



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Tesis doctoral

RELACIÓN DE LA PRESENCIA Y LA CORPORIZACIÓN EN
REALIDAD VIRTUAL EN INDIVIDUOS CON ICTUS

Autor:

Adrián Borrego González

Supervisores:

Roberto Llorens Rodríguez

Mariano Luis Alcañiz Raya

Noviembre 2018

*A mi familia y amigos, en
especial a mis padres y a
Victoria, por aguantarme todo
este tiempo.*

Reconocimientos

Me gustaría agradecer la inestimable ayuda de toda la gente que me rodea a diario y sin la cual no hubiera sido posible finalizar este trabajo, especialmente a los doctores Roberto Llorens y Mariano Alcañiz por haber guiado y dirigido esta tesis doctoral.

Gracias al Servicio de Neurorehabilitación de los Hospitales Vithas y a todos los pacientes que han participado en los estudios.

Gracias a Rosa Baños y a todo su equipo de trabajo por haberme enseñado todo lo referente a la corporización, destacando a Priscila Palomo por su colaboración directa en algunos de los estudios.

Gracias a mis compañeros de trabajo del Instituto de Investigación e Innovación en Bioingeniería, especialmente a los integrantes de mi grupo Neurorehabilitation and Brain Research Group.

Gracias a Roberto Llorens por su tiempo y su capacidad para guiar mis ideas cuando me desviaba del camino y a Jorge Latorre por ayudarme siempre a mantener el rumbo.

En definitiva, gracias a todos porque sin vosotros este trabajo carecería de sentido.

Resumen

Actualmente existe un creciente número de estudios que muestran resultados prometedores en intervenciones basadas en realidad virtual en diferentes poblaciones neurológicas, con especial énfasis en poblaciones que han sufrido un ictus. El interés en la realidad virtual se basa en su capacidad para recrear entornos controlados, inmersivos e interactivos que involucran a los participantes en ejercicios intensos y personalizados, características clave en las intervenciones efectivas de neurorehabilitación. La interacción, así como la representación corporal del usuario en un mundo virtual, suelen estar mediadas a través de entes virtuales, o avatares, que representan sincrónicamente movimientos corporales reales o responden a eventos mediante dispositivos de entrada externos. Los avatares no solo proporcionan un ancla en el mundo virtual para las tareas visomotoras, sino que su morfología también puede tener implicaciones en el comportamiento de los usuarios. Si bien una gran cantidad de estudios se han centrado en comprender los mecanismos subjetivos subyacentes a una exposición de realidad virtual (presencia y corporización o *embodiment*, principalmente) en individuos sanos, la transferencia de estos hallazgos a individuos con ictus no es evidente y permanece sin explorar. La presencia se define como el grado en que un individuo es incapaz de reconocer que una experiencia es generada por ordenador. A su vez, la corporización se define como la auto conciencia que un individuo tiene de su propio cuerpo. Estudios previos han identificado diferentes componentes que constituyen la corporización, incluyendo la propiedad, la localización y la agencia. La posible variación de dichos mecanismos podría afectar a la experiencia dentro de un entorno virtual y, en última instancia, a la efectividad clínica de las intervenciones de neurorehabilitación. El objetivo principal de este trabajo es salir al paso de esta incógnita, determinando y comparando la presencia y la corporización en un entorno virtual en usuarios sanos y con ictus.

El presente trabajo incluye cuatro estudios con sujetos sanos y con ictus, que se realizaron con dicho objetivo. Adicionalmente, se realizaron dos estudios complementarios donde se caracterizaron los sistemas de estimulación audiovisual y de registro del movimiento utilizados en este experimento. En el primer estudio se analizó la relación entre la presencia y la inmersión de los usuarios sanos durante una tarea en un entorno virtual mostrado mediante un casco de realidad virtual, donde los usuarios interactuaban mediante movimientos corporales, detectados con un

dispositivo de captura de movimiento. Los siguientes dos estudios caracterizaron las respuestas subjetivas, comportamentales y fisiológicas de la sensación de corporización en sujetos sanos y en individuos con ictus. Se utilizó la ilusión de la mano de goma para analizar la propiedad y la localización en ausencia de movimiento. Los resultados de estos estudios indican que los individuos con ictus parecen ser más propensos a sentir propiedad sobre un elemento externo a su cuerpo que los sujetos sanos. Además, a través de estos estudios se pudieron determinar otros efectos como la variación de la corporización con la edad en sujetos sanos o la respuesta muscular en sujetos con ictus y su relación con esta sensación. El último estudio caracterizó la interacción de la presencia y la corporización tanto en sujetos sanos como con ictus en un entorno virtual, homólogo al utilizado previamente. Los resultados derivados de este estudio proporcionan la primera evidencia de que los individuos con ictus pueden experimentar la sensación de presencia y corporización con algo menos de intensidad, pero de manera comparable a sujetos sanos. Estos hallazgos confirman la vivacidad de la experiencia virtual tras un ictus, lo cual podría constituir la base de la efectividad de las intervenciones de neurorrehabilitación mediante entornos de realidad virtual.

