



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Influencia del diseño de interacción sobre la experiencia de usuario en entornos de aprendizaje en Realidad Virtual: un estudio centrado en las metáforas de navegación.

Junio 2020

Autor: José Luis Soler Domínguez

Directores: D. Mariano Alcañiz Raya
D. Manuel Contero González

Agradecimientos

Esta tesis doctoral tiene una naturaleza dual. Representa un final, una llegada, una culminación y, al mismo tiempo, un principio, un proyecto, un compromiso. Cualquiera de estos dos aspectos no puede existir sin el otro. Entropía en su máxima expresión.

Y es justo en este vórtice, donde emergen con más fuerza que nunca las personas que hacen de pilares maestros de mi vida, aquellas que me sustentan. A ellas, debo agradecerles especialmente este momento.

A mi mujer, Isabel, por todo, en general y, especialmente, por sacar siempre lo mejor de mi mismo y no dejar nunca que me rindiera. A mis hijos, José Luis, Isabel y Teo, por ser la razón de casi todo. Siempre me he esforzado mucho por ser un ejemplo para ellos.

A mi madre, que me enseñó la importancia del esfuerzo y el sacrificio para ser mejor persona. Le hubiera encantado compartir este instante con nosotros.

A los amigos y familiares que siempre están a mi lado y que hacen que siempre me sienta querido y apoyado.

A Mariano, por confiar en mi para formar parte de su equipo y realizar esta tesis doctoral y por inspirarme permanentemente, en lo profesional y en lo personal. A Manolo, por su continuo respaldo, por su infinita ayuda y por hacer posible que esta tesis llegara a buen puerto.

Resumen

La Realidad Virtual (RV) se ha venido mostrando como un medio emergente y transgresor desde hace décadas. Aunque actualmente continúa su calmado pero imparable ascenso, sigue sin constituir una plataforma masiva, al contrario de lo que ocurre con otros dispositivos como las consolas o los teléfonos móviles.

En cualquier caso, su enorme potencial para generar emociones en los usuarios a través de una exposición sensorial más intensa y profunda, se ha explotado especialmente en algunos sectores, como el de la educación y la formación o el de la salud, entre otros.

Una vez que los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de dispositivos de Realidad Virtual con una alta calidad visual y a un precio asequible, nos encontramos frente a un escenario propicio para su difusión masiva. Actualmente, con más de seis millones de cascos de Realidad Virtual (HMD de sus siglas en inglés, Head Mounted Display) vendidos a lo largo del mundo, el desafío principal reside en la creación de contenidos. Al igual que ha sucedido con otras tecnologías comunicativas, como el cine o la televisión, a partir de este momento deberán ser la creatividad y el diseño las que potencien la consolidación de la RV.

La revisión del estado del arte muestra que son factores como la presencia (la sensación de estar *realmente ahí*, dentro del entorno virtual) o la comodidad (el no sufrir cibermareos, o *cybersickness* siguiendo la terminología inglesa, mientras se usa un dispositivo de RV) los que hacen que una experiencia de RV basada en HMD sea más o menos satisfactoria. Del mismo modo, extra-

polando a ámbitos específicos, como el educativo, también se muestran como determinantes a la hora de originar aprendizajes más profundos y persistentes.

Esta investigación tiene como objetivos estudiar como diferentes decisiones relativas al diseño de interacción pueden influir en la experiencia que los usuarios tengan dentro del entorno virtual, aumentando o disminuyendo su comodidad, su sensación de presencia, etc...

Para ello, poniendo el foco en una de las interacciones más relevantes, la navegación, se evalúa por primera vez las implicaciones de dos metáforas distintas a través de las tres dimensiones de la presencia: la subjetiva, la conductual y la fisiológica.

Adicionalmente, se detallan tanto un flujo de trabajo como dos herramientas software destinadas a recoger, tratar y visualizar los datos de interacción de un usuario dentro de un entorno de Realidad Virtual. La principal novedad recae en la utilización de un Sistema de Información Geográfico para el apartado de visualización, el cual proporciona una flexibilidad sin precedentes para analizar comportamientos y conductas.

Por último, se presenta una breve guía de diseño de entornos gamificados de aprendizaje en RV basados en la teoría de la cognición corporizada, con el objetivo de ayudar a diseñadores y desarrolladores a la hora de construir las experiencias de aprendizaje del futuro.

Abstract

Virtual Reality (VR) has been showing itself as an emerging and transgressive medium for decades. Although currently continues its calm but unstoppable rise, it still does not constitute a massive platform, contrary to what happens with other devices such as consoles or mobile phones.

In any case, its enormous potential to generate emotions in users through a more intense and profound sensory exposure, has been exploited especially in some sectors, such as education and training or health, among others.

Once the technological advances have allowed the development of Virtual Reality devices with high visual quality and at an affordable price, we are faced with a propitious scenario for its mass diffusion. Currently, with more than six million Virtual Reality headsets, (Head Mounted Display) sold throughout the world, the main challenge lies in content creation. As has happened with other communication technologies, such as film or television, from this moment on, creativity and design should be the ones that enhance the consolidation of the RV.

The review of the state of the art shows that they are factors such as presence (the feeling of being *really there*, within the virtual environment) or comfort (not suffering from cybersickness while using an RV device) which make a VR experience based on HMD more or less satisfactory. Similarly, extrapolating to specific areas, such as education, they are also shown as determining factors when it comes to creating deeper and more persistent learning.

This research aims to study how different decisions related to interaction design can influence the experience that users have within the virtual environment, increasing or decreasing their comfort, their sense of presence, etc ...

To do this, focusing on one of the most relevant interactions, navigation, the implications of two different metaphors are evaluated for the first time through the three dimensions of presence: subjective, behavioral and physiological.

Additionally, both a workflow and two software tools designed to collect, process and visualize user interaction data within a Virtual Reality environment are detailed. The main novelty lies in the use of a Geographic Information System for the visualization section, which provided unprecedented flexibility to analyze behaviors and behaviors.

Finally, a brief guide to the design of gamified learning environments in VR based on the theory of embodied cognition is presented, with the aim of helping designers and developers in building the learning experiences of the future.

Resum

La Realitat Virtual (RV) s'ha vingut mostrant com un mitjà emergent i transgressor des de fa dècades. Encara que actualment continua el seu calmat però imparabile ascens, segueix sense constituir una plataforma massiva, al contrari del que ocorre amb uns altres dispositius com les consoles o els telèfons mòbils.

En qualsevol cas, el seu enorme potencial per a generar emocions en els usuaris a través d'una exposició sensorial més intensa i profunda, s'ha explotat especialment en alguns sectors, com el de l'educació i la formació o el de la salut, entre altres.

Una vegada que els avanços tecnològics han permès el desenvolupament de dispositius de Realitat Virtual amb una alta qualitat visual i a un preu assequible, ens trobem enfront d'un escenari propici per a la seua difusió massiva. Actualment, amb més de sis milions de cascos de Realitat Virtual (HMD de les seues sigles en anglés, Head Mounted Display) venuts al llarg del món, el desafiament principal resideix en la creació de continguts. Igual que ha succeït amb altres tecnologies comunicatives, com el cinema o la televisió, a partir d'aquest moment hauran de ser la creativitat i el disseny les que potencien la consolidació de la RV.

La revisió de l'estat de l'art mostra que són factors com la presència (la sensació d'estar *realment ací*, dins de l'entorn virtual) o la comoditat (el no patir cibermaretjos, o *cybersickness* seguint la terminologia anglesa, mentre s'usa un dispositiu de RV) els que fan que una experiència de RV basada en HMD siga més o menys satisfactòria. De la mateixa manera, extrapolant a àmbits especí-

tics, com l'educatiu, també es mostren com a determinants a l'hora d'originar aprenentatges més profunds i persistents.

Aquesta investigació té com a objectius estudiar com a diferents decisions relatives al disseny d'interacció poden influir en l'experiència que els usuaris tinguen dins de l'entorn virtual, augmentant o disminuint la seua comoditat, la seua sensació de presència, etc...

Per a això, posant el focus en una de les interaccions més rellevants, la navegació, s'avalua per primera vegada les implicacions de dues metàfores diferents a través de les tres dimensions de la presència: la subjectiva, la conductual i la fisiològica.

Adicionalment, es detallen tant un flux de treball com dues eines programari destinades a recollir, tractar i visualitzar les dades d'interacció d'un usuari dins d'un entorn de Realitat Virtual. La principal novetat recau en la utilització d'un Sistema d'Informació Geogràfic per a l'apartat de visualització, el qual proporciona una flexibilitat sense precedents per a analitzar comportaments i conductes.

Finalment, es presenta una breu guia de disseny d'entorns ludificats d'aprenentatge en RV basats en la teoria de la cognició corporitzada, amb l'objectiu d'ajudar a dissenyadors i desenvolupadors a l'hora de construir les experiències d'aprenentatge del futur.

Publicaciones relacionadas

Los siguientes artículos han sido publicados (o se encuentran actualmente en proceso de revisión) como resultado de esta investigación doctoral.

Artículos de Revista

- Soler-Domínguez, J.L., De Juan Ripoll, C., Alcáñiz, M. & Contero, M. (2020). I walk, therefore I am: A multidimensional study on the influence of the locomotion method upon presence in virtual reality. *Journal of Computational Design and Engineering*. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa040> (SJR Q1)
- De Juan Ripoll, C., Soler Domínguez, J. L., Contero, M. & Alcañiz, M. (2019) The Spheres Shield Maze Task (SSMT): A virtual reality serious game for the assessment of risk taking in decision-making. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*. (Under review)
- Soler-Domínguez, J. L., Contero, M., & Alcañiz, M. (2019). Workflow and tool to track and visualize behavioural data from a Virtual Reality environment using a lightweight GIS. *SoftwareX*, 10, 100269. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.100269> (SJR Q1)
- Soler-Domínguez, J.L., De Juan Ripoll, C., Alcañiz, M. & Contero, M. (2019). Influencia de la metáfora de navegación en el aprendizaje dentro de un entorno de realidad virtual. *Comunicación & Pedagogía, n° Especial Aumentame EDU 2019*. (Dialnet Q3)

-
- De Juan Ripoll, C., Soler Domínguez, J. L., Guixeres Provinciale, J., Contero González, M., Álvarez Gutiérrez, N., Raya, A., & Alcañiz, M. (2018). Virtual Reality as a new approach for risk taking assessment. *Frontiers in psychology*, 9, 2532. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02532> (JCR Q1)
 - Soler-Domínguez, J.L., Alcañiz, M. & Contero, M. (2018). Aprendizaje en realidad virtual. Factores de diseño instruccional a partir de un recorrido por la relación de la estereoscopía y la personificación con la educación y la formación. *Comunicación & Pedagogía*, nº Especial Aumentame EDU 2018, 10-15. (Dialnet Q3)

Actas de Conferencia

- Soler-Dominguez, J. L., & Gonzalez, C. (2020, February). Fog of Story: Design, implementation and evaluation of a post-processing technique to guide users' point of view in cinematic Virtual Reality (cVR) experiences. En GRAPP2020, 15th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications.
- Soler-Dominguez J.L., De-Juan-Ripoll C., Camba J.D., Contero M., & Alcañiz M. (2019) Gaming Background Influence on VR Performance and Comfort: A Study Using Different Navigation Metaphors. In: Antona M., Stephanidis C. (eds) Universal Access in Human-Computer Interaction. Theory, Methods and Tools. HCII 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11572. Springer, Cham
- Soler, J. L., Ferreira, J., Contero, M., & Alcañiz, M. (2017). The power of sight: using eye tracking to assess learning experience (LX) in virtual reality environments. En INTED2017 proceedings, 8684-8689.
- Soler, J. L., Contero, M., & Alcañiz, M. (2017, November). VR serious game design based on embodied cognition theory. En Joint International Conference on Serious Games (pp. 12-21). Springer, Cham.
- Soler-Dominguez, J. L., Camba, J. D., Contero, M., & Alcañiz, M. (2017, July). A proposal for the selection of eye-tracking metrics for the implementation of adaptive gameplay in virtual reality based games. In International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality (pp. 369-380). Springer, Cham.

-
- Soler-Dominguez, J. L., Contero González, M., & Alcaniz, M. (2017). Press start!: Cinco estrategias para el despliegue efectivo del Aprendizaje Basado en Videojuegos. en CIVE2017.
 - Ferreira, J., Soler, J. L. & Contero, M. (2017) Análisis de la aplicación de la tecnología de Realidad Virtual en la formación para la prevención de riesgos laborales. Actas del XXI Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos (Cádiz, 2017)
 - Ferreira, J., Soler, J. L., Contero, M., & Alcañiz, M. (2017). Educational Application of Vr in Safety. INTED2017 - Poster.

Capítulos de Libro

- Olmos, E., Cavalcanti, J. F., Soler, J. L., Contero, M., & Alcañiz, M. (2018). Mobile virtual reality: A promising technology to change the way we learn and teach. In Mobile and ubiquitous learning (pp. 95-106). Springer, Singapore.

Índice general

Resumen	II
Índice general	XIII
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Alcance de la investigación	6
1.4 Contribución al conocimiento	7
1.5 Metodología de investigación	8
1.6 Estructura de la tesis	9
2 Revisión bibliográfica	13
2.1 Introducción	13
2.2 Evolución de la Realidad Virtual como medio de enseñanza-aprendizaje	14
2.2.1 Estereoscopia y aprendizaje: Los albores de la Realidad Virtual	15
2.2.2 El papel de una incipiente Realidad Virtual en educación y formación	17
2.2.3 Desarrollo tecnológico y búsqueda de un modelo pedagógico propio.	19

2.3	La presencia como factor clave de la experiencia de usuario en Realidad Virtual	21
2.3.1	La presencia como ausencia de mediación	23
2.3.2	La presencia como estar allí	24
2.3.3	Cuantificando la presencia: métricas previas y actuales	24
2.3.4	Medición subjetiva de la presencia	25
2.3.5	Medición conductual de la presencia	27
2.3.6	Medición fisiológica de la presencia	27
2.3.7	Interacción Hombre-Máquina en Realidad Virtual	28
2.3.8	Locomoción en Realidad Virtual	29
2.3.9	Métodos más comunes de navegación	30
2.3.9.1.	Locomoción automática	31
2.3.9.2.	Teletransporte de destino fijo	31
2.3.9.3.	Teletransporte libre	31
2.3.9.4.	Locomoción indirecta	31
2.3.9.5.	Andar en el sitio	32
2.3.9.6.	Máquina de pasos (stepper, en inglés)	32
2.3.9.7.	Andar redirigidamente	33
2.3.9.8.	Andar realmente	33
2.3.10	Bases de la relación entre locomoción y presencia	35
2.4	Comparaciones previas de diversas técnicas de navegación.	36
2.4.1	Métricas para la sensación de presencia	42
2.4.1.1.	Presencia subjetiva	42
2.4.1.2.	Presencia conductual	47
2.4.1.3.	Presencia psico-fisiológica	48
2.4.2	Relación entre la metáfora de navegación y la presencia	48
2.4.3	Conclusiones	50

3 Metáforas de navegación y experiencia de usuario en un entorno de RV 51

3.1	Introducción	51
-----	--------------	----

3.2 Metodología	52
3.2.1 El entorno virtual	52
3.2.2 Métricas	55
3.2.3 Detalles Hardware y Software	56
3.2.4 El procedimiento experimental	57
3.2.4.1. Fase 1: Cuestionarios pre-experimento	57
3.2.4.2. Fase 2: Experiencia en Realidad Virtual	57
3.2.5 Determinación del tamaño de la muestra	58
3.2.6 Las técnicas de locomoción	60
3.2.7 Las métricas en detalle	61
3.2.7.1. Presencia subjetiva	61
3.2.7.2. Presencia conductual	62
3.2.7.3. Presencia fisiológica	62
3.3 Resultados	63
3.3.1 Descripción de la muestra	63
3.3.2 Presencia subjetiva	63
3.3.3 Presencia conductual	65
3.3.4 Presencia fisiológica	66
3.3.4.1. Nivel de Conductancia de la Piel (SCL)	66
3.3.4.2. Respuesta de Conductancia de la Piel (SCR)	67
3.3.4.3. Efectos colaterales de la medición de la GSR	68
3.3.5 Matriz de correlaciones	69
3.4 Conclusiones	70
4 Registro y visualización de la actividad de los usuarios en un entorno Realidad Virtual	75
4.1 Introducción	75
4.2 Motivación y relevancia	76
4.3 Trabajos previos	78
4.4 Descripción del software	78
4.4.1 Arquitectura del software	79

4.4.2 Funcionalidades del software	79
4.4.2.1. Seguimiento de la navegación (<i>Navigation tracker</i>)	79
4.4.2.2. Cargando los datos en el SIG	81
4.5 Ejemplos ilustrativos	86
4.6 Validación.	89
4.7 Aplicación práctica: Análisis de recorridos en función de la metáfora de navegación (experimento Capítulo 3)	89
4.8 Conclusiones	91
5 Guías de diseño de experiencias de aprendizaje en Realidad Virtual basadas en la cognición corporizada	93
5.1 Introducción	93
5.2 Juegos serios en Realidad Virtual	94
5.3 Consejos para el diseño de interacción basados en la teoría de la Cognición Corporizada (CC)	96
5.4 Consejos para el diseño de interacción basados en la sensación de agencia y la corporización	98
5.5 Conclusiones	100
6 Hallazgos, conclusiones y trabajo futuro	101
6.1 Introducción	101
6.2 Resumen de logros	102
6.3 Contribución al conocimiento	104
6.3.1 Correlación entre la presencia subjetiva, la conductual y la fisiológica	105
6.3.2 Impacto de la metáfora de navegación en la experiencia de usuario en RV.	105
6.3.3 Flujo de trabajo y herramientas para la recogida y visualización de datos de interacción en RV.	106
6.3.4 Guía de diseño de interacción para experiencias de aprendizaje en RV	107
6.4 Resumen de hallazgos	107
6.5 Conclusiones	110
6.6 Limitaciones	111
6.7 Trabajo futuro.	112

Bibliografía	115
Índice alfabético	137
A Formulario ITC-SOPI en castellano	137
B Scripts y archivos auxiliares capítulo 4	141
B.1 BehavioralDataTracker.cs	141
B.2 Fichero XML con el que se recogen los datos relativos a la locomoción	145
B.3 Index.html	152
B.4 Code.js	152

Índice de figuras

1.1. Visor de fotografías estereoscópicas (alrededor del 1850)	2
1.2. HMD Oculus Quest con sensores de posición integrados (2018)	2
2.1. Sensorama, de Morton Heilig	14
2.2. Dibujos estereoscópicos de Jacopo Chimenti, s.XIV-XV	16
2.3. Estereoscopio de Wheatstone, basado en espejos (1838)	16
2.4. Fotografía aérea estereoscópica de la ciudad polaca de Stettin, 1943.	17
2.5. I. Sutherland probando su HMD, 1966.	18
2.6. Espectadores y actores de Sleep no More en Broadway, NY, USA.	22
2.7. Mandos de RV más extendidos: HTC Vive y Oculus Touch	30
2.8. Máquina de pasos, similar a una bicicleta elíptica.	32
2.9. Nintendo Wii (®)Balance Board	32
2.10. Clasificación bidimensional de los métodos de locomoción	34
2.11. Tabla resumen artículos clave.	38

2.12. Tabla resumen condiciones experimentales artículos.	39
3.1. Laberinto (vista cenital)	54
3.2. Sala de entrenamiento (vista cenital)	55
3.3. Pulsera Empatica E4	56
3.4. Estimación del tamaño de la muestra por Cornish[46])	60
3.5. Tipos de locomoción, por Boletsis et al. [18]	60
3.6. Resumen valores presencia conductual	65
3.7. Resumen valores presencia fisiológica	67
3.8. Evolución en el tiempo (eje x, en segundos) de la SCL (eje y, en μ S) para la metáfora del caminar indirecto (<i>touchpad</i>)	69
3.9. Evolución en el tiempo (eje x, en segundos) de la SCL (eje y, en μ S) para la metáfora del caminar en el sitio (<i>head bobbing</i>)	69
3.10. Tabla de correlaciones.	71
4.1. Diagrama de la arquitectura de la solución propuesta	79
4.2. Vista cenital de la escena del laberinto.	82
4.3. Archivo index.html	83
4.4. Declaración y creación del mapa	84
4.5. Declaración de las variables	84
4.6. Función de transformación a coordenadas.	85
4.7. Procesando los ficheros XML con AJAX de JQuery.	85
4.8. Mapa interactivo con los movimientos representados con marcadores.	86
4.9. Declaración de heatLayer (mapa de calor) en code.js	87
4.10. Capa de mapa de calor.	87
4.11. Diagrama esquemático del flujo de trabajo completo.	88

4.12. Recorridos consolidados utilizando la metáfora de caminar en el sitio	91
4.13. Recorridos consolidados utilizando la metáfora del caminar indirecto	91

Índice de tablas

3.1. MEDIAS Y DESVIACIONES ESTÁNDAR DEL CUESTIO- NARIO ITC-SOPI	64
--	----

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se recopila y expone a alto nivel el trabajo desarrollado en la Tesis. De manera complementaria, se describen los objetivos perseguidos así como los desafíos que los originaron. Del mismo modo, se explica el contexto que rodea a esta investigación así como el ámbito al que se circunscribe, haciendo hincapié en la aportación al conocimiento nacida de la misma. Adicionalmente, se detalla la metodología de investigación seguida a la hora de alcanzar los objetivos propuestos y, por último, se incluye un esquema general de la estructura de esta Tesis.

1.1 Contexto

La Realidad Virtual (RV) ha sido, durante décadas, fuente de inspiración y especulación, a partes iguales, a la hora de pensar en sus posibles aplicaciones presentes y futuras. La recreación sintética de la realidad (entendida desde un punto de vista sensorial y cognitivo, aquello que nuestra mente y nuestro cuerpo consideran real) ha constituido una perenne aspiración a lo largo de la historia. Desde las primeras investigaciones del filósofo griego Demócrito de Abdera (siglo IV a.C.) acerca de la percepción como acto subjetivo [56] debido a la interacción “entre los átomos de los efluvios emitidos por la cosa percibida y los átomos del receptor”, la recreación *sólida*¹ de la realidad para su uso atemporal y ubicuo se ha convertido en un desafío para la humanidad.

¹Del griego *stereos*, que significa sólido y se utilizaba como sinónimo de real.

Si dividiéramos la evolución de la RV en dos grandes bloques, nos encontraríamos con una distribución asimétrica, basada en los objetivos perseguidos y con el eje temporal drásticamente desplazado al presente. En un primer período, el cual abarcaría desde el siglo XIX hasta 2015, nos encontraríamos numerosas investigaciones centradas en la tecnología. Desde las primeras ilustraciones y fotografías estereoscópicas, con imágenes más reales que las simples representaciones bidimensionales tradicionales[209, 81, 52, 11] hasta el lanzamiento global del casco de Realidad Virtual (HMD, de las siglas en inglés Head Mounted Display) Oculus Rift DK1 [54], el objetivo era superar la barrera tecnológica de una representación fiel de la realidad, un sistema de interacción adecuado y un entorno de desarrollo versátil y asequible.



Figura 1.1: Visor de fotografías estereoscópicas (alrededor del 1850)



Figura 1.2: HMD Oculus Quest con sensores de posición integrados (2018)

En el segundo bloque, desde 2016 en adelante, el foco está puesto en el diseño de las experiencias en Realidad Virtual. Una vez disponemos de HMD portátiles, potentes y asequibles, el objetivo principal es la creación de entornos y experiencias virtuales que permitan al usuario sentirse *realmente allí*. Es por ello que las investigaciones actuales se centran en los factores de diseño que permiten alcanzar este objetivo así como en las métricas psico-cognitivas que permiten apreciar de una manera empírica ese grado de realidad percibido.

Tradicionalmente, el término Realidad Virtual se ha venido utilizando sin ambages para hacer referencia a entornos muy dispares, tanto desde un punto de vista tecnológico como del diseño de interacción: desde los entornos en tres dimensiones (3D) multi-usuario en escritorio (como Second Life o el MMORPG, Juego Masivo de Rol On-line, de sus siglas en Inglés Massive Multiplayer Online Role Playing Game, World of Warcraft) a sistemas CAVE (de sus siglas en inglés, Cave Automatic Virtual Environments) que son habitaciones donde las paredes y/o el suelo son pantallas. Esta heterogénea definición de sistemas tiene como punto de encuentro un concepto fundamental: la presencia.

El concepto de presencia, derivado del original *telepresencia*, engloba un constructo psico-cognitivo que representa la sensación “de estar ahí”, dentro del entorno virtual. Esta sensación ha sido objeto de estudio intensivo en las últimas décadas[191, 182, 170, 158, 25, 53, 33] ya que se muestra como el elemento diferencial de la RV frente a los otros medios.

Y es precisamente ese efecto de la Realidad Virtual el que la convierte en un entorno con un potencial enorme para el aprendizaje.

El papel de la presencia, de sentirse realmente dentro del entorno virtual asienta su potencial en el ámbito de la educación en dos pilares fundamentales:

- Emociones y motivación intrínseca: Aprender requiere de esfuerzo y es por esto que los seres humanos, por lo general, necesitan de un motivo o motivos para afrontar el proceso[151]. Profundizando en el origen de la motivación intrínseca, podemos concluir que las emociones son el motor de la motivación[130, 32] y que la RV es, intrínsecamente, un medio emocional[4]. En investigaciones previas, ha quedado patente la correlación entre presencia y emociones[160].
- Viveza de la experiencia y transferibilidad: Adicionalmente, una mayor presencia implica mayor viveza de la experiencia virtual y, por tanto, permitiría obtener reacciones de los sujetos muy próximas a las que se originarían en la vida real[212, 131] y por tanto, los aprendizajes tendrían una transferibilidad al mundo real mucho más alta[115].

La motivación de este trabajo es avanzar en el conocimiento de esos factores de diseño que hacen que las experiencias interactivas en RV sean “más reales”, esto es, que maximicen la presencia, de modo que sea posible explotar al máximo las capacidades de estas tecnologías a la hora de aplicarlas a distintos ámbitos, especialmente a los de la educación y la formación.

1.2 Objetivos

En el presente trabajo de Tesis, se pretende avanzar en el conocimiento acerca de como los distintos métodos de interacción dentro de un entorno de Realidad Virtual influyen en la experiencia de usuario en general y de la presencia en particular, como elemento más relevante de la citada experiencia. Adicionalmente, se persigue el establecer unas líneas base en el diseño de interacción que sirvan de apoyo a los creadores de espacios virtuales dedicados a la educación.

Por último y como elemento colateral, se quieren evaluar las métricas más utilizadas tradicionalmente a la hora de cuantificar y visualizar la experiencia de usuario en RV.

La hipótesis general puede sintetizarse como: “El adecuado diseño de interacción para un entorno virtual dedicado al aprendizaje influye positivamente en la experiencia de usuario de forma general y en particular a su elemento nuclear, la sensación de presencia, mejorando el aprendizaje significativo, la motivación intrínseca y la transferibilidad de las competencias adquiridas.”

Detallando los objetivos principales, obtendríamos el siguiente resumen:

1. Examinar la función de la presencia como elemento diferencial de los entornos de Realidad Virtual enfocados al aprendizaje.
2. Evaluar las métricas utilizadas tradicionalmente para cuantificar la sensación de presencia en entornos de Realidad Virtual y establecer, por primera vez, correlaciones entre ellas.
3. Crear un entorno experimental en RV con elementos de gamificación orientado a la evaluación de la experiencia de usuario, reutilizable por otros investigadores.
4. Desarrollar herramientas software automáticas para recoger el comportamiento de los usuarios dentro de un entorno virtual con el fin de su análisis post-experimental.
5. Desarrollar herramientas de visualización para datos masivos correspondientes al comportamiento de los individuos en un entorno de RV recogidos en los experimentos.
6. Examinar la influencia de la interacción más representativa, la navegación, dentro de un entorno de Realidad Virtual sobre la experiencia de usuario (disgregada en 2 factores: comodidad y presencia, esta última en sus tres variantes, subjetiva, conductual y fisiológica).
7. Crear un guía de diseño de interacción con recomendaciones para los diseñadores de sistemas de Realidad Virtual orientados al aprendizaje con el objetivo de potenciar la presencia.

Estos objetivos se enmarcan dentro de un objetivo estratégico de la Comisión Europea dentro del ámbito de la aplicación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación a diferentes sectores sociales. Concretamente, podemos

encontrar en el gran programa marco europeo de inversión en investigación e innovación, el programa Horizon2020, como dentro de la línea H2020-EU.2.1.1. - LIDERAZGO INDUSTRIAL - Liderazgo en tecnologías industriales y de capacitación - Tecnologías de la información y la comunicación (TIC), se encuentra un apartado específico dedicado a este ámbito: ICT-24-2016 - Juegos y gamificación, en el segundo programa de trabajo (2016-2017)[43]. Bajo este paraguas, se ubica el objetivo específico:

”...de transferencia de tecnología a través de experimentos a pequeña escala sobre el desarrollo y la validación de tecnologías y mecánicas de juegos abiertos, incluidos sectores distintos de la industria del juego, en situaciones y escenarios no relacionados con el ocio con fines de formación y motivación. Las acciones integrarán contribuciones de desarrolladores de juegos, investigadores de disciplinas de ciencias sociales y humanidades, editores, intermediarios educativos y usuarios finales. Las actividades incluirán trabajo en tecnologías de juego (realidad aumentada y mixta, audio y video 3D, mundos virtuales, narración interactiva, narrativas, modelado y datos, etc.), desencadenadores de aprendizaje y comportamiento (efectividad pedagógica, compromiso, creatividad, comportamientos colaborativos, proactivo) y aspectos de ciencias sociales (riesgos y desafíos potenciales, privacidad, cuestiones de género y éticas, etc.).

Del mismo modo, en el prestigioso informe anual *Innovating Pedagogy* de la Open University de Reino Unido, en su última edición[59], cita la Realidad Virtual aplicada a la educación y los escenarios virtuales como elementos clave para la motivación y el aprendizaje significativo en los distintos escenarios de aprendizaje, tanto para niños como para adultos.

Por este motivo, consideramos que la Realidad Virtual sigue representando un medio con enorme potencial pedagógico pero que requiere todavía de mayor respaldo investigador para crear contenidos efectivos y facilitar su despliegue masivo.

1.3 Alcance de la investigación

El estudio de la experiencia de usuario en Realidad Virtual representa un ámbito extremadamente amplio e incluye multitud de subtemas. Por una parte nos encontramos con los elementos relacionados con la tecnología propiamente dicha, por otra con la respuesta de los usuarios derivada de la exposición a dicha tecnología y por último, con los aspectos metodológicos de la recogida e interpretación de datos relacionados con la citada experiencia de usuario.

En estas tres áreas, el alcance de esta tesis ha estado firmemente acotado atendiendo a los siguientes criterios:

- **Tecnología:** Atendiendo a la clasificación expuesta en las tesis de Slater y Wilbur[185], en esta investigación no entramos en el campo de la inmersión (relativo a las cualidades del sistema tecnológico detrás de la experiencia en RV). Por ese motivo, todas las investigaciones aparejadas a esta tesis se basan en gafas de realidad virtual, conocidas como HMD (de sus siglas en inglés, *Head Mounted Display*), al estilo de las Oculus Rift o las HTC Vive, con seguimiento (del inglés *tracking*) a nivel de habitación. Se han descartado el resto de sistemas de RV, como por ejemplo los basados en tecnologías CAVE (de sus siglas en inglés, *Cave Assisted Virtual Environment*) que son habitaciones donde a través de pantallas o proyectores, se crea un entorno inmersivo. También se han descartado aquellos sistemas con 2 grados de libertad, centrando la investigación en sistemas con seguimiento a nivel de habitación (del inglés *room scale tracking*) ya que permiten desplazamientos tridimensionales y permiten interacciones más naturales.
- **Métricas para la interpretación de la experiencia de usuario:** En el proceso de medir la experiencia de usuario, nos hemos focalizado en los indicadores correspondientes a presencia, comodidad y rendimiento, dejando de lado aspectos como el *engagement*, el *flow* o la diversión aún entendiendo y compartiendo su potencial a la hora de cualificar la experiencia virtual. Esta criba sobre las métricas más habituales en sistemas de RV se basa en la elección de aquellas características que, a priori, más relevancia tienen sobre la experiencia de aprendizaje. De estas métricas es la de la presencia la que más complejidad conlleva y sobre ella, hemos trabajado desde un enfoque multidimensional: a) Se han utilizado cuestionarios para medir la presencia subjetiva; b) Se han registrado y etiquetado reacciones para medir la presencia conductual; c) Se ha utilizado la Actividad Electro-Dérmica (EDA, de sus siglas en inglés *Electro-Dermal Activity*) para medir la presencia fisiológica. En este último punto, se

descartaron otras métricas fisiológicas como el *eye-tracking* (seguimiento de la mirada de los usuarios) por su complejidad instrumental pero, en un futuro cercano, con una tecnología más madura, será una métrica interesante para este ámbito.

- **Recogida e interpretación de datos relacionados con la experiencia de usuario:** A la hora de recoger datos relativos a la experiencia de usuario dentro de los entornos virtuales, nos centramos en crear herramientas automatizadas para registrar las distintas interacciones que se producen en los experimentos así como en un sistema de visualización adecuado para entender espacialmente la actividad de los usuarios para su post-análisis. No pretendíamos generar un *framework* generalista para el análisis de la experiencia de usuario sino un *plug-in* reutilizable por otros investigadores para recoger datos en sus propios entornos.

1.4 Contribución al conocimiento

Desarrollar entornos educativos en Realidad Virtual requiere tomar muchas decisiones de diseño, en ámbitos muy diferentes; desde el diseño instruccional al diseño de interacción pasando por la dirección artística en 3D o el diseño narrativo. En este sentido, muchas de las decisiones de diseño se toman en base a experiencias previas en otros medios más que en fundamentos empíricos recogidos de la experiencia de usuario en Realidad Virtual. Esta investigación pretende arrojar luz sobre estas decisiones de diseño a partir de la evidencia experimental, particularmente sobre el diseño de interacción. Para ello, se evaluarán las implicaciones del diseño de interacción en la experiencia de usuario, especialmente en aquellos factores que mayor influencia han mostrado en entornos virtuales orientados a la educación y la formación: comodidad, rendimiento y, fundamentalmente, presencia.

El estudio de la presencia ha recibido mucha atención a lo largo de las últimas décadas, motivada mayoritariamente por su papel clave a la hora de diferenciar la Realidad Virtual de otros medios. Esta investigación previa ha venido siendo enfocada desde diferentes y variadas perspectivas, construyendo silos de conocimientos disgregados. Esta tesis pretende unificar las visiones más relevantes acerca de la presencia con el objetivo de obtener una visión integradora y sentar las bases para una investigación más productiva y aplicada. Para ello, por primera vez, se utilizarán métricas para la presencia provenientes de las tres aproximaciones más extendidas: la presencia subjetiva, la presencia conductual y la presencia fisiológica. Combinando estas tres métricas se establecerán

nuevas relaciones entre ellas, proporcionando un marco de trabajo más claro para futuras investigaciones.

Adicionalmente, con el objetivo de avanzar en el estudio de la experiencia de usuario en Realidad Virtual, se desarrollarán dos herramientas de gran interés para cualquier investigador: una destinada a recoger las interacciones que se producen en un entorno de Realidad Virtual y otra orientada a visualizar las citadas interacciones en un Sistema de Información Geográfico (GIS, de sus siglas en inglés, *Geographic Information System*).

Por último y tomando como base las evidencias obtenidas en los experimentos realizados, se establecerán unas guías de diseño de interacción útiles para todos aquellos dedicados al diseño y desarrollo de experiencias de aprendizaje en Realidad Virtual.

Tanto las herramientas software desarrolladas como los flujos de trabajo descritos así como los datos generados y recogidos a lo largo de los distintos experimentos están a disposición de la comunidad científica, como código abierto, de modo que sirvan de base para futuras investigaciones orientadas a profundizar en la relación entre interacción, presencia y aprendizaje.

1.5 Metodología de investigación

Esta sección ofrece una perspectiva general de los métodos de investigación empleados en esta tesis. Podemos afirmar que, a grandes rasgos, la metodología seguida se divide en dos etapas principales: la definición del problema de investigación (a través de la revisión bibliográfica) y la validación de hipótesis (a partir de datos obtenidos experimentalmente).

La revisión bibliográfica se centrará en como las distintas maneras de interactuar (de modo particular, el método de navegación) en un entorno de Realidad Virtual afectan a la experiencia de usuario, especialmente a la sensación de presencia. Dentro de este análisis, se hará especial hincapié en las métricas empleadas a la hora de medir la presencia así como en la implementación de los propios métodos de navegación para intentar aislar la influencia directa de la metáfora de navegación sobre la sensación de presencia.

De este modo, se podrá comprender mejor la oportunidad de investigación remarcada en el objetivo 1) de la sección 1.2 de este mismo capítulo. Los objetivos 2) y 6) se afrontarán a partir de la recogida y análisis de datos empíricos mientras que los objetivos 3), 4) y 5) constituyen desarrollos propios

para automatizar y digitalizar la recogida, tratamiento y análisis de los datos experimentales. Por último, el objetivo 7) se derivará de los hallazgos obtenidos a partir de la consecución de los objetivos previos.

El núcleo de la tesis se basa en una metodología experimental, la cual sustenta los experimentos realizados con el objetivo de obtener información cuantitativa sobre conceptos que, en esencia, son cualitativos. El rendimiento, la comodidad o la presencia si son considerados subjetivos, muestran métricas poco robustas y, al tiempo, los métodos de medida son poco ecológicos. Es por esto, que uno de los objetivos subyacentes a los anteriormente expuestos, es buscar la objetividad en estas métricas y evaluar nuevos enfoques en el diseño de entornos experimentales, a través de la gamificación, por ejemplo, para obtener datos con altos niveles de validez, consistencia y ecología.

