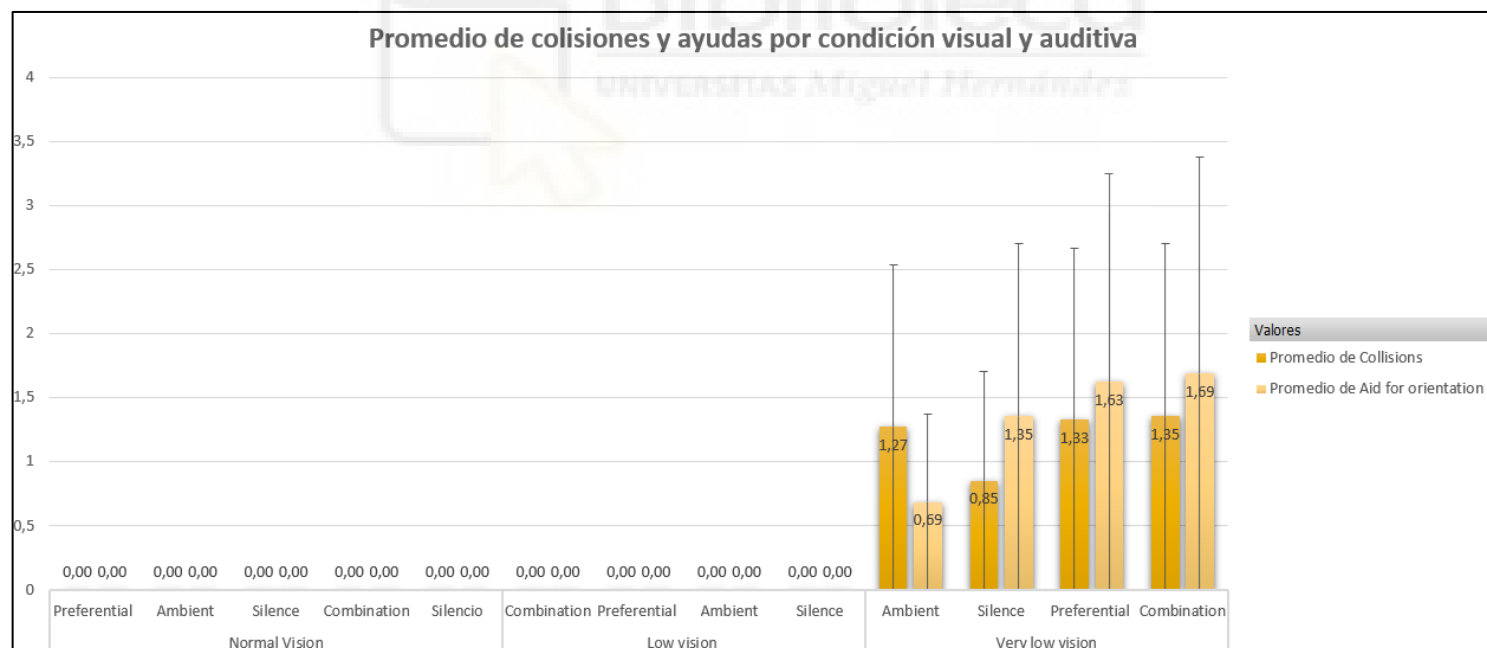


Gráfica 3: Comparación del número de colisiones entre las diferentes condiciones auditivas para muy baja visión. La gráfica muestra el sumatorio de datos de todas las rutas y todos los pacientes para las diferentes condiciones.



Gráfica 4: Comparación del número de colisiones entre las diferentes condiciones auditivas para muy baja visión. La gráfica muestra el sumatorio de datos de todas las rutas y todos los pacientes para las diferentes condiciones.

Los datos totales nos ofrecen una visión general de los datos, pero la relevancia de los mismos reside en la frecuencia de ayudas o colisiones por condición, y para esto debemos evaluar el promedio (Gráfica 4), ya que el sumatorio no tiene en cuenta las repeticiones donde se dan 0 colisiones o ayudas.



Gráfica 5: Promedio de colisiones y ayudas por condiciones visuales auditivas.