Resum

Actualment existeix un creixent nombre d'estudis que mostren resultats prometedors en intervencions basades en realitat virtual incloent diferents poblacions neurològiques, amb especial èmfasi en poblacions amb seqüeles d'ictus. L'interès en la realitat virtual es basa en la seua capacitat per recrear entorns controlats, immersius i interactius que involucren als participants en exercicis intensos i personalitzats, característiques claus en les intervencions efectives de neurorrehabilitació. La interacció, així com la representació corporal de l'usuari en un món virtual, sol estar facilitada a través d'ens virtuals o avatars, que representen sincrònicament moviments corporals reals o que responen a esdeveniments determinants mitjançant dispositius d'entrada externs. Els avatars no només proporcionen una àncora en el món virtual per a les tasques visiomotores, sinó que amb la seua morfologia també poden tindre implicacions al comportament dels usuaris. Tot i que una gran quantitat d'estudis s'han centrat en comprendre els mecanismes subjectius subjacents a una exposició de realitat virtual (presència i corporització o *embodiment*, principalment) en individus sans, la transferència d'aquests descobriments a individus amb ictus no és evident i roman sense explorar. La presència es defineix com el grau amb què un individu no és capaç de reconèixer que una experiència es generada per un ordinador. Així mateix, la corporització es defineix com l'autoconsciència que un individu té del seu propi cos i està dividida en tres constructes: la propietat, la localització i l'agència. Les possibles variacions d'aquests mecanismes poden afectar a l'experiència dins d'un entorn virtual i, en última instància, a l'efectivitat clínica de les intervencions de neurorrehabilitació. L'objectiu principal d'aquest treball és respondre aquesta incògnita, determinant i comparant la presència i la corporització a un entorn virtual amb usuaris sans i amb ictus.

El present treball inclou quatre estudis amb subjectes sans i amb ictus, que es van realitzar amb aquest objectiu. Addicionalment, es van realitzar dos estudis complementaris prèviament on es van caracteritzar els sistemes d'estimulació audiovisual i de registre del moviment utilitzats. Al primer estudi, es va analitzar la relació entre la presència i la immersió en usuaris sans durant una tasca a un entorn virtual mostrat mitjançant un casc de realitat virtual, on el usuari interaccionaven a través de moviments corporals, detectats amb un dispositiu de captura de

moviment. Els següents dos estudis van caracteritzar les respostes subjectives, de comportament i fisiològiques de la sensació de corporització en subjectes sans i individus amb ictus. Es va utilitzar la il·l·lusió de la mà de goma per analitzar la propietat i la localització en absència de moviment. Els resultats d'aquests estudis indicaren que els individus amb ictus semblen ser més propensos a sentir propietat sobre un element extern al seu cos que els subjectes sans. A més a més, mitjançant aquests estudis es van poder determinar altres efectes com la variació de la corporització amb l'edat en subjectes sans o la resposta muscular en subjectes amb ictus i la seua relació amb aquesta sensació. L'últim estudi va caracteritzar la interacció de la presència i la corporització tant en subjectes sans com ictus a un entorn virtual, homòleg al utilitzat prèviament. Els resultats derivats d'aquest estudi proporcionen la primera prova de què els individus amb ictus poden experimentar la sensació de presència i corporització de manera semblant a subjectes sans, si bé amb menys intensitat. Aquests descobriments confirmen la vivacitat de l'experiència virtual després d'un ictus, la qual cosa podria constituir la base de l'efectivitat de les intervencions de neurorrehabilitació mitjançant entorns de realitat virtual.

Abstract

An increasing number of studies report promising results of virtual reality (VR)-based interventions in different neurological populations, with particular emphasis on stroke. Interest on VR is based on its ability to recreate controlled, immersive, and interactive environments that engage participants in intensive and customized exercises. Importantly, these features have been repeatedly reported as pillars of effective neurorehabilitation interventions. Interaction and bodily presence in the virtual world is usually mediated through virtual selves, or avatars, which synchronously represent actual body movements or respond to events on external input devices. Embodied self-representations in the virtual world not only provide an anchor for visuomotor tasks, but their morphology can also have behavioral implications. While a significant body of research has focused on the underlying subjective mechanisms of exposure to VR (mainly presence and embodiment) on healthy individuals, the transference of these findings to individuals with stroke is not evident and remains unexplored. The sense of presence can be defined as the degree to which an individual is unable to recognize that an experience is computer-generated. Classical definitions of embodiment have resorted to the concept of bodily self-consciousness. Previous research has identified different constitutive components of embodiment, including body-ownership, self-location, and agency. The possible variation of these mechanisms could affect the experience and, ultimately, the clinical effectiveness of neurorehabilitation interventions. The main objective of this work is to delve into these questions, by determining and comparing the sense of embodiment and presence in a virtual environment of a sample of healthy subjects and individuals with stroke.

The present work includes four primary studies involving healthy people and people with stroke and two complementary studies that aimed to characterize the audiovisual stimulation devices and motion tracking systems used. The first primary study investigated the connection between presence and immersion in healthy subjects during a task in a virtual environment displayed by a VR headset. Participants interacted through body movements, detected with a motion tracking device. The following two primary studies determined the subjective, behavioural, and physiological responses to embodiment in healthy subjects and individuals with stroke. These studies used the rubber hand illusion to investigate body-ownership

and self-location in absence of movement. The results of these studies indicated that individuals with stroke appear to be most likely to feel body-ownership over an external body part than healthy subjects. Moreover, these studies explored other effects, such as the dependence of embodiment with age in healthy subjects or the muscular responses in individuals with stroke and its relation to embodiment. The last primary study investigated the interaction of presence and embodiment both in healthy subjects and individuals with stroke in a virtual environment, homologous to the one used previously. The results of this study provided first evidence that individuals with stroke experiment comparable (but slightly lower) sense of embodiment and presence to healthy controls during exposure to VR. These findings confirm the vivacity of the virtual experience after a stroke, which could constitute the basis for the effectiveness of neurorehabilitation interventions using VR environments.