Todos los experimentos relatados en este documento de tesis han sido llevados a cabo en un entorno académico, con estudiantes de distintas titulaciones.

Los resultados de estos estudios se aplicarán, tal y como se recoge en el objetivo 7) para sentar las bases de diseño de interacción, especialmente del diseño e implementación de metáforas de navegación a la hora de construir entornos de Realidad Virtual orientados a la educación y el aprendizaje. Adicionalmente, uno de los objetivos adyacentes, era facilitar la futura investigación en el ámbito de la experiencia de usuario en entornos de Realidad Virtual, de modo que cada nuevo investigador dispongo de un entorno virtual y herramientas para la obtención y el procesamiento de los datos y no deba comenzar de cero su planteamiento experimental.

1.6 Estructura de la tesis

Este documento de tesis se divide en 6 capítulos:

- *Capítulo 1: Introducción*

Este capítulo recoge una panorámica de la intención primera de esta tesis así como de los objetivos detallados que se persiguen con ella. Se explica el contexto de la investigación así como los aspectos en los que se pretende avanzar en el conocimiento. Adicionalmente, se explicita de un modo general la metodología de investigación empleada y los principales hallazgos que se esperan.

- *Capítulo 2: Revisión bibliográfica*

Este capítulo proporciona un análisis de los estudios relevantes para el tema de esta tesis realizados con anterioridad. A partir de este análisis, se identifican los ámbitos con potencial de investigación en la intersección entre diseño de interacción, aprendizaje y presencia. Se han revisado las siguientes áreas: educación y formación en Realidad Virtual, teorías de aprendizaje en Realidad Virtual, experiencia de usuario en Realidad Virtual, navegación en Realidad Virtual, presencia (origen y métricas) e influencia entre navegación y presencia.

- *Capítulo 3: Metáforas de navegación y experiencia de usuario en un entorno de RV*

En este tercer capítulo, se revisa la definición de experiencia de usuario en RV a través del concepto de presencia. A lo largo de este capítulo, se entra en profundidad a estudiar las distintas metáforas de navegación que se vienen implementando en Realidad Virtual y sus implicaciones en la experiencia de usuario, especialmente en la presencia. Se describen también su implementación, tanto software como hardware y las connotaciones psico-cognitivas sobre los usuarios. En último lugar, se muestran los resultados empíricos de un experimento orientado a evaluar la relación entre metáfora de navegación y presencia.

- *Capítulo 4: Registro y visualización de la actividad de los usuarios en un entorno Realidad Virtual*

Este cuarto capítulo se centra en las herramientas desarrolladas para la obtención de datos relativos a las distintas interacciones de los usuarios dentro de un entorno de RV y la posterior visualización de los mismos. Estas herramientas software vienen acompañadas del código fuente bajo licencia Creative Commons *Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)*. Esto implica que puede ser compartido (copiado y redistribuido por cualquier medio y/o formato) y adaptado (modificado, transformado y servir de base a otros productos) bajo la obligación de mencionar a los autores y de incluir un link a la licencia CC correspondiente. También se describe el flujo de trabajo necesario para su utilización, de modo que cualquier otro investigador sea capaz de utilizarlas en sus propios experimentos.

- *Capítulo 5: Guías de diseño de experiencias de aprendizaje en Realidad Virtual basadas en la sensación de presencia y en el embodiment*

En este capítulo, se recogen y sintetizan los más relevantes hallazgos relatados en los capítulos anteriores y se ofrecen en forma de guía de diseño para la creación de espacios de Realidad Virtual orientados a la educación

y el aprendizaje. Se hace especial hincapié en aquellos aspectos relativos a la sensación de presencia y al *embodiment* por ser considerados los factores de mayor peso a la hora de favorecer la profundidad y transferibilidad de los aprendizajes.

- *Capítulo 6: Conclusiones y trabajo futuro*

En el último capítulo, se procede a resumir los resultados de esta tesis y a inferir tanto unas conclusiones como una discusión acerca de las limitaciones de la misma y de las futuras líneas de investigación derivadas de este estudio.

Revisión bibliográfica

2.1 Introducción

Este capítulo, tiene como objetivo prioritario el establecer el estado del arte de la Realidad Virtual aplicada a la educación y la formación así como analizar las áreas de intersección entre interacción, presencia y experiencia de usuario en RV.

La revisión bibliográfica comienza con un análisis sobre la historia y evolución del empleo de la Realidad Virtual con fines educativos y formativos, resaltando los aspectos que mayor potencial presentan a la hora de favorecer los aprendizajes y aquellos que muestran ciertas limitaciones. Adicionalmente, se recogen y diseccionan muchos de los trabajos previos realizados en el ámbito del estudio de la sensación de presencia: teorías acerca de su naturaleza, elementos que la propician o que la disminuyen, métricas para su cuantificación e implicaciones de la misma sobre la experiencia de usuario en Realidad Virtual.

Posteriormente, se ofrece una perspectiva de los métodos de interacción en Realidad Virtual, ofreciendo un marco teórico sobre el que apoyar cualquier investigación relacionada con el diseño de interacción en Realidad Virtual y en sus aplicaciones prácticas. En último lugar, bajando a mayor nivel de detalle, se examina el estado del arte de los métodos de navegación en RV, poniendo

el foco en las implicaciones de cada familia de metáforas en la experiencia de usuario y en el aprendizaje.

2.2 Evolución de la Realidad Virtual como medio de enseñanza-aprendizaje

Las tecnologías relacionadas con la Realidad Virtual (VR) se han venido desarrollando de forma continuada durante los últimos cincuenta años. Desde la Consola Unipersonal de Heiling, Sensorama[75], en 1962, considerada como la primera aplicación comercial de tecnología multimodal, hasta el desarrollo actual de sistemas de RV de bajo coste basados en teléfonos móviles o los HMD de alta resolución con seguimiento (del inglés, *tracking*) a escala de habitación, ha tenido lugar una profunda evolución, tanto tecnológica como en el diseño de las experiencias.

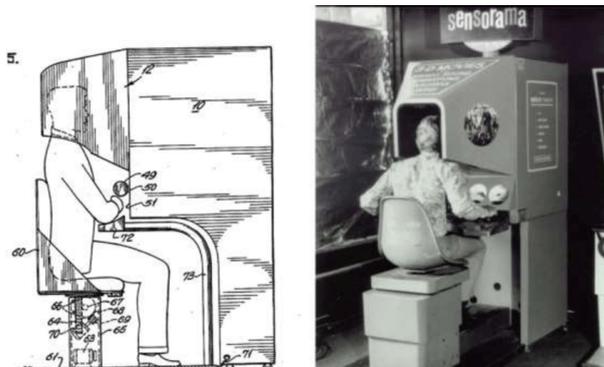


Figura 2.1: Sensorama, de Morton Heilig

Aún considerando que la citada multimodalidad del Sensorama contribuía a una experiencia más evocadora, las primeras aproximaciones a la RV aplicada al ámbito educativo se sustentaban principalmente en la visión, el sentido principal en este tipo de experiencias. En la Grecia clásica, donde los filósofos sentaron las bases de la ciencia moderna, se consideraba que las percepciones sensoriales como el oído o la vista se podían explicar a partir de la interacción entre los átomos (en griego, átomo significa inseparable) de los efluvios que emiten las cosas y los átomos del receptor. Eso justificaría la relatividad de las sensaciones[56]. Concretamente, es esa subjetividad de la percepción el sustento del antiguo anhelo de la humanidad de crear imágenes bidimensionales que engañen a nuestro cerebro para que perciba una tridimensionalidad que no es

tal. Es precisamente la tercera dimensión la que proporciona esa sensación de “solidez”, de que lo que vemos es real en base a que es creíble perceptivamente.

La tridimensionalidad de nuestra visión permite que percibamos la profundidad de un mundo construido sobre tres ejes de coordenadas y, de este modo, facilita que distingamos con precisión en qué plano se encuentra aquello que estamos mirando. Eso, nos permite interactuar con un mundo donde necesitamos gestionar la profundidad de manera permanente. La visión binocular exige que los dos ojos estén en la parte frontal de la cabeza y es propia de los depredadores ya que necesitan gran precisión tridimensional para capturar a sus presas. Sólo unos pocos seres vivos no depredadores, como los seres humanos, algunos primates o murciélagos tiene los ojos al frente ya que también han necesitado discriminar la profundidad para su evolución[72]. La visión binocular gana precisión sacrificando campo de visión.

Las presas, suelen tener los ojos en los laterales de la cabeza, ampliando el campo de visión como medida de protección a costa de su capacidad estereoscópica, limitando mucho su visión en diferentes planos al no existir convergencia en las imágenes procesadas por su cerebro. Y es precisamente esta mayor precisión, esta mayor profundidad la que genera una conexión más intensa con los elementos tridimensionales. De ahí, que la idea de crear recursos de aprendizaje estereoscópicos haya estado siempre presente. Aunque la producción de las primeras imágenes estereoscópicas artificiales, dibujos o fotografías dobles con cierta variación de ángulo para que nuestra visión binocular las procese de modo estereoscópico, estuviera vinculada al ámbito artístico, enseguida se descubrió el potencial educativo de las mismas.

2.2.1 Estereoscopia y aprendizaje: Los albores de la Realidad Virtual

Existen diversas fuentes [30] que consideran que las primeras imágenes estereoscópicas fueron creadas por el pintor Jacopo Chimenti entre mediados de los siglos XV y XVI, aunque existen sólidas evidencias [205, 189] de que la estereoscopia en sus dibujos era inconsistente y fruto de la casualidad. Su verdadero origen, expansión y popularidad vino de la mano de los estudios y la fabricación del primer estereoscopio por parte de Sir Charles Wheatstone, Catedrático de Filosofía Experimental del King’s College[209]. Este dispositivo, basado en una doble lente permitía contemplar imágenes estereoscópicas con comodidad y con una buena profundidad de campo.

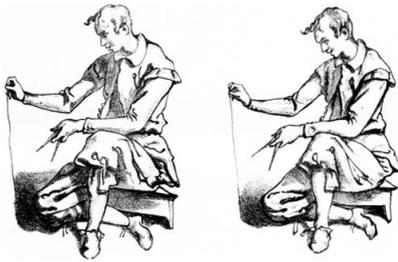


Figura 2.2: Dibujos estereoscópicos de Jacopo Chimenti, s.XIV-XV



Figura 2.3: Estereoscopio de Wheatstone, basado en espejos (1838)

Fue precisamente para una evolución del estereoscopio de Wheatstone para el que se diseñó la primera aplicación educativa estereoscópica de la que tenemos constancia. Fue “La Tierra de los Faraones”, un libro de 1897 publicado por Underwood & Underwood, con más de 100 fotografías estereoscópicas[52].

En la primera mitad del siglo XX, la empresa Keystone View Company se erigió como el referente internacional en la creación de contenido educativo estereoscópico y consiguió distribuir su visor Keystone 600 junto con una gran colección de imágenes estereoscópicas seleccionadas específicamente para su uso educativo. Para ello, crearon un equipo de 62 docentes que las seleccionaron y las clasificaron en diferentes temas: historia, agricultura, naturaleza, geografía o arte[11]. Como podemos leer en el manual[44] facilitado a los docentes: “... como las estereografías proporcionan una tercera dimensión o profundidad a las escenas, éstas tienen una mayor similitud con la realidad, provocando en los niños la misma reacción que la visión real de lo que se muestra en la imagen”.

En los años posteriores, la estereoscopia se utilizó intensamente en el ámbito de la formación, por ejemplo en el entrenamiento militar, jugando un papel relevante en la Segunda Guerra Mundial. El mayor exponente de esta técnica fue la preparación de la operación Crossbow, donde se tomaron más de 10.000.000 de fotografías de la costa francesa para preparar las operaciones de bombardeo anglo-americanas. Con esta base de imágenes, se reconstruyó estereoscópicamente el territorio objetivo y los analistas y pilotos tuvieron información de primer nivel acerca del relieve y las ubicaciones de los objetivos militares[73].

En paralelo, la medicina, uno de los ámbitos de conocimiento más expuesto siempre a la investigación de formas realistas de entrenamiento y formación, comenzaba a preguntarse acerca de la efectividad de la estereoscopia y descubrió que podía jugar un papel muy relevante en el aprendizaje y la diagnosis,

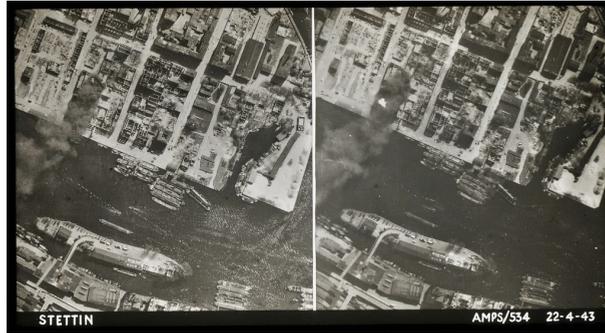


Figura 2.4: Fotografía aérea estereoscópica de la ciudad polaca de Stettin, 1943.

comenzando específicamente con la radiografía estereoscópica[51], a lo largo de la primera mitad del siglo XX, la cual aportaba información volumétrica relevante a partir de radiografías planas.

De este modo, podemos comprobar como un básico sistema de visualización inmersivo basado en la estereoscopia, aplicado en ámbitos específicos, como por ejemplo la percepción espacial o el estudio anatómico puede facilitar tareas como encontrar, identificar y clasificar objetos[120, 58, 132, 49].

2.2.2 El papel de una incipiente Realidad Virtual en educación y formación

El siguiente paso importante en la historia de la Realidad Virtual, fue dado por Ivan Sutherland con el diseño y desarrollo del primer HMD y que asentó la arquitectura de los modernos sistemas de Realidad Virtual basados en gráficos computerizados. Fue la llamada “Espada de Damocles”, ya que el dispositivo se suspendía del techo, sobre los usuarios, por su gran peso. Además de sus aportaciones en cuanto a la tecnología, también se le considera autor del artículo fundacional de la Realidad Virtual y la Realidad Aumentada tal y como las conocemos hoy: “The Ultimate Display”[194].

El propio Sutherland, en estos albores de la Realidad Virtual, ya valoraba de una manera premonitoria las implicaciones de la sensación de presencia, de realidad, de su invención. En declaraciones a la BBC, afirmó: “La imagen (la línea) era virtual, pero no engañaba a nadie haciéndole creer que era real”[10]. El sistema generaba por computador pares de imágenes estereoscópicas que se enviaban a las pantallas montadas en las gafas y permitían a los usuarios ver unas sencillas líneas 3D desde cualquier ángulo. Para interpretar el punto



Figura 2.5: I. Sutherland probando su HMD, 1966.

de vista de los usuarios, se usaron potenciómetros en las articulaciones de los brazos que sujetaban el casco, los cuales recogían los movimientos realizados. La limitada potencia gráfica, tanto de los computadores como de las pantallas, penalizaba la inmersividad de la experiencia.

Por este motivo, la introducción de nuevas capacidades gráficas y de interacción revolucionó el panorama de la Realidad Virtual.

Las primeras aplicaciones profesionales de la RV a la educación y el entrenamiento se centraron en los simuladores de vuelo para el entrenamiento de pilotos[65]. Esta adopción, mayoritariamente llevada a cabo por el ejército de los EEUU[142], se apoyó principalmente en unos menores costes operativos y la mayor seguridad de estos entornos ya que permitían practicar en escenarios peligrosos. Uno de los desafíos a los que se enfrentaban estos primeros sistemas de formación en RV era que dependían completamente del hardware, debido a que se utilizaban controles físicos los cuales replicaban los reales. Esto hacía que fuera imposible reutilizar el sistema de, por ejemplo, entrenamiento de pilotos de avión para entrenar a conductores de tanques.

Casi simultáneamente, fue la NASA la siguiente en aprovechar las capacidades de la Realidad Virtual en sus programas de formación y entrenamiento. A lo largo de la década de los 90, su Virtual Physics Lab fue un referente en la creación de entornos de formación en Realidad Virtual, como el de la Misión de Rescate del Telescopio Hubble o el de la Estación Espacial Coupola[109, 121].

Del mismo modo que ocurrió con las primeras imágenes estereoscópicas, la medicina también se aproximó rápidamente a la nueva tecnología emergente. Este acercamiento tuvo un carácter dual: Por una parte, al igual que en otros ámbitos relacionados con la visualización tridimensional, la RV se mostró como un aliado excepcional para la diagnosis y el análisis de imágenes médicas[162, 166]. Pero su mayor potencial en este campo se empezó a vislumbrar en el área del entrenamiento quirúrgico. Los simuladores con los que se forman los cirujanos son complejos y se basan principalmente en elementos físicos con retroalimentación háptica[45]. Hoy en día, todavía representan uno de los ejemplos más maduros de la utilización de la Realidad Virtual con fines educativos.

2.2.3 Desarrollo tecnológico y búsqueda de un modelo pedagógico propio.

Aunque en sus orígenes comenzó como una manera realística de simular ciertas condiciones y procesos profesionales, basados en manipulación principalmente, si analizamos las razones que llevan a emplear la Realidad Virtual en educación y formación, encontramos un abanico de diversas motivaciones, en clara evolución cronológica.

En esta misma década, a mediados de los 90, fue el Virtual Reality and Education Lab (VREL), en el seno de la East Carolina University y co-dirigido por Auld y Pantelidis[6, 7]. Su objetivo fundacional es ejercer el liderazgo necesario para promover la utilización de la Realidad Virtual en las escuelas y desde entonces, han llevado a cabo un gran número de investigaciones y proyectos piloto persiguiendo esta meta.

Analizando el interesante trabajo de la propia Verónica Pantelidis, reparamos en sus conclusiones acerca de como la utilización de la Realidad Virtual en educación es, en sus propias palabras, “una evolución natural de la Instrucción Asistida por Ordenador (CAI, de las siglas en inglés de Computer-Assisted Instruction)”[140]. Ahondando en esta afirmación, consideramos que la Realidad Virtual incorpora además algunas características intrínsecas que la hacen, en cierto modo, más compleja.

Y son, precisamente, esas singularidades las que han guiado su adopción en el ámbito de la educación y especialmente a lo largo de la década de los 90, donde se centraron los esfuerzos investigadores en la búsqueda de un modelo pedagógico propio y eficaz. En un primer momento se buscó explotar el potencial que tenía la Realidad Virtual para generar experiencias de aprendizaje no simbólicas y en primera persona mientras que la educación formal promocionaba

experiencias simbólicas en tercera persona.[212]. Mantovani, por su parte, [115] se centró en destacar los beneficios de la Realidad Virtual como una herramienta para “promover el aprendizaje en contextos difíciles o imposibles de recrear en la vida real”. Más recientemente, en un meta-análisis realizado por Freina y Ott[61] podemos apreciar como el argumento más empleado para incluir la Realidad Virtual en la práctica docente es que “da la oportunidad de vivir y experimentar situaciones que no podrían ser accesibles de manera física”.

Como elemento común a todos estas motivaciones y modelos pedagógicos asociados a la RV, podemos destacar su capacidad para experimentar, de manera cuasi real, sensaciones del mundo real pero recreadas a partir de entornos e interacciones sintéticas. Y es en este punto donde nos distanciamos más del planteamiento de Pantelidis antes citado. La capacidad de generar sensaciones de la RV la diferencia de otras opciones de formación multimedia.

La eficacia de la inducción emocional de la Realidad Virtual ha sido analizada en estudios como el proyecto EMMA[4] donde se demuestra de manera empírica y sólida la capacidad de generar emociones en los usuarios. Otro estudio, realizado por G.Riva[160] confirma de nuevo la posibilidad de utilizar la RV como una herramienta de inducción emocional, en este caso para alcanzar estados de relajación o ansiedad. Y es precisamente cuando conectamos estos resultados a otros estudios pedagógicos recientes donde se establece la activación emocional como pilares para la adquisición de nuevos conocimientos[84], fijándolos, cuando vemos el potencial de la Realidad Virtual en el ámbito de la enseñanza-aprendizaje.

Adicionalmente a su capacidad de inducción emocional, la Realidad Virtual posee gran potencial para la generación de motivación intrínseca. Como podemos ver, por ejemplo, en el estudio de Wrzesien y Alcañiz, eJunior[215], acerca del proceso de enseñanza-aprendizaje de las Ciencias Naturales y la Ecología en la etapa de educación primaria. Los alumnos se organizaron en dos grupos: uno realizó actividades en un entorno RV inmersivo mientras que el otro utilizó una aplicación 2D. Los resultados indicaron que los estudiantes que utilizaron la RV estuvieron mucho más satisfechos con la experiencia de aprendizaje.

Esto encaja a la perfección con las últimas novedades en cuanto a la aplicación de los avances neurocientíficos en el ámbito de la educación. Como se recoge en un trabajo anterior[138], la nueva disciplina de la neuroeducación surge de la interacción entre el conocimiento neurocientífico y la práctica pedagógica. El nombre en si ya referencia de manera efectiva la interconexión entre mente, cerebro y aprendizaje. Es un área multidisciplinar, identificada por Bruer[31],

cuando propuso conectar neurociencia y educación a través de la psicología cognitiva.

El desarrollo actual de técnicas como el electroencefalograma (EEG), las imágenes a partir de resonancia funcional magnética (fMRI) o la espectroscopía infrarroja de corto alcance (NIRS) proporciona herramientas para identificar qué regiones del cerebro se activan en las funciones neurocognitivas más comúnmente relacionadas con la actividad de aprender[5]. También en este ámbito se ha establecido un sólido vínculo entre las emociones y el aprendizaje: nuestro cerebro retiene mejor la información cuando ésta viene de la mano de una alta carga emocional[130].

Más recientemente, con una gran desarrollo en el ámbito tecnológico, que permite tener HMDs independientes (sin necesidad de estar conectados a un ordenador) y de gran calidad visual, las investigaciones se centran en aplicaciones verticales de la RV, como por ejemplo: en la educación a distancia[145, 149], en la educación de STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas)[206, 107] o en el área de la salud[70, 105].

En la siguiente sección veremos como la sensación de presencia es el factor clave a la hora de inducir emociones y de generar motivación intrínseca.

2.3 La presencia como factor clave de la experiencia de usuario en Realidad Virtual

El concepto de presencia se muestra difuso y esquivo. Imaginemos una obra de teatro inmersivo, como la icónica *Sleep no More*¹, donde los espectadores, ataviados con máscaras blancas, se mueven libremente a través de diferentes escenarios y donde pueden interactuar con los actores y los elementos de *atrezzo*. Aunque el espectador sabe que todo lo que está sucediendo sobre el escenario es ficción, empatiza con los personajes, su corazón late aceleradamente frente a eventos dramáticos y, en definitiva, actúa como si las situaciones fuesen reales.

Esta *suspensión de la incredulidad*, tal y como fue acuñado el término por el poeta y filósofo Coleridge[42], es indispensable al analizar obras de ficción, sea cual sea el medio en el que se presentan: cine, literatura, teatro o juegos. El conocer hasta qué punto los usuarios o consumidores de medias sienten que están relacionándose con objetos *reales* o *para-reales*[101] ha sido una cuestión relevante para un gran número de investigadores de diversos ámbitos, desde el

¹<https://www.punchdrunk.org.uk/sleep-no-more>



Figura 2.6: Espectadores y actores de Sleep no More en Broadway, NY, USA.

campo de la literatura al de la Realidad Virtual[74, 191, 14, 214, 179, 201, 63, 198, 113, 64].

Sentir como real un entorno sintético así como los eventos que en él transcurren o los personajes que lo pueblan, eso es la sensación de presencia, al menos en alguna de sus acepciones y ha sido un punto central para la investigación desde que, para muchos, constituye el punto central de cualquier experiencia mediada[101]. Originalmente, cuando la sensación de presencia fue definida por primera vez en la década de los 80 por el profesor Marvin Minsky en la revista de ciencia ficción *Omnium* [128], el término hacía referencia la *telepresencia* o la sensación de creer que se está *realmente* en otro lugar aunque, al menos desde un punto de vista cognitivo, se sabe a ciencia cierta que no es así. En estos primeros momentos, con una embrionaria investigación sobre la presencia, el foco se colocaba en los aspectos tecnológicos pero con el desarrollo del área, psicólogos y neurocientíficos[163] se han visto fuertemente atraídos por este concepto.

Hoy en día, la investigación sobre la presencia está fuertemente vinculada a la Realidad Virtual ya que es el medio más inmersivo y de mayor capacidad evocadora. La RV provoca que, tanto de una manera consciente como inconsciente, los usuarios actúen como si no existiera ninguna mediación tecnológica, olvidando por un momento los HMD que llevan sobre su cabeza y que todo lo que ven está generado por un ordenador.

Como un ejemplo claro del potencial de la presencia en RV a la hora de aplicarlo a distintos ámbitos, sirva la utilización de entornos inmersivos en el lado

del paciente, como un contexto propicio para el tratamiento clínico de ciertas patologías a través de la generación de realidades sintéticas. Valga como muestra la sólida producción científica llevada a cabo en el Institut Guttmann, centro vinculado a la Universitat Autònoma de Barcelona y con un profundo historial de aplicaciones médicas de la Realidad Virtual, principalmente en el ámbito de la rehabilitación neuronal y en el tratamiento del dolor neuropático. En este último tipo de tratamientos, la Realidad Virtual y su capacidad de evocar una realidad alternativa ha mostrado un efecto analgésico intenso y duradero, sin implicaciones en las funciones cognitivas de los pacientes y constituyendo una sólida alternativa al tratamiento farmacológico. Los últimos avances del Institut Guttmann en estos ámbitos se recogen en recientes artículos [137, 60, 103, 207].

A la hora de explicar este fenómeno, los investigadores proponen un amplio abanico de marcos teóricos, los cuales pueden ser agrupados en dos grandes conjuntos atendiendo a la interpretación específica que se realice del concepto de presencia: a) la presencia como ausencia de mediación y b) la presencia como estar *ahí*. Estos grupos no integran el *corpus* de investigación al completo pero incluyen una parte mayoritaria de las teorías. Esta clasificación está basada en las tres revisiones bibliográficas más amplias y generalistas de los últimos veinte años: Schumie et al. (2001)[170], Lee and Kwan Min (2004)[101] and Skarbez, Brooks and Whitton (2017)[175].

2.3.1 La presencia como ausencia de mediación

Esta teoría fue formalmente presentada por Lombard y Ditton [110] como la ilusión perceptiva de la ausencia de mediación. En esta definición, perceptivo indica que los sistemas cognitivos, sensoriales y emocionales se encuentran en permanente relación con el entorno de cada individuo. Adicionalmente, la ilusión de la ausencia de mediación sucede cuando una persona no es capaz de identificar un medio en su entorno y sus reacciones son similares a aquellas que tendrían lugar si el medio no estuviera presente. Schuemie, por su parte, destaca esta dualidad[169] como que “parte de nuestra percepción sabe que la experiencia está mediada por alguna tecnología mientras que otra parte no es consciente de ello”. Esta teoría ha sido la base de los trabajos de Slater y Usoh[181] y por la International Society for Presence Research[152] tal y como recogen en su revisión bibliográfica Skarbez et al.[175].

2.3.2 *La presencia como estar allí*

Este es el marco teórico de la sensación de presencia que más apoyo recibe. Fue acuñado por Minsky (originalmente como *telepresencia*) y posteriormente fue respaldada por Steuer[191], Schloerb[167], Welch[208], Mantovani[116], Biocca[15], Riva[158], Witmer[213] y Mestre[126] entre otros.

Al analizar esta teoría, descubrimos que se basa en la sensación física de “estar en el entorno virtual” y desde los primeros trabajos de Steuer[191], ya se substituye el término de telepresencia por el de presencia con el objetivo de hacerlo independiente de la tecnología empleada o del dominio de uso[101]. La presencia en un entorno de Realidad Virtual tiene una correlación negativa con el entorno real ya que ambos representan extremos del mismo eje[179]. A pesar de que esta definición de presencia es informada principalmente de un modo subjetivo por parte de los usuarios (sólo uno mismo es capaz de conocer y definir si se encuentra en un sitio o en otro), Schloerb[167] trató de desarrollar una métrica objetiva para este concepto de presencia: Un individuo se encuentra objetivamente presente en un lugar si es capaz de presentar un rendimiento adecuado ante una tarea propuesta. Esta propuesta proporcionó una medida muy simplificada de la presencia, lejos de las complejas alternativas implementadas hasta aquel momento pero no tuvo prácticamente ninguna relevancia científica ya que el resto de investigadores del área a causa de su imparcialidad: un experto en cierto ámbito o con ciertas habilidades siempre tendría un desempeño superior en un entorno de RV que otra persona sin experiencia alguna en esa tarea propuesta[175].

2.3.3 *Cuantificando la presencia: métricas previas y actuales*

Como otros estados psicológicos, la presencia puede ser cuantificada tanto utilizando un enfoque dentro-fuera (subjetivo, introspectivo) o un enfoque fuera-fuera (objetivo, percibido). Esta última categoría puede ser dividida en dos subcategorías de métricas adicionales dependiendo de la fuente que origina los hechos o eventos percibidos:

- conductual, con datos derivados de las respuestas físicas de nuestro cuerpo frente a los estímulos virtuales.
- Fisiológica, con datos procedentes de la actividad del sistema nervioso simpático.

En las siguientes subsecciones vamos a proporcionar un trasfondo detallado acerca de los trabajos previos relacionados con la medición de la presencia en entornos de RV.

2.3.4 *Medición subjetiva de la presencia*

Este conjunto de métodos incluye cada técnica basada en la auto-evaluación de uno o más aspectos relacionados con la experiencia en el entorno virtual. Esta manera de medir la presencia, normalmente se apoya en cuestionarios pasados tras el experimento y que se sustentan en la propia percepción del usuario acerca de cuan “real” es el entorno virtual en el que ha discurrido la experiencia. Entre los cuestionarios dirigidos a medir la sensación de presencia podemos encontrarlos tanto exclusivos como formando parte de un paquete más grande de métricas. También los hay que están dirigidos a medir la presencia en entornos multimedia (cine, teatro, juegos...) y otros diseñados específicamente para Realidad Virtual. Los de mayor relevancia, tal y como recoge Skarvez en su revisión[175] son (mantenemos sus nombres en inglés para favorecer su posterior identificación y búsqueda):

- Slater, Usoh y Steed[180] (SUS questionnaire, 1995).
- Kim y Biocca[91] (Arrival/Departure questionnaire, 1997).
- Baños et al.[8] (Reality Judgement and Presence Questionnaire, RJPQ, 2000).
- Larsson, Västfjäll y Kleiner[98] (Swedish Viewer-User Presence Questionnaire, SVUP, 2001).
- Lessiter et al.[102] (ITC Sense of Presence Inventory, ITC-SOPI, 2001).
- Vorderer et al.[204] (MEC Spatial Presence Questionnaire, MEC-SPQ, 2001).
- Schubert, Friedmann y Regenbrecht[168] (Igroup Presence Questionnaire, IPQ, 2001).
- Bouchard et al.[20] (Single-Item presence questionnaire, 2004).
- Witmer y Singer[213] (Presence Questionnaire, PQ, 2005).
- Takatalo, Nyman y Laaksonen[197] (Experimental Virtual Environment-Experience Questionnaire, EVEQ, 2008).

- Lombard et al.[112, 111] (Temple Presence Inventory, TPI, 2009).
- Chertoff, Goldiez y LaViola Jr.[35] (Virtual Experience Test, VET, 2010).

Si seguimos el criterio de Rosakranse y Oh[161], los cuestionarios más relevantes y usados son:

1. SUS Questionnaire (SUS).
2. Witmer-Singer Presence Questionnaire (PQ).
3. IGroup Presence Questionnaire (IPQ).
4. ITC-Sense of Presence Inventory (ITC-SOPI).
5. Lombard and Ditton Questionnaire.

Todos estos cuestionarios dan por supuesto que se responderán una vez haya terminado la experiencia en RV (excepto el de Bouchard et.al, Single-Item Questionnaire[20], el cual fue diseñado para ser administrado también durante la experiencia virtual) y esto, hace que sean:

- Ssgados, ya que se basan en recuerdos evanescentes de la experiencia previa.
- Subjetivos, ya que dependen de una reflexión introspectiva sobre un sentimiento complejo relacionado con la realidad. Esto afecta a su fiabilidad.
- Opacos, ya que actúan como una caja negra, ocultando detalles acerca de los cambios en la sensación de presencia que se producen a lo largo de la experiencia completa. Estos cuestionarios dan un valor o conjunto de valores finales, discretos o continuos.

Por otra parte, los cuestionarios son fáciles de administrar, asequibles y además tienen una alta validez ecológica ya que no hay necesidad de modificar aspecto alguno del entorno virtual para obtener valores para esta métrica.

2.3.5 *Medición conductual de la presencia*

De manera intuitiva, cuanto más presente se siente un individuo, más cercanas a la realidad serán sus reacciones. Respuestas como los actos reflejos pueden actuar como indicadores de altos niveles de presencia en un entorno de Realidad Virtual[126]. Held y Durlach[78] fueron los primeros que se preguntaron si un teleoperador que controlase un robot a distancia y que viese a través de sus “ojos”, reaccionaría agachándose o realizando algún movimiento similar de esquiva si amagaran un golpe a los ojos del robot con un bate de beisbol.

Partiendo de este planteamiento, Sheridan[172, 171] propuso utilizar las reacciones de la gente como una medida objetiva para la presencia. En concreto, propuso un experimento donde los sujetos intentaban, dentro de un entorno de RV, atrapar una pelota o esquivar un objeto que les era arrojado.

Las medidas conductuales aportan algunas mejoras interesantes frente a los cuestionarios:

- Se recogen simultáneamente a la experiencia virtual por lo que se evita el sesgo de los recuerdos evanescentes.
- No son intrusivas ya que se toman externamente, de manera transparente para los usuarios.
- Son prácticamente objetivas aunque se necesita a un observador externo que registre las reacciones de los individuos dentro el entorno virtual y que las etiquete como reacciones “naturales”.

Sin embargo, las métricas conductuales poseen un valor bajo de validez ecológica ya que con el fin de obtener reacciones naturales o actos reflejos, los investigadores deben incluir elementos adicionales en los entornos virtuales experimentales, tales como situaciones peligrosas o, al menos, incómodas: alturas, objetos cayendo, sonidos estridentes... Estos elementos pueden no encajar con el fin del experimento o alterar algunas otras mediciones.

2.3.6 *Medición fisiológica de la presencia*

Diferentes parámetros fisiológicos han sido utilizados como medidas de la sensación de presencia, tales como el ritmo cardiaco, la temperatura de la piel o la actividad electrodérmica (EDA, de sus siglas en inglés Electrodermal Activity), también conocida como respuesta conductiva de la piel (SCR, de sus siglas en inglés Skin Conductance Response) o respuesta galvánica de la piel (GSR, de sus siglas en inglés Galvanic Skin Response).

Aunque la mayoría de estas medidas están relacionadas con la excitación o la activación emocional en vez de con la presencia directamente y que pueden presentar valores alterados a causa de la actividad física realizada durante la experiencia virtual (andar, saltar, agacharse...), se ha establecido cierta correlación entre ellas y la presencia.

Primero Meehan[123] y después Wiederhold[210] fueron capaces de encontrar ciertas correlaciones entre los cuestionarios auto-cumplimentados y las medidas fisiológicas, específicamente, con la actividad electrodérmica.

Esta métrica es objetiva *per se* pero su obtención resulta intrusiva ya que se necesitan dispositivos exógenos para ello y esto puede causar, en algunas ocasiones, pérdida de presencia. Adicionalmente, en los experimentos mencionados anteriormente, las condiciones que llevan a incrementos en la sensación de presencia están siempre relacionadas con provocar miedo a los participantes del experimento, haciendo el entorno virtual poco ecológico y sólo aplicable a un reducido subconjunto de escenarios de investigación.

2.3.7 Interacción Hombre-Máquina en Realidad Virtual

Aún cuando los actuales sistemas de Realidad Virtual se basan en HMD de alta definición y poseen controladores inalámbricos de alta precisión, los diseñadores de experiencias de Realidad Virtual tienen que enfrentarse a un desafío clásico: ¿Cómo van a interactuar los usuarios con el entorno virtual? Se han desarrollado diferentes aproximaciones al diseño de interacción, así como un amplio abanico de técnicas y metáforas, eso sí, centradas en el rendimiento, la usabilidad, el realismo, el confort o una combinación de ellas. Slater et al.[184] desarrolló una interesante taxonomía, dividiendo las interacciones dentro de un entorno de Realidad Virtual en dos categorías principales: mundanas y mágicas, atendiendo al nivel de fidelidad entre la interacción virtual y como esa misma acción sería llevada a cabo en el mundo real.

A pesar de la implícita suspensión temporal de la incredulidad propia de las experiencias mediadas, la cual permite que los usuarios permanezcan inmersos en lo que ven, escuchan y/o tocan aunque sea claramente irreal[99], las interacciones mágicas poseen algunas imperfecciones que son relevantes en ciertos dominios.

Mientras que las interacciones mundanas se realizan, hasta cierto punto, de la misma manera que serían realizadas en el mundo real (moviéndose de un punto a otro del entorno virtual andando en el mundo real, coger un objeto tocándolo con un mando mientras se tiene pulsado un botón...), las interaccio-

nes mágicas constituyen metáforas creadas para solventar ciertas limitaciones o para relajar ciertas restricciones de un entorno virtual. Por ejemplo, coger objetos sin tocarlos (usando una especie de fuerza telepática para moverlos a distancia) o volar (desplazarse a través del entorno virtual tocando un botón o moviendo un joystick mientras se está quieto en el mundo real...) representan adaptaciones o metáforas de ciertas acciones implementadas con el objetivo de incrementar la efectividad de la interacción o facilitando su utilización.