Para comprobar si existen diferencias significativas en el caso de *very low vision* entre las diferentes condiciones auditivas y el promedio de colisiones y ayudas se realizaron dos pruebas de ANOVA.

En el caso de colisiones el p-valor obtenido fue de 0.0807 ($p\text{-valor} > \alpha = 0.05$) con lo que rechazamos la hipótesis de que la variable del sonido tiene influencia en las colisiones. En cuanto a las ayudas el ANOVA nos muestra que existen diferencias significativas entre grupos ($p\text{-valor} = 0.000883 < \alpha = 0.05$), para determinar entre que grupos existen diferencias significativas se realizó un test a *posteriori* de Tukey:

	upr	p adj
Combination-Ambient	1.6998073	0.0015770
Preferential-Ambient	1.6373073	0.0035499
Silence-Ambient	1.3664740	0.0681067
Preferential-Combination	0.6373073	0.9956160
Silence-Combination	0.3664740	0.6056111
Silence-Preferential	0.4289740	0.7477249

Tabla 3: Resultados del test de Tukey.

Vemos que existen diferencias significativas en cuanto a las ayudas según la condición auditiva. La condición de sonido ambiente presenta diferencias con combinación de sonido y sonido preferencial, teniendo ambiente menor numero de ayudas.

4.1.2 VELOCIDAD DE EJECUCIÓN

El *script* "extrac_data" también nos permitía guardar la información obtenida de los videos en formato numpy, el cual estructuramos como un directorio de directorios. El primer nivel de los archivos .npy, son las cámaras (cam1, cam2, cam3, cam4) las cuales tienen dentro directorios denominados "frame", estos a su vez contienen la información del reconocimiento de personas. Como la cadencia de grabación de las cámaras es de 15FPS (640p) o 25FPS (1080p) para obtener el tiempo de ejecución de cada *trial* dividiremos el número total de *frames* entre los FPS. Para poder realizar esto de manera automática y en secuencia de todos los datos se desarrollo un nuevo código de programación "extrac_vel", con el que también obtendremos las velocidades de ejecución. De los resultados de cada trayecto se realizaron las medias por condiciones auditivas y visuales, obteniendo los datos mostrados en la **Gráfica 5**.

A los datos se les aplico un ANOVA para determinar si había diferencias significativas entre las condiciones, el resultado fue que la condición visual afecta significativamente a la velocidad de ejecución en concreto la condición de muy baja visión ($p\text{valor} = < 2e-16$).