Abreviaturas

RV: Realidad virtual

EV: Entorno virtual

HMD: Casco de realidad virtual

SUS: Cuestionario Slater-Usih-Steed

FOV: Campo de visión

EEG: Electroencefalografía

fMRI: Imagen por resonancia magnética funcional

RHI: Ilusión de la mano de goma

ERHQ: Cuestionario *Embodiment of Rubber Hand Questionnaire*

EDA: Actividad electrodermal

EMG: Electromiografía

sEMG: Electromiografía de superficie

Índice general

Índice general.....	15
Índice de figuras	19
Índice de tablas.....	23
Capítulo 1. Introducción	25
1.1. Realidad virtual.....	27
1.1.1. Definición.....	27
1.2. Presencia.....	30
1.2.1. Definición.....	30
1.2.2. Facilitación	32
1.2.2.1 Inmersión	33
1.2.3. Medidas	37
1.2.3.1 Medidas subjetivas	38
1.2.3.2 Medidas objetivas	39
1.2.4. Estudios previos sobre presencia	43
1.2.4.1 Facilitación de la presencia	43
1.2.4.2 Uso de medidas subjetivas.....	45
1.2.4.3 Uso de medidas objetivas	46
1.3. Corporización.....	50
1.3.1. Definición.....	50
1.3.2. Facilitación	56
1.3.2.1 Ilusión de la mano de goma.....	57
1.3.3. Medidas	59
1.3.3.1 Medidas subjetivas	59
1.3.3.2 Medidas objetivas	59
1.3.4. Estudios previos sobre corporización.....	65
1.3.4.1 Facilitación de la corporización	65
1.3.4.2 Uso de medidas subjetivas.....	71
1.3.4.3 Uso de medidas objetivas	71
1.4. Ictus.....	81
1.4.1. Definición.....	81
1.4.2. Consecuencias	83

1.4.3.	Estudios previos sobre realidad virtual	88
1.4.4.	Estudios previos sobre presencia	90
1.4.5.	Estudios previos sobre corporización.....	91
1.5.	Limitaciones de la literatura existente	93
1.5.1.	Presencia.....	93
1.5.2.	Corporización.....	93
1.5.3.	Presencia y corporización	94
1.5.4.	Sistemas de estimulación visual y de registro corporal	95
1.6.	Hipótesis	96
1.6.1.	Hipótesis principal.....	96
1.6.2.	Hipótesis secundarias.....	96
1.7.	Objetivos	97
1.7.1.	Objetivo principal.....	97
1.7.2.	Objetivos secundarios	97
1.8.	Estructura de la tesis.....	98
Capítulo 2.	Caracterización de los sistemas de estimulación y registro	99
2.1.	Sistemas de estimulación visual.....	101
2.1.1.	Oculus Rift	102
2.1.2.	HTC Vive	104
2.1.3.	Características de los sistemas estimulación visual	105
2.1.4.	Estudio comparativo de sistemas de estimulación visual	107
2.1.4.1	Hipótesis y objetivos.....	107
2.1.4.2	Procedimiento.....	107
2.1.4.3	Análisis de los datos	109
2.1.4.4	Resultados	109
2.1.4.5	Discusión	111
2.2.	Sistemas de registro corporal.....	114
2.2.1.	Microsoft Kinect v1	116
2.2.2.	Microsoft Kinect v2	117
2.2.1.	Características de los sistemas de registro corporal	119
2.2.2.	Fuentes de error	121
2.2.3.	Estudio comparativo de sistemas de registro corporal	122
2.2.3.1	Hipótesis y objetivos.....	122
2.2.3.2	Procedimiento.....	122

2.2.3.3	Análisis de los datos	124
2.2.3.4	Resultados	124
2.2.3.5	Discusión	125
2.3.	Sistemas de registro fisiológico	128
2.3.1.	Actividad electrodérmica	128
2.3.2.	Temperatura de la piel	130
2.3.3.	Actividad electromiográfica	130
Capítulo 3.	Estudios	133
3.1.	Presencia e inmersión en individuos sanos	135
3.1.1.	Hipótesis y objetivos	135
3.1.2.	Participantes	135
3.1.3.	Materiales	135
3.1.4.	Procedimiento	137
3.1.4.1	Medidas	137
3.1.5.	Análisis de los datos	138
3.1.5.1	Análisis estadístico	138
3.1.6.	Resultados	138
3.1.7.	Discusión	139
3.2.	Corporización en individuos sanos de distintas edades	140
3.2.1.	Hipótesis y objetivos	140
3.2.2.	Participantes	140
3.2.3.	Materiales	141
3.2.4.	Procedimiento	141
3.2.4.1	Medidas	143
3.2.5.	Análisis de los datos	143
3.2.5.1	Análisis de la señal	143
3.2.5.2	Análisis estadístico	144
3.2.6.	Resultados	145
3.2.6.1	Diferencias entre grupos de edad	145
3.2.6.2	Relación entre la edad y la corporización	147
3.2.7.	Discusión	147
3.3.	Corporización en individuos con ictus	151
3.3.1.	Hipótesis y objetivos	151

3.3.2.	Participantes.....	151
3.3.3.	Materiales	153
3.3.4.	Procedimiento.....	153
3.3.4.1	Medidas	154
3.3.5.	Análisis de los datos	154
3.3.5.1	Análisis de señal	154
3.3.5.2	Análisis estadístico	155
3.3.6.	Resultados	155
3.3.6.1	Medidas subjetivas	155
3.3.6.2	Medidas fisiológicas	157
3.3.6.3	Interacción entre las respuestas subjetivas y fisiológicas.....	160
3.3.7.	Discusión	161
3.4.	Presencia y corporización en individuos sanos y con ictus.....	169
3.4.1.	Hipótesis y objetivos.....	169
3.4.2.	Participantes.....	169
3.4.3.	Materiales	170
3.4.4.	Procedimiento.....	172
3.4.4.1	Medidas	172
3.4.5.	Análisis de los datos	172
3.4.5.1	Análisis estadístico	172
3.4.6.	Resultados	173
3.4.7.	Discusión	175
Capítulo 4.	Conclusiones	179
4.1.	Objetivo principal.....	181
4.2.	Objetivos secundarios.....	182
Anexos	183
Anexo I.	Cuestionario Embodiment of Rubber Hand Questionnaire.....	185
Anexo II.	Cuestionario Slater-Usoh-Steed	189
Bibliografía	191
Méritos	215
	Artículos en revista.....	217
	Artículos en congreso internacional.....	218
	Artículos en congreso nacional	220