Estas metáforas, al representar maneras alternativas de realizar una acción, tienen ciertas implicaciones con nuestro sistema propioceptivo. Sir Charles Scott Sherrington definió la propiocepción como “nuestro sentido secreto, nuestro sexto sentido”[173] y, de una manera más detallada, como un flujo sensorial que de manera continua y permanente nos da la sensación de que nuestro cuerpo, “es nuestro” y de que lo controlamos a voluntad.

Si existen disonancias propioceptivas, como ver a través de nuestros ojos que nos estamos moviendo pero, al mismo tiempo, no sentirlo con nuestros músculos, tendones o articulaciones, puede causar una pérdida de la sensación de presencia y malestares puntuales como los cibermareos, un fenómeno que se manifiesta típicamente con síntomas como desorientación, náuseas o fatiga visual, entre otros[13]. Adicionalmente, en ciertos dominios, como el entrenamiento, estos problemas propioceptivos pueden penalizar la transferencia al mundo real de las acciones entrenadas en el entorno virtual[176].

A lo largo de esta tesis, pondremos el foco de estudio en la locomoción, como la interacción más común en entornos de Realidad Virtual[22].

2.3.8 Locomoción en Realidad Virtual

Los diseñadores de experiencias inmersivas tienen que enfrentarse de manera reiterativa a un desafío: sobrepasar los límites físicos del seguimiento a nivel de habitación y dar a los usuarios la posibilidad de moverse en espacios más grandes. Esta decisión de diseño comporta numerosas implicaciones en el rendimiento, la comodidad o la presencia y debe ser informada a partir de la evidencia científica.

Bowman creó una exhaustiva taxonomía donde clasificaba los diferentes métodos de locomoción atendiendo a su complejidad[23]:

- Viaje: Control del movimiento desde el punto de vista del usuario, en un entorno tridimensional.

- **Orientación:** Proceso cognitivo de encontrar un camino a partir de pistas visuales, conocimiento del entorno y ayudas como mapas y/o brújulas.
- **Navegación:** Es una interacción que representa la combinación de viajar y orientarse

A partir de esta clasificación, en esta tesis, ponemos el foco en la habilidad de navegación ya que constituye la interacción de mayores implicaciones cognitivas. También nos referiremos a ella como locomoción.

2.3.9 Métodos más comunes de navegación

Los sistemas de Realidad Virtuales actuales suelen incluir una pareja de mandos inalámbricos (figura 2.7), uno para cada mano, con numerosos fotosensores o LEDs infrarrojos (depende de la plataforma) que les permite ser reconocidos por las cámaras de seguimiento. Este sistema de seguimiento detecta e interpreta un amplio rango de movimientos y gestos de los usuarios, permitiendo un conjunto de interacciones potencialmente infinito.



Figura 2.7: Mandos de RV más extendidos: HTC Vive y Oculus Touch

Aprovechando esta libertad casi absoluta para diseñar interacciones, se han desarrollado numerosas metáforas para interpretar la acción de navegar en un entorno de Realidad Virtual. Las más empleadas y estudiadas[169, 18, 27] son:

2.3.9.1 Locomoción automática

Este método puede no ser considerado interactivo de pleno derecho. Aunque el usuario puede controlar la cámara moviendo la cabeza y es capaz de interactuar con el entorno de otras maneras, el movimiento está fuera de su control. Es similar a una montaña rusa u otras atracciones de feria, como el tren de la bruja, donde nos movemos de forma autónoma a lo largo de un escenario.

2.3.9.2 Teletransporte de destino fijo

La metáfora del teletransporte de destino fijo es una variedad restringida del método del teletransporte libre que veremos más adelante. El usuario es poseedor de una especie de puntero que le permite seleccionar diferentes destinos predeterminados para teletransportarse. Una vez seleccionado el destino (normalmente presionando un botón o apretando un gatillo), el avatar virtual establece su posición en ese punto.

2.3.9.3 Teletransporte libre

La metáfora del teletransporte libre permite a los usuarios apuntar libremente a cualquier (o casi cualquier) lugar dentro del entorno virtual y cambiar instantáneamente su posición al punto seleccionado. Existen diferentes soluciones a la hora de gestionar la dirección hacia la que se enfoca el usuario cuando es teletransportado: mirar en la misma dirección que antes del teletransporte, mirar hacia el punto de origen del teletransporte o seleccionar antes del teletransporte la nueva dirección hacia la que se mirará después.

2.3.9.4 Locomoción indirecta

El término de locomoción indirecta (del inglés, *indirect walking*) actúa de paraguas para un elevado número de otras metáforas, unidas por el común denominador de que en ellas, el desplazamiento del avatar virtual se realiza a partir de una interacción desconectada, esto es, con una acción que no está explícitamente vinculada con el movimiento. Estas metáforas provienen principalmente del ámbito de los videojuegos: pulsar un botón, apretar un gatillo, empujar un joystick, tocar un panel táctil (del inglés *touchpad*)... Normalmente, al realizar estas acciones, el avatar virtual se mueve en la dirección hacia la que está mirando el usuario pero hay diferentes alternativas como, por ejemplo, moverse en la dirección hacia la que el joystick apunta y dejar la cámara en la dirección

hacia la que mira el usuario. Esta familia de métodos, dentro de un entorno de RV, se comportan de manera similar a volar o deslizarse.

2.3.9.5 Andar en el sitio

Esta categoría también agrupa un variado subgrupo de metáforas como *head bobbing* (detección del movimiento de la cabeza en vertical al andar) o *arm swinging* (detección del balanceo de los brazos al andar). Ambos ejemplos de métodos de andar en el sitio se basan en el reconocimiento de los movimientos del usuario con cámaras ópticas o con dispositivos de seguimiento como HMD o mandos y la posterior traducción de los diferentes gestos o acciones (desplazamientos verticales de la cabeza, desplazamiento vertical alterno de las manos, etc...) en movimientos del avatar virtual. Se han desarrollado mejoras muy interesantes de la precisión del reconocimiento mediante la utilización de técnicas de aprendizaje automático[133].

2.3.9.6 Máquina de pasos (*stepper*, en inglés)

Una variante de la metáfora “andar en el sitio” es el *stepper*. Básicamente es la misma acción de caminar sin moverse pero soportada por un dispositivo específico que mejora dramáticamente la precisión del reconocimiento del movimiento. Esos dispositivos capaces de reconocer pasos abarcan desde la Wii®Balance Board hasta una bicicleta elíptica adaptada.



Figura 2.8: Máquina de pasos, similar a una bicicleta elíptica.



Figura 2.9: Nintendo Wii ®Balance Board

2.3.9.7 Andar redirigidamente

Esta familia de métodos se basa principalmente en la manipulación sutil del entorno virtual de modo que el usuario se mueva libremente en el espacio físico pero en una superficie con seguimiento muy reducida. Esta ilusión puede ser recreada de diferentes maneras como utilizando puertas que actúen como portales de teletransporte o modificando de manera casi imperceptible para el usuario la orientación del entorno de modo que lo mantenga girando y girando permanentemente mientras en el entorno virtual parece que se desplaza en línea recta. Existen otras manipulaciones del entorno que han funcionado exitosamente a la hora de recrear el caminar redirigido, normalmente basadas en ilusiones arquitectónicas o en adaptaciones en tiempo real[154, 190, 80].

2.3.9.8 Andar realmente

Esta metáfora, no es una metáfora. “Realmente” significa aquí que los usuarios andan en el mundo real y que su navegación es trasladada bajo un esquema 1:1 al entorno virtual. Normalmente, para implementar esta técnica se necesita: a) Un estricto diseño de niveles, especialmente en aquellos sistemas con superficies de seguimiento pequeñas, que permita que los usuarios anden únicamente en espacios de entre 15 y 20 metros cuadrados. Esta condición puede ser apoyada por la narrativa, haciendo que la acción transcurra en una oficina llena de cubículos, en un submarino con camarotes estrechos o en una nave espacial distribuida en pequeños compartimentos; b) En espacios físicos grandes como estadios o naves industriales, con sistemas potentes de seguimiento que puedan soportar estas superficies.

Para representar visualmente estos métodos de locomoción, proponemos una taxonomía bidimensional basada en:

- Nivel de retroalimentación propioceptiva (PF, del inglés *Proprioceptive Feedback*): Abarca desde una baja PF (LPF, del inglés *Low PF*) a una alta PF (HPF, del inglés *High PF*). Podemos asociar la LPF con la incoherencia de la información sensorial recibida por el usuario de un entorno de Realidad Virtual y las acciones realizadas dentro del mismo.
- Nivel de *magia*: Se mueve desde lo mundano (del inglés, *mundane*) hasta lo mágico (del inglés, *magical*), dependiendo de como de creíble es la acción de locomoción (desde el punto de vista del mundo real).

Atendiendo a esta clasificación, se han creado 4 subgrupos: (Q1) Magical-LPF; (Q2) Magical-HPF; (Q3) Mundane-LPF and (Q4) Mundane-HPF.

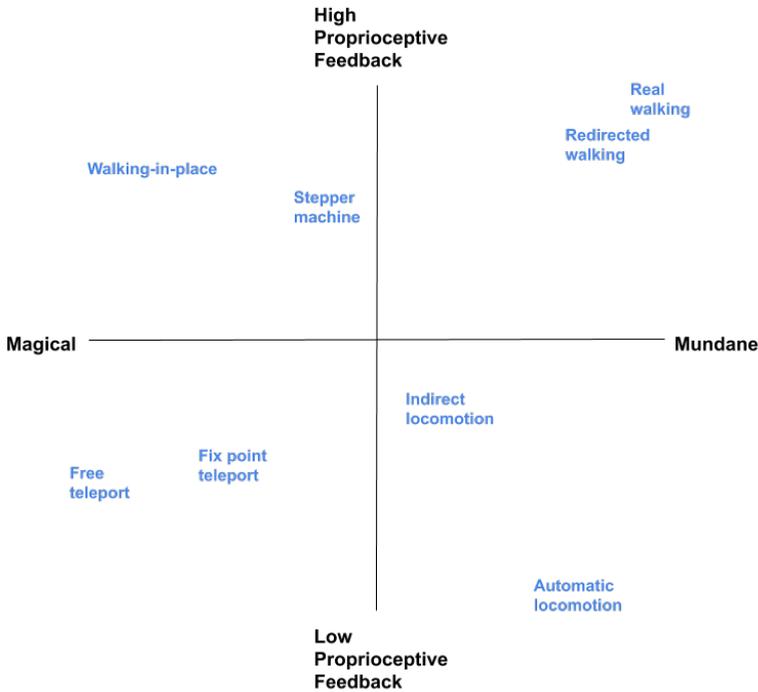


Figura 2.10: Clasificación bidimensional de los métodos de locomoción

En Q1, se ubican Teletransporte libre (del inglés, *free teleport*) y teletransporte de destino fijo (del inglés, *fix point teleport*) ya que representan una manera artificial de moverse y con una retroalimentación propioceptiva muy baja, con el cuerpo totalmente estático cuando el movimiento se produce y cambiando “mágica” e inmediatamente de posición.

Q2 reúne las técnicas de locomoción de caminar en el sitio (del inglés, *Walking-in-place*) y máquina de pasos (del inglés, *stepper machine*). Ambas tienen una retroalimentación propioceptiva media-alta debido a que requieren del movimiento del usuario para producir un desplazamiento en el mundo virtual. Por otro lado, al no producirse desplazamiento en el mundo real, no pueden considerarse con retroalimentación propioceptiva completa. Adicionalmente, se pueden considerar con un nivel alto de “magia” ya que tanto la rotación como el caminar en el sitio resultan atípicas para los usuarios estándar.

En Q3 se clasificación dos metáforas de navegación artificial: Caminar indirecto (del inglés, *indirect locomoción* o *indirect walking*), la cual es considerada mundana por su habitual utilización en videojuegos y locomoción automática (del inglés, *automatic locomotion*), popularizada por las atracciones de los parques temáticos. Ambas tienen baja retroalimentación propioceptiva ya que no exigen ningún movimiento y no reciben ninguna entrada sensorial de retorno.

Finalmente, en Q4 se incluyen los métodos de locomoción natural, Caminar real (del inglés, *real walking*) y Caminar redirigido (del inglés, *redirected walking*). Las dos son principalmente mundanas pero Caminar redirigido se muestra con un menor nivel de retroalimentación propioceptiva ya que, incluso con las implementaciones más eficientes, presenta algunas singularidades sensoriales.

Para este estudio, se han seleccionado dos técnicas de locomoción de los grupos Q2, Mundane-LPF, y Q4, Magical-HPF con la intención de analizar su influencia sobre la experiencia de usuario.

2.3.10 Bases de la relación entre locomoción y presencia

Desde el momento en que la interacción juega un papel fundamental en la sensación de presencia ya que es un factor crucial en la aceptación y en el uso satisfactorio de la Realidad Virtual[134] y que la locomoción es la segunda interacción más utilizada dentro de un entorno de RV[22] (justo después de controlar la cámara con los movimientos de la cabeza), vamos a poner el foco en la intersección de estos dos conceptos: locomoción y presencia.

La idea intuitiva detrás de esta relación es que eligiendo una técnica de locomoción cercana a la locomoción humana (mundana y HPF, tal como vimos en la sección anterior) se incrementarían todas las manifestaciones de la presencia[177, 201]: subjetiva, conductual y fisiológica. Esta hipótesis radica en el concepto de que los usuarios que navegan a través de un entorno de Realidad Virtual utilizando una técnica de locomoción que encaja de modo más preciso la información propioceptiva que arroja su propio cuerpo y la retroalimentación sensorial que proporciona el ordenador, experimentarán una mayor sensación de presencia.

La investigación realizada durante los últimos 25 años[202] ha cultivado la idea de que una técnica de locomoción más realista estará siempre asociada con mayores niveles de presencia. A lo largo de esta tesis doctoral comprobaremos que esta afirmación no es siempre correcta *per se* ya que habría que incluir implicaciones más complejas en la ecuación.

Aunque hasta el momento, la mayor parte de las investigaciones desarrolladas estudiando la relación entre presencia y locomoción han sido subsidiarias de otros temas [216] como, por ejemplo, los cibermareos, el rendimiento o la usabilidad, existe una base interesante de artículos que nos ayudarán a fijar unas líneas base en la investigación.

En la siguiente sección analizaremos en profundidad los trabajos más relevantes en los que se ha estudiado la relación entre locomoción y presencia.

2.4 Comparaciones previas de diversas técnicas de navegación

Con el objetivo de crear una sólida base de conocimiento acerca de las metáforas de navegación empleadas en Realidad Virtual y su relación con la sensación de presencia, se utilizaron principalmente las siguientes fuentes de datos Web of Science (WoS), Scopus y Google Scholar las cuales a su vez buscan en otras bases de datos de editoriales como Sage, Springer, Elsevier, ACM e IEEE.

La fórmula de búsqueda utilizada para esta parte de la tesis ha sido:

TITLE-ABS-KEY ((virtual AND reality OR vr) AND (navigation OR walking OR locomotion OR travel) AND presence)

Para validar esta fórmula de búsqueda, se incluyeron otras palabras clave como “virtual” y “HMD” pero no incorporaron resultados útiles. De esta búsqueda, obtuvimos 417 documentos, de los cuales, filtramos aquellos anteriores al 2013, fecha de lanzamiento del primer HMD de difusión masivo, el Oculus Rift DK1. De este modo, las comparaciones serían realizadas entre sistemas de RV análogos, excluyendo aquellos que anteriormente se contemplaban como RV: monitores estereoscópicos, sistemas CAVE, etc... Esto limitó los resultados a 84 artículos publicados en revistas con las siguientes características:

- Incluyen comparación de diferentes técnicas de locomoción.
- Incluyen al menos un método de medida de la sensación de presencia.
- Utilizan un sistema de RV completamente inmersivo, con HMD.

De esta criba inicial, únicamente un artículo resultaba adecuado para su inclusión, por ese motivo y a partir de un extenso y prolongado estudio, se

decidieron incorporar estudios relevantes de prestigiosas conferencias, llegando a 7 los artículos seleccionados.

Este proceso de búsqueda arroja una de las primeras conclusiones de esta tesis y es que no existe una base lo suficientemente amplia de trabajos empíricos en los que se comparen diferentes metáforas de navegación y su implicación en la presencia dentro de un mismo entorno de Realidad Virtual.

De cada artículo seleccionado, como se puede ver en la tabla resumen 2.11 analizamos los siguientes datos: a) Metáforas de navegación comparadas; b) Datos y características de la muestra; c) Métricas de presencia empleadas y d) Resultados de la medición de la presencia (qué metáfora generaba mayor sensación de presencia).

Pasaremos ahora a analizar las condiciones técnicas y diseños experimentales de los citados estudios.

- **Usoh et al. (1999)[202]**: En este estudio, el entorno virtual consistía en un espacio de seguimiento dividido en dos diferentes sub-espacios: un área de entrenamiento y un área experimental (el *foso virtual*), ambos de 5 x 4 metros. El HMD empleado fue un Virtual Research V8 con una resolución VGA (640x3)x480 píxeles por ojo. El campo de visión (FoV, de las siglas en inglés Field of View) era de 60 grados. Participaron en el experimento 33 sujetos, divididos en tres grupos de 11 sujetos cada uno de ellos. A cada grupo (*voladores, caminantes y caminantes reales*) le fue asignada una técnica de navegación para la experiencia en el entorno virtual. El procedimiento experimental fue el siguiente, en orden cronológico: Cuestionario acerca de cibermareos, experiencia virtual, cuestionario acerca de cibermareos, cuestionario de presencia (SUS, el cuestionario Slater-Usuh-Steed[177]) y una sesión de diálogo final. La actividad propuesta dentro del entorno virtual fue explorar las distintas áreas, sin tareas definidas.
- **Zanbaka et al. (2004)[217]**: Este experimento perseguía comparar cuatro técnicas de navegación distintas: andar realmente en un espacio de 4.5m x 4.6m x 2.6m y dos variantes de locomoción indirecta, basadas en el manejo de un joystick. La cuarta técnica se basaba también en controlar un joystick pero sobre un monitor en vez de en un HMD: teniendo en cuenta esto, sólo contemplamos las tres primeras opciones. El sistema de Realidad Virtual se basaba en un HMD V8 con una resolución de 640x480 píxeles por ojo. El entorno virtual consistía en una única sala, en la cual se podían encontrar muebles, cuadros, libros, etc... El procedimiento experimental se organizó en tres etapas: a) Pre-experimento: con cuestio-

Id	Datos identificativos		Metáforas de locomoción estudiadas							Participantes			Métricas de presencia			Resultados de presencia			
	Autores	Año	Caminar real	Caminar redirigido	Caminar en el sitio	Máquina de pasos	Teletransporte libre	Teletransporte a puntos fijos	Locomoción automática	Locomoción indirecta	n	Intersujeto/Intrasujeto	Tamaño del subgrupo por condición	Edad media participantes	Presencia Subjetiva	Presencia comportamental	Presencia psico-fisiológica	¿Existe diferencia significativa en la presencia?	Metáfora con la presencia más alta
1	Mayor et al. [118]	2019	x				x	x		x	48	Intrasujeto	NA	28.5	IPQ	No	No	SI	Caminar real
2	Bozgeyikli et al. [26]	2019		x			x	x			15	Intrasujeto	NA	26.38	Adapted version of Witmer & Singer Self developed questionnaire	No	No	SI	Caminar redirigido
3	Griffin et al. [68]	2018	x				x				20	Intrasujeto	NA	23.45	SUS	No	No	SI	Caminar en el sitio
4	Langbehn et al. [97]	2018		x			x				33	Intrasujeto	11	25.2	SUS	No	No	No	NA
5	Frommel et al. [62]	2017						x			24	Intrasujeto	NA	27.04	Adapted version of E21 presence	No	No	SI	Teletransporte libre
6	Peck et al. [144]	2011		x							36	Intrasujeto	12	26	SUS	No	No	No	NA
7	Zanbaka et al. [217]	2004	x								44	Intrasujeto	11	27	SUS	No	No	No	NA
8	Usoh et al. [202]	1999	x								33	Intrasujeto	11	NA	SUS	SI	No	No	NA

Figura 2.11: Tabla resumen artículos clave.

Id	Autores	Año	Tamaño del espacio de seguimiento	Tipo HMD	Resolución HMD (por ojo)	Campo de visión (FoV)	¿Exploración libre (EL) u orientado a tareas (OT)?
1	Mayor et al. [118]	2019	4m x 4m	HTC Vive	1080x1200	110°	OT
2	Bozgeyikli et al. [26]	2019	2.43m x 2.43m	VR2200	1024x768	45°	OT
3	Griffin et al. [68]	2018	2m x 1.5m	HTC Vive	1080x1200	110°	OT
4	Langbehn et al. [97]	2018	4m x 4m	HTC Vive	1080x1200	110°	OT
5	Frommel et al. [62]	2017	2m x 3m	HTC Vive	1080x1200	110°	EL
6	Peck et al. [144]	2011	6.5m x 6.5m	nVisor SX	1280x1024	60°	OT
7	Zanbaka et al. [217]	2004	4.5m x 4.6m x 2.6m	Virtual Research V8	640x480	60°	EL
8	Usoh et al. [202]	1999	5m x 4m	Virtual Research V8	640x480	60°	EL

Figura 2.12: Tabla resumen condiciones experimentales artículos.

narios para recoger datos acerca de su perfil demográfico, de manejo de ordenadores, de ansiedad frente a los ordenadores, el cuestionario acerca de cibermareos SSQ (del inglés Simulation Sickness Questionnaire[89] y el cuestionario GZ, de Guilford-Zimmerman[69] para medir habilidades espaciales; b) Experimento: con una sesión de entrenamiento y una posterior actividad de exploración del entorno virtual durante 5 minutos; c) Post-experimento: de nuevo SSQ y el cuestionario de presencia SUS. Completaron satisfactoriamente el experimento 44 personas, 11 de cada condición.

- Peck et al. (2011)[144]:** Este estudio perseguía la evaluación comparativa de andar redirigidamente (una variante basada en distractores), andar en el sitio y locomoción indirecta (basada en joystick). El entorno virtual consistía en dos laberintos, uno más sencillo orientado a una tarea de búsqueda trivial y el otro, más complejo, daba soporte a una tarea de búsqueda. El espacio total de seguimiento del usuario era de 6.5m x 6.5m. Participaron 36 personas, divididas en tres grupos iguales de 12 sujetos, uno por condición. Se utilizó un HMD nVisor SX con una resolución de 1280x1024 píxeles por ojo y un campo de visión (FoV, del inglés Field of View) de 60 grados. El diseño experimental se organizó en 4 fases: a) Entrenamiento: navegación simple; b) Búsqueda trivial: con 6 objetivos;

c) Búsqueda priorizada: con 6 objetivos; y d) Post-experimento: administrando los cuestionarios SSQ de cibermareos y SUS de presencia.

- **Frommel et al. (2017)[62]**: Los investigadores utilizaron un entorno de Realidad Virtual llamado VRZoo. Este, consistía en un zoo futurista con cinco áreas: 4 recintos y un distribuidor principal. Cada recinto contenía un tipo específico de animal, vivo o extinto y estaban diseñados como espacios abiertos bajo una cúpula de cristal. No había ningún objetivo que alcanzar ni condición de victoria, simplemente se pretendía que los usuarios exploraran libremente. El HMD era un HTC Vive con mandos inalámbricos. Este dispositivo proporciona una resolución de 1080 x 1200 píxeles por ojo con un FoV diagonal de 100 grados. El grupo de participantes estuvo formado por 24 sujetos y todos ellos pasaron por las cuatro condiciones, correspondientes a cuatro metáforas de navegación distintas: teletransporte libre, teletransporte de destino fijo, locomoción indirecta con *touchpad* y locomoción guiada). Se empleó un contrabalanceo de cuadrado latino. El procedimiento experimental fue el siguiente: a) Experiencia en el entorno virtual; b) Post-Experimento: administrando los cuestionarios SSQ de cibermareos, SAM (del inglés Self-Assessment Manikin[28]) para recoger el estado emocional y el cuestionario de presencia y disfrute de Lin, el (E²I[106]).
- **Langbehn et al. (2018)[97]**: Este experimento se lleva a cabo en un espacio caminable de 4 x 4 metros con seguimiento proporcionado por un sistema HTC Vive. Los autores evaluaron locomoción indirecta, andar redirigido y teletransporte. Participaron 33 sujetos que completaron satisfactoriamente el experimento. El proceso experimental fue el siguiente: a) Cuestionarios pre-experimento; b) Instrucciones; c) Experiencia en RV; d) Cuestionarios post-experimento (SSQ de cibermareos y SUS de presencia); e) Debate posterior. Se utilizó un diseño experimental basado en la comparación entre-sujetos con 3 grupos de 11 personas cada uno de ellos. A cada grupo le fue asignada una metáfora de navegación. Los participantes debían explorar una representación virtual de una oficina, navegando entre diferentes objetivos, marcados por luces de diferentes colores que desaparecían al tocarlas).
- **Griffin et al. (2018)[68]**: Este artículo no sólo perseguía la comparación entre diferentes métodos de locomoción sino también averiguar como influía si los usuarios tenían sus manos ocupadas o libres durante el experimento. Los autores investigaron dos metáforas de navegación que se deben ejecutar con las manos ocupadas: caminar indirecto y teletransporte y dos metáforas que se pueden llevar a cabo con las manos libres:

caminar en el sitio y reconocimiento del movimiento vertical de la cabeza. El entorno virtual corría sobre un sistema HTC Vive. Los participantes en el estudio debían resistir el mayor tiempo posible el ataque de diferentes oleadas de drones enemigos que intentaban acabar con ellos. Podían defenderse disparándoles con dos pistolas que sujetaba su avatar virtual en las manos, vinculadas a los mandos del sistema virtual. En total, 20 sujetos pasaron por el experimento y cada uno de ellos “jugó” cuatro rondas, una con cada metáfora de navegación. Para evaluar la sensación de presencia, se les administró un cuestionario elaborado ad-hoc por los autores, basado en una escala Likert del 1 al 5, preguntándoles acerca de cuánto habían sentido que “realmente” estaban en el mundo virtual.

- **Bozgeyikli et al. (2019)[26]**: Los autores pretendían comparar 8 metáforas de navegación distintas (caminar redirigido, caminar en el sitio, caminar en el sitio con una máquina de pasos, teletransporte y tres versiones de locomoción indirecta (joystick, trackball y “volar” agitando las manos). Un total de 15 participantes pasaron por las tres condiciones. El entorno virtual era un sencillo aunque realista espacio al aire libre. El procedimiento experimental fue el siguiente: a) Pre-experimento con recogida de datos demográficos a partir de cuestionarios; b) Experiencia Virtual y c) Post-experimento con diversos cuestionarios: Experiencia de usuario con una versión modificada del cuestionario de los Core Elements of Gaming Experience de Loewenthal [108]; cibermareos con el Pensacola Diagnostic Criteria[100] y presencia con una versión modificada del cuestionario de Witmer and Singer[214]. El sistema de RV utilizado fue un VR2200 con una resolución de 1024 x 768.
- **Mayor, Raya y Sánchez (2019)[118]**: Este artículo tiene como objetivo la comparación de cuatro técnicas de locomoción e interacción en base a la presencia, la usabilidad y la comodidad (relacionada con los cibermareos). Para ello, elaboraron un entorno en RV dividido narrativamente en cuatro capítulos, cada uno de ellos con unas tareas determinadas a ejecutar: mini-puzzles, tareas simples de manipulación, desplazamiento de objetos, etc... Las metáforas de locomoción analizadas fueron: teletransporte a puntos fijos, teletransporte libre, caminar indirecto y caminar libre (con seguimiento a escala de habitación). El sistema de RV utilizado fue un HMD HTC VIVE con una resolución de 2160 x 1200, un campo de visión, FOV de 110 grados y un rendimiento de 90 Hz. Participaron del experimento un total de 48 personas, las cuales utilizaron de una manera balanceada (algoritmo cuadrado latino) cada una de las cuatro técnicas de locomoción en uno de los cuatro capítulos. El procedimiento experi-

mental fue el siguiente: los usuarios llevaban a cabo las tareas asignadas a cada capítulo y al terminar el mismo y antes de comenzar el siguiente cumplimentaban formularios relacionados con presencia (IPQ[168]) y con comodidad y cibermareos (SSQ[89]). Adicionalmente, para comparar la usabilidad, se registraron los tiempos dedicados a completar cada tarea o interacción.

2.4.1 Métricas para la sensación de presencia

La sensación de presencia se manifiesta bajo diferentes formas y, por tanto, puede ser medida de diferentes maneras, cada una de ellas con sus potenciales beneficios y debilidades[126]. Vamos a analizar estas vías para, posteriormente, poder estudiar en profundidad el posible correlato entre presencia y metáfora de navegación.

2.4.1.1 Presencia subjetiva

Esta vía para cuantificar la presencia es registrada normalmente en cuestionarios administrados tras la experiencia en Realidad Virtual y se basa en la auto-percepción de cuan “real” ha sido para el sujeto el entorno virtual. Witmer y Singer[214] y Slater, Usoh y Steed[182, 201] desarrollaron los primeros *estándares de oro* para cuantificar la sensación de presencia aún cuando otros investigadores habían trabajado intensamente en métricas alternativas[55, 143]. El cuestionario de Witmer y Singer (WS) consiste en 32 preguntas que deben ser respondidas en una escala Likert del 1 al 7. Por su parte, el cuestionario de Slater, Usoh y Steed (SUS) tiene 6 preguntas, también con respuestas en una escala Likert del 1 al 7. En este último cuestionario, son los investigadores que lo utilizan los que deciden qué valores corresponden a una alta presencia: bien 5, 6 y 7 o únicamente 6 y 7.

Estos cuestionarios aún siendo extensamente probados, como el resto de cuestionarios basados en complejas reflexiones introspectivas, tienen un inherente sesgo ya que se apoyan en recuerdos acerca de la experiencia virtual que se van debilitando, en un humor cambiante, en prejuicios y contextos sociales[93]. Este hecho complica sobremanera que los resultados obtenidos por estos medias sean considerados robustos y fiables, tal y como se presentó en la sección 2.3.4.

De los ocho estudios analizados en detalle, 4 de ellos [97, 144, 217, 202] utilizaron el SUS administrado post-experimentalmente con el objetivo de evaluar la presencia subjetiva. Otro estudio[62] utilizó una versión adaptada del cuestio-

nario E²I[106]. En el artículo de Mayor[118] se empleó el cuestionario IPQ[168]. El estudio de Bozgeyikli[27] utilizó una versión modificada del cuestionario WS.

En este último caso, se simplificó el WS a tres preguntas, las cuales debían ser respondidas en una escala Likert de 4 puntos (0: nada; 3: mucho).

- ¿Has tenido la sensación de estar en el mundo virtual? (“Did you have the sense of being in the virtual world?”)
- ¿Has tenido la sensación de que el mundo virtual era real? (“Did you feel like the virtual world was real?”)
- ¿Has tenido la sensación de que estabas visitando el mundo virtual o viendo una escena? (“Did you feel like you were visiting the virtual world or viewing a scene?”)

Por su parte, en el estudio de Frommel et al.[62], se utilizó una versión personalizada del E²I, el cual descompone la sensación de presencia en cuatro factores: Factor Sensorial (SF, del inglés *Sensory Factor*), Factor de Distracción (DF, del inglés *Distraction Factor*), Factor de Realismo (RF, del inglés *Realism Factor*) y Factor de Control (CF, del inglés *Control Factor*). El cuestionario, en su dimensión específica de la presencia, tiene 9 preguntas que tienen que ser respondidas en una escala Likert de 7 puntos:

- ¿Cuánto te involucra contemplar ... (el entorno virtual)?, por ejemplo ¿Cuánto atrae tu atención la escena visual? (*How much did looking at (the VE) involve you, i.e. how much did the visual scene attract your attention?*, SF)
- ¿Hasta qué punto te distraen los ruidos originados fuera del entorno virtual de lo que está pasando dentro de él? (*To what extent did events such as noise occurring outside the VE distract your attention from it?*, DF)
- ¿Cuán consistente te resultó la sensación de objetos moviéndose a través del espacio? (*How compelling was your sense of objects moving through space?*, SF,RF)
- ¿Cuán consistentes te parecieron las experiencias en el entorno virtual? Por ejemplo, ¿hasta qué punto sentiste que realmente te estabas moviendo por el entorno virtual? (*How consistent were experiences in the virtual environment; i.e., to what extent did you feel as though you were actually moving through the VE?*, SF,RF)

- ¿Cuán capaz te sentiste de explorar o buscar activamente a través del entorno utilizando la visión? (*How completely were you able to actively survey or search the environment using vision?*, SF,RF,CF)
- ¿Te viste tan inmerso en la tarea de memoria que perdiste la noción del tiempo? (*Were you involved in the memory task to the extent that you lost track of time?*, DF)
- ¿Hasta qué punto tenías la sensación de “estar allí”, en el entorno virtual? (*How much did you have a sense of “being there” in the virtual environment?*, SF,RF)
- ¿Durante la experiencia, cuál fue más intenso en términos generales, la sensación de estar en la habitación del simulador de conducción o en el entorno virtual? (*During the time of the experience, which was strongest on the whole, your sense of being in the driving simulator room or in the virtual environment?*, SF,DF,RF)
- Estructura de la memoria (a través de un test de memoria acerca del entorno virtual). (SF,RF,CF)

También encontramos cuatro estudios que emplearon el cuestionario SUS: Usho et al.[202], Zanbaka et al.[217], Peck et al.[144] y Langbehn et al.[97]. Este cuestionario se basa en las siguientes preguntas:

- Por favor, evalúa tu sensación de estar en el entorno virtual en una escala del 1 al 7, donde 7 representa tu experiencia normal de estar en un sitio. (*Please rate your sense of being in the virtual environment, on a scale of 1 to 7, where 7 represents your normal experience of being in a place.*)
- ¿En qué medida el tiempo transcurrido durante la experiencia en el entorno virtual era la realidad para ti? (*To what extent were there times during the experience when the virtual environment was the reality for you?*)
- Cuando vuelves a pensar en la experiencia, ¿piensas más en el entorno virtual como imágenes que has visto o como un lugar que has visitado? (*When you think back to the experience, do you think of the virtual environment more as images that you saw or more as somewhere that you visited?*)
- A lo largo de la experiencia, ¿qué sensación fue más fuerte, la de estar en el entorno virtual o la de estar en cualquier otro sitio? (*During the*

time of the experience, which was the strongest on the whole, your sense of being in the virtual environment or of being elsewhere?)

- Considera tus recuerdos de estar en el entorno virtual. ¿Cuán similares, en términos de la estructura de la memoria, consideras esos recuerdos de otros relativos a otros sitios en los que has estado hoy? Por estructura de la memoria considera elementos como si tienes recuerdos visuales del entorno virtual, si esos recuerdos son en color, en qué medida son vívidos o realistas, su tamaño, lugar en tu imaginación, hasta qué punto es panorámico en tu imaginación y otros elementos estructurales. (*Consider your memory of being in the virtual environment. How similar in terms of the structure of the memory is this to the structure of the memory of other places you have been today? By “structure of the memory” consider things like the extent to which you have a visual memory of the virtual environment, whether that memory is in colour, the extent to which the memory seems vivid or realistic, its size, location in your imagination, the extent to which it is panoramic in your imagination, and other such structural elements.*)
- A lo largo de la experiencia, ¿pensaste a menudo que estabas realmente en el entorno virtual? (*During the time of your experience, did you often think to yourself that you were actually in the virtual environment?*)

Cada cuestión debía ser respondida en una escala Likert de 7 puntos, donde 1 representaba menos “credibilidad” y 7 una sensación casi total de estar en un sitio “real”.

En el estudio de Griffin et al. [68], nos encontramos con un cuestionario desarrollado por los propios autores y consistente en una única pregunta, repetida para cada metáfora de navegación: “El método ... proporciona una presencia alta”. Estas preguntas debían ser respondidas en una escala Likert de 5 puntos, donde el 1 representaba un total desacuerdo y el 5, un acuerdo total.