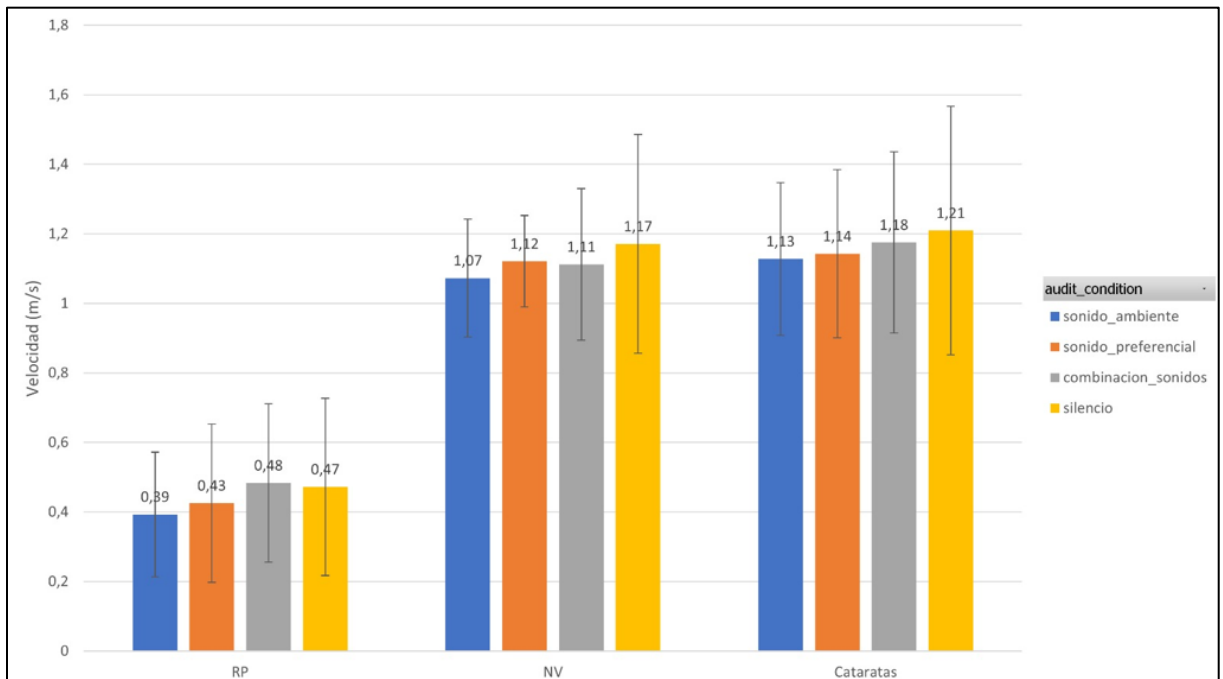


Figura 24: Comparativas de las velocidades medias por condición visual y condición auditiva.

4.2 EDA/GSR

En el caso del análisis del EDA, los datos obtenidos, de la pulsera *Empática E4*, fueron almacenados con la siguiente estructura:

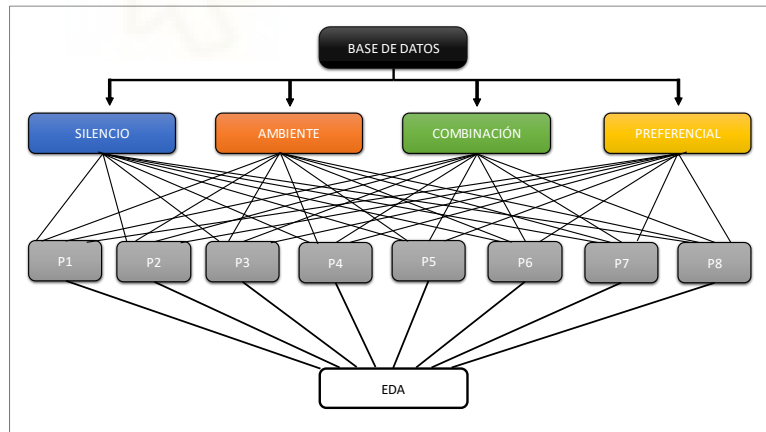


Figura 25: Esquema de la base de datos para el análisis de GSR.

Para el procesamiento del GSR, se desarrollo un código de programación “*análisis_EDA*”, el cual nos permitía: en primer lugar, cambiar el formato de archivo del registro EDA de la sesión, de un formato CVS a formato npy. En segundo lugar, cargaba y limpiaba los datos obtenidos, para posteriormente, poder obtener la media de los niveles de GSR durante la sesión. Por último, se realizó la media según la condición auditiva, para evaluar cual de las 4 producida mayores niveles de estrés en los participantes, los datos obtenidos se muestran en la **tabla 4**.

Audit_cond	EDA_mean
ambiente	5,6125
silencio	5,3875
preferencial	4,75
combinación	7,04875

Tabla 4: Media de los valores EDA según la condición auditiva.

Se realizo un Anova para la comprobación de diferencias significativas dando lugar a que la condición de combinación producía un nivel medio de EDA mayor que el resto de las condiciones (pvalor= 0.000297)

4.3 VALORACIÓN Y PERCEPCIÓN DE LOS PARTICIPANTES

En nuestro planteamiento era un elemento relevante poder obtener un *feedback* de la percepción de los participantes sobre la dificultad y otros aspectos que habían tenido en el experimento. Para ello se realizó un cuestionario post-experimentación de los cuales mostramos los siguientes resultados: **figuras 26-28**.

Como vemos por la propia percepción de los pacientes la dificultad de la simulación de patologías visuales se asemeja a los resultados obtenidos, pues en las dos primeras condiciones los pacientes perciben la dificultad baja, mientras que en muy baja visión la dificultad percibida es más elevada.