Índice de figuras

Figura 1. Componentes de la presencia.....	33
Figura 2. Sistema <i>VideoWall</i>	35
Figura 3. Sistema CAVE. Montaje experimental del sistema CAVE donde se observan <i>a)</i> unas gafas 3D, <i>b)</i> el dispositivo de interacción y <i>c)</i> las cámaras de seguimiento infrarrojas.	35
Figura 4. Sistema HMD Samsung Odyssey.....	36
Figura 5. Sistema de electroencefalografía. <i>a)</i> Sistema comercial StartStim y <i>b)</i> ejemplo de una señal obtenida con el sistema.	41
Figura 6. Sistema de resonancia magnética funcional. <i>a)</i> Sistema comercial Vintage Titan T3 y <i>b)</i> ejemplo de imagen tomada con el sistema.....	42
Figura 7. Capturas de un participante del estudio de Wagenmakers <i>et al.</i> Representación del estudio de <i>embodied cognition</i> , donde un usuario coge <i>a)</i> un lápiz entre sus dientes y <i>b)</i> entre sus labios.	51
Figura 8. Captura del experimento de Kalckert y Ehrsson. Método utilizado para realizar la estimulación visotáctil.....	55
Figura 9. Representaciones gráfica de distintas ilusiones corporales. Entre ellas se pueden encontrar: <i>a)</i> una ilusión de distorsión corporal, <i>b)</i> una experiencia extracorpórea y <i>c)</i> una ilusión de propiedad.	57
Figura 10. Montaje experimental del <i>Rubber Hand Illusion</i>	58
Figura 11. Protocolo experimental para calcular la deriva propioceptiva durante el experimento del <i>Rubber Hand Illusion</i>	60
Figura 12. Esquema de la ilusión de distorsión corporal realizada por el grupo de Lackner <i>et al.</i>	66
Figura 13. Representación de la ilusión de la nariz fantasma llevada a cabo por el experimento de Hirsten <i>et al.</i>	67
Figura 14. Experimento llevado a cabo por Ehrsson <i>et al.</i> donde se inducía una experiencia extracorpórea en uno de los participantes de su estudio	69

Figura 15. Experimento llevado a cabo por Cebolla <i>et al.</i> donde se utilizaba <i>The Machine To Be Another</i> para promover una experiencia extracorpórea.....	70
Figura 16. Clasificación del ictus.....	81
Figura 17. Tipos de paresia.....	84
Figura 18. Ejemplos de espasticidad en un usuario con ictus.....	85
Figura 19. Comparación de estudios de realidad virtual y terapia convencional. Efecto en las funciones del miembro superior tras una intervención.....	89
Figura 20. Ejemplos de los primeros dispositivos de realidad virtual. <i>a)</i> Simulador Sensorama y <i>b)</i> dispositivo “espada de Damocles”.....	101
Figura 21. Versiones para desarrolladores del sistema Oculus Rift presentadas en <i>a)</i> 2013 y <i>b)</i> 2014 correspondientemente.....	102
Figura 22. Sistema Oculus Rift CV1 formado por <i>a)</i> el casco de visualización y por el <i>b)</i> módulo de seguimiento Constellation.....	103
Figura 23. Sistema HTC Vive formado por <i>a)</i> el casco de visualización y <i>b)</i> por diversos módulos de seguimiento.....	104
Figura 24. Posicionamiento de los dispositivos de seguimiento para el sistema <i>a)</i> Oculus Rift y <i>b)</i> HTC Vive.....	108
Figura 25. Comparación del área de trabajo recomendada y real registrada para el sistema <i>a)</i> Oculus Rift y <i>b)</i> HTC Vive.....	110
Figura 26. Versiones del dispositivo Kinect. A la izquierda la <i>a)</i> Kinect v1 y a la derecha la <i>b)</i> Kinect v2.....	115
Figura 27. Patrón de haces de luz infrarroja emitidos por la Kinect v1 y capturados mediante una cámara de visión nocturna.....	116
Figura 28. Esquema del funcionamiento de una cámara Time-of-Flight.....	118
Figura 29. Localización de las articulaciones obtenidas por los dispositivos <i>a)</i> Kinect v1 y <i>b)</i> Kinect v2.....	120
Figura 30. Rejilla diseñada para el estudio de comparación de sistemas de registro corporal.....	123

Figura 31. Montaje del sistema de seguimiento para el estudio de comparación de sistemas de registro corporal.....	123
Figura 32. Dispositivo portátil utilizado para medir la actividad electrodérmica Q Sensor.....	128
Figura 33. Amplificador utilizado para medir la actividad electrodérmica <i>a)</i> Refa y <i>b)</i> sensores conectados a la mano.	129
Figura 34. Sensores del dispositivo Q Sensor.	130
Figura 35. Sensorización de la electromiografía de superficie.....	131
Figura 36. Entorno virtual mostrado en el estudio de presencia e inmersión. El entorno se observaba desde la perspectiva de tercera persona.	136
Figura 37. Sensación de presencia promovida por el <i>head mounted display</i> y la pantalla de televisión.	138
Figura 38. Herramientas utilizadas para reproducir el <i>Rubber Hand Illussion</i> . <i>a)</i> Pinceles, martillo y <i>b)</i> brazos de goma utilizados durante la experimentación.	141
Figura 39. Montaje del experimento del <i>Rubber Hand Illusion</i> con usuarios sanos.	142
Figura 40. Resultados de <i>a)</i> porcentaje de participantes que sintieron propiedad, localización y agencia en los tres grupos de edad y <i>b)</i> la distribución de cajas y bigotes de cada subcomponente en cada grupo en el experimento del corporización con usuarios sanos.	145
Figura 41. Resultados de <i>a)</i> de la deriva propioceptiva y <i>b)</i> la distribución de cajas y bigotes de la actividad electrodérmica y de la temperatura en los tres grupos de edad.....	146
Figura 42. Montaje experimental del <i>Rubber Hand Illusion</i> con usuarios con ictus.	154
Figura 43. Diferencias significativas entre grupos en las variables de la corporización del experimento del corporización en usuarios con ictus.	157