Por último, en el estudio de Mayor et al., se empleó el cuestionario IPQ. Este cuestionario está construido a partir de preguntas de otros cuestionarios de presencia [182, 79, 34, 214]. Concretamente, utiliza 14 de los elementos más relevantes. Estos deben ser evaluados en una escala Likert de 7 puntos donde 0 representa “completamente en desacuerdo” y 6 “completamente de acuerdo”. Algunas preguntas se encuentran invertidas para contrastar los resultados y en ellas el 6 representa “completamente en desacuerdo” y el 0, “completamente de acuerdo”. Los 14 elementos se dividen en 3 grupos: Presencia Espacial (SP, del inglés *Spatial Presence*), referente al sentido de estar físicamente presente

en el espacio virtual; Involucración (INV, del inglés *Involvement*), referente a la atención prestada al entorno virtual así como al nivel de involucración en el mismo; Realismo (REAL, del inglés *Realism*), referente a la experiencia subjetiva de realismo dentro del entorno virtual. Adicionalmente, el cuestionario presenta un grupo General (G), con una única pregunta, el cual se utiliza para medir el nivel consolidado de presencia. Los citados items son:

1. (G) En el mundo generado por ordenador, he tenido la sensación de “estar allí”. (*In the computer generated world I had a sense of "being there".*)
2. (SP) De algún modo, sentí que el mundo virtual me rodeaba. (*Somehow I felt that the virtual world surrounded me.*)
3. (SP) Me sentí como si estuviera contemplando imágenes. (*I felt like I was just perceiving pictures.*)
4. (SP) No me sentí presente en el espacio virtual. (*I did not feel present in the virtual space.*)
5. (SP) Tuve la sensación de realizar acciones en el espacio virtual más que de operar algo desde fuera. (*I had a sense of acting in the virtual space, rather than operating something from outside.*)
6. (SP) Me sentí presente en el espacio virtual. (*I felt present in the virtual space.*)
7. (INV) ¿Fuiste consciente del mundo real que te rodeaba cuando estabas navegando el mundo virtual? (por ejemplo, sonidos, temperatura de la habitación, otras personas, etc.) (*How aware were you of the real world surrounding while navigating in the virtual world? (i.e. sounds, room temperature, other people, etc.)?*)
8. (INV) No fui consciente de mi entorno real. (*I was not aware of my real environment.*)
9. (INV) No dejé de prestar atención al entorno real. (*I still paid attention to the real environment.*)
10. (INV) Estaba totalmente cautivado por el mundo virtual. (*I was completely captivated by the virtual world.*)
11. (REAL) ¿Cuán real te pareció el mundo virtual? (*How real did the virtual world seem to you?*)

12. (REAL) ¿Hasta que punto te pareció consistente la experiencia en el mundo virtual con tu experiencia en el mundo real? (*How much did your experience in the virtual environment seem consistent with your real world experience ?*)
13. (REAL) ¿Cuán real te pareció el mundo virtual? (*How real did the virtual world seem to you?*)
14. (REAL) El mundo virtual me pareció más realista que el mundo real. (*The virtual world seemed more realistic than the real world.*)

2.4.1.2 Presencia conductual

De un modo intuitivo, cuanto mayor sea la sensación de presencia de un sujeto dentro de un entorno virtual, más cercanas a la realidad serán sus reacciones dentro del mismo. Estos actos reflejos pueden actuar como indicadores de presencia en un entorno de Realidad Virtual[126]. Agacharse frente a una amenaza a la altura de los ojos, tratar de evitar pisar un objeto peligroso o caminar despacio por un puente estrecho y elevado, son reacciones comunes dentro de un entorno de Realidad Virtual y muestran que el sujeto está experimentando una elevada sensación de presencia[77].

De los 8 estudios clave seleccionados, los cuales comparan diferentes metáforas de navegación sobre sistemas HMD, sólo uno, el de Usoh et al.[202], incluyó la presencia conductual como una dimensión de la medición de la presencia. Los autores crearon una puntuación compuesta de cinco elementos, cumplimentados por observadores externos:

1. Nivel de consciencia del sujeto frente a los ruidos de fondo en el laboratorio real (evaluado en una escala del 1 al 7);
2. Hasta que punto, la reacción del sujeto cuando miraba hacia abajo en el pozo era similar a la esperada en el mundo real (evaluado en una escala del 1 al 7);
3. El nivel de vértigo o miedo a caer que mostraba el sujeto cuando miraba hacia abajo en el mundo real (evaluado en una escala del 1 al 7);
4. La disposición del sujeto a caminar por encima del pozo virtual (evaluada en una escala del 1 al 7);

5. El camino que tomaron para llegar a la silla de la otra parte del pozo; si caminaron sobre el abismo, la puntuación era de 0, si lo hicieron por el borde, la puntuación era de 1.

Esta medida correlaciona positivamente y de manera elevada con la presencia auto-evaluada[202].

2.4.1.3 *Presencia psico-fisiológica*

Con el objetivo de obtener una medida continua de la sensación de presencia de los participantes en un experimento basado en Realidad Virtual y tratando de evitar obtenerla de cuestionarios post-experimento, basados en sesgados y debilitados recuerdos, se han propuesto diversas señales fisiológicas como métricas correlacionadas con la presencia[85].

Se han realizado interesantes investigaciones en esta línea, destacando el trabajo de Meehan [124], en el cual se investigó la correlación entre la sensación de presencia y ciertas medidas fisiológicas (tasa cardíaca, conductividad de la piel y temperatura de la piel), variando tres condiciones del entorno virtual: tasa de fotogramas (*frame rate*), presencia de hápticos pasivos y exposiciones múltiples al entorno. Otro interesante conjunto de trabajos más reciente, es el liderado por Alcañiz, utilizando EEG (electroencefalograma) con el objetivo de medir la sensación de presencia durante la navegación de un entorno en Realidad Virtual[39, 38].

2.4.2 *Relación entre la metáfora de navegación y la presencia*

Como apreciamos previamente en la Figura 2.12, 4 de los estudios analizados en profundidad no encontraron ninguna diferencia significativa en la sensación de presencia al comparar en un mismo entorno virtual diferentes metáforas de navegación: Usoh et al.[202], Zambaka et al. [217], Peck et al.[144] y Langbehn et al.[97]. Si buscamos un denominador común de estos artículos, encontramos un hallazgo realmente interesante: los 4 comparten un mismo diseño experimental. Su procedimiento es el siguiente:

1. Contraste intersujeto: Los n participantes del estudio fueron divididos en diferentes grupos, uno por condición. Cada grupo únicamente experimentaba una metáfora de navegación y los resultados de evaluar su sensación de presencia eran comparados con los de los otros grupos.

2. Cuestionario SUS: Los cuatro experimentos utilizaron el cuestionario SUS como métrica para la presencia, administrado post-experimentalmente.

Otros dos artículos (Frommel et al.[62] y Bozgeyikli et al. ([27]) muestran diferencias significativas en los niveles de presencia. Ambos emplearon un diseño experimental intrasujeto. Esto significa que todos los participantes pasaron por todas las condiciones (metáforas de navegación en nuestro caso) y que la comparación no es con otros sujetos sino con sus propios resultados con las otras condiciones. Adicionalmente, ninguno de ellos utilizó el cuestionario SUS. En el caso de Frommel et al. [62] , después del cálculo ANOVA, se mostró un efecto significativo de la metáfora de navegación sobre la sensación de presencia. La clasificación de las puntuaciones obtenidos para la presencia a partir del cuestionario E²I fue: (1ro) Teletransporte (Media = 37.00); (2do) Locomoción Indirecta (touchpad) (Media = 34.54); (3ro) Teletransporte puntos fijos (Media = 32.42); (4to) Locomoción automática (Media = 31.54).

Griffin et al. [68] , después de los tests post-hoc Mann-Whitney, encontraron una diferencia significativa en las puntuaciones Likert entre el caminar en el sitio y todas las otras metáforas de navegación ($p < .05$). (1ro) Caminar en el sitio; (2do) Movimiento de cabeza; (3ro) Locomoción Indirecta; (4to) Teletransporte. No se proporcionan los valores individuales de presencia para cada método de navegación en el estudio.

El estudio desarrollado por Bozgeyikli et al. [27] , utilizando el cuestionario Witmer y Singer, obtuvieron también diferencias significativas, aunque los resultados finales no se muestran en el artículo, únicamente una representación gráfica de los mismos: (1ro) Caminar redirigido; (2do) Caminar en el sitio; (3ro) Teletransporte libre; (4to) Máquina de pasos; (5to) Locomoción indirecta (volar); (6to) Locomoción indirecta (Joystick); (7to) Locomoción indirecta (Trackball); (8to) Locomoción indirecta (“aleteando” con las manos).

Por último, en el artículo de Mayor et al. [118] , tras administrar el cuestionario IPQ, se detectaron diferencias estadísticamente significativas en las variables G y SP entre las diferentes metáforas. La clasificación a partir de los resultados obtenidos fue: (1ro) Caminar real. (2do) Teletransporte libre; (3ro) Locomoción indirecta (Gamepad); (4to) Teletransporte puntos fijos.

2.4.3 Conclusiones

Tras esta exhaustiva revisión bibliográfica, apreciamos que la sensación de estar realmente dentro de un entorno virtual, la presencia, juega un papel fundamental en la evocación emocional y, por extensión, en la eficacia de las experiencias formativas en Realidad Virtual. Medir esta sensación de presencia es complejo y se han realizado, durante los últimos 30 años, diferentes aproximaciones, casi todas ellas basadas en cuestionarios auto-perceptivos. Estos cuestionarios no se muestran robustos ya que se basan en recuerdos débiles de la experiencia virtual y contienen sesgos psicológicos. Por este motivo, son necesarios nuevos experimentos incluyendo medidas alternativas, con mayor carga objetiva. Surge aquí la oportunidad para las métricas conductuales y fisiológicas. Adicionalmente, se ha comprobado en esta revisión que los experimentos intersujeto, donde cada participante evalúa una condición, una metáfora, no muestran diferencias significativas por lo que podemos inferir que la novedad o la falta de referentes hacen que se sienta tan presente o no presente como se lo permita su propio sistema psico-cognitivo.

Metáforas de navegación y experiencia de usuario en un entorno de RV

3.1 Introducción

En este capítulo se relata el diseño, desarrollo y resultados de un experimento destinado a solventar algunas carencias en las evidencias empíricas mostradas en el capítulo anterior: Entender la influencia de la metáfora de interacción sobre la experiencia de usuario en general y de la sensación de presencia en particular, en un entorno de Realidad Virtual, a partir de un abanico de métricas subjetivas y objetivas.

Una métrica definitoria de la Realidad Virtual (RV), como pudimos ver en el capítulo anterior, es la sensación de presencia, una construcción psicofísica compleja y multidimensional que representa cuán intensa es la sensación de *realmente estar allí*, dentro del Entorno Virtual (EV), olvidando cómo la tecnología media en la experiencia. A lo largo del capítulo, exploraremos cómo la locomoción influye en la presencia, estudiando dos formas diferentes de movimiento artificial a través de un EV: caminar en el sitio (a través de la detección

del movimiento de la cabeza) y caminar indirecto (a través de la interacción con el panel táctil del controlador). Para evaluar esa influencia, se creó un laberinto neutro narrativamente, del cual cuarenta y un participantes ($N = 41$) tuvieron que escapar.

3.2 Metodología

El experimento relatado en este capítulo se basa en los trabajos destacados en la sección 2.4 de esta tesis doctoral. En ellos, se pretende establecer una correlación entre el método de locomoción y la sensación de presencia y para ello, se diseñaron entornos virtuales a medida, además de diferentes tareas para evaluar el desempeño y la sensación de presencia en los sujetos participantes.

Teniendo en cuenta los trabajos previos, este es el primero estudio realizado en la intersección de técnicas de locomoción y presencia en Realidad Virtual que establece las relaciones entre las tres familias de métricas de presencia: subjetiva, conductual y fisiológica.

Se desarrolló un escenario ad-hoc con la intención de facilitar que los usuarios estuvieran motivados por la experiencia virtual al tiempo que se medían los efectos sobre la presencia de dos metáforas de navegación diferentes.

3.2.1 *El entorno virtual*

El entorno virtual se diseñó con el objetivo de combinar las acciones propias de un escenario orientado a tareas con aquellas correspondientes a la consecución de metas de exploración, de modo que se superaran las limitaciones de ambos tipos de escenarios. En este sentido, pretendimos cubrir las opciones de diseño más habituales en esta área de investigación donde, como vimos en el capítulo anterior, los experimentos anteriores se dividían en dos subgrupos: a) Orientados a tareas; b) Orientados a exploración.

Para el subgrupo a), las limitaciones provienen de la ausencia de navegación, ya que los desplazamientos están guiados por el principio de efectividad propio de la realización de tareas en juegos y para el subgrupo b), las limitaciones se establecen en el tedio del simple discurrir con el entorno virtual, donde la desmotivación puede mostrar valores alterados de presencia.

Adicionalmente, quisimos incorporar elementos de gamificación como las karmasferas, el escudo y los riesgos, con la intención de crear un entorno similar al de un videojuego, de modo que se manifestaran tanto el compromiso como la

motivación intrínseca, propias de estos, en nuestro estudio. Las karma-esferas representan elementos que al ser recogidos (tocados con uno de los controladores) suman puntos al valor total del “karma”. Se ubicaron karma-esferas de dos tipos: estáticas (fijas en un punto, a distintas alturas) y dinámicas (se mueven constantemente en recorridos prefijados). Se asemejan a los elementos coleccionables propios de los juegos comerciales. Al recogerlas, se produce un sonido “positivo” el cual propicia la intensificación del bucle positivo del juego (explorar - recoger).

Tal y como se afirma en McMahan et al.[122], el compromiso con la experiencia virtual y la sensación de presencia están estrechamente relacionadas.

Nuestro EV consistía en un laberinto descontextualizado y narrativamente neutro (Fig. 3.1) en el que los participantes deben conseguir llegar desde la posición inicial hasta la salida en un tiempo predeterminado. Más concretamente, los individuos disponían de 3 minutos para escapar del laberinto (misión principal) mientras que recogían la mayor cantidad posible de puntos de “karma”. La experiencia se concibió como una competición para aumentar su motivación intrínseca y para ello, la condición de victoria se estableció de la siguiente manera: Ganaría aquel que, habiendo conseguido salir en el tiempo disponible, hubiese acumulado mayor cantidad de karma.

El karma se diseñó como una métrica sintética para el rendimiento de los participantes. Había esferas distribuidas a lo largo del laberinto, las cuales al ser tocadas por los usuarios, les otorgaban un punto de karma. Por otra parte, este karma podía también ser perdido si los participantes se exponían a distintas amenazas o riesgos.

Estos riesgos estaban también distribuidos por todo el laberinto y eran de tres tipos: fuegos, precipicios y charcos tóxicos. No implicaban ningún riesgo real para el jugador ni para su avatar virtual aunque cuando entraban en contacto con ellos, perdían karma y recibían *feedback* audiovisual negativo (sonido de bocina y aura roja alrededor de la cámara), reforzando la negatividad de su acción.

Algunas esferas estaban cercanas a los peligros y otras estaban en zonas sin riesgo. Los participantes contaban con la posibilidad de activar un escudo (al estilo de los campos de energía de la ciencia ficción).

Cuando el escudo está activo, la velocidad de desplazamiento de los usuarios en el EV se ve reducida significativamente (en un 40%), además de no poder recoger karma-esferas. Esta mecánica de juego promueve las decisiones utilitaristas, aumentando el compromiso con el juego. El escudo es un recurso finito

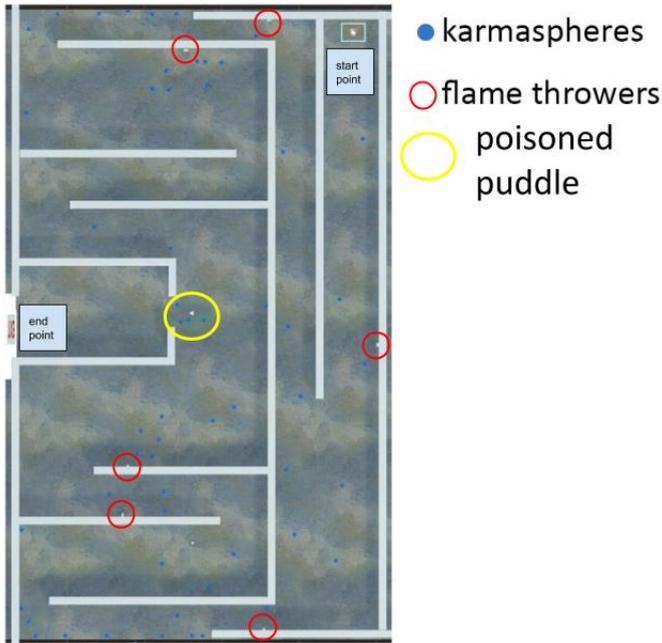


Figura 3.1: Laberinto (vista cenital)

ya que depende de una batería que se descarga con el uso y que se recarga cuando no está activo. Los usuarios tienen información orientativa permanente de la batería que les queda para el escudo así como del tiempo restante. Del karma acumulado no tienen ninguna referencia. De este modo, evitamos la especulación y favorecemos una toma de decisiones más cercana a la del mundo real.

Adicionalmente a este escenario principal, se creó un EV de entrenamiento, el cual tenía implementadas todas las mecánicas (recoger esferas, navegación y escudo) pero era una simple habitación vacía. Dentro, los usuarios se encontraban con tres luces: una verde, una amarilla y una roja, además de tres karma-esferas. Para superar esta fase de entrenamiento, los participantes debían:

1. Recoger todas las karma-esferas.

2. Activar el escudo al menos una vez.
3. Desplazarse hasta cada una de las luces, utilizando la mecánica de navegación asignada en ese caso, en el orden: verde, amarilla y roja. Una vez se colocaba encima el usuario, la luz se apagaba, indicándole que la acción había tenido éxito.



Figura 3.2: Sala de entrenamiento (vista cenital)

Una vez se cumplían todas las metas, la escena fundía a negro y se cargaba el escenario principal.

3.2.2 Métricas

En este experimento se recogieron métricas referentes a:

- Perfil de los participantes: Datos demográficos (Sexo, Edad...).
- Presencia subjetiva: A través del cuestionario ITC-SOPI [102] (ITC Sense of Presence Inventory) de Lessiter et al. A través de este cuestionario también se recoge información relativa a cibermareos.
- Presencia conductual: Mediante una escala propia basada en la observación.

- Presencia fisiológica: Utilizamos la actividad electrodérmica (EDA, del inglés Electrodermal Activity) como indicador de la presencia, obtenida a partir de las mediciones de una pulsera Empatica E4.
- Rendimiento: Basada en la puntuación de Karma obtenida a lo largo de la experiencia virtual.

3.2.3 Detalles Hardware y Software

Para este experimento se utilizó un HMD HTC Vive VR. Este dispositivo ofrece un rendimiento adecuado (resolución de 2160 x 1200, campo de visión de 110 grados y una tasa de refresco de 90-Hz) para la complejidad geométrica de nuestro entorno y de las tareas realizadas dentro de él por los usuarios. HTC Vive y sus controladores poseen todas las características necesarias para la implementación de las distintas técnicas de locomoción estudiadas en esta tesis. Los experimentos se llevaron a cabo en un área de seguimiento de 3.5m x 3.5m. El entorno virtual fue desarrollado utilizando el motor de videojuegos Unity (versión 2017.3.1f1) y ofrecía un rendimiento estable, fijado por código, de 60 FPS (frames por segundo), ejecutándose en un portátil HP OMEN 17-An104ns, con las siguientes características: i7-8750H;16GB;1TB;256SSD;17.3 pulgadas;GT 1050/W10.

En el apartado de la presencia fisiológica, para recoger los valores de la actividad electrodérmica (EDA), se utilizó una pulsera Empatica E4¹.



Figura 3.3: Pulsera Empatica E4

¹<https://www.empatica.com/en-eu/research/e4/>

Este dispositivo, orientado a la investigación, ofrece información en tiempo real acerca de la EDA. Además, posee una gran validez ecológica ya que, por su reducido tamaño, permite una interacción natural con las manos y no incorpora un aparataje voluminoso que distraiga a los usuarios durante la experiencia virtual.

Medir la EDA a través de la muñeca ofrece mayor compatibilidad con los mandos de los sistemas de RV más comunes y, adicionalmente, ha mostrado mayor receptividad que las tradicionales métricas basadas en la superficie de la palma de la mano[164]. La Empatica E4 proporciona mediciones de la conductividad eléctrica (magnitud inversa a la resistencia) a lo largo de la piel. Estas medidas son obtenidas pasando una minúscula cantidad de corriente eléctrica entre dos electrodos que están en contacto con la piel. Las unidades de medida de la conductividad son los microSiemens (μ S).

3.2.4 El procedimiento experimental

El proceso completo llevó, aproximadamente, 40 minutos de media por participante, distribuidos en las siguientes etapas.

3.2.4.1 Fase 1: Cuestionarios pre-experimento

Los participantes respondieron a los cuestionarios (demográfico e ITC-SOPI) de modo digital, utilizando un portátil convencional.

3.2.4.2 Fase 2: Experiencia en Realidad Virtual

Los participantes eran conducidos a una segunda sala, donde estaba instalado el sistema de realidad virtual junto con el área de seguimiento.

Una vez allí, se procedía a colocarles la pulsera Empatica, y a establecer una línea base de su actividad electrodérmica. Para ello, se les hacía estar en reposo durante 5 minutos con la pulsera puesta y se registraba su EDA.

Posteriormente, se les proporcionaba la siguiente locución a través de unos auriculares.

Hola, te damos la bienvenida a este laberinto. Has sido elegido para participar en una competición de la que sólo puede salir un ganador. Dispondrás de 300 segundos para encontrar la salida del laberinto y,

en tu recorrido, deberás recoger todas las esferas que puedas. Cada esfera que recojas, aumentará tu puntuación de Karma. Pero, ¡cuidado!, hay elementos que pueden hacerte perder karma. Exponerte a riesgos, te restará puntos de karma. En cualquier caso, no vamos a dejar que te enfrentes al recorrido totalmente desprotegido: contarás con un escudo que te protegerá de todos los riesgos que encuentres. Al activarlo, su campo energético protector te hará caminar más lento y no podrás recoger esferas, pero no perderás karma. El escudo, se alimenta a través de una batería, la cual se descarga con cada uso aunque se recarga de manera automática cuando no está en uso. Si la batería llegara a vaciarse del todo, no podrías activar el escudo hasta que esta no vuelva a cargarse. Recuerda, debes salir del laberinto antes de que se acabe el tiempo, ganando el mayor karma posible. ¿Estás preparado? Comenzaremos con un entrenamiento. ¡Buena suerte!

Una vez habían recibido las instrucciones, los participantes se colocaban el HMD. En primer lugar, se veían inmersos en el escenario de entrenamiento, donde debían practicar todas las mecánicas. Para atender a un diseño contrabalanceado, ya que todos los participantes pasaban por las dos condiciones (utilizar las dos técnicas de navegación distintas), la mitad comenzaban por una y la otra mitad por la otra, evitando efectos colaterales de aprendizaje.

Al completar el entrenamiento, se cargaba automáticamente el nivel principal, el laberinto. En este momento se activaba el registro de la Empatica.

Tras completar el recorrido se procedía a la administración del cuestionario ITC-SOPI, en formato digital. Al completarlo, se dejaba descansar al usuario durante 5 minutos para, posteriormente, invitarle de nuevo a repetir la secuencia con la otra metáfora de navegación: primero, la escena de entrenamiento y después, el laberinto.

El proceso completo tuvo una duración media de 30 minutos por usuario.

3.2.5 Determinación del tamaño de la muestra

A la hora de establecer un tamaño apropiado de la muestra para este experimento, de modo que se alcanzasen los objetivos de fiabilidad y robustez, seguimos un proceso de decisión basado en dos factores:

- Factor a) Trabajos anteriores: Seleccionamos los trabajos anteriores más relevantes en este ámbito de la revisión bibliográfica previa con el objeti-

vo de averiguar el tamaño medio de muestra. Nuestro objetivo primario era trabajar con una muestra mayor que la media del resto de artículos relacionados. Estos artículos, listados en el capítulo 2, fueron: Usoh et al.[202], Zambaka et al. [217], Peck et al.[144], Frommel et al. [62], Langbehn et al.[97], Griffin et al. [68], Bozgeyikli et al. [27] y Mayor et al. [118].

Su tamaño de muestra fue, respectivamente: 33, 44, 36, 24, 33, 20, 15 y 48, con una n media de 31.62 participantes. Por este motivo, con 41 participantes, cumplíamos holgadamente nuestro objetivo. Este método, consistente en elegir un tamaño de muestra similar al de otros estudios relevantes relacionados se detalla en Kotrlik et al. [95].

- Factor b) Potencia estadística: Ante poblaciones indeterminadas, la significatividad de los resultados viene determinada por el tamaño del efecto estadístico. Si atendemos al relevante trabajo de Cohen [41] acerca de la potencia estadística, podemos considerar que el tamaño de la muestra podría ser evaluado *a posteriori* utilizando el tamaño del efecto. Si la potencia estadística de nuestros hallazgos no alcanza los objetivos prefijados de significatividad, un método efectivo para aumentar esa potencia es incrementar el tamaño de la muestra. Los cálculos de tamaño de muestra basados en la potencia estadística están relacionados con la validación de hipótesis. Brevemente, podemos considerar dos tipos de errores: a) Errores de tipo I (falso positivo): Concluir que hay un efecto donde no lo hay. $\alpha = P(\text{error tipo I}) = \text{nivel de significatividad estadística [} = P(\text{rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ verdadera})]$; b) Errores de tipo II (falso negativo): Concluir que no hay efecto cuando realmente lo hay. $\beta = P(\text{error tipo II}) [= P(\text{aceptar } H_0 \mid H_1 \text{ verdadera})]$

La potencia estadística de un determinado conjunto de resultados se define como $1 - \beta [= P(\text{rechazar } H_0 \mid H_1 \text{ verdadera})]$. Esta técnica puede ser utilizada para estimar *a priori* un tamaño de muestra adecuado. Predefiniendo valores apropiados para α y β , podemos averiguar el tamaño mínimo de la muestra necesario para alcanzar determinados requisitos de potencia estadística [46].

Para un experimento intrasujeto, con valores razonables para α ($= 0.05$) y β ($= 0.8$) y previendo un conservador tamaño del efecto medio, el tamaño de muestra mínimo es de 34 individuos, como podemos ver en la Fig. 3.4, por lo que con 41 individuos, cumplimos con creces también este criterio.

Paired samples t-test, $\alpha = 0.05, \beta = 0.8$:

Effect	Small	Medium	Large
Effect size	0.2	0.5	0.8
Minimum total sample size	199	34	15

Figura 3.4: Estimación del tamaño de la muestra por Cornish[46]

3.2.6 Las técnicas de locomoción

Decidimos implementar dos diferentes métodos de locomoción, atendiendo a la tipología relativa a locomoción en RV creada por Boletsis et al. [18] (Fig. 3.5).

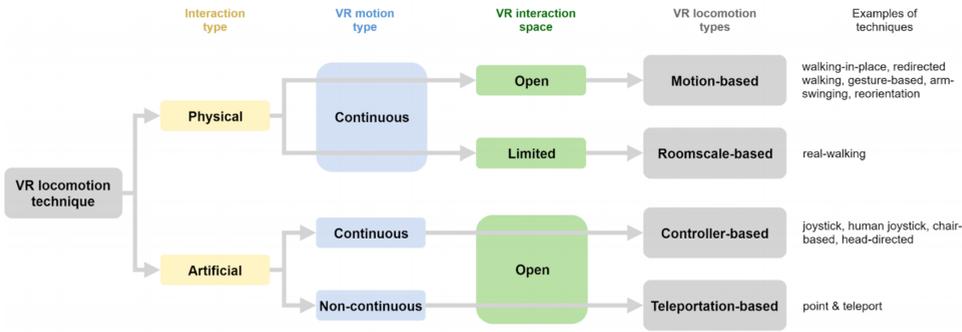


Figura 3.5: Tipos de locomoción, por Boletsis et al. [18]

Fueron seleccionados dos métodos de locomoción, cada uno de ellos representando a uno de los dos grandes grupos (físicos y artificiales) con movimiento continuo y con espacio de interacción de abierto. Estas dos características permiten mayor libertad a los diseñadores ya que imponen menos restricciones creativas.

Las dos técnicas implementadas fueron:

- Presionar un botón en el mando: Este método de locomoción pertenece al grupo de metáforas Caminar Indirecto. Esta mecánica en particular viene heredada del mundo de los videojuegos. Al presionar un botón en el controlador del sistema de RV, el avatar del usuario se desplaza en la dirección en la que está mirando. Este desplazamiento se realiza con una velocidad de 2 m/s ya que a partir de 3 m/s, se incrementan los síntomas de cibermareo [187]. Adicionalmente, esta técnica presenta

gran precisión y una curva de aprendizaje muy asequible, por lo que su potencial interés es alto.

- Caminar en el sitio (implementada a partir del movimiento de la cabeza): Este método, conocido en inglés como Head Bobbing, forma parte de la familia de métodos de Caminar en el Sitio (realizar la acción de andar pero sin desplazarse) y se basa en la detección y reconocimiento de los movimientos verticales de la cabeza que se producen involuntariamente al caminar. En este caso en particular es el HMD el responsable de detectar estos movimientos a través de sus sensores de movimiento aunque también hay variantes basadas en reconocimiento óptico a partir de cámaras. Este método resulta interesante por su alto nivel de retroalimentación propioceptiva y su fácil implementación para espacios de seguimiento pequeños.

Ambas técnicas de locomoción fueron implementadas en C# utilizando el motor Unity3D. Están basadas en las librerías SteamVR 2.0 y VR Locomotion Essentials - v2.5, dos paquetes comerciales de gran difusión. Previamente al experimento, ambas fueron evaluadas a nivel de precisión y optimización a través de un piloto con personal del laboratorio con y sin experiencia en RV o juegos en tres dimensiones.

3.2.7 *Las métricas en detalle*

Este es el primer experimento que combina las tres aproximaciones predominantes a la hora de medir la sensación de presencia: presencia subjetiva, presencia conductual y presencia fisiológica.

3.2.7.1 *Presencia subjetiva*

Con el objetivo de evaluar la presencia desde una perspectiva subjetiva, se seleccionó el cuestionario ITC-Sense of Presence Inventory (ITC-SOPI), un formulario generalista, orientado a múltiples medios (no únicamente RV) y que fue desarrollado por Lessiter, Freeman, Keogh y Davidoff en 2001[102]. Este cuestionario se compone de 44 elementos (en la versión revisada, ya que originalmente tenía 63 ítems) los cuales se evalúan a través de una escala Likert de 5 puntos (1 totalmente en desacuerdo; 5 totalmente de acuerdo). Internamente, este cuestionario se encuentra segmentado en 4 factores diferentes: (a) Sensación de Espacio Físico (Physical Space, PS); (b) Compromiso (Engagement, E); (c) Validez Ecológica (Ecological Validity, EV); y (d) Efectos Negativos (Negative Effects, NE).

3.2.7.2 Presencia conductual

Al hacer referencia a presencia conductual, se está midiendo hasta que punto los comportamientos, reacciones o percepciones individuales que se producen cuando se está inmerso en una experiencia de Realidad Virtual son análogos a aquellos que ocurrirían en el mundo real. Esta métrica se construyó a partir de los datos recogidos por los investigadores acerca de las reacciones de los participantes en el experimento a los estímulos sensoriales (amenazas visuales, sonidos, etc...) mientras caminaban por el laberinto. La codificación de estas reacciones no tiene relación con la teoría BIP (Rupturas en la Presencia, del inglés Breaks In Presence) de Slater [178], basada en la idea de que los eventos (principalmente sonidos) en el mundo real podrían ser omitidos por los usuarios si estuvieran totalmente inmersos (sensación de presencia muy alta) en el mundo virtual. Por nuestra parte, intentamos mantener el *mundo real* lo más neutro posible, en cuanto a interacciones con los participantes, de modo que se maximizara la experiencia inmersiva. Del mismo modo que en Usoh et al. [202], se construyó un marcador a partir de un indicador informado por observadores externos el cual recogía hasta que punto los participantes experimentaron reacciones *reales* ante situaciones de riesgo. Para cada amenaza, se registraron las siguientes reacciones:

- Lanzallamas (agacharse y/o saltar y/o gritar).
- Charco peligroso (saltar hacia adelante y/o caminar cautelosamente).
- Abismo (caminar cautelosamente).

Cada reacción registrada de la anterior lista añadía un punto al marcador, siendo el conteo total de las mismas, el Marcador de Presencia conductual (MPC).

3.2.7.3 Presencia fisiológica

La actividad electrodérmica (EDA) fue elegida como métrica para la presencia fisiológica. La EDA representa cambios eléctricos en la superficie de la piel que se muestran cuando la propia piel recibe señales nerviosas del cerebro. Existe un amplio consenso entre los investigadores acerca de que las variaciones en la EDA se producen por el sistema nervioso simpático y, por tanto, la EDA proporcionaría una métrica sensible de la actividad del sistema nervioso simpático [47, 147].

La EDA, también conocida como Conductancia de la Piel (SC, del inglés *Skin Conductance*) o Respuesta Galvánica de la Piel (GSR, del inglés *Galvanic Skin Response*), se ha venido utilizando como medida objetiva de la experiencia de usuario en videojuegos durante la última década [114]. Puede ser medida de muchas maneras diferentes, todas ellas basadas en la electricidad: potencial de la piel, resistencia, conductancia, admitancia e impedancia [21].

Para obtener mediciones, tal y como se explica con detalle en la sección 3.2.3 de este mismo capítulo, se utilizó un dispositivo ligero y cómodo, intentando priorizar la validez ecológica del experimento. El dispositivo elegido fue una pulsera Empatica E4.

Ya que este dispositivo recoge las variaciones en la conductividad de la piel múltiples veces por segundo, tras el experimento, los datos fueron objeto de un post-procesado (limpieza y normalización), empleando las herramientas que proporciona el software Ledalab, un *plugin* para Matlab ².

3.3 Resultados

3.3.1 Descripción de la muestra

Los 41 participantes de este estudio fueron en su mayoría estudiantes y profesores universitarios. La media de edad fue de 25.45 años (SD = 8.05). En cuanto a la distribución por género, un 56.9% fueron hombres y un 43.1% mujeres. Aproximadamente la mitad (49.9%) se autoclasificó como jugador habitual de videojuegos.

3.3.2 Presencia subjetiva

Las medias y la desviación estándar del cuestionario ICT-SOPI pueden encontrarse en la Tabla 1.

Se realizó un análisis de la varianza en los valores relativos a la presencia, teniendo en cuenta la metáfora de navegación. En primer lugar, comprobamos la normalidad de la distribución utilizando el test Lilliefors, el cual se utiliza para comprobar la hipótesis nula que afirma que los datos vienen de una población distribuida normalmente [104]. Para cada variable dependiente (Physical space, Engagement, Ecological validity y Negative Effects), el test devolvió 0,

²<http://www.ledalab.de/>

Tabla 3.1: MEDIAS Y DESVIACIONES ESTÁNDAR DEL CUESTIONARIO ITC-SOPI

	Metáfora de locomoción			
	Caminar indirecto		Andar en el sitio	
	Mean	SD	Mean	SD
Physical space	3.3288	0.6936	3.3002	0.6255
Engagement	3.7134	0.6613	3.6273	0.6339
Ecological validity	2.9220	0.9010	2.7902	0.7589
Negative effects	2.0446	0.7612	2.5366	0.9367

lo que significa que la hipótesis nula fue aceptada, a excepción de la variable Negative Effects bajo la condición Caminar Indirecto.

El tamaño del efecto se calculó utilizando la d de Cohen [192] y los resultados fueron bajos ($<.2$) para cada variable excepto para Negative Effects, un resultado consistente con el test ANOVA:

- Physical Space: $d=.04$.
- Engagement: $d=.13$.
- Ecological validity: $d=.15$.
- Negative effects: $d=.57$.

Se llevó a cabo un ANOVA de una vía entre sujetos para comparar el efecto de la metáfora de navegación en los cuatro factores en los que se desglosa el cuestionario ITC-SOPI. A partir de este análisis, no se encontró ningún efecto significativo del método de navegación sobre la presencia subjetiva en un nivel de $p <.05$ para ninguno de los tres primeros factores (PS, E, EV) pero encontramos una diferencia significativa en el cuarto (NE):

- Physical Space: $F(1, 80)=0.04, p=.84$.
- Engagement: $F(1, 80)=0.36, p=.54$.
- Ecological validity: $F(1,80)=0.51, p=.47$.
- Negative effects: $F(1,80)=6.81, p=.01$.

Atendiendo a la distribución no normal de los datos para el factor Negative Effects en el caso de la variable independiente Andar en el sitio, realizamos un test no paramétrico adicional, el de Kruskal-Wallis [29]. Los resultados

arrojaron un valor de $p < .05$ ($p = .013$) el cual confirmó la diferencia significativa entre las dos condiciones para este factor específico.

3.3.3 Presencia conductual

Estos resultados muestran el conteo total de las reacciones conductuales dentro de el entorno virtual durante la experiencia virtual:

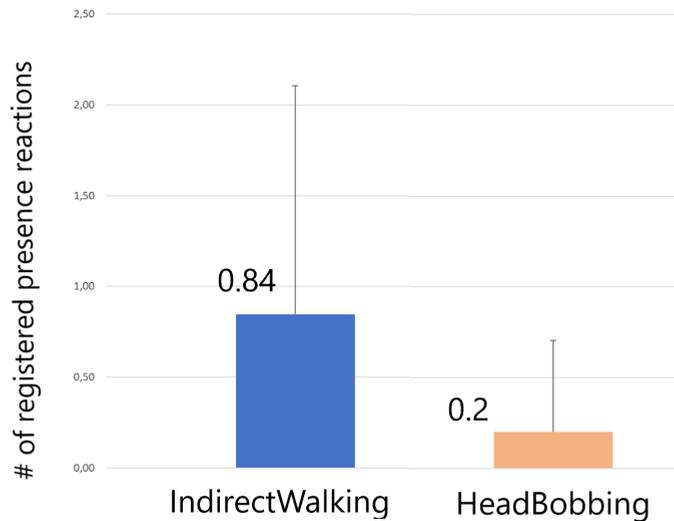


Figura 3.6: Resumen valores presencia conductual

Los resultados numéricos fueron:

- Caminar indirecto (M=0.84, DS=1.26); Conteo total= 38
- HeadBobbing(M=0.2, DS=0.50); Conteo total = 9

El test de Lilliefors sacó a relucir la no normalidad de los datos y Kruskal-Wallis reveló una $p < .05$ ($d = .0076$). Esta diferencia significativa en el efecto del tipo de locomoción sobre la métrica de presencia conductual resulta evidente ya que se registraron casi cuatro veces más reacciones bajo la condición Caminar indirecto que sobre la de Andar en el sitio. La d de Cohen obtenida fue $d = .67$, lo que representa una tamaño de efecto medio ($d > .5$ y $d < .8$).