Uno de los bloques de preguntas que planteábamos trataba sobre su percepción en cuanto a la dificultad de las condiciones visuales, obteniendo las siguientes respuestas:

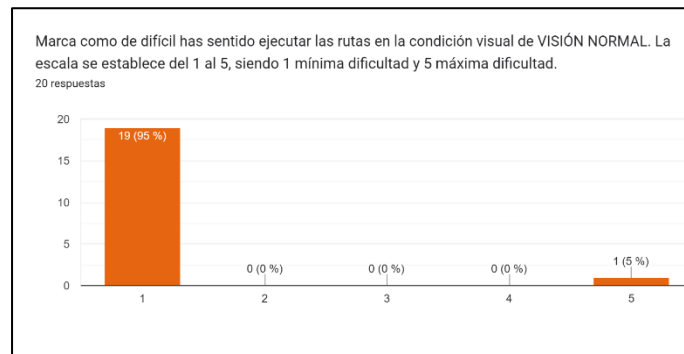


Figura 26: Valoración de los participantes en cuanto a la dificultad de visión normal. Hay que aclarar que el dato de nivel de dificultad 5 es error del participante al contestar.

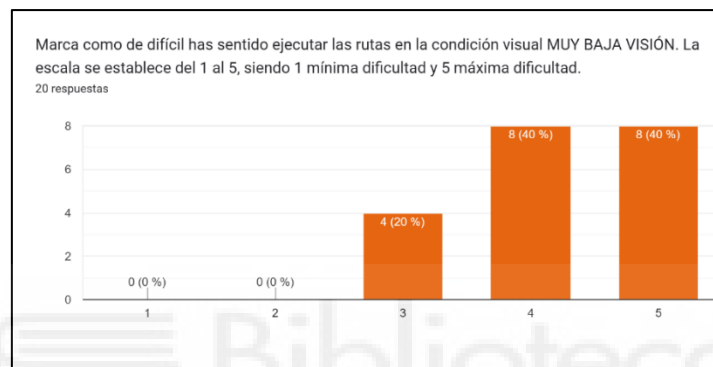


Figura 27: Valoración de los participantes en cuanto a la dificultad de baja visión.

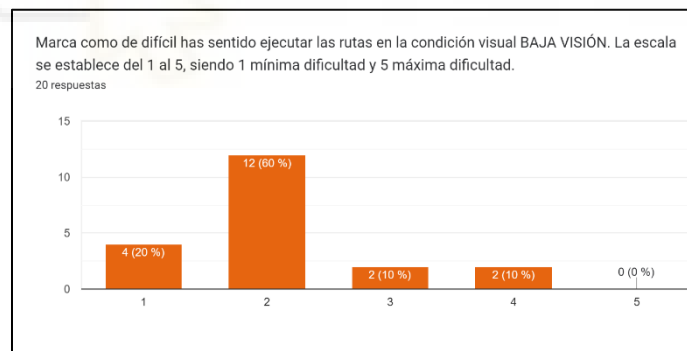


Figura 28: Valoración de los participantes en cuanto a la dificultad de muy baja visión.

5. DISCUSIÓN

En el presente apartado, profundizaremos en la valoración crítica de los resultados obtenidos en la experimentación y la propia metodología de esta.

5.1 SOBRE EL PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL: LIMITACIONES Y CONSIDERACIONES

Sobre el planteamiento experimental comenzaré resaltando las limitaciones o puntos de mejora para futuras investigaciones. En primer lugar, encontramos aspectos técnicos sobre los sistemas de grabación y audio: respecto del audio, es un sistema de nuevo desarrollo por lo que, si bien ha cumplido con su cometido, tiene amplio margen de mejora, en aspectos como su automatización, modulación (intensidad, frecuencia del sonido, etc.). En cuanto al sistema de grabación, los principales que hemos tenido que afrontar ha sido: disposición de las cámaras, aunque no encontramos puntos ciegos, si hay zonas donde solo podemos obtener datos de una cámara cuando lo ideal sería que en todo momento al menos 2 cámaras enfocando; diferentes calidades y ritmos de grabación, las cámaras dependiendo del modelo y calidad de conexión WIFI realizan las grabaciones a 640p (15FPS) o a 1080p (25FPS) lo que dificulta, pero no imposibilita, el procesamiento de videos.