Figura 44. Diferencias significativas entre grupos en las respuestas fisiológicas del experimento del corporización en usuarios con ictus.	159
Figura 45. Captura de un participante con ictus realizando la tarea del estudio de presencia y corporización <i>a)</i> en primera persona y <i>b)</i> en tercera persona. En ambas condiciones, el participante está pisando una esfera localizada en el suelo cerca de su pie izquierdo.	171
Figura 46. Resultado de <i>a)</i> propiedad, <i>b)</i> localización, <i>c)</i> agencia y <i>d)</i> presencia experimentada por los sujetos sanos y los individuos con ictus en ambas condiciones en el experimento de presencia y corporización.	175

Índice de tablas

Tabla 1. Diferentes condiciones en el estudio de Mosley <i>et al.</i>	74
Tabla 2. Resumen del estudio Rohde <i>et al.</i>	78
Tabla 3. Comparativa de las especificaciones de los sistemas Oculus Rift y HTC Vive.....	105
Tabla 4. Valores medios de la precisión y el <i>jitter</i> de los sistemas de estimulación visual a diferentes alturas, tanto dentro como fuera del área de trabajo. Los datos están expresados en términos de media y desviación estándar.	111
Tabla 5. Características de los sistemas de seguimiento y de estimación de la pose Kinect v1 y Kinect v2.....	119
Tabla 6. Precisión y <i>jitter</i> registrados en los puntos de intersección de la rejilla para los dispositivos Kinect v1 y v2. Números menores indican un menor error y una mayor precisión.....	124
Tabla 7. Respuestas subjetivas, comportamentales y fisiológicas del experimento del <i>Rubber Hand Illusion</i> en sujetos sanos.	147
Tabla 8. Criterios de inclusión y exclusión del estudio de corporización en individuos con ictus.	152
Tabla 9. Resultados del cuestionario de corporización en usuarios sanos y con ictus.	155
Tabla 10. Resultados del cuestionario de corporización en usuarios sanos y con ictus, en aquellos usuarios que sintieron propiedad.	156
Tabla 11. Resultados de los datos fisiológicos en el estudio de corporización con individuos con ictus.	158
Tabla 12. Resultados de los datos fisiológicos en el estudio de corporización con individuos con ictus, en aquellos usuarios que sintieron propiedad.	159
Tabla 13. Interacciones entre la corporización y los registros fisiológicos en el estudio con individuos con ictus.	160

Tabla 14. Criterios de inclusión y exclusión del estudio de presencia y corporización.....	170
Tabla 15. Resultados de presencia y corporización en los usuarios sanos.....	173
Tabla 16. Resultados de presencia y corporización en los usuarios con ictus.	174

Capítulo 1.

Introducción

1.1. Realidad virtual

1.1.1. Definición

La realidad virtual (RV) ha sido definida a lo largo de los años de diferentes formas. En los inicios, las definiciones más populares hacían referencia sólo a un sistema tecnológico en particular. Por ejemplo, Coates la definía en 1992 como [1]:

“La realidad virtual es una estimulación electrónica de ambientes experimentados a través de un casco de realidad virtual y otros elementos que permiten al usuario final interactuar en situaciones tridimensionales realistas.”

Otra definición que podemos encontrar es la dada por Greenbaum en 1992 [2]:

“La realidad virtual es un mundo alternativo lleno de imágenes generadas por ordenador que responden a los movimientos del usuario. Estos entornos simulados son comúnmente visitados con la ayuda de caros trajes que incorporan gafas de video estereoscópicas y guantes capacitivos de fibra óptica.”

Todas estas definiciones poseen algo en común: todas hablan de sistemas de gafas y dispositivos como medio para acceder a estos entornos. La aplicación de estas definiciones está limitada por la tecnología que se utilizaba para navegar e interactuar con el entorno. Actualmente estas tecnologías varían permanentemente, tanto los métodos de visualización, con nuevos cascos de realidad virtual apareciendo en el mercado periódicamente, como los medios de interacción, con nuevos guantes hápticos [3], trajes de seguimiento corporal [4] y técnicas de tratamiento de imagen que permiten el seguimiento del propio cuerpo humano mediante cámaras RGB [5] o de profundidad [6].

Las definiciones más coetáneas ya no se centran en hablar sobre tecnologías o dispositivos. Otro elemento clave ha pasado a ser el centro de éstas, el usuario. El ser humano conoce el mundo que le rodea a través de los sentidos y de los diferentes sistemas de percepción que tiene el cuerpo. Tradicionalmente es conocido que el cuerpo cuenta con cinco sentidos: el gusto, el olfato, el tacto, el oído y la vista. Sin embargo,

estos son sólo los órganos sensoriales más obvios. Existen otros sentidos que nos permiten conocer nuestro entorno, por ejemplo, el sentido del equilibrio o el interoceptivo. Todas estas entradas sensoriales, junto con el procesamiento de la información realizado por nuestros cerebros, aseguran un conocimiento amplio del medio que rodea a un individuo.

La realidad que un usuario percibe viene dada por la combinación de la información sensorial que obtiene y del procesamiento de ella que realiza su cerebro. Sería lógico pues pensar que, si fuera posible presentar ante estos sistemas sensoriales información creada artificialmente, la percepción de la realidad del usuario cambiaría creándose una versión de la realidad que no existe, pero que, desde la perspectiva del usuario sería real.

Una definición que podría ajustarse a esta corriente es la dada por Bermúdez i Badia *et al* en 2016 [7]:

“La realidad virtual puede definirse como la recreación de un entorno o actividad que estimula uno o más canales sensoriales que permiten la interacción del usuario con el entorno en tiempo real.”