3.3.4 Presencia fisiológica

El dispositivo empleado, la Empatica E4 recoge la conductancia eléctrica de la piel, que es la inversa de la resistencia. Su tasa de muestreo para la GSR es de 4 Hz.

Una señal de EDA en bruto se divide en dos componentes: (a) El Nivel de Conductancia de la Piel (SCL, del inglés *Skin Conductance Level*) y (b) la Respuesta de Conductancia de la Piel (SCR, del inglés *Skin Conductance Response*). Cada una de ellas hace referencia a un factor distinto y fueron analizadas por separado.

3.3.4.1 Nivel de Conductancia de la Piel (SCL)

La SCL muestra información acerca la línea base tónica, la cual varía lentamente y de modo que acaba mostrando una tendencia ascendente o descendente, dependiendo de varios factores como la hidratación, la sequedad de la piel o la auto-regulación del sujeto.

Con anterioridad al experimento, se registró una línea base para cada participante, haciendo que se sentasen en reposo y con los ojos cerrados, para reducir los estímulos externos durante 5 minutos.

Esta línea base, generalmente, se considera el nivel tónico medio de un individuo en condiciones de reposo y frente a la ausencia de cualquier estímulo discreto, interno o externo.

En algunas ocasiones, los valores de excitación recogidos en esta línea base son mayores que en la fase de estimulación, debido a a factores como la anticipación o el nerviosismo, los cuales hacen que se incremente artificialmente la línea base y alteran los resultados [200, 114].

A partir de esta línea base, es posible calcular el diferencial entre la media de los valores de SCL obtenidos durante el experimento y la línea base, obteniendo el incremento producido, *a priori*, por la inmersión en el sistema de Realidad Virtual. Esta inferencia a partir de un diferencial, se detalla en la subsección 3.2.7.3 y se expresa con la siguiente fórmula:

$$\Delta SCL = media(SCL_{RV}) - media(SCL_{LineaBase}).$$

Tomando como base este cálculo, obtuvimos diferenciales y desviaciones estándar para cada condición. Estos valores se recogen en la Figura 3.7.

Aplicando de nuevo el test de normalidad de Lilliefors obtuvimos un que los valores de SCL seguían una distribución no normal. Debido a esto, aplicamos Kruskal-Wallis y proyectó una $p=.028(<.05)$, por lo que podemos afirmar que hay una diferencia significativa entre los valores de presencia registrados en ambos métodos de locomoción.

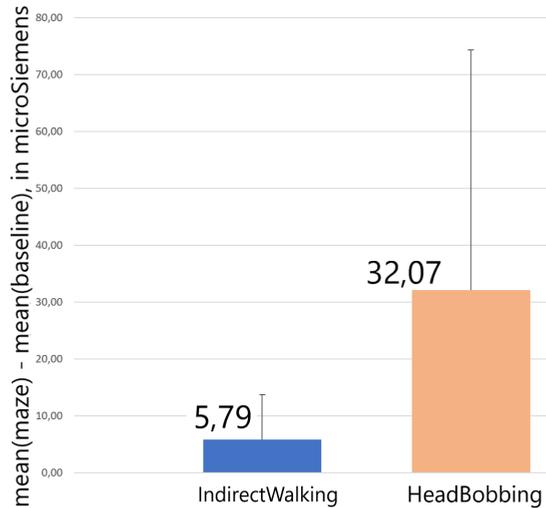


Figura 3.7: Resumen valores presencia fisiológica

Finalmente, el tamaño del efecto obtenido utilizando la d de Cohen fue $d=.85$. Esto representa un efecto de tamaño grande ($d>.8$).

3.3.4.2 Respuesta de Conductancia de la Piel (SCR)

La SCR refleja la señal fásica que precede a los cambios tónicos. Se ha demostrado su correlación con la activación emocional, la cual ocurre de 1 a 5 segundos después del estímulo emocional [200]. Mientras que la SCL se puede mantener desde unas decenas de segundos a varios minutos, la SCR sufre variaciones vertiginosas en un espacio de tiempo muy reducido. Es lo que se conoce como “picos de GSR” [12]. Estos picos de GSR ofrecen, acto seguido, un también rápido declive hasta la zona base de actividad tónica.

Para el cálculo de los picos se utilizó, de nuevo, la herramienta de post-proceso del software Ledalab. Esta herramienta se basa en el método DDA (del inglés *Discrete Deconvolution Analysis*) de Benedek y Kaernbach [12].

La cuantificación de estos picos de GSR en su valor medio ha mostrado correlación con la presencia [218], por lo que podría ser utilizado como una medida objetiva de la misma.

Siguiendo el procedimiento empleado por Terkildsen y Makransky [200], se calculó el valor de picos GSR/minuto, para obtener un factor comparable, independiente del tiempo en el que estuvieron los participantes dentro de la experiencia virtual.

Se comparó la cantidad de picos GSR/minuto entre los dos grupos de usuarios, correspondientes a cada una de las metáforas de navegación: Caminar indirecto con *touchpad* (Media = 38.75, SD = 13.98) y caminar en el sitio con *head bobbing* (Media = 34.55, SD = 10.33). Tras la aplicación del test de Lilliefors se obtuvo que ambos conjuntos de datos seguían una distribución normal. Al tratarse de dos conjuntos de datos relacionados (dos muestras de los mismos individuos) y seguir una distribución normal, se aplicó un t-test para averiguar si había diferencias significativas. Se obtuvo una $p=.27$ ($>.05$), por lo que no se apreció ninguna diferencia significativa a la hora de comparar los picos GSR / minuto para cada una de las dos metáforas de navegación.

3.3.4.3 Efectos colaterales de la medición de la GSR

Como se recoge en el trabajo de Slater et al. [186], existe una tendencia observable en las lecturas de GSR según la cual, los valores ascienden constantemente a lo largo del tiempo. Este efecto es debido a la acumulación de sudor en la superficie de los electrodos y depende de las características propias de cada dispositivo medidor. En este estudio, se ha observado esta tendencia, tal y como se muestra en las figuras 3.8 y 3.9.

Con el objetivo de minimizar la distorsión introducida por este fenómeno, se propone el aislamiento de zonas de interés o intervalos entre eventos para establecer diferenciales intra-secuencias.

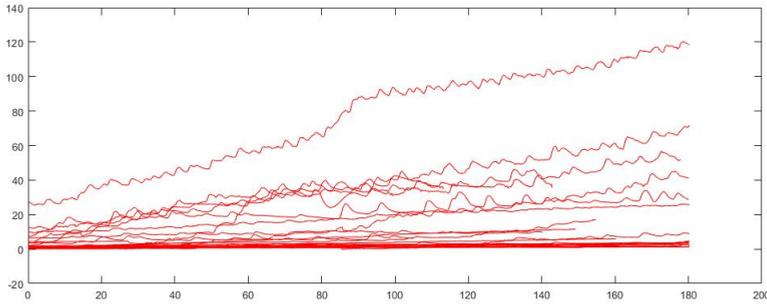


Figura 3.8: Evolución en el tiempo (eje x, en segundos) de la SCL (eje y, en μS) para la metáfora del caminar indirecto (*touchpad*)

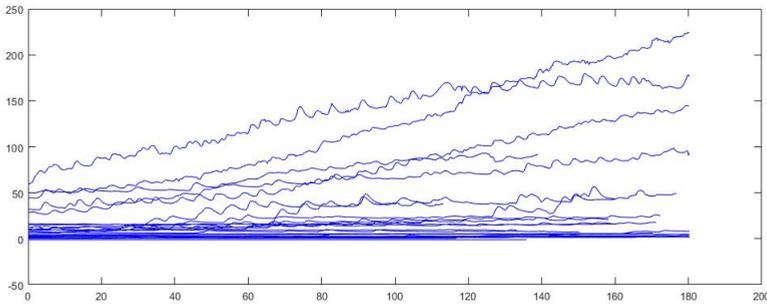


Figura 3.9: Evolución en el tiempo (eje x, en segundos) de la SCL (eje y, en μS) para la metáfora del caminar en el sitio (*head bobbing*)

3.3.5 Matriz de correlaciones

La figura 3.10 recoge la matriz que refleja los coeficientes de correlación obtenidos utilizando la τ de Kendall [88] para cada par de variables dependientes. Los coeficientes remarcados en rojo indican aquellos pares de variables que tienen correlaciones con diferencias significativas.

Encontramos una interesante correlación negativa entre la presencia conductual para la condición de Andar en el sitio y el factor Negative Effects del cuestionario ITC-SOPI para esa misma condición. Aquí, la $\tau = -.29$ de Kendall muestra una intuitiva relación entre presencia y comodidad. Si los individuos se encuentran incómodos en el espacio de Realidad Virtual, difícilmente pueden

sentirse totalmente inmersos en la experiencia virtual y esto, transitivamente, puede afectar al nivel de presencia percibida.

Adicionalmente, incluso cuando las tres dimensiones de la presencia (subjetiva, conductual y fisiológica) no han mostrado correlación entre ellas, internamente poseen correlaciones significativas lo que garantiza la robustez de estas métricas, tomándolas en consideración de manera individual.

3.4 Conclusiones

Este experimento estaba dirigido a profundizar en el conocimiento que, a día de hoy, tenemos acerca de la interacción en general y de la locomoción en particular sobre la sensación de presencia dentro de un entorno de Realidad Virtual. Con este objetivo en mente, se evaluaron dos métodos de locomoción (Caminar indirecto y Andar en el sitio) y su influencia sobre tres diferentes métricas de presencia (subjetiva, conductual y fisiológica).

Slater y Usoh [183] emplearon el término “interacción centrada en el cuerpo” para referirse a aquellas técnicas de interacción que pretenden hacer coincidir propiocepción e información sensorial. Nosotros hemos evaluado una técnica de Andar en el sitio, basada en la detección de los movimientos verticales de la cabeza la cual representa un claro ejemplo de este tipo de interacciones. El otro método, el Caminar indirecto, no pretende alcanzar esa coincidencia.

Teniendo muy presente todo el trabajo previo realizado en comodidad y cibermareos, la metáfora del Caminar indirecto debería haber obtenido resultados más altos en el factor Negative Effects (NE) del cuestionario ITC-SOPI pero, sorprendentemente, fue el otro método, Andar en el sitio, aquel que obtuvo peores valores en este área. Esto podría ser entendido atendiendo a la similitud existente entre los controladores de los sistemas de Realidad Virtual y los mandos habituales empleados en videojuegos. Al ser la población del experimento de una media de edad baja y estar todos ellos habituados a los videojuegos (tal como mostraron los datos demográficos), esta metáfora de locomoción, aún con inferiores condiciones de propioceptividad, les resultaba más sencilla de entender y asimilar.

Haciendo referencia a las tres dimensiones de métricas para la presencia, aunque no fueran reveladas correlaciones entre ellas, pueden ser resaltados algunos hallazgos de interés.

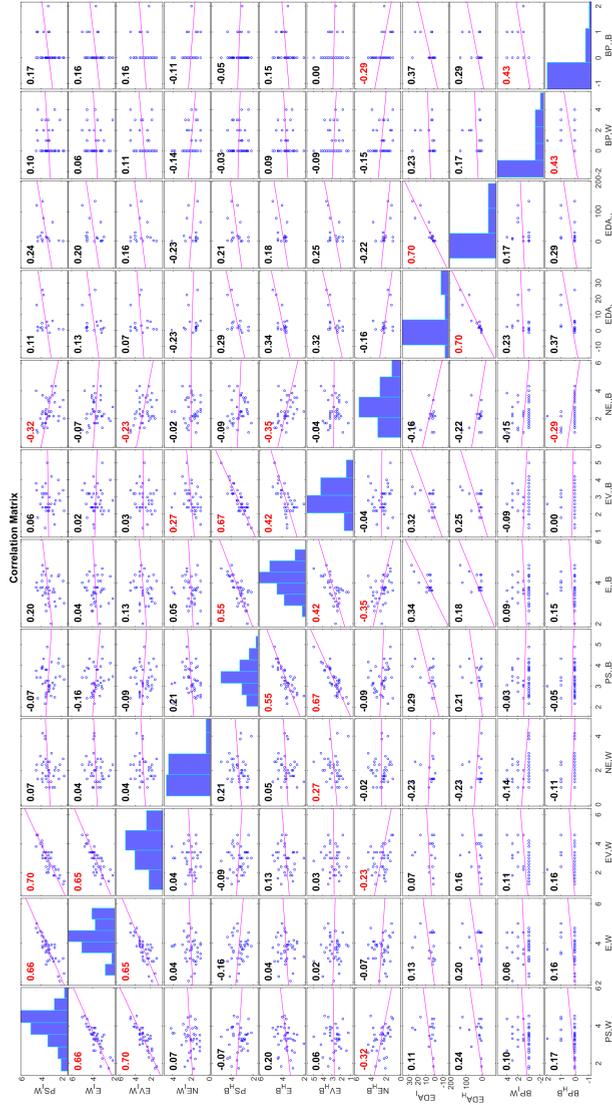


Figura 3.10: Tabla de correlaciones.

En primer lugar, es evidente que el complejo y difuso concepto de presencia muestra diferentes caminos para ser medido, cada uno de ellos con un enfoque diferente, tratando de capturar una pequeña porción del entramado de conceptos psíquico-fisiológicos que la conforman.

Tratamos de aportar alguna luz sobre estas sombras a partir de una inédita aproximación holística, combinando los tres métodos con mayor respaldo de la comunidad investigadora y los resultados son claros: cada familia de métricas (subjettiva, conductual y fisiológica) mide algo distinto. Hasta cierto punto, podría afirmarse que cada una de ellas mide una *presencia distinta*. Como numerosos estudios previos, los cuestionarios post-experimento auto-evaluados no son buenos discriminando diferentes niveles de presencia entre diferentes métodos de locomoción. Este hecho podría asentarse en el recuerdo sesgado y debilitado de la experiencia que los usuarios tuvieron dentro del entorno de Realidad Virtual.

La presencia conductual se muestra como una métrica robusta ya que refleja reacciones “de verdad”, en el mundo real pero juega en su contra el que, para su activación, deben ser incluidos en los entornos experimentales de Realidad Virtual diferentes elementos poco ecológicos: situaciones peligrosas, sonidos estridentes, etc... Esto tiene un efecto dual: a) El diseño de los entornos virtuales siempre debe contener ciertos elementos reiterativos a la hora de registrar presencia conductual en tiempo real y esto constreñiría sobremanera a los creadores, especialmente en ciertos ámbitos o dominios; b) Este tipo de medida de la sensación de presencia está fuertemente vinculado al perfil psicológico de los usuarios así como de su experiencia previa en entornos 3D: cuanto más acostumbrados estén a la navegación en entornos “hostiles”, como los de los videojuegos, menores y más controladas serán sus reacciones a los eventos dentro del entorno virtual, tal y como pudimos comprobar con los participantes en este estudio.

Por último, la presencia fisiológica puede representar la métrica más objetiva pero aún hoy en día, cuando los dispositivos utilizados para su medida son poco intrusivos y esto garantiza niveles más altos de ecología en los experimentos, la EDA ha mostrado debilidades discriminando la excitación anímica de un nivel alto de actividad física (correr, saltar, etc...) [123].

Tal y como se introducía anteriormente, la “interacción centrada en el cuerpo” de Slater y Usoh debería poseer niveles más altos de presencia al hacer coincidir las informaciones propioceptivas y sensoriales. En este experimento, la metáfora Andar en el sitio era la representante de este tipo de interacciones y como se puede apreciar en los resultados mostrados con antelación, esta teoría

no ha encontrado respaldo en las evidencias obtenidas. En dos métricas, la subjetiva y la conductual, obtuvo valores inferiores a los de la otra metáfora, el Caminar indirecto. En la tercera métrica, la presencia fisiológica basada en la EDA, obtuvo valores más altos pero vinculados indiscutiblemente a la mayor actividad física requerida por el tipo de interacción.

Estos hallazgos se vinculan la teoría que explica la presencia como inmersión perceptual/psicológica [139, 14] y que se basa en la idea de que la presencia es, principalmente, una experiencia sensorial y que altos niveles de actividad física pueden distraer los sentidos de su labor perceptiva.

Atendiendo a los estudios previos y a nuestros resultados, podemos aportar dos ideas fundamentales al área de estudio:

- En referencia a la metodología y las métricas utilizadas en la evaluación de presencia-locomoción, nuestros resultados nos invitar a cuestionar acerca de como la presencia ha sido evaluada hasta ahora. Hasta cierto punto, la sensación de presencia se ha revelado en nuestro estudio más propensa a ser alta cuando los usuarios estaban más cómodos con el diseño de interacción, independientemente del tipo de métrica utilizada (subjetiva, conductual o fisiológica). Este hecho está respaldado por nuestros hallazgos donde un método de locomoción menos natural, como el Caminar indirecto (presionando un botón) obtiene mayor sensación de presencia bajo la aproximación conductual. La presencia fisiológica, medida a partir de la SCL, tiene una intensa correlación con la actividad física por lo que no resulta un método fiable para medir presencia con técnicas de locomoción que requieran intensidad de movimientos. En el caso de la utilización de la SCR como medida de GSR, que por su naturaleza resulta más independiente de la actividad física, no se aprecia diferencia alguna entre ambas metáforas de navegación.
- En cuanto al diseño de experiencias en Realidad Virtual, tal y como se comentaba en el punto anterior, los métodos de locomoción con altos niveles de actividad física, por más reales que sean, pueden distraer la percepción de los usuarios así como hacer más incómoda la experiencia, penalizando la sensación de presencia. Este resultado, sugiere la idea de que un método de locomoción personalizado (al menos, elegible y/o configurable), vinculado a las características personales de la condición física del usuario, a su experiencia con juegos en espacios tridimensionales, etc... podría mejorar dramáticamente la experiencia de usuario en Realidad Virtual. En el plano de los juegos serios basados en RV, sin duda podría reducir la carga cognitiva destinada a la locomoción y mejorar la percepción de

los usuarios dentro del entorno virtual. En un medio tan vinculado a las emociones con la RV, la personalización de la interacción (o cierta adaptación en tiempo real) podría resultar clave para favorecer una mayor penetración de la tecnología.

Por tanto, considero que el foco en el ámbito de la investigación de presencia y locomoción, debería estar en cómo adaptar el método de interacción al usuario a partir de métricas de presencia en tiempo real más que tratando de averiguar qué método de locomoción es “el mejor”. Esta idea se apoya en teorías recientes, resumidas en el estudio de Riva et al. [159], donde se desarrolla el concepto de codificación predictiva (PC, del inglés Predictive Coding). La teoría PC sugiere que el “cerebro mantiene activamente un modelo (simulación) del cuerpo y el espacio alrededor de él, el cual provee predicciones acerca de la información sensorial esperada y que trata de minimizar la cantidad de errores de predicción (o ‘sorpresas’)” [159](p.88).

Esta teoría, de gran relevancia en las últimas investigaciones en el ámbito de la RV también establece que la Realidad Virtual trata de mimetizar el modelo cerebral: cuanto más se parece el modelo de RV al modelo del cerebro, más presente se sentirá el usuario en el mundo virtual. En este sentido, podemos afirmar que cualquier técnica de locomoción con movimiento real de las piernas (Caminar real, Caminar en el sitio, etc...) debería generar sensaciones de presencia más altas. A pesar de este concepto, los resultados de este estudio muestran que la presencia no se ve significativamente afectada por este hecho así que deberían ser introducidas variables adicionales en este modelo. Hasta donde alcanza este estudio, la experiencia con videojuegos tridimensionales puede afectar los modelos cerebrales hasta el punto de que pulsar un botón en un mando puede asociarse de manera consistente con la sensación de movimiento, generando una sensación de presencia equivalente a la del movimiento natural.

Registro y visualización de la actividad de los usuarios en un entorno Realidad Virtual

4.1 Introducción

El registro y evaluación del comportamiento de los usuarios en un entorno de Realidad Virtual es un desafío para los investigadores involucrados en diseñar y llevar a cabo experimentos en entornos inmersivos. Esta información conductual puede llevar a interesantes hallazgos en las áreas de la presencia, el compromiso (*engagement*) o el estado emocional del individuo dentro de una experiencia en Realidad Virtual. Recoger este tipo de evaluación y explotarla de un modo productivo ayudará a los investigadores y diseñadores de juegos a identificar patrones conductuales relevantes y correlaciones entre determinados comportamientos y ciertos estados psicológicos. En este capítulo, se propone un procedimiento simple y replicable además de un conjunto de herramientas software destinadas a la adquisición y visualización de datos relativos a la navegación de los usuarios en un entorno de Realidad Virtual. Para ello, se utilizan las capacidades inherentes de un Sistema de Información Geográ-

fico (SIG). Este procedimiento abarca desde la adquisición de datos a través del motor de videojuegos Unity3D, utilizando C, hasta la representación final en un mapa interactivo y personalizable utilizando Leaflet, un SIG de código abierto basado en Javascript, pasando por el preprocesamiento de los datos empleando archivos XML. La utilización de un SIG para visualizar datos de navegación representa una solución flexible, ecológica y efectiva la cual incrementa la productividad y la visibilidad de las capacidades narrativas de los datos.

4.2 Motivación y relevancia

Tal y como analizamos en el Capítulo 2, el interés de la Realidad Virtual como herramienta en diferentes campos [153, 157, 119, 19] ha crecido de manera continua durante las últimas seis décadas. Desde sus inicios, docentes, médicos, formadores, diseñadores instruccionales, psicólogos y muchos otros profesionales han destacado las potencialidades de la RV a la hora de mejorar sus actividades, apoyándose en sus capacidades de inmersión, compromiso (*engagement*), medición y retroalimentación.

Contemplando esta utilización de la Realidad Virtual como un medio para alcanzar ciertos objetivos transversales a diferentes disciplinas, se han desarrollado numerosas estrategias de evaluación de la experiencia de usuario. Muchas de ellas están centradas en la obtención de diferentes métricas acerca de los sentimientos, emociones y/o percepciones de los usuarios. Este conjunto de métricas se basa, normalmente, en la administración de cuestionarios post-experienciales, con el sesgo inherente de este tipo de prácticas, distanciadas temporalmente de la experiencia real y con recuerdos evanescentes[93].

Recientemente, esta familia de métricas está comenzando a ser reemplazadas por datos de origen fisiológico con el objetivo de obtener unas medidas con un nivel superior de objetividad[93]. La electromiografía (EMG), la actividad electrodérmica (EDA), la encefalografía (EEG) y las imágenes de resonancia funcional magnética (fMRI) son las técnicas más comunes y ampliamente validadas de medidas fisiológicas.

Por otra parte, surge una tercera vía para obtener datos de estas experiencias virtuales. Tal como pudimos ver en el Capítulo 3, este tercer grupo se relaciona con el comportamiento de los usuarios dentro del entorno en Realidad Virtual. En un experimento tipo basado en RV, los investigadores persiguen almacenar la mayor cantidad de datos posible con la intención de evaluar, por ejemplo,

el rendimiento o, como en nuestro caso, como el usuario navega por el entorno virtual.

La navegación es la más básica y ubicua interacción en cualquier entorno digital [22], inmersivo o no inmersivo y tiene importantes implicaciones en la sensación de presencia [184] o en los cibermareos [155].

Por este motivo, los investigadores invierten una cantidad significativa de tiempo diseñando y desarrollando herramientas software con el objetivo de adquirir y analizar información acerca de la navegación de los usuarios. Teniendo esto en cuenta, el objetivo de este capítulo es compartir el flujo de trabajo y las herramientas diseñadas e implementadas con la intención de recoger datos de navegación de los usuarios en un entorno virtual desarrollado en un popular y versátil motor de videojuegos: Unity3D [199], para luego ser visualizados de una manera innovadora, utilizando un Sistema de Información Geográfico como Leaflet [2]. Estas funcionalidades pueden ahorrar mucho tiempo a otros investigadores además de incrementar la replicabilidad de experimentos centrados en el análisis conductual de usuarios en entornos de Realidad Virtual.

En último lugar, cabría destacar que la Realidad Virtual está evolucionando hacia su transformación en un espacio colaborativo, apoyándose en las tecnologías actuales, las cuales soportan interacciones simultáneas multi-usuario. Estas nuevas capacidades permiten a distintos usuarios involucrarse en tareas comunes dentro de un mundo virtual [165].

Uno de los aspectos más desafiantes de diseñar y desarrollar Entornos Colaborativos Virtuales (CVE, del inglés *Collaborative Virtual Environments*) es medir la consciencia de cada participante de estar realizando una tarea que forma parte de un trabajo colaborativo de entidad superior [36]. Como ocurre con otros parámetros usualmente medidos en entornos de RV (por ejemplo la presencia, la co-presencia o la comodidad entre otros, se han desarrollado algunos cuestionarios [135] pero como todos los cuestionarios administrados *a posteriori* de la experiencia virtual, presentan un sesgo significativo en sus resultados[93].

La propuesta presentada en este capítulo está, de manera intrínseca, orientada a entornos de Realidad Virtual multi-usuario ya que cada participante posee su propio elemento de seguimiento y pueden ser recogidos datos individuales. A partir de estos datos puede mostrarse, tanto en tiempo real como a partir de un procesado post-experiencial, las interacciones de los usuarios (entre ellos y con el entorno) de un modo consolidado.

4.3 Trabajos previos

Con el desarrollo de la cartografía basada en Internet, aparecieron numerosas soluciones GIS. Inmediatamente, el mundo académico resaltó la necesidad de explorar el ámbito de la visualización de datos espaciales de modos alternativos a los tradicionales. Desde un principio, fue evidente el vínculo entre SIG y RV debido a su natural complementariedad: los SIG tratan información geográfica de modo nativo y la RV tiene un potencial increíble para desarrollar una interacción natural. Originariamente, esta relación SIG-RV sólo discurría en un sentido: la visualización de información SIG en un entorno de Realidad Virtual [82, 156, 203, 57].

Posteriormente, habiendo demostrado la transferibilidad de las experiencias de RV al mundo real, se desarrollaron numerosos estudios donde los participantes debían identificar algunos elementos, de su reciente experiencia en RV, sobre una representación 2D del mismo entorno [24, 50]. En estos estudios, elegidos como una muestra representativa, se instaba a los participantes a que escribieran en un mapa de papel cosas que hubieran visto a través del HMD o decisiones que hubieran tomado. Esta metodología es complicada y lenta de llevarse a cabo con tamaños grandes de muestra.

Por este motivo, se comenzaron a crear algunas herramientas *ad hoc* para la visualización de datos de navegación, como por ejemplo la de Gillner [66] pero tenían una funcionalidad muy limitada, altas restricciones en cuanto a reusabilidad y exigían un esfuerzo alto de los investigadores en la adaptación de las mismas a sus entornos particulares, desviando recursos de la propia investigación.

En este capítulo, propones un flujo de trabajo replicable y compartimos algunas herramientas software creadas para hacer más sencillo e intuitivo este tipo de análisis además de ofrecer mayores posibilidades de personalización para investigaciones particulares.

4.4 Descripción del software

La contribución principal de este capítulo al conocimiento es la descripción del procedimiento completo y probado así como dos herramientas software, representadas por dos scripts, uno de ellos para la adquisición de los datos y el otro para su post-proceso para la adaptación al SIG.

4.4.1 Arquitectura del software

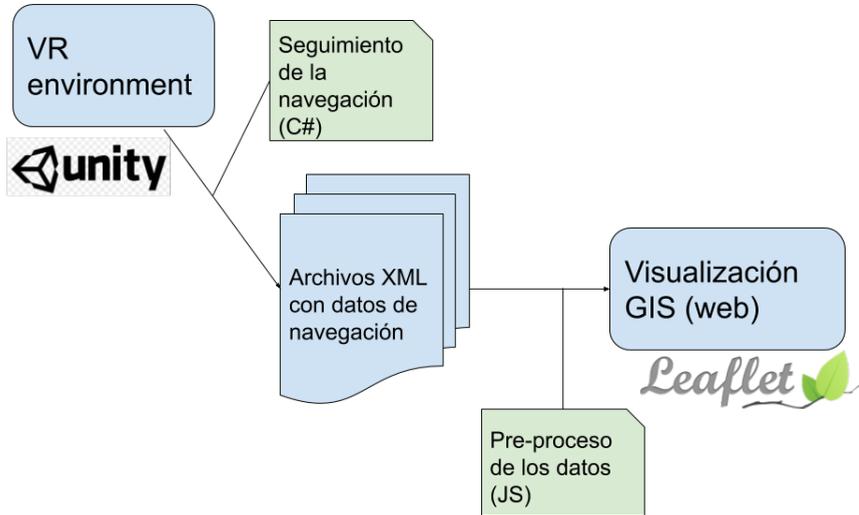


Figura 4.1: Diagrama de la arquitectura de la solución propuesta

4.4.2 Funcionalidades del software

En este apartado se presentan en detalle las funcionalidades principales de los scripts incluidos en este flujo de trabajo.

4.4.2.1 Seguimiento de la navegación (Navigation tracker)

Este script, originariamente diseñado para el elemento *Camera Rig*¹ de HTC Vive es muy sencillo de incorporar a cualquier proyecto ya que puede adaptarse a cada *Character Controller* con una adaptación mínima. Se basa principalmente en dos eventos: *StartMovement()* y *EndMovement()*. Cada función registra la posición del avatar del usuario en dos momentos clave: al inicio y

¹El Camera Rig es el GameObject fundamental para una escena de Realidad Virtual en HTC Vive ya que incluye las cámaras subjetivas vinculadas al HMD así como un Capsule Collider encargado de las físicas del avatar virtual.

al final de cada movimiento. También se almacena el momento temporal en el que se produce cada uno de los eventos, con la intención de calcular el tiempo total de movimiento del usuario. Con esta información, es sencillo calcular la distancia recorrida en cada movimiento:

```
distanceMoved = Vector3.Distance(startPosition, endPosition);
```

Después de que haya terminado cada movimiento, podemos añadirlo a nuestra estructura de datos principal: una lista definida como una colección de *Movements*:

```
public List<Movement> movements = new List<Movement>();
```

Su funcionalidad es la siguiente:

- Cuando el evento *StartMovement* es detectado, se añade un nuevo *movement* a la lista de movimientos.

```
movements.Add(new Movement(position));
```

- Cuando se lanza el evento *EndMovement* se actualiza el contador de la lista (*currentMovementIndex*) y se almacena la posición final.

```
movements[currentMovementIndex].EndMovement(position);  
currentMovementIndex ++;
```

Para que esta aproximación funcione correctamente, es necesario personalizar los métodos que llaman a los eventos *StartMovement()* y *EndMovement()*. Por ejemplo, en este proyecto en concreto, utilizamos dos metáforas de navegación: Caminar indirecto (presionando un botón en el mando) y Andar en el sitio (a través de la detección del *head bobbing*). Para cada técnica de navegación deberemos determinar cuales son las acciones que comienzan y terminan el movimiento. En el caso de la navegación indirecta, resulta trivial: cuando el usuario presiona el botón del mando, el movimiento comienza y cuando lo suelta, ese movimiento ha terminado. Por otra parte, para la detección de los movimientos verticales de la cabeza (*head bobbing*), resulta mucho más complejo el determinar estos eventos. Discriminar los movimientos de *head bobbing*

de los movimientos habituales de la cabeza implica trabajar con velocidades, ángulos y otros parámetros, lo que complica el modelo algorítmico. A alto nivel, se implementó una función *HeadBobDetected()* que se lanzaba cuando se detectaba un *head bobbing* que entraba en los parámetros definidos y ese era nuestro *StartMovement()*. Cuando se dejaban de detectar esos movimientos, se activaba el evento *EndMovement()*.

El archivo XML generado por todos estos movimientos tenía esta estructura (mostrado con datos de ejemplo):

```
<movement>
  <startPosition>
    <x>0.8478197</x>
    <y>0.0833333358</y>
    <z>2.12983274</z>
  </startPosition>
  <endPosition>
    <x>0.854446</x>
    <y>0.0833333358</y>
    <z>2.07698369</z>
  </endPosition>
  <startTime>7.191995</startTime>
  <endTime>7.20538664</endTime>
  <totalTime>0.0133914948</totalTime>
  <distanceMoved>0.0532628447</distanceMoved>
</movement>
```

4.4.2.2 Cargando los datos en el SIG

Con el objetivo de representar todos los datos recogidos durante la experiencia en Realidad Virtual (normalmente, un fichero XML por participante) en la primera etapa de este flujo de trabajo, deben seguirse estos pasos:

1. **Crear un mapa 2D a partir de nuestro entorno virtual 3D.** Este mapa debe respetar las proporciones del escenario tridimensional con el objetivo de hacer la traslación más sencilla. El método más sencillo y rápido es realizar una captura cenital del entorno dentro del propio motor de desarrollo. En la figura 4.2 puede verse un ejemplo de este tipo de representación:



Figura 4.2: Vista cenital de la escena del laberinto.

2. Configurar el entorno Leaflet

Leaflet es un Sistema de Información Geográfico ligero basado en JavaScript y constituye una solución muy popular para la representación de mapas interactivos en dispositivos móviles. Con un peso de tan solo 38 KB, incorpora prácticamente la totalidad de funcionalidades cartográficas que la mayoría de desarrolladores necesitan. Leaflet está diseñado persiguiendo la simplicidad, el rendimiento y la usabilidad. Funciona de manera eficiente sobre la mayoría de las plataformas móviles y de escritorio, atendiendo a su naturaleza web [2].

Dado que Leaflet es nativa en JavaScript, se asume que va a funcionar en entorno web pero es posible configurar una instancia que trabaje en modo local, algo muy útil para crear un entorno de pruebas. Eso si, tenemos que recordar que los ficheros XML no pueden ser manipulados a través de JavaScript de modo local. Si queremos configurar un entorno mínimo local, deberemos instalar un servidor Tomcat o similar en nuestro ordenador de modo que se pueda acceder a los ficheros XML a través de http.

La configuración más recomendable para este tipo de arquitectura es almacenar los ficheros XML en un servidor remoto y ofrecerlos como un servicio que será llamado por tu dispositivo local. Del mismo modo, todo este flujo de trabajo puede ser implementado en JSON, que es a su vez nativo JavaScript. Se ha seleccionado XML por su transversalidad.

En nuestra configuración inicial hemos incluido:

- **leaflet.cs**: la librería principal de Leaflet.
- **jquery-3.3.1.min.js**: JQuery es una popular librería JavaScript de código abierto con numerosas utilidades para el tratamiento de documentos XML y para la interacción con grandes colecciones de datos.

3. Creación del mapa interactivo, pre-proceso de los archivos XML y adición de los mismos al mapa

Toda la funcionalidad relatada en este punto está incluida en un único .js, el cual va a ser explicado en detalle a continuación.

Al estar integrado en un proyecto web, todas las librerías deben ser añadidas al archivo html principal, *index.html* (Fig.4.3).

```

1  <!DOCTYPE html>
2  <html>
3  <head>
4    <title>Ejemplo</title>
5    <link rel="stylesheet" href="leaflet/leaflet.css" />
6    <link rel="stylesheet" href="css/estilos.css" />
7  </head>
8  <body>
9
10 <div id="mapid"></div>
11 <script src="leaflet/leaflet.js"></script>
12 <script src="jQuery/jquery-3.3.1.min.js"></script>
13 <script src="js/codigo.js"></script>
14
15 </body>
16 </html>

```

Figura 4.3: Archivo index.html

Adicionalmente, se ha creado un archivo CSS maestro, el cual contiene la definición principal del mapa:

```
#mapid { height: 700px; }
```

Después de esto, se deberá generar el archivo principal JS, *code.js*. En primer lugar, es necesario declarar y formalizar el tamaño de nuestro mapa. En la misma instrucción, le asignaremos el mapa 2D que hemos creado previamente (Fig. 4.4).

```
1 var map = L.map('mapid',{
2     crs: L.CRS.Simple // we create a specific Coordinate Reference System
3 });
4 var mapWidth = 700; // custom map size
5 var mapHeight = 700;
6 var imageBounds = [[0,0], [mapWidth,mapHeight]];
7 var image = L.imageOverlay('img/maze_top.jpg', imageBounds).addTo(map);
8 map.fitBounds(imageBounds);
```

Figura 4.4: Declaración y creación del mapa

Adicionalmente, se ha implementado un sencilla función para transformar nuestra notación para las coordenadas de cada punto de los movimientos al formato geográfico de Leaflet. La variable *offSet* representa la escala entre nuestro mapa 2D y el entorno virtual en tres dimensiones (Fig. 4.5).

```
10 var yx = L.latLng;
11 var totalUnity = 86; // units of the Unity (3D) environment. As it is square too, we
12 //need only one. If not, we need totalUnityX and totalUnityY
13 var offSet = mapWidth / total3Dmap;
14 var xOriginUnity = -43; //x component of the map's origin in Unity
15 var zOriginUnity = -42; //z component of the map's origin in Unity
```

Figura 4.5: Declaración de las variables

Si el entorno virtual con el que trabajamos no es cuadrado, deberíamos crear dos *offsets*, uno vertical y otro horizontal. *XOriginUnity* y *zOriginUnity* representan las coordenadas donde se encuentra ubicado el punto (0,0) del entorno virtual. No se utiliza el eje Y en este proyecto en concreto ya que el usuario no puede volar, escalar o llevar a cabo cualquier otra acción que pueda variar su posición vertical.

4. Transformación de las coordenadas del entorno 3D al mapa 2D

Para este fin, se emplea una única función que convierte los valores de texto extraídos de los archivos XML al formato de Leaflet, basado en coordenadas longitud/latitud. Se utiliza el parámetro *latLng* para implementar esta funcionalidad (Fig. 4.6).

```

18 var xyOffset = function(x,y){
19     return yx(((zOriginUnity - parseFloat(y))*Offset*-1),(xOriginUnity - parseFloat(x))*Offset*-1);
20 };

```

Figura 4.6: Función de transformación a coordenadas.