El otro factor determinante en el planteamiento experimental ha sido el de la utilización de voluntarios con simulación en vez de pacientes reales. Partimos de que la participación de pacientes reales no era viable, pero es evidente que la simulación pone sobre la mesa una serie de limitaciones. El principal elemento limitante es que la simulación de patología puede no reflejar completamente la experiencia de los pacientes, por una simulación deficiente, por una falta de adaptación a la condición...

La utilización del SL, aunque entorno realista, puede no replicar con totalidad exactitud el desempeño en un entorno real.

Aunque el planteamiento inicial ha presentado limitaciones el resultado final ha sido fructífero, pues se ha desarrollado un protocolo experimental válido para la inclusión del sonido en el estudio de orientación y movilidad. También es relevante mencionar el tamaño de la muestra (n=32).

5.2 EFECTOS DEL SONIDO EN LA ORIENTACIÓN Y MOVILIDAD

El objetivo primario del estudio consiste en la evaluación del impacto del sonido en la O&M en voluntarios con patologías visuales simuladas, utilizando como espacio de trabajo el StreetLab. Los resultados nos arrojan información al respecto, siendo que, en cuestión de ayudas, sonido ambiente ha presentado diferencias significativas. La justificación de esto puede resultar en que la emisión de un sonido en el centro de la sala ayuda la percepción espacial ayudando a que los participantes realicen un mapa mental del entorno, pero a diferencia de combinación donde la emisión de diferentes sonidos puede generar una desorientación, o en sonido preferencial donde la emisión proviene de extremos de la sala. Por su lado, el sonido no ha mostrado influencia en cuanto a las colisiones producidas.

Por lo referido a nuestras hipótesis, estos resultados nos permiten rechazar las tres vinculadas al impacto que tiene el sonido en la O&M, ya que en el caso de combinación de sonidos y sonido preferencial no han mostrado diferencias significativas ni en colisiones ni en ayudas. Por su parte, sonido ambiente si ha mostrado diferencias significativas en cuanto a ayudas, a diferencia de nuestro planteamiento inicial en el que postulábamos que tendría resultados similares al grupo control.

5.3 IMPACTO DE LAS CONDICIONES VISUALES

En cuanto al impacto de la simulación de deficiencias visuales, y en consonancia con nuestra hipótesis planteada, la única condición que ha demostrado un impacto en el desempeño de los ejercicios de O&M ha sido muy baja visión, influenciando en el número de colisiones y ayudas requeridas. En el caso de NV y VL, ningún participante necesito y produjo ayudas o colisiones. Hay que entender que es la condición más restrictiva y a ello sumarle la falta de habituación de los voluntarios a esta condición.

La condición de simulación de retinitis pigmentaria también demostró tener influencia sobre la velocidad de ejecución en las tareas.

5.4 RELEVANCIA DE ASPECTOS NEUROPSICOLÓGICOS

La valoración sobre cómo han sido integrados conceptos y puntos de vista de la neuropsicología al estudio se debe hacer de manera crítica. En primer lugar, se ha hecho evidente la falta de un conocimiento amplio del campo que llevo a cometer errores protocolarios, como realizar mediciones de los niveles “normales” de EDA de los pacientes previos a las sesiones, como no hacer registros específicos por repetición en vez de por sesión y así poder evaluar el cambio frente a estímulos

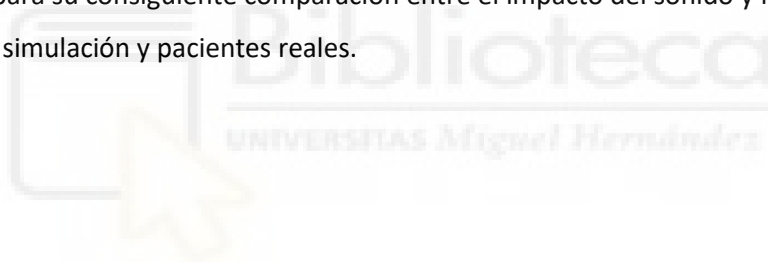
concretos. También hay que destacar la importancia que pueden tener en el desempeño de los pacientes factores como la memoria, el nerviosismo, la motivación, cansancio, etc. y que no se le dio la atención correspondiente a su influencia.