Según esta definición, la meta final de la RV es crear escenarios que permitan estimular los canales sensoriales del usuario para así introducirlos en el entorno virtual (EV). Si un sistema de RV fuera capaz de recrear artificialmente toda esta información que el cuerpo humano asimila, la experiencia sensorial podría llegar a sentirse tan real que permitiría al usuario olvidar que se encuentra en un entorno creado artificialmente, comenzando a interactuar con él de forma natural, tal y como lo haría en el mundo real. Esto permitiría crear un mundo sintético que podría imitar o no las propiedades del entorno real. Un EV puede simular un entorno cotidiano, por ejemplo, un parque por el que caminar, o puede exceder los límites de la realidad física permitiendo crear mundos artificiales sin las limitaciones del mundo real en los que los investigadores pueden introducir a usuarios. Por ejemplo, puede permitir a un individuo en silla de ruedas caminar por una calle. Estas características permiten considerar la RV como algo más que una herramienta de entretenimiento, permitiendo realizar nuevos avances y descubrimientos en áreas básicas para la vida cotidiana como la medicina o la educación.

La RV permite generar multitud de estímulos gracias a la capacidad de adaptar los entornos, así como monitorizar respuestas de los usuarios, tanto comportamentales como fisiológicas, y el seguimiento detallado de sus movimientos y acciones, sincronizando toda esta información y permitiendo analizarla a posteriori, o incluso al momento, por un equipo de profesionales. Esto permite realizar herramientas enfocadas al tratamiento de diversas enfermedades que afecten a, por ejemplo, el sistema cognitivo [8] o el sistema motor [9].

A medida que el coste de los dispositivos de RV disminuya y los sistemas se vuelvan más comunes, se espera que los usos más serios¹, como las aplicaciones educativas o de productividad, pasen a un primer plano. La RV podría cambiar sustancialmente la forma en la que nos relacionamos con las tecnologías digitales, continuando la tendencia actual de humanizar las nuevas tecnologías y hacerlas así más alcanzables para todos los usuarios [10].

¹ Serios de acuerdo a la terminología de *serious games*, y en tanto en cuanto son menos lúdicos.

1.2. Presencia

1.2.1. Definición

Con el objetivo de definir la RV en términos de experiencias humanas y no como un conjunto de dispositivos tecnológicos comenzó a ser necesario un nuevo término que aunara las diferentes características presentes en la RV. Este concepto se denominó presencia [11].

La sensación de presencia o nivel de presencia, se ha definido como el grado en que un individuo es incapaz de reconocer que una experiencia es generada por ordenador [12,13], lo cual podría extenderse a cualquier experiencia no física. Otra definición de presencia que se ha utilizado ampliamente en la literatura es la relativa a la sensación de “estar ahí” [14]. Diversos estudios centrados en el concepto de presencia han ofrecido una explicación más extensa sobre dicho término [15]:

“La presencia (o una versión acortada del término telepresencia) es un estado psicológico o una percepción subjetiva en la cual, aunque una parte o la totalidad de la experiencia que observa un individuo es generada y/o filtrada a través de la tecnología, el usuario no es capaz de percibir con precisión el papel de esta.

En una gran parte de los casos, el individuo puede indicar correctamente qué tecnología está utilizando, pero alcanzado cierto punto, sus percepciones pasan por alto este conocimiento y los objetos, eventos, entidades y entornos son percibidos como si la tecnología no estuviera involucrada en la experiencia.”

Aunque los términos presencia y telepresencia han estado tradicionalmente unidos, algunos autores enfatizan en su diferencia, definiendo la telepresencia únicamente como la sensación de estar en un lugar real remotamente [16].

Además, algunos estudios han diferenciado entre diversos tipos o dimensiones de presencia. A continuación, se describen los principales tipos de presencia:

Presencia espacial o física. Aparece cuando un individuo es incapaz de reconocer con precisión el papel de la tecnología que recrea una ubicación física o un entorno diferente a su ubicación y entorno real en el mundo físico.

Presencia sensorial o validez ecológica. Surge cuando el usuario no es capaz de detectar con precisión el papel de la tecnología que simula las características sensoriales del entorno que le rodea. El usuario percibe los objetos, eventos y personas como lo hace en el mundo real, a nivel visual, auditivo y táctil sin necesidad de que sean réplicas exactas del mundo físico. En resumen, el usuario siente el EV como si fuera real.

Realismo social. Ocurre cuando el individuo no tiene la capacidad de diferenciar con precisión el rol de la tecnología en la recreación de las características sociales de un entorno o ubicación virtual respecto a dichos rasgos en el mundo real. El usuario percibe los objetos, eventos y personas del mundo virtual como elementos que podrían existir, respondiendo de la misma forma que responderían en el mundo real.

Engagement o inmersión psicológica. Surge cuando una parte o la totalidad de la percepción de un usuario es dirigida hacia un objeto, evento o persona creada por la tecnología. El usuario no presta atención al mundo real que le rodea mientras se encuentra interactuando o navegando por él. Cabe destacar que la percepción no está dirigida hacia la tecnología sino hacia los elementos que ésta crea.

Presencia social. Aparece cuando el individuo no es capaz de reconocer el rol de la tecnología en la comunicación que existe entre él y otras personas o entidades. Diversos aspectos deben de ser tenidos en cuenta respecto a este tipo de presencia:

- *Actor social sin el medio.* Ocurre cuando en una comunicación en dos sentidos con otra persona, o en un sentido con una entidad artificial, el individuo es incapaz de reconocer el papel de la tecnología. En estos casos el usuario cree estar interactuando de manera natural con un personaje virtual.
- *Co-presencia.* Aparece cuando el usuario cree que se encuentra en la misma localización física o entorno que la persona con la que se está realizando una comunicación bidireccional. El individuo piensa que el personaje virtual se encuentra en con él en el espacio virtual.