Una vez con todas estas herramientas auxiliares funcionando, se podrá ya tratar los archivos XML (uno a uno o en modo masivo) empleando los métodos AJAX que incorpora jQuery. De este modo, se irán añadiendo a nuestro mapa del SIG todos los puntos extraídos del recorrido y las interacciones realizadas por los usuarios dentro del entorno virtual. Para ello, habrá que localizar las coordenadas útiles para nuestra representación espacial (x,z) y, en el mismo bucle, recoger información adicional simplemente buscando en el fichero utilizando el nombre del campo como filtro (Fig. 4.7).

```

22 $.ajax({
23     type: "GET",
24     url: "data/BaseSceneTP.5.xml",
25     dataType: "xml",
26     success: function (xml) {
27         console.log(xml);
28         var i = 0;
29
30         // Parse XML file and obtain data
31         var xmlDoc = $.parseXML(xml),
32             $xml = $(xmlDoc);
33         $(xml).find('startPosition').each(function () {
34             console.log("Movement " + i);
35             i++;
36             var xStartPosition = $(this).find('x').text();
37             var zStartPosition = $(this).find('z').text();
38             var mapPoint = xyOffset(xStartPosition,zStartPosition);
39             L.marker(mapPoint).addTo(map).bindPopup('movement' + i);
40         });
41     },
42     error: function() {
43         alert("It was impossible to process that XML file");
44     }
45 });

```

Figura 4.7: Procesando los ficheros XML con AJAX de JQuery.

4.5 Ejemplos ilustrativos

Después de incluir todos los movimientos en el mapa, obtener distintas visualizaciones de los mismos es realmente rápido y sencillo: marcadores, rutas, mapas de calor... La utilización de un SIG permite aprovechar la ingente cantidad de herramientas intrínsecas a estos sistemas de un modo cómodo y eficiente. Del mismo modo, cabe destacar la interactividad de los mapas generados mediante Leaflet, lo que permite a los investigadores realizar análisis dinámicos de los datos de navegación de una sesión.

Pueden apreciarse estas características en las figuras 4.8 y 4.10.



Figura 4.8: Mapa interactivo con los movimientos representados con marcadores.

Adicionalmente, añadiendo uno de los numerosos *plugins* que existen para Leaflet, podemos cambiar nuestro modo de visualización. En el siguiente paso, se empleará el *plugin* `leaflet-heat.js` [3] con el fin de añadir una capa de mapa de calor a nuestro mapa 2D personalizado. Este tipo de visualización es útil para mostrar la densidad de puntos (movimientos en nuestro caso) geográficamente distribuida.

```
83 var heat = L.heatLayer(addressPoints, {
84   minOpacity:0.5,
85   max:1.0,
86   radius: 20,
87   gradient:{
88     0.4: 'blue',
89     0.65: 'lime',
90     1: 'red'
91   }
92 }).addTo(map);
```

Figura 4.9: Declaración de `heatLayer` (mapa de calor) en `code.js`

Además, se ha creado un vector, `addressPoints`, con la intención de almacenar todos los puntos antes de añadirlos a la capa de mapa de calor. Estas capas (marcadores, mapa de calor, etc...) pueden dibujarse unas encima de otras, por lo que tendremos la capacidad de construir visualizaciones complejas.



Figura 4.10: Capa de mapa de calor.

En la Fig. 4.11, se presenta un resumen visual del flujo de trabajo completo.

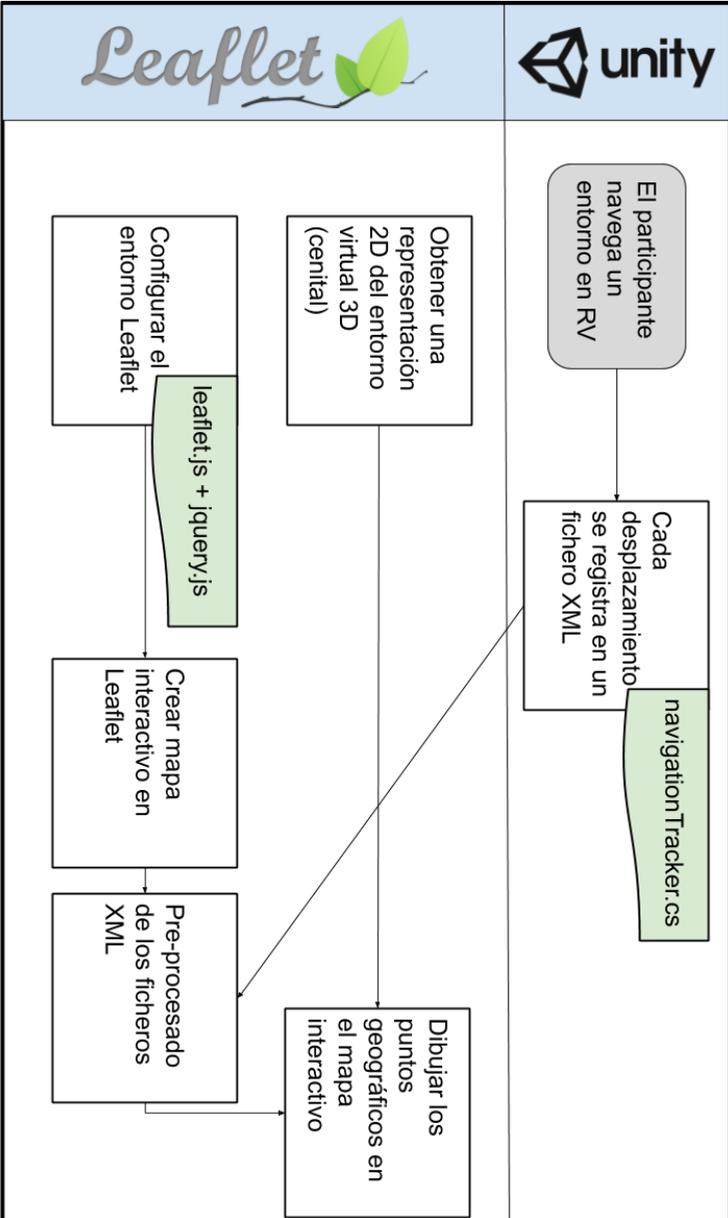


Figura 4.11: Diagrama esquemático del flujo de trabajo completo.

4.6 Validación

Este flujo de trabajo y las herramientas incluidas en él se han validado con 35 juegos distintos de datos de navegación. En estos 35 casos, las herramientas funcionaron sin ningún tipo de error o excepción. En 5 casos, con un gran número de pequeños desplazamientos, los marcadores que representaban cada movimiento aparecían demasiado próximos en el mapa interactivo, lo que dificultaba su interpretación. Para prevenir estas salvedades, se habilitó la opción de redimensionar los marcadores, de modo que se resolvían los problemas de visibilidad.

En estas pruebas, definimos una métrica llamada Precisión Espacial (PE), basada en la comparación visual de la ruta original de los usuarios en el espacio virtual y la mostrada en el mapa 2D. Si ambos caminos coincidían, la variable *encaje2D/3D* tomaba el valor 1 para ese conjunto de datos en concreto. Si no coincidían, la variable tomaba el valor 0. Si se detectaban algunas divergencias que debían ser estudiadas *a posteriori*, la variable debía tomar el valor 2.

Al final de las pruebas, obtuvimos un valor de $PE = 100\%$ ya que cada conjunto de datos obtuvo el valor 1, demostrando que la función de mapeado obtenía los resultados esperados. Este proceso de validación fue ejecutado por el autor de esta tesis. Una futura vía de expansión de esta solución sería la validación automática de la PE.

4.7 Aplicación práctica: Análisis de recorridos en función de la metáfora de navegación (experimento Capítulo 3)

Un ejemplo de utilización de este flujo de trabajo y de las herramientas desarrolladas es el análisis de diferencial de los recorridos llevados a cabo por los diferentes individuos que participaron en el experimento detallado en el anterior capítulo. El citado experimento consistía en la navegación de un laberinto del cual debían conseguir salir en un tiempo determinado.

Las metáforas de navegación utilizadas fueron dos: caminar en el sitio (a través de la detección del movimiento de la cabeza) y caminar indirecto (a través de la interacción con el panel táctil del controlador).

Para cada una de ellas, empleando el flujo de trabajo descrito en este mismo capítulo, se recogieron los distintos movimientos realizados por los usuarios.

El concepto de *movimiento* se ha definido en la herramienta de seguimiento como cada desplazamiento producido desde la activación de la interacción que inicia la acción de arranque (*trigger*) hasta el instante en el que tiene lugar la interacción que finaliza el movimiento.

En el caso de la metáfora del caminar en el sitio, cada movimiento viene determinado por estos dos eventos:

1. Comienzo: Detección del movimiento de cabeza (*head bobbing*) propio del caminar en el sitio.
2. Final: Ausencia de movimiento durante un intervalo de n segundos ($n = 1.5$, en nuestro caso). Es un parámetro configurable.

La metáfora del caminar indirecto, a través de pulsaciones en el *touchpad*, por su parte, se define a través de estos dos eventos:

1. Comienzo: Pulsación del touchpad. Mientras está pulsado, el avatar virtual se desplaza en la dirección en la que está mirando el usuario.
2. Final: Ausencia de pulsación del touchpad. Cuando se levanta el dedo del touchpad, el desplazamiento se detiene, concluyendo el movimiento.

En las figuras 4.12 y 4.13 podemos apreciar, respectivamente, los recorridos consolidados con la metáfora del caminar en el sitio y con la metáfora del caminar indirecto de todos los participantes ($n = 41$). Se ha empleado la visualización con mapas de calor porque permite apreciar, de un modo sencillo y eficaz, la densidad de movimientos por cada zona del laberinto.

Las zonas con colores más cálidos representan un mayor número de desplazamientos en las mismas mientras que los colores fríos muestran una menor densidad de movimientos en ese área determinada.

A partir de esta visualización de los datos provenientes de los recorridos de todos los participantes, podemos concluir que la utilización de estas dos metáforas de navegación no influye en los recorridos realizados dentro del laberinto ya que se distribuyen de manera homogénea por todas las rutas posibles.

Resulta llamativo también la mayor densidad de movimientos bajo la metáfora de caminar en el sitio. Esto se debe al mecanismo de registro de movimiento, el cual recoge un mayor número de movimientos en esta metáfora porque son menos continuos, esto es, empiezan y concluyen un mayor número de veces.



Figura 4.12: Recorridos consolidados utilizando la metáfora de caminar en el sitio

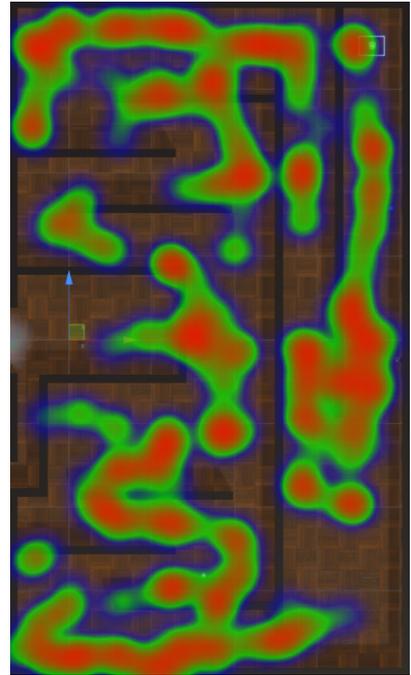


Figura 4.13: Recorridos consolidados utilizando la metáfora del caminar indirecto

Atendiendo a la naturaleza puramente física de este tipo de desplazamiento, es razonable pensar que un mayor esfuerzo implique movimientos con mayores pausas.

4.8 Conclusiones

Este flujo de trabajo aquí propuesto puede mejorar significativamente los procesos de los investigadores que empleen la RV en sus experimentos, facilitándoles la adquisición y el análisis de los datos, principalmente a la hora de visualizar la actividad de los usuarios dentro de un entorno virtual.

Adicionalmente, proporciona un cómodo punto de partida para cualquier investigador que busque recoger y visualizar datos relativos a la interacción de los participantes en un experimento de RV. Para ello, nos apoyamos en un

Sistema de Información Geográfico de código abierto, basado en web, flexible, potente y personalizable como es Leaflet.

Este flujo de trabajo abarca desde la adquisición de los datos en Unity3D con C# a la representación final en un mapa de Leaflet utilizando JavaScript, pasando por el preprocesado de archivos XML.

Utilizar un SIG para visualizar información acerca de la navegación de los usuarios en un entorno de RV es una solución ecológica y efectiva que incrementa la productividad y las capacidades narrativas de los datos.

Guías de diseño de experiencias de aprendizaje en Realidad Virtual basadas en la cognición corporizada

5.1 Introducción

A lo largo de este capítulo, a modo de corolario, se pretende recoger aquellos hallazgos de esta tesis doctoral relevantes para la tarea de diseñar sistemas de RV. Más específicamente, está dirigido a aquellos diseñadores, investigadores y desarrolladores de sistemas de Realidad Virtual que, con el objetivo de maximizar los aprendizajes originados en el entorno virtual así como para crear experiencias de usuario cómodas y atractivas, se enfrenten a decisiones complejas en el ámbito del diseño de interacción.

En primer lugar, se mostrarán unos fundamentos de diseño basados en la teoría de la Cognición Corporizada (CC, del inglés *Embodied Cognition*), de modo que sirvan para contextualizar el desafío que se afronta.

En segundo lugar, en base a los hallazgos de esta tesis, se darán una serie de recomendaciones, algunas aplicables directamente y otras, sembrando la semilla de futuras investigaciones.

5.2 Juegos serios en Realidad Virtual

El término “juegos serios” (del inglés, *serious games*), suele emplearse para definir a juegos que se han diseñado y desarrollado con un fin último alejado de lo meramente lúdico. La definición actual suele basarse en los trabajos de Susi, Johannesson y Backlund [193] y de Michael y Chen [127], aunque el término fue acuñado en 1987 por Abt [1]. Aunque este término representa la nomenclatura estándar para los juegos dedicados específicamente al aprendizaje, la salud, el entrenamiento profesional, el marketing y otros muchos ámbitos, no ha estado nunca exento de polémica ya que muestra una total contradicción al combinar juego con seriedad, puesto que el juego, por naturaleza, como expresa Huizinga en su “Homo Ludens” [83], es:

“una actividad donde reina el entusiasmo y la emotividad, ya sea que se trate de una simple fiesta, de un momento de diversión o de una instancia más orientada a la competencia. La acción, por momentos se acompaña de tensión, aunque también conlleva alegría y distensión.”

Por este motivo, no queda más remedio que atribuir la inclusión del adjetivo serio a un interés comercial y/o académico mal entendido de dotar de un rigor y una trascendencia al ámbito de los juegos de la que socialmente no gozaban en aquella época.

En el ámbito educativo y formativo, los juegos serios representan una opción con gran potencial, aunque con una serie de desafíos a resolver. Por una parte, nos encontramos con una serie de ventajas inherentes a su propia definición. Al estar diseñados originariamente con un fin didáctico, suelen incluir características muy ventajosas para su utilización en el aula como pueden ser:

- a. Supresión de elementos superfluos en el diseño del juego (no orientados a los objetivos propuestos).
- b. Inclusión de mecanismos de seguimiento personalizado de la actividad y herramientas de evaluación.

- c. Documentación y recursos para docentes que pueden ser utilizados en el diseño de actividades de Aprendizaje Basado en Videojuegos (ABV).
- d. Retroalimentación positiva, orientada al aprendizaje.

Por otra parte, estos juegos serios, ya que tienen su foco puesto en las competencias a adquirir y no en el diseño lúdico del juego, puede que carezcan de los recursos adecuados para mantener a los usuarios-alumnos motivados y en estado de “*flow*” (esa zona o estado mental donde estamos completamente inmersos e implicados en lo que estamos haciendo[48]). Tradicionalmente, han existido videojuegos educativos con este problema: no son divertidos ni visualmente atractivos por lo que pierden las características de motivación intrínseca propias de los videojuegos.

Pero en los últimos años, está cobrando relevancia una creciente integración entre dos ámbitos en auge: la Realidad Virtual y los juegos serios. En esta intersección, surgen los VRSG (del inglés, *Virtual Reality Serious Games*)

Mientras que existe un claro consenso acerca del potencial instruccional de los VRSG, tal y como se recoge en el Capítulo 1 de esta tesis, no existe una clara referencia acerca de como deben ser diseñados. Especialmente, a la hora de seleccionar interacciones, o mecánicas de juego, que lleven a alcanzar el objetivo dual de este tipo de experiencias virtuales:

1. Los VRSG deben ser entretenidos (para ser “juegos”).
2. Los VRSG deben conseguir la transferibilidad de los aprendizajes al mundo real (para ser “serios”).

Cuando se diseña un VRSG debemos ser especialmente cuidadosos con el balanceo de estos dos componentes ya que, si se prioriza uno sobre el otro, podemos obtener un aburrido juego educativo o un divertido juego que no sirva para aprender nada.

En este sentido, debemos poner el foco en aquello que hace especial a los juegos frente a otros medios: su interactividad. Y esta, en su máxima expresión, se traduce en mecánicas de juego. En este estudio, utilizaremos la definición de mecánica como cada acción simple que puede realizar un usuario dentro de un juego, frente a otras definiciones más complejas [141, 40].

5.3 Consejos para el diseño de interacción basados en la teoría de la Cognición Corporizada (CC)

Para comenzar esta serie de recomendaciones, cabría contextualizar el relevante papel de la interacción en un entorno virtual.

Asociar nuestros procesos cognitivos con la interacción entre nuestro cuerpo y el entorno es algo que viene realizándose a lo largo de los últimos 80 años, con importantes defensores de la teoría de la CC en distintos ámbitos como la psicología, la filosofía o la sociología [94] como Piaget [146], Polanyi [150], Montessori [129] o Lakoff y Johnson [96] y también algunos detractores, partidarios de la hipótesis de Kieras y Meyer [90] de la cognición descorporizada (en inglés, *disembodied cognition*).

A la hora de entender como la teoría de la CC nos puede ayudar a diseñar experiencias de aprendizaje en RV hay que poner el foco en ejemplos reales de como nuestra mente y nuestro cuerpo trabajan codo con codo a la hora de interpretar e interactuar con el entorno. Analizaremos los principios de la CC así como ejemplos tradicionales de como estos principios se materializan en nuestro día a día [211, 37]:

- **La cognición depende de la situación:** Esta idea traslada el principio de que los procesos cognitivos son dependientes del lugar y del momento en el que se producen y que contextualizan las entradas de nuestro sistema cognitivo. Esto, se traslada fácilmente a un contexto educativo ya que si el objetivo de una experiencia de aprendizaje es, por ejemplo, conocer las pirámides del Antiguo Egipto, será mucho más eficaz un entorno virtual en el que el alumnado recorra las pirámides, con una antorcha en la mano, oyendo sonidos a cada paso y con la misión de recordar ciertos jeroglíficos que navegando a través de imágenes seleccionadas de un menú.

Esto entronca directamente con el aprendizaje basado en emociones (del inglés *affective learning*) de Picard y Papert [148], donde el estado emocional de las personas pasa a jugar un papel determinante en su aprendizaje y con el aprendizaje activo.

En este sentido, hacer un juego de preguntas al estilo del clásico Trivial en RV, no aprovecha las características potenciales de esta tecnología. Es necesario diseñar experiencias en primera persona y con interacciones variadas para que el aprendizaje sea significativo.

- **La teoría de la CC nos ayuda a gestionar nuestra carga cognitiva:** Tenemos una capacidad cognitiva limitada. La teoría de la carga cognitiva (TCC) de Sweller [196, 195] afirma que nuestra memoria de trabajo puede llegar a verse ocupada por aspectos colaterales como la interacción con un sistema, entender unas reglas o procesar entradas multimodales, impidiendo que los conceptos que queremos aprender puedan pasar a la memoria a largo plazo. En este sentido, la teoría de la CM presenta alternativas para liberar carga cognitiva a través de la externalización de la misma. Contar con los dedos es un ejemplo cotidiano de externalización de carga cognitiva ya que nos apoyamos en recursos físicos y en el procesamiento de entradas sensoriales evitando representaciones mentales que suponen una mayor carga cognitiva.

Otro ejemplo de esta externalización es como se rinde mejor en el Tetris cuando vamos rotando las fichas mientras caen para visualizar su posición en vez de basarnos de nuevo únicamente en representaciones mentales [92].

Por este motivo, un sistema de RV orientado al aprendizaje debe facilitar la interacción física de los usuarios con el entorno de modo que puedan externalizar carga cognitiva, como por ejemplo, utilizar elementos “físicos” para representar ciertas cantidades numéricas o ciertas relaciones espaciales. Dejar que los usuarios puedan anotar ideas o referencias en paredes, suelo u otros espacios también es una buena práctica de externalización. La manipulación además, ayuda a activar el aprendizaje [129].

- **El entorno es parte del sistema cognitivo:** El flujo de información entre el entorno y la mente es tan abundante y complejo que no tiene sentido tratar a esta última como un elemento aislado a la hora de intentar comprender la actividad cognitiva [211].

Como muestra, el trabajo de Merleau-Ponty [125] acerca de cómo los invidentes perciben a través de su bastón. No sienten el entorno a través de la mano que sujeta el bastón sino a través del propio bastón. Este enfoque trata al bastón como un “sensor” más de los sentidos y el lugar de la sensación se traslada a la punta del bastón. Por tanto, en este caso, el bastón no es una herramienta para obtener información que será procesada más tarde con el objetivo de obtener información acerca del entorno sino un sensor que recoge señales que son inmediatamente interpretadas, como si fueran realmente sentidas.

Esta teoría, permite relacionar la interacción física con el aprendizaje [16], especialmente con la retención del conocimiento que está siendo adqui-

rido. Destacamos dos estudios en este sentido, extraídos de Black et al. [16]. El primero, de Chan y Black [17] muestra que la retroalimentación senso-motora a través de las manos puede ser transferido a la memoria de trabajo para un procesamiento posterior. Esto permitió que los estudiantes que estuvieron trabajando conceptos de física a través de animación manipulativa obtuvieron mejores resultados de aprendizaje que aquellos que los trabajaron de un modo exclusivamente narrativo.

El segundo, de Han y Black [71] mostró hallazgos significativos en la incorporación de retroalimentación háptica al diseño instruccional. Dos grupos estudiaron el funcionamiento de máquinas simples; uno de ellos con retroalimentación háptica y el otro no. El grupo con retroalimentación háptica obtuvo mejores resultados, no sólo en el test inmediatamente posterior, sino también en una prueba de transferencia realizada más tarde.

Por estos motivos, incorporar retroalimentación háptica (a través de motores vibratorios en los mandos del sistema de RV) al interactuar con el mundo virtual, no sólo va a mejorar la sensación de presencia sino que, además, activará procesos cognitivos que ayudan a mejorar el aprendizaje y la retención.

5.4 Consejos para el diseño de interacción basados en la sensación de agencia y la corporización

De un modo casi tan relevante como la sensación de presencia, se encuentra la de agencia. La sensación de agencia refleja la propia percepción de control o manipulación sobre el entorno virtual [9].

Adicionalmente, cuanto mayor es la sensación de agencia, mejor recuerdo y aprendizaje se produce [87].

Cómo recoge la propia Johnson-Glenberg [87], aunque existan otros métodos para ejecutar las interacciones o mecánicas de juegos (como el seguimiento de la mirada o los comandos de voz), la utilización del propio cuerpo mejora la activación cognitiva y la memoria [67] y reduce los cibermareos [188].

En cualquier caso, teniendo en consideración el gran número de ventajas que tiene implementar mecánicas de juego basadas en la interacción corporal con el entorno virtual, es necesario tener en cuenta que un porcentaje de los usuarios que pasen por el VRSG poseerán bajas capacidades espaciales y eso, va a

penalizar su experiencia de aprendizaje en un espacio virtual [86]. Existen iniciativas muy interesantes para entrenar y potenciar la capacidad espacial, necesaria para estas nuevas formas de aprendizaje [117].

Con el objetivo de maximizar la sensación de agencia, presentamos, por último, los consejos de diseño de Johnson-Glenberg [87], basados en como la agencia favorece el aprendizaje:

1. Es necesario un “andamiaje”, propio de las teorías constructivistas del aprendizaje, para el esfuerzo cognitivo así como para el interactivo. Para ello, se aconseja ir introduciendo y practicando las interacciones poco a poco dentro del VRSG.
2. Utilizar exploración guiada, para disminuir la carga cognitiva necesaria así como la desorientación.
3. Dar retroalimentación inmediata para cada una de las acciones realizadas. Esto no significa que sea necesario una retroalimentación permanente [174]. Los modelos mentales de retroalimentación necesitan repeticiones para construirse.
4. Probar los VRSG a menudo, con grupos piloto adecuados, esto es, que ayuden a identificar posibles problemas en las interacciones de diferentes grupos de personas.
5. Crear espacios para la reflexión. Las interacciones y mecánicas de juego deben dejar lugar a momentos reflexivos ya que estas ventanas a la metacognición (percatarse del propio pensamiento, del propio aprendizaje) son necesarias para consolidar los aprendizajes.
6. Integrar interacciones relacionadas con el contenido que va a ser aprendido. Esto incrementa el aprendizaje significativo y, por tanto, la transferibilidad del mismo.
7. Las interacciones corporales merecen la pena: mejoran el aprendizaje, la agencia y atenúan los cibermareos.
8. Incorporar las interacciones físicas como una forma de evaluación, tanto durante (formativo) como después de la lección (sumativo). Esto permite añadir información detallada del modelo mental de los usuarios a los procesos evaluativos.

5.5 Conclusiones

En este capítulo, se ha recogido en una breve guía de consejos para la selección y el diseño de mecánicas de juego para experiencias de aprendizaje en Realidad Virtual.

A modo de corolario, es necesario focalizar el diseño de entornos de RV para el aprendizaje en la interacción, en la manera en que los usuarios se van a relacionar con el mundo virtual. Si se perpetúan “clichés” del diseño procedente de entornos de escritorio, se estará desaprovechando el mayor potencial de la Realidad Virtual: su capacidad de recrear situaciones en primera persona, en modo activo (no como espectador).

Este tipo de experiencias, maximiza la presencia y la agencia y, por tanto, favorece la motivación intrínseca y la transferibilidad de los aprendizajes.

Como limitación de lo expuesto en este capítulo, cabe destacar que es precisa una evaluación empírica completa de estas guías de diseño que, actualmente, no pasan de ser recomendaciones para diseñadores de experiencias en RV.

Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Introducción

En este último capítulo de la tesis se va a ahondar, en primer lugar, en los principales hallazgos de esta investigación. De algunos de ellos, se desprende una aplicación inmediata en el diseño de interacción de experiencias de aprendizaje en RV; de otros, se deriva una investigación más profunda, con el fin de aportar más luz a la pregunta que ocupa a muchos investigadores: ¿Cómo mejorar las experiencias de aprendizaje en Realidad Virtual?

Posteriormente, se establecerán unas conclusiones, dirigidas a sentar las bases de los futuros trabajos así como a consolidar la aportación del conocimiento.

En el punto de contribución al conocimiento, se matizarán las innovaciones presentadas al respecto del tema tratado, presentadas desde las perspectivas de los trabajos previos.

También se analizarán en detalle las limitaciones de este estudio, motivadas principalmente por restricciones técnicas o decisiones metodológicas.

En último lugar, se propondrán las vías naturales de expansión de este trabajo, como indicios del futuro trabajo de este doctorando así como de todos aquellos que quieran aproximarse al campo de la presencia en Realidad Virtual.

6.2 Resumen de logros

A lo largo de este trabajo de tesis, se han analizado en profundidad las implicaciones del diseño de interacción en la experiencia de usuario percibida por los usuarios dentro de un entorno de Realidad Virtual orientado a fines educativos. Este análisis, se ha centrado principalmente en una de las interacciones básicas, la locomoción, y en la cualidad más diferencial de la RV, la presencia, siendo esta última un elemento clave en la transferibilidad de lo aprendido dentro de un entorno RV.

La presencia, tal y como hemos visto a lo largo de esta tesis, es la sensación subjetiva de realidad, de “creerse” que lo que están percibiendo está ahí, de un modo quasi-material; es, en definitiva, la sensación de estar, a todos los efectos, en el mundo virtual. Como una sensación subjetiva que es, su medición ha recaído tradicionalmente en la autoevaluación de los participantes de una experiencia de RV. Esta autoevaluación, presenta numerosas limitaciones y sesgos, dado su carácter post-experiencial, basado en recuerdos y en un complejo análisis introspectivo del concepto de realidad. Por este motivo, se han venido desarrollando nuevos métodos de medida de la presencia, intentando buscar métricas objetivas.

Las dos principales vías alternativas para la cuantificación de la presencia son: la presencia conductual (comprobar si las reacciones de los usuarios de un entorno de RV son similares a las que se producen en el mundo real) y la presencia fisiológica (asimilar ciertas dimensiones de métricas fisiológicas a la mayor o menor sensación de presencia).

Los resultados de esta tesis doctoral han contribuido significativamente a establecer una correlación, por primera vez, entre estas tres familias de medidas. Adicionalmente, se han comparado dos metáforas de navegación de naturalezas muy distintas. Una de ellas, el andar en el sitio, es un claro exponente de técnica de locomoción cercana a la realidad, con alta retroalimentación propioceptiva. La otra, el caminar indirecto pulsando un botón del mando, representa un ejemplo paradigmático de los métodos alejados de la locomoción real, pero cercanos a los usuales de los videojuegos.

De los experimentos llevados a cabo para esta investigación, se desprende que, al contrario de lo que se afirmaba en numerosos estudios previos, para un conjunto de usuarios con gran exposición a videojuegos 3D, es más cómodo y preciso. Este hallazgo es clave ya que permite personalizar el método de navegación a las particularidades de los usuarios, además de introducir novedades importantes a la hora de prevenir cibermareos: no dependen tanto del método

de locomoción elegido como de su implementación y del perfil previo de los usuarios.

Los objetivos de investigación propuestos en el Capítulo 1, se han materializado en los siguientes elementos:

- Se ha revisado la función de la presencia como elemento diferencial de los entornos de Realidad Virtual enfocados al aprendizaje.
- Se han evaluado las métricas utilizadas tradicionalmente para cuantificar la sensación de presencia en entornos de Realidad Virtual (subjetiva, conductual y fisiológica) y se ha establecido, por primera vez, correlaciones entre ellas.
- Se ha desarrollado un entorno experimental en RV con elementos de gamificación orientado a la evaluación de la experiencia de usuario, reutilizable por otros investigadores. Este entorno, el laberinto, permite su adaptación a diferentes escenarios de uso.
- Se ha desarrollado una herramienta software automática para recoger el comportamiento de los usuarios dentro de un entorno virtual con el fin de su análisis post-experimental. Esta herramienta se integra con el motor Unity y está diseñada con el objetivo de recoger datos tanto de la navegación como de cualquier interacción que se desee estudiar.
- Se ha desarrollado un flujo de trabajo y una herramienta de visualización para datos masivos correspondientes al comportamiento de los individuos en un entorno de RV recogidos en los experimentos. Para ello, por primera vez, se ha utilizado un Sistema de Información Geográfico como interfaz de visualización.
- Se ha examinado en profundidad la influencia de la interacción más representativa, la navegación, dentro de un entorno de Realidad Virtual sobre la experiencia de usuario (disgregada en 2 factores: comodidad y presencia, esta última en sus tres variantes, subjetiva, conductual y fisiológica).
- Se han proporcionado guías de diseño de interacción con recomendaciones para los diseñadores de sistemas de Realidad Virtual orientados al aprendizaje con el objetivo de potenciar la presencia.

6.3 Contribución al conocimiento

La evaluación de la experiencia de usuario en entornos de Realidad Virtual representa un ámbito de estudio novedoso y desafiante.

Las tecnologías actuales, apoyadas en HMD asequibles económicamente y con unas capacidades gráficas desconocidas hasta la fecha, así como los sistemas de seguimiento a escala de habitación, los cuales permiten formas de interacción revolucionarias, ofrecen un amplio abanico de posibilidades de diseño. Por este motivo, es necesario ahondar en los métodos y herramientas disponibles para que los desarrolladores de entornos virtuales puedan tomar decisiones de diseño informadas, eficaces y eficientes.

Especialmente relevante se muestra esta necesidad de sustrato empírico en el caso de los entornos de realidad virtual destinados a la actividad formativa ya que un diseño de interacción deficiente puede menoscabar el potencial didáctico de este tipo de sistemas.

Por este motivo, esta investigación se ha centrado en profundizar en como las distintas interacciones, más concretamente, el modo de desplazarse dentro de un entorno virtual, influye en lo “real” que los usuarios perciben esa experiencia. Este vínculo, tal como se avanzaba anteriormente, resulta crucial en experiencias educativas en RV porque ese “nivel de realidad”, reflejado en la sensación de presencia, afecta directamente a la transferibilidad y significatividad de los aprendizajes.

A continuación, se proporciona una descripción detallada de la contribución al conocimiento de esta investigación a través de un esquema en cuatro puntos:

- Establecimiento de correlaciones entre las tres aproximaciones más comunes a la cuantificación de la sensación de presencia: subjetiva, conductual y fisiológica.
- Evaluación del efecto sobre la experiencia de usuario en RV de dos metáforas de navegación: una física y una artificial.
- Diseño y desarrollo de un flujo de trabajo y de dos herramientas software para la recogida y visualización de datos procedente de la interacción de los usuarios en un entorno virtual.
- Desarrollo de una guía de diseño de interacción para experiencias de aprendizaje de RV basada en la sensación de presencia y en la teoría de la cognición materializada.

6.3.1 Correlación entre la presencia subjetiva, la conductual y la fisiológica

En este estudio, se combinan por primera vez las tres medidas de la sensación de presencia que se han desarrollado hasta el momento. Los métodos empleados para medir cada uno de estas aproximaciones han sido:

- Para la presencia subjetiva: Cuestionario ITC-SOPI, cumplimentado por los usuarios tras la experiencia virtual.
- Para la presencia conductual: Recuento de indicadores propios, registrados por los investigadores durante la experiencia virtual.
- Para la presencia fisiológica: Actividad electrodérmica (EDA) a través de la pulsera Empatica.

Tras realizar un análisis estadístico en profundidad, podemos afirmar que las tres dimensiones de la presencia (subjetiva, conductual y fisiológica) no muestran correlación entre ellas aunque internamente poseen correlaciones significativas lo que las hace válidas por separado.

Esto, a grandes rasgos, indica que cada una de estas aproximaciones a la cuantificación de la sensación de presencia está midiendo algún aspecto distinto. De este modo, es posible afirmar que no conforman aspectos complementarios, siendo partes de un todo, sino que representan métricas distintas para constructos psicológicos distintos. Ahondando en las interesantes conclusiones de Hein et al. [76], hasta ahora no se ha establecido correlación previa ni entre distintos cuestionarios, ni entre cuestionarios y reacciones conductuales. En nuestro caso, hemos ido un paso más allá y también demostramos que no existen correlaciones entre cuestionarios, conducta y medidas fisiológicas. En el apartado de trabajo futuro, se profundizará en las bases de los siguientes pasos a dar en este ámbito.

6.3.2 Impacto de la metáfora de navegación en la experiencia de usuario en RV

Atendiendo a los hallazgos obtenidos, la sensación de presencia se vincula positivamente cuando los usuarios estaban más cómodos con el diseño de interacción, independientemente del tipo de métrica utilizada (subjetiva, conductual o fisiológica). Los datos resultantes de la experimentación, sugieren que un método de locomoción artificial, como el Caminar indirecto (presionando un botón) obtiene mayor sensación de presencia bajo la aproximación conductual.

La presencia fisiológica tiene una intensa correlación con la actividad física por lo que no resulta un método fiable para medir presencia con técnicas de locomoción que requieran intensidad de movimientos, como las naturales.

Centrándonos en la fase de diseño de experiencias en Realidad Virtual, los métodos de locomoción con altos niveles de actividad física, por más reales que sean, pueden distraer la percepción de los usuarios así como hacer más incómoda la experiencia, penalizando la sensación de presencia. Este resultado, sugiere la idea de que un método de locomoción personalizado (al menos, elegible y/o configurable), vinculado a las características personales del usuario, como la condición física, la experiencia con juegos en primera persona, etc... podría mejorar drásticamente la experiencia de usuario.. En el ámbito de los juegos serios basados en RV, sin duda podría reducir la carga cognitiva destinada a la locomoción y mejorar la percepción de los usuarios dentro del entorno virtual. En un medio tan vinculado a las emociones como la RV, la personalización de la interacción (o cierta adaptación en tiempo real) podría resultar clave para favorecer una mayor penetración de la tecnología.

6.3.3 Flujo de trabajo y herramientas para la recogida y visualización de datos de interacción en RV

Uno de los aspectos más desafiantes de la investigación sobre experiencia de usuario en RV es la recogida de datos acerca de sus interacciones y la posterior visualización de las mismas de modo que se facilite la obtención de conclusiones por parte de los investigadores.

En este sentido, como parte de esta tesis, se ha desarrollado un flujo de trabajo así como dos herramientas software, representadas por dos scripts orientados todos ellos a la adquisición datos relativos a la interacción de los usuarios dentro de un entorno de RV y a su posterior tratamiento para la visualización en un Sistema de Información Geográfico.

Estas herramientas han sido liberadas bajo licencia Creative Commons para su aprovechamiento por la comunidad científica.