Por último, quiero comentar que por falta de respuesta de 12 de los 32 voluntarios al formulario de “Valoración tras la realización del experimento” no se ha podido presentar la comparativa completa, postulada en un inicio, entre la percepción de los participantes y sus registros fisiológicos y resultados en la ejecución de las rutas.

5.5 POSIBILIDADES FUTARAS

En resumen, el estudio pese a haber mostrado ciertas limitaciones, ha sido concluyente en.... La estandarización del protocolo experimental abre la puerta nuevas investigaciones: modificaciones en los tipos, ubicación, intensidad, frecuencia, eventos clave del sonido; repetición de los experimentos con pacientes reales para su posterior comparativa.

Por ejemplo, en el marco más amplio del StreetLab, la realización de estudios sobre la influencia de la iluminación para su consiguiente comparación entre el impacto del sonido y la iluminación en la O&M, también en simulación y pacientes reales.



6. CONCLUSIONES

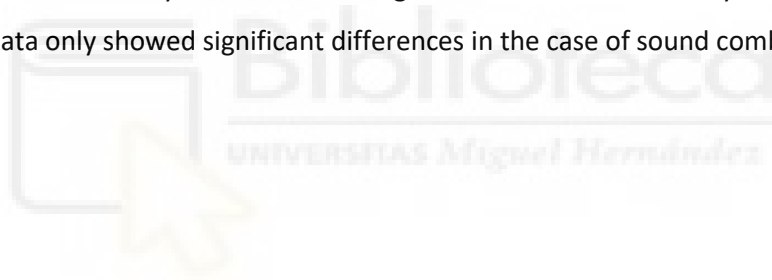
Una vez expuesta la totalidad del ensayo, pasaré a exponer las distintas conclusiones que se extraen:

1. El sonido si produce un impacto en el desempeño de las tareas de O&M bajo condiciones de simulación.
2. La condición de sonido ambiente facilita la percepción espacial de los participantes, traduciéndose esto en un menor número de ayudas requeridas.
3. Las condiciones visuales de visión normal y baja visión, no han producido efecto alguno en el desempeño de las tareas de O&M.
4. El protocolo experimental ha permitido satisfactoriamente la inclusión de una nueva variable de estudio en pruebas de O&M en StreetLab.
5. La condición de muy baja visión ha tenido un impacto directo en la velocidad de ejecución de las tareas de O&M.
6. El modelo de análisis de body tracking desarrollado ha permitido la obtención de parámetros relevantes para el estudio y comprensión de la orientación y la movilidad.
7. Los datos de EDA solo mostraron diferencias significativas en el caso de combinación de sonidos

6. Conclusions

Once the entire essay has been exposed, I will present the different conclusions that are drawn:

1. Sound does have an impact on the performance of O&M tasks under simulation conditions.
2. The ambient sound condition facilitates the spatial perception of the participants, translating this into a smaller number of aids required.
3. The visual conditions of normal vision and low vision have not produced any effect on the performance of O&M tasks.
4. The experimental protocol has successfully allowed the inclusion of a new study variable in O&M tests in StreetLab.
5. The condition of very low vision has had a direct impact on the speed of execution of O&M tasks.
6. The body tracking analysis model developed has allowed the obtaining of relevant parameters for the study and understanding of orientation and mobility.
7. The EDA data only showed significant differences in the case of sound combinations.