- *Medio como actor social.* Surge cuando un individuo es incapaz de reconocer que la entidad con la que se está comunicando está siendo controlada por la tecnología o por el medio. El usuario piensa que el ordenador con el que se está comunicando parece una persona.

Aunque la separación anterior por dimensiones es muy detallada, no todos los autores la utilizan. Otros estudios han extrapolado la separación anterior en tres categorías generales, dependiendo de aquello que representa la sensación de presencia, el individuo, otros individuos o el mismo entorno [17].

- *Presencia personal.* La medida en que una persona se siente parte de un EV.
- *Presencia social.* La medida en la que otros (ya sean personas reales o avatares) existen dentro del EV.
- *Presencia del entorno.* La medida en la cual el propio entorno reconoce y actúa respecto a las acciones de la persona en el EV.

1.2.2. Facilitación

Han sido propuestas distintas fuentes de la sensación de presencia. Esta sensación puede ser generada individualmente por una sola causa o por un conjunto complejo de estas (Figura 1). Existen dos categorías generales en las que se pueden distribuir estas causas [17,18]:

- *Características del medio.* Se encuentran divididas entre la forma y el contenido del medio.
 - *Forma del medio o inmersión.* Hace referencia a las propiedades tecnológicas con las que se muestra la información sensorial. Algunas de ellas pueden ser la tecnología utilizada para mostrar la información, los grados de control que el usuario tiene sobre los medios de interacción con el sistema o el uso de sistemas hápticos.
 - *Contenido del medio.* Hace referencia a los contenidos del EV, desde los objetos hasta personajes virtuales o eventos.
- *Características del usuario.* Las cuales involucran aspectos individuales del usuario como pueden ser aspectos demográficos, limitaciones motoras o

cognitivas, experiencia previa con entornos virtuales y diferencias en la personalidad o estados de ánimo.

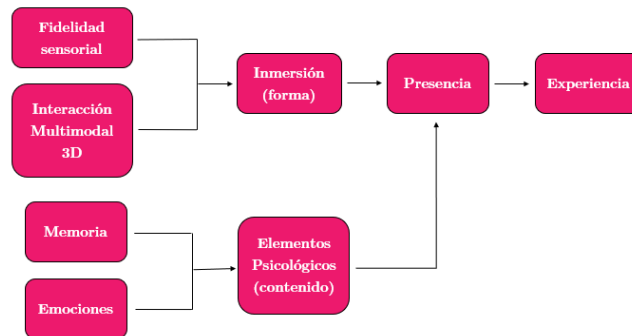


Figura 1. Componentes de la presencia.

De entre todas las diferentes características que promueven la presencia, la inmersión es en la que más se han centrado los esfuerzos en los últimos años gracias al desarrollo tecnológico. A continuación, se detalla más detenidamente esta característica.

1.2.2.1 Inmersión

La inmersión es la medida en que la RV es capaz de sustituir el entorno real que rodea al usuario por un entorno artificial de manera suficientemente convincente como para poder suprimir la sensación de incredulidad del usuario y permitirle participar plenamente en el entorno creado. La inmersión depende de los parámetros objetivos de las tecnologías del medio, como la resolución o el campo de visión de los dispositivos de visualización [19]. Para crear esta ilusión, el EV necesita estimular la máxima cantidad de sentidos de la manera más fidedigna posible, alcanzando el estado de inmersión total cuando se consigue recrear información en todos los canales sensoriales.

Se han utilizado diferentes tecnologías para estimular cada uno de los sentidos. Por ejemplo, para recrear la información sonora se han desarrollado métodos que representan cómo se percibe el sonido en el mundo real. Uno de estos métodos son las fuentes volumétricas, donde se le otorgan a cada fuente de sonido una determinada potencia dependiendo de su distancia al usuario en el EV. A medida que la fuente se

acerca al oyente, el sonido que ésta emite es capaz de rodear completamente al oyente, esparciéndose por el volumen que le rodea. Otra tecnología es la denominada “audio 3d de campo cercano”, donde se aplican una variedad de filtros que permiten el posicionamiento preciso de pequeñas fuentes de sonido cercanas al oyente [20]. Para recrear la información táctil, se han desarrollado diversos guantes hápticos que simulan la textura, forma o peso de un objeto virtual. Algunos ejemplos de estos guantes son los Manus VR (Manus VR, Eindhoven, Países Bajos) o los Plexus (Plexus, San Francisco, CA, EEUU). Dada la importancia de la vista en la percepción humana [21], que se evidencia anatómicamente por la gran cantidad de áreas cerebrales involucradas en el procesamiento visual y la asociación intermodal de éstas [22], la mayoría de los esfuerzos en el desarrollo tecnológico se han centrado en mejorar la estimulación visual. Aunque a lo largo de los años se han presentado diferentes sistemas de visualización, los sistemas más utilizados en la actualidad son aquéllos que han implicado en pantallas tradicionales o pantallas de visualización fijadas a la cabeza o, del inglés, *head mounted display* (HMD), cercanas a los ojos del usuario. Estos dispositivos sustituyen completamente la información que obtenemos del mundo real por contenido generado por ordenador. Tradicionalmente, las aplicaciones de RV que han utilizado HMD como método de visualización han evidenciado algunos problemas derivados del uso de estos dispositivos, como mareos, además de tener un alto coste, haciéndolas, en ocasiones, inalcanzables para la mayoría de usuarios.

Atendiendo al grado de inmersión que posee una tecnología, es posible definir distintos niveles de inmersión, los cuales permiten categorizar las tecnologías de RV en tres grandes grupos. A continuación, se describen dichos niveles particularizados para el caso de los dispositivos de visualización.