Bajo la premisa de que estas utilidades están principalmente destinadas a representar información relativa a la locomoción, se debe resaltar su escalabilidad, capacidad de personalización y ligereza, de modo que pueden ser utilizadas para apoyar el análisis conductual en experimentos de RV ya que pueden adaptarse de modo sencillo para trabajar con otras formas de interacción.

Su principal novedad se sustenta en la utilización de un Sistema de Información Geográfico para la visualización de los datos, haciendo que la traslación espacial de un entorno 3D a un mapa 2D sea sencilla y asequible. Esto, permite a su vez, un análisis fácil pero potente de los citados datos.

6.3.4 *Guía de diseño de interacción para experiencias de aprendizaje en RV*

A partir de los resultados anteriores, se ha confeccionado una breve guía de recomendaciones para el diseño de interacción que, basándose en la teoría de la cognición corporizada, pretende ayudar a diseñadores y desarrolladores a la hora de maximizar la sensación de presencia en entornos de realidad virtual, principalmente aquellos dedicados a fines educativos.

Con este objetivo, se ofrecen ejemplos prácticos de decisiones de diseño que pueden ser extrapoladas a diferentes estilos y géneros en Realidad Virtual.

6.4 Resumen de hallazgos

En esta sección, se va a establecer una correlación explícita entre los objetivos establecidos en el Capítulo 1 de esta tesis y la contribución al conocimiento, detallada en el punto anterior de este mismo capítulo.

Objetivo 1: Examinar la función de la presencia como elemento diferencial de los entornos de Realidad Virtual enfocados al aprendizaje.

Esta investigación ha profundizado en el marco teórico que apoya el papel relevante de la sensación de presencia dentro de una experiencia de aprendizaje basada en Realidad Virtual. Fruto de este trabajo, se establece que la presencia es clave por su relación con dos aspectos fundamentales de la educación: a) Emociones y motivación intrínseca: Aprender requiere de esfuerzo y este necesita, a su vez, de motivación para realizarlo. Mayor presencia implica mayor carga emocional y, transitivamente, mayor motivación; b) Viveza de la experiencia y transferibilidad: Una más intensa sensación de presencia implica mayor viveza de la experiencia virtual y, por tanto, posibilita la obtención de reacciones de los sujetos muy cercanas a las que se obtendrían en la vida real. Por este motivo, aquello aprendido dentro del entorno de RV, tendría una mayor transferibilidad al mundo real.

Objetivo 2: Evaluar las métricas utilizadas tradicionalmente para cuantificar la sensación de presencia en entornos de Realidad Virtual y establecer, por primera vez, correlaciones entre ellas.

Se han utilizado métricas representativas de cada una de las tres dimensiones de la presencia y se han establecido correlaciones estadísticas entre ellas, concluyendo que no se producen correlaciones, ni positivas ni negativas, con un tamaño de efecto que las haga significativas. Este hecho, además de confirmar que no son medidas equivalentes de un mismo constructo, conlleva ciertos interrogantes colaterales, que serán desarrollados en la sección 6.7. Trabajo futuro, de este mismo capítulo: ¿Cuál es la dimensión de la presencia que contribuye en mayor medida al éxito de un entorno de aprendizaje en RV? ¿Es posible aislar de manera individual aquello que está midiendo cada una de ellas?

Objetivo 3: Crear un entorno experimental en RV con elementos de gamificación orientado a la evaluación de la experiencia de usuario, reutilizable por otros investigadores.

Se ha desarrollado un laberinto en 3D gamificado a través de la inclusión de variadas mecánicas procedentes de videojuegos como son:

- Presión temporal
- Recolección de recursos (karmaesferas)
- Activación de escudo (campo de energía protector)
- Feedback positivo/negativo
- Riesgos con penalización (lanzallamas, abismos y charcos letales)

Este entorno puede personalizarse fácilmente con, por ejemplo, variaciones de recorrido o inclusión de nuevos objetos, riesgos, etc... pudiendo dar soporte a un amplio rango de experimentos en Realidad Virtual.

Objetivo 4: Desarrollar herramientas software automáticas para recoger el comportamiento de los usuarios dentro de un entorno virtual con el fin de su análisis post-experimental.

Se ha desarrollado un procedimiento y una herramienta software (script en C# para el motor Unity3D) que recoge en un fichero XML todos los desplazamientos e interacciones (tras una parametrización a medida) de los usuarios en un

entorno virtual. Este script se ha liberado bajo licencia Creative Commons y se encuentra en el anexo B de esta tesis, en la sección B.1.

Objetivo 5: Desarrollar herramientas de visualización para datos masivos correspondientes al comportamiento de los individuos en un entorno de RV recogidos en los experimentos.

Se ha desarrollado un procedimiento y una herramienta software en entorno web para visualizar los datos recogidos en Unity con el script señalado en el Objetivo 4 de esta sección. Para ello, se ha utilizado un Sistema de Información Geográfico (Leaflet) lo cual ha proporcionado nuevos niveles de flexibilidad y adaptación a la hora de analizar el comportamiento de los participantes en una experiencia de RV. La herramienta software desarrollada ha sido liberada bajo licencia Creative Commons y se encuentra en el anexo B de esta tesis, en la secciones B.3 y B.4.

Objetivo 6: Examinar la influencia de la interacción más representativa, la navegación, dentro de un entorno de Realidad Virtual sobre la experiencia de usuario (disgregada en 2 factores: comodidad y presencia, esta última en sus tres variantes, subjetiva, conductual y fisiológica).

Se ha estudiado la experiencia de usuario, atendiendo a comodidad y presencia, bajo dos condiciones de la variable “Metáfora de locomoción”, Andar en el sitio y Caminar indirecto, obteniendo los siguientes resultados a alto nivel:

- Comodidad: Debido a su baja retroalimentación propioceptiva, la técnica del Caminar indirecto debería haber obtenido resultados más altos en el factor Negative Effects (NE) del cuestionario ITC-SOPI, el cual representa lo incómodo que se siente el usuario en un entorno de Realidad Virtual. Sorprendentemente, fue el otro método, Andar en el sitio, aquel que obtuvo peores valores en este área, aún siendo un método clasificado como natural, por su similitud a la forma de andar convencional. Esto indica que otros factores, como se ha visto en este estudio, influyen en la sensación de comodidad de manera relevante. Principalmente, lo habituado que esté el usuario a los videojuegos.
- Presencia: Se utilizaron tres diferentes medidas: subjetiva (ITC-SOPI), conductual (Conteo reacciones) y fisiológica (EDA). Para cada una de ellas, los resultados fueron los siguientes: a) Presencial: No hay diferencias significativas entre ambos metáforas; b) Conductual: La condición Caminar indirecto obtuvo un valor de presencia significativamente superior al

Andar en el sitio; c) Fisiológica: La condición Andar en el sitio, obtuvo un valor de presencia significativamente superior al Caminar indirecto.

Objetivo 7: Crear un guía de diseño de interacción con recomendaciones para los diseñadores de sistemas de Realidad Virtual orientados al aprendizaje con el objetivo de potenciar la presencia.

Se ha desarrollado una breve guía de recomendaciones para el diseño de interacción, la cual, al basarse en la teoría de la cognición corporizada, asienta ciertas bases a la hora de concretar interacciones dentro de un espacio virtual de modo que se maximice la sensación de presencia, principalmente aquellos dedicados a fines educativos.

6.5 Conclusiones

Esta investigación se ha centrado en averiguar como diferentes metáforas de navegación influían en la sensación de presencia, tan necesaria para mejorar la experiencia de aprendizaje en un entorno de Realidad Virtual.

Se han evaluado dos metáforas de locomoción diferentes: uno de ellas del subgrupo Mágicas-HPF (Andar en el sitio) y otra representativa del subgrupo Mundanas-LPF (Caminar indirecto). Empleando un diseño intra-sujeto y aislando la dimensión subjetiva de la presencia, es posible concluir que la mecánica de locomoción empleada no tiene ninguna influencia en la presencia. Cuando los individuos se ven expuestos a dos métodos de locomoción en un mismo entorno virtual, no se muestran capaces de reflejar diferentes niveles de presencia a través de cuestionarios.

En las métricas conductuales de la presencia, la metáfora de Caminar indirecto, pulsando un botón al estilo de los videojuegos, aún siendo totalmente artificial y no tener retroalimentación propioceptiva (aunque si se considera mundana por ser un método de interacción habitual), ha obtenido mejores valores de presencia y comodidad. Esto se debe, probablemente, que al ser un método interiorizado de locomoción en entornos virtuales, su carga cognitiva es menor, permitiendo focalizarse más en el entorno y menos en el desplazamiento. Adicionalmente, al no requerir actividad física intensa, la percepción sensorial se ve favorecida también.

De hecho, haciendo referencia a una teoría que está cobrando popularidad rápidamente en los últimos tiempos, la de la Codificación Predictiva (CP) de Riva,

Wiederhold y Mantovani [159], se observa que nuestros hallazgos introducen dudas razonables también acerca de ese planteamiento.

La teoría de la CP sugiere que “el cerebro mantiene un modelo interno (simulación) del cuerpo y el espacio alrededor de él, lo que le permite proporcionar predicciones acerca de las entradas sensoriales que va a recibir y trata de minimizar la cantidad de errores de predicción (o ‘sorpresas’)”[159] (p.88). Los autores defienden que la RV trata de mimetizar el modelo cerebral lo máximo posible: cuanto más similar sea el modelo RV al modelo cerebral, mayor sensación de presencia experimentará el individuo.

Con este experimento, se ha probado que estos modelos, aparentemente vinculados a la naturaleza humana, pueden verse modificados por la actividad reiterada, como por ejemplo, la utilización intensiva de videojuegos.

En el caso de la métrica fisiológica, la EDA, debemos concluir que se ha visto mucho más influenciada por la actividad física de lo esperado, mostrándose además poco usable, ya que es altamente dependiente de la capacidad funcional de los usuarios.

Por último, en relación a las herramientas software y al entorno desarrollados, suponen una ayuda importante para futuros estudios en este ámbito y deberían constituir un comienzo a la hora de crear un banco de entornos virtuales de acceso libre para fomentar la repetibilidad de los experimentos así como la evolución del conocimiento, sin deber invertir recursos y esfuerzos en desarrollar entornos similares propios.

6.6 Limitaciones

En esta sección, se van a discutir algunos de los factores limitantes de esta tesis doctoral.

Poniendo el foco en el diseño experimental, encontramos varias limitaciones, relativas, por una parte a las elecciones de métricas y por otra a las características de los dispositivos hardware empleados.

A la hora de seleccionar métricas representativas de cada una de las tres dimensiones de la sensación de presencia, se seleccionó un método representativo para cada una de ellas. Para la subjetiva, el cuestionario ITC-SOPI; para la conductual, un conteo de reacciones de desarrollo propio; para la fisiológica, la EDA a través de un dispositivo de pulsera.

Aún cuando estas métricas están ampliamente validadas, existen pocos estudios que correlacionen los resultados de estos instrumentos con otros de su propia dimensión de presencia. Antes de inferir de manera absoluta que no existe correlación significativa entre métricas de diferentes dimensiones, sería necesario experimentar más, tanto de modo intra-dimensional como de modo cruzado.

Por otra parte, en el ámbito de la métrica fisiológica empleada, la EDA, es necesario remarcar que su correlación con la actividad física es muy pronunciada. Por este motivo, con ciertas metáforas de locomoción naturales, las cuales exigen movimiento corporal de mayor o menor intensidad, sus valores se verán profundamente alterados.

Para obviar esta correlación, podría establecerse una línea base con actividad física (por ejemplo, tras correr 15 segundos en el sitio) y sin exposición a la Realidad Virtual, para poder normalizar después los valores obtenidos.

Además, la utilización de un HMD cableado, introducía mayor complejidad a la hora de caminar en el sitio, ya que el paso ligero que requería, se veía entorpecido por el aparataje auxiliar (auriculares, cable, etc...), disminuyendo la capacidad inmersiva del conjunto de dispositivos.

Estudios futuros deberían repetir las condiciones experimentales de esta investigación pero probando alguna otra medida fisiológica, con mayor independencia de la actividad física, como el eye-tracking, y de mayor ecología.

6.7 Trabajo futuro

Esta tesis doctoral sienta las bases de futuras aplicaciones de la Realidad Virtual y de las implicaciones de la sensación de presencia en diferentes campos.

Tanto el entorno virtual experimental como las herramientas desarrolladas se han empleado como base del proyecto ATEMIN (*Assessment and Training on dEcision Making in rIsk eNvironments*).

El objetivo de ATEMIN consiste en desarrollar una plataforma de medición, evaluación y entrenamiento de factores relacionados con la toma de decisiones en situaciones laborales de riesgo a través de medidas implícitas y realidad virtual, bajo un paradigma de evaluación oculta y utilizando medidas psicofisiológicas para la obtención de procesos implícitos cerebrales de manera individualizada, orientado al sector de la industria de procesos.

ATEMIN es un proyecto financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) en la convocatoria RETOS-COLABORACIÓN 2017 con nº de expediente RTC-2017-6523-6.

En cuanto a las herramientas software en concreto, el futuro trabajo en esta línea debería ir dirigido a la automatización completa del flujo de trabajo, llegando a integrar el SIG dentro del entorno de Unity, mejorando la productividad. Adicionalmente, deben desarrollarse nuevos estudios acerca de como los datos recogidos a partir de las interacciones de los usuarios en un entorno RV puede informar a otras métricas habituales como presencia [163], co-presencia [136], carga cognitiva [185] o estados emocionales [160], de modo que sea posible incorporar nuevos indicadores en los entornos virtuales.

Estas métricas, alejadas del sesgo propio de los cuestionarios post-experimentales y complementarias a las complejas de obtener y poco ecológicas señales fisiológicas [93], podrían conducirnos a una evaluación objetiva de ciertos estados psicológicos complejos con una alta validez ecológica.

Y, por último, en referencia a la cuantificación de la presencia, es necesario trabajar en la obtención de medidas psicofisiológicas y/o conductuales que permitan, en tiempo real, conocer el nivel de presencia del usuario para poder maximizar su experiencia de aprendizaje en RV. A través de mediciones en tiempo real y apoyándonos en técnicas de Inteligencia Artificial, podemos crear contenidos procedurales y/o personalizar los existentes para adecuarnos a la experiencia de cada usuario.

Bibliografía

- [1] Clark C Abt. *Serious games*. University press of America, 1987.
- [2] Vladimir Agafonkin. *Leaflet*. 2014.
- [3] Vladimir Agafonkin. *Leaflet.heat*. 2014.
- [4] Mariano Alcañiz y col. “The EMMA Project: Emotions as a determinant of presence”. En: *PsychNology Journal* 1.2 (2003), págs. 141-150.
- [5] Daniel Ansari, Bert De Smedt y Roland H Grabner. “Neuroeducation—a critical overview of an emerging field”. En: *Neuroethics* 5.2 (2012), págs. 105-117.
- [6] Lawrence WS Auld y Veronica S Pantelidis. “Exploring virtual reality for classroom use”. En: *TechTrends* 39.1 (1994), págs. 29-31.
- [7] Lawrence Auld y Veronica S Pantelidis. “VIRTUAL reality”. En: *THE Journal (Technological Horizons In Education)* 27.4 (1999), pág. 48.
- [8] Rosa Maria Baños y col. “Presence and reality judgment in virtual environments: a unitary construct?” En: *CyberPsychology & Behavior* 3.3 (2000), págs. 327-335.

- [9] Lawrence W Barsalou. "Grounded cognition". En: *Annu. Rev. Psychol.* 59 (2008), págs. 617-645.
- [10] Redacción BBC. *Ivan Sutherland, el "padre de la computación gráfica" que revolucionó nuestra interacción con las máquinas*. Mar. de 2019.
- [11] Jared E Bendis. *A history and future of stereoscopy in education*. 2003.
- [12] Mathias Benedek y Christian Kaernbach. "A continuous measure of phasic electrodermal activity". En: *Journal of neuroscience methods* 190.1 (2010), págs. 80-91.
- [13] Frank Biocca. "Will simulation sickness slow down the diffusion of virtual environment technology?" En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1.3 (1992), págs. 334-343.
- [14] Frank Biocca y Ben Delaney. "Immersive virtual reality technology". En: *Communication in the age of virtual reality* 15 (1995), pág. 32.
- [15] Frank Biocca, Chad Harms y Judee K Burgoon. "Toward a more robust theory and measure of social presence: Review and suggested criteria". En: *Presence: Teleoperators & virtual environments* 12.5 (2003), págs. 456-480.
- [16] John B Black y col. "Embodied cognition and learning environment design". En: *Theoretical foundations of learning environments* 2 (2012), págs. 198-223.
- [17] Margaret S Chan John B Black. "Direct-manipulation animation: Incorporating the haptic channel in the learning process to support middle school students in science learning and mental model acquisition". En: (2006).
- [18] Costas Boletsis. "The new era of virtual reality locomotion: A systematic literature review of techniques and a proposed typology". En: *Multimodal Technologies and Interaction* 1.4 (2017), pág. 24.
- [19] Cristina Botella y col. "Virtual reality in the treatment of pain". En: (2008).

-
- [20] Stéphane Bouchard y col. “Reliability and validity of a single-item measure of presence in VR”. En: *Proceedings. Second International Conference on Creating, Connecting and Collaborating through Computing*. IEEE. 2004, págs. 59-61.
- [21] Wolfram Boucsein. *Electrodermal activity*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [22] Doug A. Bowman. *3D user interfaces: theory and practice*. Addison-Wesley, 2005.
- [23] Doug A Bowman, David Koller y Larry F Hodges. “A methodology for the evaluation of travel techniques for immersive virtual environments”. En: *Virtual reality 3.2* (1998), págs. 120-131.
- [24] Doug A Bowman, David Koller y Larry F Hodges. “Travel in immersive virtual environments: An evaluation of viewpoint motion control techniques”. En: *Virtual Reality Annual International Symposium, 1997., IEEE 1997*. IEEE. 1997, págs. 45-52.
- [25] Doug A Bowman y Ryan P McMahan. “Virtual reality: how much immersion is enough?” En: *Computer* 40.7 (2007), págs. 36-43.
- [26] E. Bozgeyikli y col. “Locomotion in virtual reality for room scale tracked areas”. En: *International Journal of Human Computer Studies* 122 (2019). cited By 0, págs. 38-49. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2018.08.002.
- [27] Evren Bozgeyikli y col. “Locomotion in virtual reality for room scale tracked areas”. En: *International Journal of Human-Computer Studies* 122 (2019), págs. 38-49.
- [28] Margaret M Bradley y Peter J Lang. “Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential”. En: *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry* 25.1 (1994), págs. 49-59.
- [29] Norman Breslow. “A generalized Kruskal-Wallis test for comparing K samples subject to unequal patterns of censorship”. En: *Biometrika* 57.3 (1970), págs. 579-594.

- [30] Kevin R Brooks. “Depth perception and the history of three-dimensional art: Who produced the first stereoscopic images?” En: *i-Perception* 8.1 (2017), pág. 2041669516680114.
- [31] John T Bruer. “Education and the brain: A bridge too far”. En: *Educational researcher* 26.8 (1997), págs. 4-16.
- [32] Lynn Butler-Kisber. “Mind, brain, and education: Implications for educators”. En: *Learning Landscapes* 5.1 (2011), págs. 1-266.
- [33] Fabio Buttussi y Luca Chittaro. “Effects of different types of virtual reality display on presence and learning in a safety training scenario”. En: *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 24.2 (2017), págs. 1063-1076.
- [34] Albert S Carlin, Hunter G Hoffman y Suzanne Weghorst. “Virtual reality and tactile augmentation in the treatment of spider phobia: a case report”. En: *Behaviour research and therapy* 35.2 (1997), págs. 153-158.
- [35] Dustin B Chertoff, Brian Goldiez y Joseph J LaViola. “Virtual Experience Test: A virtual environment evaluation questionnaire”. En: *2010 IEEE virtual reality conference (VR)*. IEEE. 2010, págs. 103-110.
- [36] Elizabeth F Churchill y Dave Snowdon. “Collaborative virtual environments: an introductory review of issues and systems”. En: *Virtual Reality* 3.1 (1998), págs. 3-15.
- [37] Andy Clark y David Chalmers. “The extended mind”. En: *analysis* 58.1 (1998), págs. 7-19.
- [38] M. Clemente y col. “Assessment of the influence of navigation control and screen size on the sense of presence in virtual reality using EEG”. En: *Expert Systems with Applications* 41.4 PART 2 (2014), págs. 1584-1592.
- [39] M. Clemente y col. “Measuring presence during the navigation in a virtual environment using EEG”. En: *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine* 11 (2013), págs. 136-140.

-
- [40] Charlie Cleveland. "Meaningful game mechanics". En: *Game Design Perspectives* (2002), págs. 85-88.
- [41] Jacob Cohen. "Statistical power analysis". En: *Current directions in psychological science* 1.3 (1992), págs. 98-101.
- [42] Samuel Taylor Coleridge. *Biographia literaria, or, biographical sketches of my literary life and opinions*. Vol. 7. Princeton University Press, 1984.
- [43] European Commission. *H2020 - 2nd WP(2016-2017) - Information and Communication Technologies*. Inf. téc. European Commission, 2017.
- [44] Keystone View Company. *Visual Education: Teacher's Guide to Keystone "600 Set"*. Keystone view Company (incorporated), 1920.
- [45] JB Cooper y VR2004 Taqueti. "A brief history of the development of mannequin simulators for clinical education and training". En: *Postgraduate medical journal* 84.997 (2008), págs. 563-570.
- [46] Rosie Cornish. *Statistics: An introduction to sample size calculations*. 2006.
- [47] Hugo D Critchley. "Electrodermal responses: what happens in the brain". En: *The Neuroscientist* 8.2 (2002), págs. 132-142.
- [48] Mihaly Csikszentmihalyi, Sami Abuhamdeh, Jeanne Nakamura y col. *Flow*. 1990.
- [49] Dongmei Cui y col. "Evaluation of the effectiveness of 3D vascular stereoscopic models in anatomy instruction for first year medical students". En: *Anatomical sciences education* 10.1 (2017), págs. 34-45.
- [50] Laura A Cushman, Karen Stein y Charles J Duffy. "Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality". En: *Neurology* 71.12 (2008), págs. 888-895.
- [51] James Mackenzie Davidson. "Stereoscopic Radiography". En: *Archives of Radiology and Electrotherapy* 23.11 (1919), 340a-346.

- [52] Robert DeLeskie. “The Underwood stereograph travel system: A historical and cultural analysis”. Tesis doct. Concordia University, 2000.
- [53] Julia Diemer y col. “The impact of perception and presence on emotional reactions: a review of research in virtual reality”. En: *Frontiers in psychology* 6 (2015), pág. 26.
- [54] Jim Edwards. *Oculus Rift Will Finally Go On Sale To Consumers Next Year*. Abr. de 2014.
- [55] Stephen R Ellis. “Presence of mind: A reaction to thomas sheridan’s “further musings on the psychophysics of presence””. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 5.2 (1996), págs. 247-259.
- [56] Robert B English. “Democritus’ theory of sense perception”. En: *Transactions and Proceedings of the American Philological Association*. Vol. 46. JSTOR. 1915, págs. 217-227.
- [57] Nickolas L Faust. “The virtual reality of GIS”. En: *Environment and Planning B: Planning and Design* 22.3 (1995), págs. 257-268.
- [58] Richard Ferdig y col. “Using stereoscopy to teach complex biological concepts”. En: *Advances in physiology education* 39.3 (2015), págs. 205-208.
- [59] R Ferguson y col. *Innovating Pedagogy 2019: Open University Innovation Report 7*. Inf. téc. The Open University, 2019.
- [60] Daniel Dominguez Ferraz y col. “The effects of functional training, bicycle exercise, and exergaming on walking capacity of elderly patients with Parkinson disease: a pilot randomized controlled single-blinded trial”. En: *Archives of physical medicine and rehabilitation* 99.5 (2018), págs. 826-833.
- [61] Laura Freina y Michela Ott. “A literature review on immersive virtual reality in education: state of the art and perspectives”. En: *The International Scientific Conference eLearning and Software for Education*. Vol. 1. Çarol I"National Defence University. 2015, pág. 133.

-
- [62] Julian Frommel, Sven Sonntag y Michael Weber. “Effects of controller-based locomotion on player experience in a virtual reality exploration game”. En: *Proceedings of the 12th International Conference on the Foundations of Digital Games*. ACM. 2017, pág. 30.
- [63] D Randy Garrison y Martha Cleveland-Innes. “Facilitating cognitive presence in online learning: Interaction is not enough”. En: *The American journal of distance education* 19.3 (2005), págs. 133-148.
- [64] Richard Gerrig. *Experiencing narrative worlds*. Routledge, 2018.
- [65] Michael A Gigante. “Virtual reality: definitions, history and applications”. En: *Virtual reality systems*. Elsevier, 1993, págs. 3-14.
- [66] Sabine Gillner y Hanspeter A Mallot. “Navigation and acquisition of spatial knowledge in a virtual maze”. En: *Journal of Cognitive Neuroscience* 10.4 (1998), págs. 445-463.
- [67] Susan Goldin-Meadow. “Widening the lens: what the manual modality reveals about language, learning and cognition”. En: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 369.1651 (2014), pág. 20130295.
- [68] Nathan Navarro Griffin, James Liu y Eelke Folmer. “Evaluation of Hands-busy vs Handsfree Virtual Locomotion”. En: *Proceedings of the 2018 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*. ACM. 2018, págs. 211-219.
- [69] Joy Paul Guilford y Wayne S Zimmerman. “The Guilford-Zimmerman Aptitude Survey.” En: *Journal of applied Psychology* 32.1 (1948), pág. 24.
- [70] Therese Gunn y col. “The use of virtual reality simulation to improve technical skill in the undergraduate medical imaging student”. En: *Interactive Learning Environments* 26.5 (2018), págs. 613-620.
- [71] Insook Han y John B Black. “Incorporating haptic feedback in simulation for learning physics”. En: *Computers & Education* 57.4 (2011), págs. 2281-2290.

- [72] Wilfred Harris. “Evolution of binocular and stereoscopic vision in man and other animals”. En: *British medical journal* 2.4831 (1953), pág. 297.
- [73] Anders Hast y A Marchetti. “Stereo Visualisation of Historical Aerial Photos—an Useful and Important Aerial Archeology Research Tool”. En: *2nd International Conference of Aerial Archaeology, Roma*: <http://www.iit.cnr.it/en/node/41603>. 2016.
- [74] Carrie Heeter. “Being there: The subjective experience of presence”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1.2 (1992), págs. 262-271.
- [75] Morton L Heilig. *Sensorama simulator*. US Patent 3,050,870. Ago. de 1962.
- [76] Dimitri Hein, Christian Mai y Heinrich Hußmann. “The Usage of Presence Measurements in Research: A Review”. En: *Proceedings of the International Society for Presence Research Annual Conference (Presence'18)*. *The International Society for Presence Research*. 2018.
- [77] Richard M Held y Nathaniel I Durlach. “Telepresence”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1.1 (1992), págs. 109-112.
- [78] Richard Held y Nathaniel Durlach. “Telepresence, time delay and adaptation”. En: *Pictorial communication in virtual and real environments* (1991), págs. 232-246.
- [79] Claudia Hendrix y Woodrow Barfield. “Presence within virtual environments as a function of visual display parameters”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 5.3 (1996), págs. 274-289.
- [80] Eric Hodgson y Eric Bachmann. “Comparing four approaches to generalized redirected walking: Simulation and live user data”. En: *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 19.4 (2013), págs. 634-643.
- [81] Oliver Wendell Holmes. “The stereoscope and the stereograph”. En: *Atlantic Monthly* 3.1 (1859).

-
- [82] Bo Huang y Hui Lin. “GeoVR: a web-based tool for virtual reality presentation from 2D GIS data”. En: *Computers & Geosciences* 25.10 (1999), págs. 1167-1175.
- [83] J. Huizinga. *Homo Ludens*. Colección Piragua : ensayos. Emecé Editores, 1968, pág. 217.
- [84] Mary Helen Immordino-Yang y Matthias Faeth. “The role of emotion and skilled intuition in learning”. En: *Mind, brain, and education: Neuroscience implications for the classroom* 69 (2010), pág. 83.
- [85] Brent E Insko. “Measuring presence: Subjective, behavioral and physiological methods.” En: (2003).
- [86] Susan Jang y col. “Direct manipulation is better than passive viewing for learning anatomy in a three-dimensional virtual reality environment”. En: *Computers & Education* 106 (2017), págs. 150-165.
- [87] Mina C. Johnson-Glenberg. “Immersive VR and Education: Embodied Design Principles That Include Gesture and Hand Controls”. En: *Frontiers in Robotics and AI* 5 (2018), pág. 81. ISSN: 2296-9144. DOI: 10.3389/frobt.2018.00081.
- [88] Maurice George Kendall. “Rank correlation methods.” En: (1948).
- [89] Robert S Kennedy y col. “Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness”. En: *The international journal of aviation psychology* 3.3 (1993), págs. 203-220.
- [90] David E Kieras y David E Meyer. *The EPIC architecture for modeling human information-processing and performance: A brief introduction*. Inf. téc. MICHIGAN UNIV ANN ARBOR DIV OF RESEARCH DEVELOPMENT y ADMINISTRATION, 1994.
- [91] Taeyong Kim y Frank Biocca. “Telepresence via television: Two dimensions of telepresence may have different connections to memory and persuasion.” En: *Journal of computer-mediated communication* 3.2 (1997), JCMC325.

- [92] David Kirsh y Paul Maglio. “On distinguishing epistemic from pragmatic action”. En: *Cognitive science* 18.4 (1994), págs. 513-549.
- [93] J Matias Kivikangas y col. “A review of the use of psychophysiological methods in game research”. En: *journal of gaming & virtual worlds* 3.3 (2011), págs. 181-199.
- [94] Scott R Klemmer, Björn Hartmann y Leila Takayama. “How bodies matter: five themes for interaction design”. En: *Proceedings of the 6th conference on Designing Interactive systems*. 2006, págs. 140-149.
- [95] JWKJW Kotrlik y CCHCC Higgins. “Organizational research: Determining appropriate sample size in survey research appropriate sample size in survey research”. En: *Information technology, learning, and performance journal* 19.1 (2001), pág. 43.
- [96] George Lakoff y Mark Johnson. *Philosophy in the Flesh*. Vol. 4. New York: Basic books, 1999.
- [97] Eike Langbehn, Paul Lubos y Frank Steinicke. “Evaluation of Locomotion Techniques for Room-Scale VR. Joystick, Teleportation, and Re-directed Walking”. En: *Proceedings of the Virtual Reality International Conference (VRIC)*. 2018.
- [98] Pontus Larsson, Daniel Västfjäll y Mendel Kleiner. “The actor-observer effect in virtual reality presentations”. En: *CyberPsychology & Behavior* 4.2 (2001), págs. 239-246.
- [99] Brenda Laurel. *Computers as theatre*. Addison-Wesley, 2013.
- [100] Ben D Lawson y col. “Signs and symptoms of human syndromes associated with synthetic experiences.” En: (2002).
- [101] Kwan Min Lee. “Presence, explicated”. En: *Communication theory* 14.1 (2004), págs. 27-50.
- [102] Jane Lessiter y col. “A cross-media presence questionnaire: The ITC-Sense of Presence Inventory”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 10.3 (2001), págs. 282-297.

-
- [103] Charles E Levy y col. “V-Mart, a Virtual Reality Grocery Store: A Focus Group Study of a Promising Intervention for Mild Traumatic Brain Injury and Posttraumatic Stress Disorder”. En: *American journal of physical medicine & rehabilitation* 98.3 (2019), págs. 191-198.
- [104] Hubert W Lilliefors. “On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown”. En: *Journal of the American statistical Association* 62.318 (1967), págs. 399-402.
- [105] Jason Lilly y col. “Creating a new “reality” for medical education: the Nexus Reality Lab for virtual reality”. En: *Journal of the Medical Library Association: JMLA* 107.4 (2019), pág. 609.
- [106] JJ-W Lin y col. “Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment”. En: *Virtual Reality, 2002. Proceedings. IEEE*. IEEE. 2002, págs. 164-171.
- [107] Wei-Kai Liou y Chun-Yen Chang. “Virtual reality classroom applied to science education”. En: *2018 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT)*. IEEE. 2018, págs. 1-4.
- [108] Kate Loewenthal y Christopher Alan Lewis. *An introduction to psychological tests and scales*. Psychology press, 2018.
- [109] R Bowen Loftin, M Engleberg y Robin Benedetti. “Applying virtual reality in education: A prototypical virtual physics laboratory”. En: *Proceedings of 1993 IEEE Research Properties in Virtual Reality Symposium*. IEEE. 1993, págs. 67-74.
- [110] Matthew Lombard y Theresa Ditton. “At the heart of it all: The concept of presence”. En: *Journal of computer-mediated communication* 3.2 (1997), JCMC321.
- [111] Matthew Lombard, Theresa B Ditton y Lisa Weinstein. “Measuring presence: the temple presence inventory”. En: *Proceedings of the 12th Annual International Workshop on Presence*. 2009, págs. 1-15.
- [112] Matthew Lombard y col. “Measuring presence: A literature-based approach to the development of a standardized paper-and-pencil instru-

- ment”. En: *Third international workshop on presence, delft, the netherlands*. Vol. 240. 2000, págs. 2-4.
- [113] Mario Lorenz y col. “I’m There! The influence of virtual reality and mixed reality environments combined with two different navigation methods on presence”. En: *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*. IEEE. 2015, págs. 223-224.
- [114] Regan L Mandryk y Lennart E Nacke. “Biometrics in Gaming and Entertainment Technologies”. En: *Biometrics in a Data Driven World*. Chapman y Hall/CRC, 2016, págs. 215-248.
- [115] G Mantovani, R Riva y C Galimberti. “VR learning: Potential and challenges for the use of 3D”. En: *Towards cyberpsychology: Mind, cognitions, and society in the Internet age* (2003), págs. 208-225.
- [116] Giuseppe Mantovani y Giuseppe Riva. ““Real” presence: how different ontologies generate different criteria for presence, telepresence, and virtual presence”. En: *Presence* 8.5 (1999), págs. 540-550.
- [117] Jorge Martín-Gutiérrez y col. “Design and validation of an augmented book for spatial abilities development in engineering students”. En: *Computers & Graphics* 34.1 (2010), págs. 77-91.
- [118] Jesus Mayor, Laura Raya y Alberto Sanchez. “A comparative study of virtual reality methods of interaction and locomotion based on presence, cybersickness and usability”. En: *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* (2019).
- [119] Rory McCloy y Robert Stone. “Science, medicine, and the future: Virtual reality in surgery”. En: *BMJ: British Medical Journal* 323.7318 (2001), pág. 912.
- [120] John P McIntire, Paul R Havig y Eric E Geiselman. “Stereoscopic 3D displays and human performance: A comprehensive review”. En: *Displays* 35.1 (2014), págs. 18-26.
- [121] Hilary McLellan. “Virtual realities”. En: *Handbook of research for educational communications and technology* (1996), págs. 457-487.

-
- [122] Alison McMahan. “Immersion, engagement, and presence: A method for analyzing 3-D video games”. En: *The video game theory reader*. Routledge, 2013, págs. 89-108.
- [123] Michael Meehan y col. “An objective surrogate for presence: Physiological response”. En: *3rd International Workshop on Presence*. Vol. 2. 2000.
- [124] Michael Meehan y col. “Physiological measures of presence in stressful virtual environments”. En: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 21.3 (2002), págs. 645-652.
- [125] Maurice Merleau-Ponty. *Phenomenology of perception*. Routledge, 1982.
- [126] Daniel Mestre y col. “Immersion et présence”. En: *Le traité de la réalité virtuelle. Paris: Ecole des Mines de Paris* (2006), págs. 309-38.
- [127] David R Michael y Sandra L Chen. *Serious games: Games that educate, train, and inform*. Muska & Lipman/Premier-Trade, 2005.
- [128] Marvin Minsky. “Telepresence”. En: *Omni magazine* June (1980), págs. 44-52.
- [129] Maria Montessori. *The Montessori method*. Transaction publishers, 2013.
- [130] Francisco Mora. *Neuroeducación*. Alianza Editorial, 2017.
- [131] Johannes Moskaliuk, Johanna Bertram y Ulrike Cress. “Training in virtual environments: putting theory into practice”. En: *Ergonomics* 56.2 (2013), págs. 195-204.
- [132] Shumei Murakami y col. “Stereoscopy in Dental Education: An Investigation”. En: *Journal of dental education* 81.4 (2017), págs. 450-457.
- [133] GRS Murthy y RS Jadon. “A review of vision based hand gestures recognition”. En: *International Journal of Information Technology and Knowledge Management* 2.2 (2009), págs. 405-410.
- [134] Joschka Mütterlein y Thomas Hess. “Immersion, Presence, Interactivity: Towards a Joint Understanding of Factors Influencing Virtual Reality

- Acceptance and Use”. En: *AMCIS2017 Proceedings: Adoption and Diffusion of Information Technology (SIGADIT)*. 2017.
- [135] Thi Thuong Huyen Nguyen y Thierry Duval. “A survey of communication and awareness in collaborative virtual environments”. En: *Collaborative Virtual Environments (3DCVE), 2014 International Workshop on*. IEEE. 2014, págs. 1-8.
- [136] Kristine L Nowak y Frank Biocca. “The effect of the agency and anthropomorphism on users’ sense of telepresence, copresence, and social presence in virtual environments”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 12.5 (2003), págs. 481-494.
- [137] Tatiana Ogourtsova y col. “Ecological Virtual Reality Evaluation of Neglect Symptoms (EVENS): effects of virtual scene complexity in the assessment of poststroke unilateral spatial neglect”. En: *Neurorehabilitation and neural repair* 32.1 (2018), págs. 46-61.
- [138] Elena Olmos y col. “Mobile virtual reality: A promising technology to change the way we learn and teach”. En: *Mobile and ubiquitous learning*. Springer, 2018, págs. 95-106.
- [139] Mark T Palmer. “Interpersonal communication and virtual reality: Mediating interpersonal relationships”. En: *Communication in the age of virtual reality* (1995), págs. 277-299.
- [140] Veronica S Pantelidis. “Reasons to use virtual reality in education and training courses and a model to determine when to use virtual reality”. En: *Themes in Science and Technology Education* 2.1-2 (2010), págs. 59-70.
- [141] David Sidney Parlett. *The Oxford history of board games*. Oxford University Press, USA, 1999.
- [142] Randy Pausch, Thomas Crea y Matthew Conway. “A literature survey for virtual environments: Military flight simulator visual systems and simulator sickness”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1.3 (1992), págs. 344-363.