7. BIBLIOGRAFÍA

Artículos

- Agathos, C. P., Ramanoël, S., Bécu, M., Bernardin, D., Habas, C., & Arleo, A. (2020). Postural control while walking interferes with spatial learning in older adults navigating in a real environment. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 398.
- Alfaro, A., Bernabeu, Á., Agulló, C., Parra, J., & Fernández, E. (2015). Hearing colors: an example of brain plasticity. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9, 56.
- Ayton, L. N., Rizzo, J. F., 3rd, Bailey, I. L., Colenbrander, A., Dagnelie, G., Geruschat, D. R., Hessburg, P. C., McCarthy, C. D., Petoe, M. A., Rubin, G. S., Troyk, P. R., & HOVER International Taskforce (2020). Harmonization of Outcomes and Vision Endpoints in Vision Restoration Trials: Recommendations from the International HOVER Taskforce. *Translational vision science & technology*, 9(8), 25. <https://doi.org/10.1167/tvst.9.8.25>.
- Bharadwaj, A., Shaw, S. B., & Goldreich, D. (2019). Comparing tactile to auditory guidance for blind individuals. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 443.
- Bonyadi, Afsaneh & Jokar, A. & Moallemi, Mostafa. (2019). Cataract etiology and prevention in traditional Persian medicine texts. DOI: 6. 192-6. 10.4103/JNMS.JNMS_23_19. 14
- Chang, K. Y. J., Dillon, L. L., Deverell, L., Boon, M. Y., & Keay, L. (2020). Orientation and mobility outcome measures. *Clinical and Experimental Optometry*, 103(4), 434-448. <https://doi.org/10.1111/cxo.13004>.
- Chundury, P., Patnaik, B., Reyazuddin, Y., Tang, C., Lázaro, J., & Elmqvist, N. (2022). Towards Understanding Sensory Substitution for Accessible Visualization: An Interview Study. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 28(1), 1084-1094. doi:10.1109/TVCG.2021.3114829
- Colenbrander A: Visual functions and functional vision. *Int Congr Ser* 1282:482-486, 2005
- de Ruyter van Steveninck, J., van Gestel, T., Koenders, P., van der Ham, G., Vereecken, F., Güçlü, U., van Gerven, M., Güçlütürk, Y., & van Wezel, R. (2022). Real-world indoor mobility with simulated prosthetic vision: The benefits and feasibility of contour-based

- scene simplification at different phosphene resolutions. *Journal of vision*, 22(2), 1. <https://doi.org/10.1167/jov.22.2.1>
- Finger, R. P., Ayton, L. N., Deverell, L., O'Hare, F., McSweeney, S. C., Luu, C. D., ... & Bentley, S. A. (2016). Developing a very low vision orientation and mobility test battery (O&M-VLV). *Optometry and Vision Science*, 93(9), 1127-1136.
 - GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators, & Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study (2021). Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: the Right to Sight: an analysis for the Global Burden of Disease Study. *The Lancet. Global health*, 9(2), e144–e160. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30489-7](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30489-7)
 - Hu, X., Song, A., Wei, Z., & Zeng, H. (2022). StereoPilot: A Wearable Target Location System for Blind and Visually Impaired Using Spatial Audio Rendering. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 30, 1621-1630. doi: 10.1109/TNSRE.2022.3182661
 - Jacobson, Dan. (1998). Cognitive Mapping Without Sight: four preliminary studies of spatial learning. *Journal of Environmental Psychology*. 18. 289–305. 10.1006/jevp.1998.0098.
 - José-Alain Sahel, M. D., Mohand-Said, S., Michel Paques, M. D., Becker, K., Chaumet-Riffaud, A. E., Gutman, E., & Katia Marazova, M. D. Assessing photoreceptor status in retinal dystrophies: from high resolution imaging to functional vision.
 - Kim, D. S., Emerson, R. W., Naghshineh, K., Pliskow, J., & Myers, K. (2012). Impact of adding artificially generated alert sound to hybrid electric vehicles on their detectability by pedestrians who are blind. *Journal of rehabilitation research and development*, 49(3), 381.
 - Kumaran, N., Ali, R. R., Tyler, N. A., Bainbridge, J. W., Michaelides, M., & Rubin, G. S. (2020). Validation of a vision-guided mobility assessment for RPE65-associated retinal dystrophy. *Translational Vision Science & Technology*, 9(10), 5-5.
 - Lauren N. Ayton, Joseph F. Rizzo, Ian L. Bailey, August Colenbrander, Gislin Dagnelie, Duane R. Geruschat, Philip C. Hessburg, Chris D. McCarthy, Matthew A. Petoe, Gary S. Rubin, Philip R. Troyk, for the HOVER International Taskforce; Harmonization of Outcomes and Vision Endpoints in Vision Restoration Trials:

- Recommendations from the International HOVER Taskforce. *Trans. Vis. Sci. Tech.* 2020;9(8):25. <https://doi.org/10.1167/tvst.9.8.25>.
- Müller, M., Hu, H., Dietz, M., Beiderbeck, B., Ferreiro, D. N., & Pecka, M. (2023). Temporal hyper-precision of brainstem neurons alters spatial sensitivity of binaural auditory processing with cochlear implants. *Frontiers in neuroscience*, 16, 1021541.
 - Nau, A. C., Pintar, C., Fisher, C., Jeong, J. H., & Jeong, K. (2014). A standardized obstacle course for assessment of visual function in ultra low vision and artificial vision. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (84), e51205.
 - Navea, R. F., Buenvenida, P. J., & Cruz, C. D. (2019). Stress Detection using Galvanic Skin Response: An Android Application. *Journal of Physics: Conference Series*, 1372(1), 012001. doi:10.1088/1742-6596/1372/1/012001
 - Ohmi, M., Tanigawa, M., Yamada, A., Ueda, Y., & Haruna, M. (2009). Dynamic analysis of internal and external mental sweating by optical coherence tomography. *Journal of biomedical optics*, 14(1), 014026. <https://doi.org/10.1117/1.3079808>
 - Phung, L., Gregori, N. Z., Ortiz, A., Shi, W., & Schiffman, J. C. (2016). REPRODUCIBILITY AND COMPARISON OF VISUAL ACUITY OBTAINED WITH SIGHTBOOK MOBILE APPLICATION TO NEAR CARD AND SNELLEN CHART. *Retina (Philadelphia, Pa.)*, 36(5), 1009–1020. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000000818>
 - Rao, S., Ghosh, S., Rodriguez, G. P., Röggla, T., Cesar, P., & El Ali, A. (2023). From Video to Hybrid Simulator: Exploring Affective Responses toward Non-Verbal Pedestrian Crossing Actions Using Camera and Physiological Sensors. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 1-24.
 - Sánchez, J., Sáenz, M., Pascual-Leone, A., & Merabet, L. B. (2010). Enhancing Navigation Skills through Audio Gaming. *Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 3991-3996. doi:10.1145/1753846.1754091.
 - Sanchez-Garcia, M., Morollon-Ruiz, R., Martinez-Cantin, R., Guerrero, J. J., & Fernandez-Jover, E. (2022). Assessing visual acuity in visual prostheses through a virtual-reality system. *arXiv preprint arXiv:2205.10395*.
 - Seki, Y., & Sato, T. (2010). A training system of orientation and mobility for blind people using acoustic virtual reality. *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 19(1), 95-104.

- Shiels, A., & Hejtmancik, J. F. (2019). Biology of Inherited Cataracts and Opportunities for Treatment. Annual review of vision science, 5, 123–149. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision091517-034346>
- Soto Astacio, E. Estudios de orientación y movilidad: aproximación del empleo de la memoria espacial para la creación de mapas mentales en un entorno real vs. un entorno virtual. Trabajo de Fin de Master Universidad Miguel Hernández, España.
- Val Calvo, M., Morollón Ruiz, R., Soo, L., Waclawczyk, D., Grani, F., Ferrández, J. M., & Jover, E. F. (2022, May). Horizon cyber-vision: a cybernetic approach for a cortical visual prosthesis. In *International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation* (pp. 380-394). Cham: Springer International Publishing.
- Virgili, G., Rubin, G. Orientation and mobility training for adults with low vision. Cochrane Database of Systematic Reviews 2010, Issue 5. Art. No.: CD003925. DOI: 10.1002/14651858.CD003925.pub3.
- Weale, V., Love, J., Clays, E., & Oakman, J. (2023). Using EMA and Physiological Data to Explore the Relationship between Day-to-Day Occupational Stress, Musculoskeletal Pain and Mental Health among University Staff: A Study Protocol. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 3526.
- Xiong, Y.-Z., Addleman, D. A., Nguyen, N. A., Nelson, P. B., & Legge, G. E. (2022). Visual and auditory spatial localization in younger and older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 14, 838194. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.838194>[1]

Libros

- Manual de StreetLab

Páginas Web consultadas:

- National Eye Institute

<https://www.nei.nih.gov/learn-about-eye-health/healthy-vision/how-eyes-work>

- Webvisión

<https://webvision.med.utah.edu>

- OMS

<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>

- Librería de imágenes del *National Institutes of Health (NIH)*

<https://medialibrary.nei.nih.gov>

8. ANEXOS