-
- [143] Randy Pausch, Dennis Proffitt y George Williams. “Quantifying immersion in virtual reality”. En: *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 1997, págs. 13-18.
- [144] Tabitha C Peck, Henry Fuchs y Mary C Whitton. “An evaluation of navigational ability comparing Redirected Free Exploration with Distractors to Walking-in-Place and joystick locomotion interfaces”. En: *Virtual Reality Conference (VR), 2011 IEEE*. IEEE. 2011, págs. 55-62.
- [145] Jennifer L Penland y col. “Virtual Learning: A Study of Virtual Reality for Distance Education”. En: *Handbook of Research on Blended Learning Pedagogies and Professional Development in Higher Education*. IGI Global, 2019, págs. 156-176.
- [146] Jean Piaget y Margaret Trans Cook. “The origins of intelligence in children. 1952”. En: *Manuela Piazza, Vronique Izard, Philippe Pinel, Denis Le Bihan, and Stanislas Dehaene (1952)*.
- [147] Rosalind W. Picard, Szymon Fedor y Yadid Ayzenberg. “Multiple Arousal Theory and Daily-Life Electrodermal Activity Asymmetry”. en. En: *Emotion Review* (mar. de 2015), págs. 1-14. ISSN: 1754-0739, 1754-0747. DOI: 10.1177/1754073914565517.
- [148] Rosalind W Picard y col. “Affective learning—a manifesto”. En: *BT technology journal* 22.4 (2004), págs. 253-269.
- [149] Krzysztof Pietroszek y Chao Cheng Lin. “UniVResity: Face-to-Face Class Participation for Remote Students using Virtual Reality”. En: *Proceedings of the 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST 2019)*. ACM. 2019.
- [150] Michael Polanyi. *The tacit dimension*. University of Chicago press, 2009.
- [151] Marc Prensky. “The motivation of gameplay: The real twenty-first century learning revolution”. En: *On the horizon* 10.1 (2002), págs. 5-11.
- [152] “Presence defined”. En: *International Society for Presence Research*. Last retrieval from <https://ispr.info> on 2019-04-02 (feb. de 2000).

- [153] J. Psotka. “Immersive training systems: Virtual reality and education and training”. En: *Instructional Science* 23.5 (1995), págs. 405-431. ISSN: 1573-1952. DOI: 10.1007/BF00896880.
- [154] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn y Mary C Whitton. *Redirected walking*. Citeseer, 2005.
- [155] Lisa Rebenitsch y Charles Owen. “Review on cybersickness in applications and visual displays”. En: *Virtual Reality* 20.2 (2016), págs. 101-125.
- [156] Theresa Marie Rhyne. “Going virtual with geographic information and scientific visualization”. En: *Computers & Geosciences* 23.4 (1997), págs. 489-491.
- [157] Giuseppe Riva. “Virtual reality: an experiential tool for clinical psychology”. En: *British Journal of Guidance & Counselling* 37.3 (2009), págs. 337-345.
- [158] Giuseppe Riva, Fabrizio Davide y Wijnand A IJsselsteijn. *Being there: Concepts, effects and measurements of user presence in synthetic environments*. Ios Press, 2003.
- [159] Giuseppe Riva, Brenda K Wiederhold y Fabrizia Mantovani. “Neuroscience of virtual reality: From virtual exposure to embodied medicine”. En: *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking* 22.1 (2019), págs. 82-96.
- [160] Giuseppe Riva y col. “Affective interactions using virtual reality: the link between presence and emotions”. En: *CyberPsychology & Behavior* 10.1 (2007), págs. 45-56.
- [161] Christine Rosakranse y Soo Youn Oh. “Measuring presence: the use trends of five canonical presence questionnaires from 1998-2012”. En: *Challenging presence: Proceedings of the 15th international conference on presence*. 2014, págs. 25-30.
- [162] Joseph M Rosen y col. “Evolution of virtual reality [Medicine]”. En: *IEEE engineering in medicine and biology magazine* 15.2 (1996), págs. 16-22.

-
- [163] Maria V Sanchez-Vives y Mel Slater. “From presence to consciousness through virtual reality”. En: *Nature Reviews Neuroscience* 6.4 (2005), pág. 332.
- [164] Akane Sano, Rosalind W. Picard y Robert Stickgold. “Quantitative analysis of wrist electrodermal activity during sleep”. eng. En: *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology* 94.3 (dic. de 2014), págs. 382-389. ISSN: 1872-7697. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2014.09.011.
- [165] Wilson J Sarmiento y César A Collazos. “Common-Awareness Artifacts”. En: *International Conference on Human-Computer Interaction*. Springer. 2016, págs. 376-381.
- [166] Richard M Satava y Shaun B Jones. “Current and future applications of virtual reality for medicine”. En: *Proceedings of the IEEE* 86.3 (1998), págs. 484-489.
- [167] David W Schloerb. “A quantitative measure of telepresence”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 4.1 (1995), págs. 64-80.
- [168] Thomas Schubert, Frank Friedmann y Holger Regenbrecht. “The experience of presence: Factor analytic insights”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 10.3 (2001), págs. 266-281.
- [169] Martijn J Schuemie y col. *Research on Presence in Virtual Reality: A Survey*. Inf. téc. 2001.
- [170] Martijn J Schuemie y col. “Research on presence in virtual reality: A survey”. En: *CyberPsychology & Behavior* 4.2 (2001), págs. 183-201.
- [171] Thomas B Sheridan. “Further musings on the psychophysics of presence”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 5.2 (1996), págs. 241-246.
- [172] Thomas B Sheridan. “Musings on telepresence and virtual presence”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1.1 (1992), págs. 120-126.

- [173] Charles Scott Sherrington. *The integrative action of the nervous system*. Charles Scribners Sons, 1906.
- [174] Valerie J Shute. “Stealth assessment in computer-based games to support learning”. En: *Computer games and instruction* 55.2 (2011), págs. 503-524.
- [175] Richard Skarbez, Frederick P. Brooks Jr. y Mary C. Whitton. “A Survey of Presence and Related Concepts”. En: *ACM Comput. Surv.* 50.6 (nov. de 2017), 96:1-96:39. ISSN: 0360-0300. DOI: 10.1145/3134301.
- [176] Mel Slater. “How colorful was your day? Why questionnaires cannot assess presence in virtual environments”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 13.4 (2004), págs. 484-493.
- [177] Mel Slater, John McCarthy y Francesco Maringelli. “The influence of body movement on subjective presence in virtual environments”. En: *Human Factors* 40.3 (1998), págs. 469-477.
- [178] Mel Slater y Anthony Steed. “A Virtual Presence Counter”. En: *Presence: Teleoper. Virtual Environ.* 9.5 (oct. de 2000), págs. 413-434. ISSN: 1054-7460. DOI: 10.1162/105474600566925.
- [179] Mel Slater y Anthony Steed. “A virtual presence counter”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 9.5 (2000), págs. 413-434.
- [180] Mel Slater, Anthony Steed y Martin Usoh. “The virtual treadmill: A naturalistic metaphor for navigation in immersive virtual environments”. En: *Virtual Environments’ 95*. Springer, 1995, págs. 135-148.
- [181] Mel Slater y Martin Usoh. “Representations systems, perceptual position, and presence in immersive virtual environments”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 2.3 (1993), págs. 221-233.
- [182] Mel Slater, Martin Usoh y Anthony Steed. “Depth of presence in virtual environments”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 3.2 (1994), págs. 130-144.

- [183] Mel Slater, Martin Usoh y Anthony Steed. “Steps and ladders in virtual reality”. En: *Virtual Reality Software And Technology*. World Scientific. 1994, págs. 45-54.
- [184] Mel Slater, Martin Usoh y Anthony Steed. “Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality”. En: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)* 2.3 (1995), págs. 201-219.
- [185] Mel Slater y Sylvia Wilbur. “A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 6.6 (1997), págs. 603-616.
- [186] Mel Slater y col. “Analysis of physiological responses to a social situation in an immersive virtual environment”. En: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 15.5 (2006), págs. 553-569.
- [187] Richard HY So, WT Lo y Andy TK Ho. “Effects of navigation speed on motion sickness caused by an immersive virtual environment”. En: *Human factors* 43.3 (2001), págs. 452-461.
- [188] Kay M Stanney y Phillip Hash. “Locus of user-initiated control in virtual environments: Influences on cybersickness”. En: *Presence* 7.5 (1998), págs. 447-459.
- [189] Efstathios Stavrakis. “Stereoscopic non-photorealistic rendering”. En: (2008).
- [190] Frank Steinicke y col. “Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques”. En: *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 16.1 (2009), págs. 17-27.
- [191] Jonathan Steuer. “Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence”. En: *Journal of communication* 42.4 (1992), págs. 73-93.
- [192] Gail M Sullivan y Richard Feinn. “Using effect size—or why the P value is not enough”. En: *Journal of graduate medical education* 4.3 (2012), págs. 279-282.

- [193] Tarja Susi, Mikael Johannesson y Per Backlund. *Serious games: An overview*. 2007.
- [194] Ivan E Sutherland. “The ultimate display”. En: *Multimedia: From Wagner to virtual reality* (1965), págs. 506-508.
- [195] John Sweller. “Cognitive load theory”. En: *Psychology of learning and motivation*. Vol. 55. Elsevier, 2011, págs. 37-76.
- [196] John Sweller. “Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design”. En: *Learning and instruction 4.4* (1994), págs. 295-312.
- [197] Jari Takatalo, Göte Nyman y Leif Laaksonen. “Components of human experience in virtual environments”. En: *Computers in Human Behavior* 24.1 (2008), págs. 1-15.
- [198] Ron Tamborini y Paul Skalski. “The role of presence in the experience of electronic games”. En: *Playing video games: Motives, responses, and consequences* (2006), págs. 225-240.
- [199] Unity Technologies. *Unity3D*. 2018.
- [200] Thomas Terkildsen y Guido Makransky. “Measuring presence in video games: An investigation of the potential use of physiological measures as indicators of presence”. En: *International Journal of Human-Computer Studies* 126 (2019), págs. 64-80.
- [201] Martin Usoh y col. “Using presence questionnaires in reality”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 9.5 (2000), págs. 497-503.
- [202] Martin Usoh y col. “Walking>walking-in-place>flying, in virtual environments”. En: *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 1999, págs. 359-364.
- [203] Edward Verbree y col. “Interaction in virtual world views-linking 3D GIS with VR”. En: *International Journal of Geographical Information Science* 13.4 (1999), págs. 385-396.

-
- [204] Peter Vorderer y col. “MEC spatial presence questionnaire (MEC-SPQ): Short documentation and instructions for application”. En: *Report to the European community, project presence: MEC (IST-2001-37661)* 3 (2004).
- [205] Nicholas J Wade. “The chimenti controversy”. En: *Perception* 32.2 (2003), págs. 185-200.
- [206] Peng Wang y col. “A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training”. En: *International journal of environmental research and public health* 15.6 (2018), pág. 1204.
- [207] Lynne M Weber y col. “Immersive Virtual Reality Mirror Therapy for Upper Limb Recovery After Stroke: A Pilot Study”. En: *American journal of physical medicine & rehabilitation* 98.9 (2019), págs. 783-788.
- [208] Robert B Welch y col. “The effects of pictorial realism, delay of visual feedback, and observer interactivity on the subjective sense of presence”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 5.3 (1996), págs. 263-273.
- [209] Charles Wheatstone. “XVIII. Contributions to the physiology of vision. Part the first. on some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision”. En: *Philosophical transactions of the Royal Society of London* 128 (1838), págs. 371-394.
- [210] Brenda K Wiederhold y col. “An investigation into physiological responses in virtual environments: an objective measurement of presence”. En: *Towards cyberpsychology: Mind, cognitions and society in the internet age* 2 (2001).
- [211] Margaret Wilson. “Six views of embodied cognition”. En: *Psychonomic bulletin & review* 9.4 (2002), págs. 625-636.
- [212] William Winn. “A conceptual basis for educational applications of virtual reality”. En: *Technical Publication R-93-9, Human Interface Technology Laboratory of the Washington Technology Center, Seattle: University of Washington* (1993).

- [213] Bob G Witmer, Christian J Jerome y Michael J Singer. “The factor structure of the presence questionnaire”. En: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 14.3 (2005), págs. 298-312.
- [214] Bob G Witmer y Michael J Singer. “Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire”. En: *Presence* 7.3 (1998), págs. 225-240.
- [215] Maja Wrzesien y Mariano Alcañiz Raya. “Learning in serious virtual worlds: Evaluation of learning effectiveness and appeal to students in the E-Junior project”. En: *Computers & Education* 55.1 (2010), págs. 178-187.
- [216] Christine Youngblut. *What a decade of experiments reveals about factors that influence the sense of presence*. Inf. téc. INSTITUTE FOR DEFENSE ANALYSES ALEXANDRIA VA, 2006.
- [217] Catherine Zambaka y col. “Effects of travel technique on cognition in virtual environments”. En: *Virtual Reality, 2004. Proceedings. IEEE*. IEEE. 2004, págs. 149-286.
- [218] Zhengbo Zou y Semiha Ergan. “A Framework towards Quantifying Human Restorativeness in Virtual Built Environments”. En: *arXiv preprint arXiv:1902.05208* (2019).

Apéndice A

Formulario ITC-SOPI en castellano

Preguntas del ITC-SOPI

En este apéndice, se muestra el formulario ITC-SOPI [102] en su versión en Castellano, administrado durante el proceso experimental detallado en el capítulo 3.

Evalúa las siguientes expresiones del 1 al 5, siendo:

1. Totalmente en desacuerdo.
2. En desacuerdo.
3. Ni de acuerdo ni en desacuerdo.
4. De acuerdo.
5. Totalmente de acuerdo

Pregunta 1. TRAS mi experiencia en el entorno virtual...

- Me sentí triste porque la experiencia terminase.

- Me sentí desorientado.
- Tuve la sensación de que había vuelto de un viaje.
- Me hubiera gustado que la experiencia hubiera continuado.
- Recuerdo vívidamente algunas partes de la experiencia.
- Recomendaría esta experiencia a mis amigos.

Pregunta 2. DURANTE mi experiencia en el entorno virtual...

- Me sentí involucrado.
- Me sentí envuelto por el entorno.
- Perdí la noción del tiempo.
- Sentí que podía interactuar con el entorno.
- El entorno parecía natural.
- Sentí que el contenido estaba “vivo”.
- Sentí que los elementos u objetos casi podían tocarme.
- Me divertí.
- Sentí que estaba visitando los lugares del entorno.
- Me sentí cansado.
- El contenido me pareció creíble.
- Sentí que no estaba sólo viendo cosas.
- Tuve la sensación de que me movía en respuesta a partes del entorno.
- Me sentí mareado.
- Sentí que el entorno era parte de la vida real.
- Mi experiencia fue intensa.
- Presté más atención al entorno que a mis propios pensamientos (preocupaciones personales, fantasías, ...)

-
- Tuve la sensación de estar dentro de las escenas del entorno.
 - Sentí que podía mover objetos (en el entorno virtual).
 - Las escenas representadas podrían ocurrir realmente en el mundo real.
 - Sentí fatiga ocular.
 - Casi podía oler los diferentes elementos del entorno.
 - Tuve la sensación de que los elementos del entorno eran conscientes de que yo estaba allí.
 - Tuve una fuerte sensación de que los sonidos provenían de diferentes direcciones del entorno.
 - Me sentí rodeado por el entorno.
 - Sentí náuseas.
 - Tuve una fuerte sensación de que los elementos eran sólidos.
 - Sentí que podía alcanzar y tocar cosas (en el entorno).
 - Sentí que la temperatura cambiaba junto a las escenas del entorno.
 - Respondí de manera emocional.
 - Sentí que todos mis sentidos eran estimulados al mismo tiempo.
 - El contenido me atrajo.
 - Me sentí capaz de cambiar el curso de los eventos en el entorno.
 - Sentí que estaba en el mismo espacio que los elementos del entorno.
 - Tuve la sensación de que partes del entorno me respondían.
 - Sentí que realmente podía mover cosas en el entorno.
 - Sentí dolor de cabeza.
 - Sentí que estaba participando dentro del entorno.

Pregunta 3. Determina tu sensación de estar dentro el entorno virtual siguiendo una escala del 1 al 7, en la que el 7 representa una sensación natural de estar en un lugar

Tuve la sensación de estar ahí en el entorno virtual:

(1 = En absoluto; 7 = Mucho).

Pregunta 4. ¿Hasta qué punto hubo momentos durante la experiencia en los que el entorno era la realidad para ti?

Hubo momentos durante la experiencia en los que el entorno virtual era la realidad para mi...

(1 = En ningún momento; 7 = Casi todo el tiempo).

Pregunta 5. Cuando recuerdas tu experiencia en el entorno virtual, ¿lo recuerdas más como una imagen que has visto, o como un lugar que has visitado?

El entorno virtual me parece más...

(1 = Imágenes que he visto; 7 = Un lugar que he visitado).

Pregunta 6. Durante el transcurso de la experiencia, ¿qué fue más fuerte en general, tu sensación de estar dentro del entorno, o de estar en otro lugar?

Tuve una sensación más fuerte de...

(1 = Estar en otro lugar; 7 = Estar dentro del entorno virtual).

Pregunta 7. Considera tu recuerdo de estar en el entorno virtual. ¿Cómo de similar resulta este recuerdo, al de estar en otros lugares en los que has estado hoy? Considera aspectos como realismo, tamaño, lugar en tu imaginación, hasta qué punto tienes visión “panorámica” en tu imaginación, y otros elementos de estructura.

Pienso en el entorno virtual como un lugar de manera similar a otros lugares en los que he estado hoy...

(1 = En absoluto; 7 = En gran medida).

Pregunta 8. Durante el transcurso de la experiencia, ¿a menudo pensaste que estabas dentro del entorno virtual?

Durante el transcurso de la experiencia, a menudo pensé que estaba dentro del entorno virtual...

(1 = Con poca frecuencia; 7 = Mucho).

Apéndice B

Scripts y archivos auxiliares capítulo 4

En este apéndice, se recogen todos los *scripts* referenciados en el Capítulo 4 de esta tesis. A su vez, son descargables libremente por estar publicados en abierto, bajo licencia Creative Commons (CC0). El repositorio de GitHub público es: https://github.com/ElsevierSoftwareX/SOFTX_2018_69.

B.1 BehavioralDataTracker.cs

Este script, realizado con C# está diseñado para utilizarse con Unity. Debe incorporarse al GameObject del avatar virtual del usuario.

```
using UnityEngine;
using System.Collections;
using System.Collections.Generic ;
using System.Xml ;
using System.Xml.Serialization ;
using System.IO ;
using UnityEngine.SceneManagement;

public class FPSInputTracker : MonoBehaviour
{
    //prefix for saving file
```

```
string xmlSaveFileName;
//path for saving file
public static string _path
{
get
{
string s = Application.dataPath ;

s = Path.Combine(s, "UserBehaviouralData") ;

//if the fold doesn't exist, create it
if(!Directory.Exists(s))
Directory.CreateDirectory(s) ;
print ("Folder Created");

return s ;
}
}

#region movement classes-----
public class Movement
{

public Vector3 startPosition ;
public Vector3 endPosition ;
public float startTime, endTime, totalTime, distanceMoved ;

//default constructor
public Movement()
{
this.startPosition = Vector3.zero ;
this.startTime = 0f ;
this.endTime = 0f ;
this.totalTime = 0f ;
this.endPosition = Vector3.zero ;
this.distanceMoved = 0f ;
}

//alternative constructor
public Movement(Vector3 startPosition)
{
this.startPosition = startPosition ;
this.startTime = Time.timeSinceLevelLoad ;
}

//finishing movement
public void EndMovement(Vector3 endPosition)
{
this.endTime = Time.timeSinceLevelLoad ;
this.totalTime = endTime - startTime ;
this.endPosition = endPosition ;
this.distanceMoved = Vector3.Distance(this.startPosition, this.endPosition) ;
}
}

public class MovementData
{

public float idleTime ;

public Movement movement ;
```

```
//default constructor
public MovementData()
{
    idleTime = 0f ;
    movement = new Movement() ;
}
//alternative constructor
public MovementData(Movement movement, float previousEndTime)
{
    this.movement = movement ;
    this.idleTime = movement.startTime - previousEndTime ;
}
}
#endregion

//movements collection
public List<Movement> movements = new List<Movement>() ;

//---this class is what gets saved-to/retrieved-from an xml file-->
[XmlRoot("UserLog")]
public class UserLog
{
    [XmlElement("TotalTime")]
    //public float totalTime ;
    public float totalTime ;
    [XmlElement("TotalDistance")]
    public float totalDistance ;

    [XmlArray("MovementData"), XmlArrayItem("Information")]
    public MovementData[] movementData ;

//default constructor
public UserLog()
{
    this.totalTime = 0f ;
    this.totalDistance = 0f ;
    movementData = new MovementData[0] ;
}

#region XML saving/loading -----
//script header must include [using]-> System.Xml, System.Xml.Serialization, System.IO

public void Save(string path)
{
    int index = 0 ;
    string p = path + "." + index.ToString() ;

    while(File.Exists(p + ".xml"))
    {
        index ++ ;
        p = path + "." + index.ToString() ;
    }
}
```

```
var serializer = new XmlSerializer(typeof(UserLog)) ;
var stream = new FileStream(p + ".xml", FileMode.Create) ;
serializer.Serialize(stream, this) ;

stream.Close() ;
}

public UserLog Load(string path)
{

if(!File.Exists(path))
return new UserLog() ;

var serializer = new XmlSerializer(typeof(UserLog)) ;
var stream = new FileStream(path, FileMode.Open) ;

var ul = serializer.Deserialize(stream) as UserLog ;

stream.Close() ;
return ul ;
}
#endregion
}

//cache reference to this objects transform
Transform myTrans ;
//cache reference to the camera transform
Transform myCam ;

void Start()
{
xmlSaveFileName = SceneManager.GetActiveScene ().name;
myTrans = this.transform ;
myCam = myTrans.Find("Camera (eye)");
print ("Begin");

//finding the camera object child
if(!myCam || !myCam.GetComponent<Camera>())
{
Debug.LogError("Error : No child of name \"Main Camera\" was found on GameObject
(\"\" + myTrans.name + "\")");
this.enabled = false ;
return ;
}
}

bool goalCompleted = false ;

void Update()
{ }

int currentMovementIndex = 0 ;
```

```
bool isMoving = false ;

public void StartMovement()
{
print ("StartMovement()");
movements.Add(new Movement(myTrans.position)) ;

if(isMoving)
{
EndMovement() ;
}

isMoving = true ;
}

public void EndMovement()
{
print ("EndMovement()");
print("Num. movements = " + movements.Count);
print ("Movement index = " + currentMovementIndex);
if(movements.Count <= 0 || currentMovementIndex < movements.Count)
movements[currentMovementIndex].EndMovement(myTrans.position) ;

currentMovementIndex ++ ;
isMoving = false ;
}
}
```

B.2 Fichero XML con el que se recogen los datos relativos a la locomoción

Este fichero XML es un ejemplo real de la estructura y tipo de datos recogidos por el BehavioralDataTracker.cs.

```
<?xml version="1.0" encoding="Windows-1252"?>
<UserLog xmlns:xsi=
"http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <TotalTimeTakenToComplete>38.9222221</TotalTimeTakenToComplete>
  <TotalDistanceTraveled>114.87178</TotalDistanceTraveled>
  <MovementData>
    <Information>
      <idleTime>4.909191</idleTime>
    </Information>
    <movement>
      <startPosition>
        <x>1.16532791</x>
        <y>0.0833333358</y>
        <z>2.73833966</z>
      </startPosition>
      <endPosition>
        <x>0.6511547</x>
        <y>0.0833333358</y>
        <z>1.29903293</z>
      </endPosition>
    </movement>
  </MovementData>
</UserLog>
```

```
</endPosition>
<startTime>4.909191</startTime>
<endTime>5.05266333</endTime>
<totalTime>0.1434722</totalTime>
<distanceMoved>1.52839065</distanceMoved>
</movement>
</Information>
<Information>
<idleTime>6.4786315</idleTime>
<movement>
<startPosition>
<x>0.6511547</x>
<y>0.0833333358</y>
<z>1.29903293</z>
</startPosition>
<endPosition>
<x>0.00218765065</x>
<y>0.0833333358</y>
<z>-0.520014644</z>
</endPosition>
<startTime>11.5312948</startTime>
<endTime>11.7113256</endTime>
<totalTime>0.180030823</totalTime>
<distanceMoved>1.93134463</distanceMoved>
</movement>
</Information>
<Information>
<idleTime>1.68583679</idleTime>
<movement>
<startPosition>
<x>0.00218765065</x>
<y>0.0833333358</y>
<z>-0.520014644</z>
</startPosition>
<endPosition>
<x>-0.54804635</x>
<y>0.0833333358</y>
<z>-2.06180739</z>
</endPosition>
<startTime>13.3971624</startTime>
<endTime>13.5537958</endTime>
<totalTime>0.156633377</totalTime>
<distanceMoved>1.63703465</distanceMoved>
</movement>
</Information>
<Information>
<idleTime>3.06003284</idleTime>
<movement>
<startPosition>
<x>-0.54804635</x>
<y>0.0833333358</y>
<z>-2.06180739</z>
</startPosition>
<endPosition>
<x>-1.10818577</x>
<y>0.0833333358</y>
<z>-3.63066268</z>
</endPosition>
<startTime>16.6138287</startTime>
<endTime>16.7704334</endTime>
<totalTime>0.156604767</totalTime>
<distanceMoved>1.66585207</distanceMoved>
</movement>
```

```
</Information>
<Information>
  <idleTime>0.8928127</idleTime>
  <movement>
    <startPosition>
      <x>-1.10818577</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>-3.63066268</z>
    </startPosition>
    <endPosition>
      <x>-1.97603011</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>-6.062367</z>
    </endPosition>
    <startTime>17.6632462</startTime>
    <endTime>17.909668</endTime>
    <totalTime>0.246421814</totalTime>
    <distanceMoved>2.58192563</distanceMoved>
  </movement>
</Information>
<Information>
  <idleTime>0.649107</idleTime>
  <movement>
    <startPosition>
      <x>-1.97603011</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>-6.062367</z>
    </startPosition>
    <endPosition>
      <x>-2.88843536</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>-8.61626</z>
    </endPosition>
    <startTime>18.5587749</startTime>
    <endTime>18.814806</endTime>
    <totalTime>0.256031036</totalTime>
    <distanceMoved>2.71198273</distanceMoved>
  </movement>
</Information>
<Information>
  <idleTime>7.42732048</idleTime>
  <movement>
    <startPosition>
      <x>-2.88843536</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>-8.61626</z>
    </startPosition>
    <endPosition>
      <x>-8.455916</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>-3.53148818</z>
    </endPosition>
    <startTime>26.2421265</startTime>
    <endTime>26.6227169</endTime>
    <totalTime>0.380590439</totalTime>
    <distanceMoved>7.5400095</distanceMoved>
  </movement>
</Information>
<Information>
  <idleTime>0.201320648</idleTime>
  <movement>
    <startPosition>
      <x>-8.455916</x>
```

```
<y>0.0833333358</y>
<z>-3.53148818</z>
</startPosition>
<endPosition>
  <x>-11.0940351</x>
  <y>0.0833333358</y>
  <z>4.035683</z>
</endPosition>
<startTime>26.8240376</startTime>
<endTime>27.2371674</endTime>
<totalTime>0.4131298</totalTime>
<distanceMoved>8.013847</distanceMoved>
</movement>
</Information>
<Information>
  <idleTime>1.77794647</idleTime>
  <movement>
    <startPosition>
      <x>-11.0940351</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>4.035683</z>
    </startPosition>
    <endPosition>
      <x>0.112702608</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>2.067114</z>
    </endPosition>
    <startTime>29.0151138</startTime>
    <endTime>29.59347</endTime>
    <totalTime>0.5783558</totalTime>
    <distanceMoved>11.3783226</distanceMoved>
  </movement>
</Information>
<Information>
  <idleTime>1.65550613</idleTime>
  <movement>
    <startPosition>
      <x>0.112702608</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>2.067114</z>
    </startPosition>
    <endPosition>
      <x>3.81260371</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>3.29544139</z>
    </endPosition>
    <startTime>31.2489758</startTime>
    <endTime>31.4499779</endTime>
    <totalTime>0.201002121</totalTime>
    <distanceMoved>3.89846849</distanceMoved>
  </movement>
</Information>
<Information>
  <idleTime>0.723773956</idleTime>
  <movement>
    <startPosition>
      <x>3.81260371</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>3.29544139</z>
    </startPosition>
    <endPosition>
      <x>7.4645505</x>
      <y>0.0833333358</y>
```

```
      <z>4.750268</z>
    </endPosition>
    <startTime>32.17375</startTime>
    <endTime>32.37483</endTime>
    <totalTime>0.201076508</totalTime>
    <distanceMoved>3.93106031</distanceMoved>
  </movement>
</Information>
<Information>
  <idleTime>0.37984848</idleTime>
  <movement>
    <startPosition>
      <x>7.4645505</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>4.750268</z>
    </startPosition>
    <endPosition>
      <x>17.94763</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>9.100483</z>
    </endPosition>
    <startTime>32.7546768</startTime>
    <endTime>33.3363342</endTime>
    <totalTime>0.5816574</totalTime>
    <distanceMoved>11.34986</distanceMoved>
  </movement>
</Information>
<Information>
  <idleTime>0.8480606</idleTime>
  <movement>
    <startPosition>
      <x>17.94763</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>9.100483</z>
    </startPosition>
    <endPosition>
      <x>33.81084</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>-12.8650684</z>
    </endPosition>
    <startTime>34.1843948</startTime>
    <endTime>35.5584564</endTime>
    <totalTime>1.37406158</totalTime>
    <distanceMoved>27.0947762</distanceMoved>
  </movement>
</Information>
<Information>
  <idleTime>1.48736572</idleTime>
  <movement>
    <startPosition>
      <x>33.81084</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>-12.8650684</z>
    </startPosition>
    <endPosition>
      <x>6.624195</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>-13.6664295</z>
    </endPosition>
    <startTime>37.0458221</startTime>
    <endTime>38.418293</endTime>
    <totalTime>1.37247086</totalTime>
    <distanceMoved>27.1984539</distanceMoved>
```

```

</movement>
</Information>
<Information>
  <idleTime>0.381534576</idleTime>
  <movement>
    <startPosition>
      <x>6.624195</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>-13.6664295</z>
    </startPosition>
    <endPosition>
      <x>4.22627354</x>
      <y>0.0833333358</y>
      <z>-13.4210119</z>
    </endPosition>
    <startTime>38.7998276</startTime>
    <endTime>38.9222221</endTime>
    <totalTime>0.122394562</totalTime>
    <distanceMoved>2.4104476</distanceMoved>
  </movement>
</Information>
</MovementData>
<LookData>
  <Information>
    <totalTimeFacingDirection>9.159333</totalTimeFacingDirection>
    <tracks>
      <startTime>0</startTime>
      <forwardDirection>
        <x>-0.177554354</x>
        <y>-0.8494337</y>
        <z>-0.496927828</z>
      </forwardDirection>
      <ObjectDirectlyAhead>
        <name>Floor</name>
        <position>
          <x>0</x>
          <y>0</y>
          <z>0</z>
        </position>
        <focusPoint>
          <x>1.26631033</x>
          <y>-7.356639E-18</y>
          <z>0.33131358</z>
        </focusPoint>
      </ObjectDirectlyAhead>
    </tracks>
  </Information>
<Information>
  <totalTimeFacingDirection>0.5082331</totalTimeFacingDirection>
  <tracks>
    <startTime>9.159333</startTime>
    <forwardDirection>
      <x>-0.177285179</x>
      <y>-0.8495877</y>
      <z>-0.496760458</z>
    </forwardDirection>
    <ObjectDirectlyAhead>
      <name>Floor</name>
      <position>
        <x>0</x>
        <y>0</y>
        <z>0</z>
      </position>
    </ObjectDirectlyAhead>
  </tracks>
</Information>

```

```
<focusPoint>
  <x>0.734713</x>
  <y>2.56862642E-17</y>
  <z>-1.15680647</z>
</focusPoint>
</ObjectDirectlyAhead>
</tracks>
</Information>
<Information>
  <totalTimeFacingDirection>0.500674248</totalTimeFacingDirection>
  <tracks>
    <startTime>9.667566</startTime>
    <forwardDirection>
      <x>-0.177140281</x>
      <y>-0.849610269</y>
      <z>-0.496772945</z>
    </forwardDirection>
    <ObjectDirectlyAhead>
      <name>Floor</name>
      <position>
        <x>0</x>
        <y>0</y>
        <z>0</z>
      </position>
      <focusPoint>
        <x>0.734767854</x>
        <y>2.56828513E-17</y>
        <z>-1.15665281</z>
      </focusPoint>
    </ObjectDirectlyAhead>
  </tracks>
</Information>
<Information>
  <totalTimeFacingDirection>28.7539825</totalTimeFacingDirection>
  <tracks>
    <startTime>10.1682405</startTime>
    <forwardDirection>
      <x>-0.1774774</x>
      <y>-0.849482238</y>
      <z>-0.496872216</z>
    </forwardDirection>
    <ObjectDirectlyAhead>
      <name>Floor</name>
      <position>
        <x>0</x>
        <y>0</y>
        <z>0</z>
      </position>
      <focusPoint>
        <x>0.734806</x>
        <y>2.5684628E-17</y>
        <z>-1.1567328</z>
      </focusPoint>
    </ObjectDirectlyAhead>
  </tracks>
</Information>
</LookData>
</UserLog>
```

B.3 Index.html

Este script representa la página principal de la estructura web para montar la arquitectura necesitada por Leaflet.

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
<title>Ejemplo</title>
<link rel="stylesheet" href="leaflet/leaflet.css" />
<link rel="stylesheet" href="css/estilos.css" />
</head>
<body>

<div id="mapid"></div>
<script src="js/xml2json.js"></script>
<script src="js/pruba.js"></script>
<script src="leaflet/leaflet.js"></script>
<script src="js/leaflet-heat.js"></script>
<script src="jQuery/jquery-3.3.1.min.js"></script>
<script src="js/codigo.js"></script>

</body>
</html>
```

B.4 Code.js

Este archivo en JavaScript, es el archivo fundamental para post-procesar los ficheros XML con los datos y adecuarlos a la estructura que espera el Sistema de Información Geográfica.

```
var map = L.map('mapid',{
  crs: L.CRS.Simple
});
var imageBounds = [[0,0], [700,700]];
var image = L.imageOverlay('img/maze_top.jpg', imageBounds).addTo(map);
map.fitBounds(imageBounds);

var yx = L.latLng;

var xy = function(x, y) {
  if (L.Util.isArray(x)) { // If arguments are an array
    return yx(x[1], x[0]);
  }
  return yx(y, x); // If arguments are a pair
};

var xOffset = 8.139; // If squared map, use only one offset variable
var zOffset = 8.139;
var xOriginUnity = -43; // Origin point in Unity3D
var yOriginUnity = -42; // Origin point in Unity3D
var totalUnity = 86; // Total Unity environment length (Final - Origin)

var xyOffset = function(x,y){
```

```
    return yx(((yOriginUnity - parseFloat(y))*xOffset*-1),(xOriginUnity - parseFloat(x))*xOffset*-1);
  };

  var addressPoints = [];

  //xml unwrap
  $.ajax({
    type: "GET",
    url: "data/BaseSceneTP.5.xml", //sample file with user data
    dataType: "xml",
    success: function (xml) {
      console.log(xml);
      var i = 0;

      // Parse the xml file and get data
      var xmlDoc = $.parseXML(xml),
          $xml = $(xmlDoc);
      $(xml).find('startPosition').each(function () {
        //console.log("Movement " + i);
        i++;

        var xStartPosition = $(this).find('x').text();
        var zStartPosition = $(this).find('z').text();
        //console.log(xStartPosition,zStartPosition);
        var point = xyOffset(xStartPosition,zStartPosition);
        //console.log("point = " + point);
        var zOK = $(zStartPosition) + $(zOffset);
        var xAux = (xOriginUnity - parseFloat(xStartPosition))*xOffset*-1;
        var yAux = (yOriginUnity - parseFloat(zStartPosition))*xOffset*-1;
        //console.log("x = " + xAux + " / y = " + yAux);

        addressPoints.push([ yAux,xAux ,1]);

      });

    },
    error: function() {
      console.log("ERROR");
      alert("XML file loading was unsuccessful");
    }
  });

  //console.log(addressPoints);

  var heat = L.heatLayer(addressPoints, {
    minOpacity:0.5,
    max:1.0,
    radius: 20,
    gradient:{
      0.4: 'blue',
      0.65: 'lime',
      1: 'red'
    }
  }).addTo(map);
```