Tecnología no inmersiva. En los sistemas no inmersivos sólo son estimulados algunos de los sentidos de los usuarios, permitiendo una conciencia periférica de la realidad fuera del EV. Los usuarios entran en estos EV a través de un portal o ventana utilizando comúnmente monitores de alta resolución o simples pantallas de televisión (Figura 2).

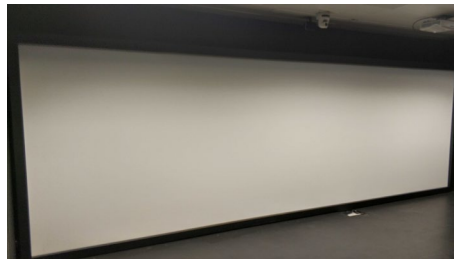


Figura 2. Sistema *Video Wall*.

En el caso concreto del sistema mostrado en la Figura 2, esta configuración consta de dos videoproyectores que crean una pantalla estereoscópica de 6x2m. Además, el sistema permite el seguimiento de la cabeza y las manos a través de cámaras infrarrojas y la navegación a través de un *flystick*.

Tecnología semi-inmersiva. Estas tecnologías permiten al usuario estar parcialmente inmerso en el EV, lo cual puede lograrse combinando grandes sistemas de proyecciones alrededor del usuario. Uno de los sistemas más conocidos es el *Cave automatic virtual environment* o sistema CAVE [23] (Figura 3).



Figura 3. Sistema CAVE. Montaje experimental del sistema CAVE donde se observan *a)* unas gafas 3D, *b)* el dispositivo de interacción y *c)* las cámaras de seguimiento infrarrojas.

En el ejemplo de la Figura 3, un sistema de cuatro proyectores es capaces de crear una imagen estereoscópica sobre las diferentes paredes que forman el cubo (suelen

estar formados por tres paredes verticales y el suelo). Un conjunto de cámaras infrarrojas realiza el seguimiento de diversas constelaciones pasivas de marcadores infrarrojos reflectantes que indican la posición y rotación de la cabeza del usuario y de los dispositivos de interacción. Los usuarios utilizan gafas estereoscópicas para observar el entorno en 3D y *joysticks* como dispositivos de interacción. Estos dispositivos traducen los movimientos de las manos en desplazamientos sin involucrar la cinemática de la marcha real [24], pudiendo afectar a la inmersión en el EV, llegando a disuadir al usuario de su uso.

Tecnología totalmente inmersiva. Los sistemas inmersivos sumergen completamente al usuario en el EV, comúnmente, mediante HMDs (Figura 4). Estas configuraciones suelen hacer uso de dispositivos de seguimiento corporal para introducir al usuario en el EV. Estas simulaciones son capaces de proporcionar experiencias muy realistas ofreciendo un amplio campo de visión y altas resoluciones. Simultáneamente con el renovado interés en la RV [25], se han presentado un número creciente de sistemas totalmente inmersivos en los últimos años [26–28]. Tal como lo describen los fabricantes, estos nuevos dispositivos proporcionan características mejoradas, como una resolución más alta, menor latencia, una frecuencia de refresco de pantalla más rápida y un campo de visión más amplio a costes menores.



Figura 4. Sistema HMD Samsung Odyssey.

Algunos de los nuevos dispositivos incluyen mecanismos de seguimiento incorporados para estimar la posición y orientación de la cabeza en tiempo real, lo que permite a los usuarios moverse libremente en un entorno reducido. Estas nuevas tecnologías permiten al usuario una interacción crucial para experiencias de RV, ya que proporcionan una forma de navegar por el entorno de forma natural, aumentando la inmersión. En los últimos años, la interacción dentro de un EV se ha facilitado

mediante movimientos corporales [9,29], toques con los dedos en los dispositivos de interacción [30,31] o dispositivos diseñados específicamente para ello [32]. Aunque se han utilizado con éxito diferentes soluciones para detectar movimientos tanto de los miembros superiores [33] como inferiores [9], la implementación de la navegación en entornos de RV de grandes dimensiones plantea un desafío tecnológico para los sistemas de seguimiento de movimiento actuales, que sólo son capaces de detectar movimiento en un área limitada.

1.2.3. Medidas

La presencia ha sido analizada y cuantificada mediante diferentes estrategias, tanto objetivas como subjetivas. Algunas de las técnicas utilizadas para medir presencia en EV se han basado en instrumentos de medida psicológica como cuestionarios o informes subjetivos [34]. Otras estrategias se han fundamentado en la monitorización de respuestas fisiológicas y comportamentales durante la inmersión en EVs [35,36].

Como cualquier otra herramienta, las técnicas empleadas para medir la presencia deberían cumplir los siguientes requerimientos [37]:

- *Contenido y validez nominal.* Los diferentes elementos de los cuestionarios que analizan la presencia suelen ser complicados de entender para las personas que no están acostumbradas a trabajar con RV. Los diferentes ítems deben de ser claros y concisos, permitiendo que cualquier usuario los pueda comprender.
- *Test-retest.* La técnica empleada debe de haber sido utilizada repetidamente con resultados similares, pudiendo categorizarla como una técnica de confianza.
- *Validez convergente.* Las variables obtenidas a través de una estrategia para analizar la presencia deben ser coherentes con el resto de técnicas que midan variables similares.
- *Sensibilidad.* Un instrumento útil para analizar la presencia debe de ser lo suficientemente preciso para detectar pequeños cambios en la varianza de la variable que está analizando.

- *Facilidad de administración.* Una estrategia debe ser sencilla de aplicar y administrar, así como de bajo coste, facilitando su empleo en el campo de la investigación.

Debido a la gran cantidad de técnicas que se han utilizado para medir presencia, su descripción en el presente trabajo es imposible. A continuación, se resumen algunas de las más importantes.

1.2.3.1 Medidas subjetivas

Diversas medidas subjetivas para analizar la presencia han ido apareciendo a lo largo de los años. A continuación, se muestran algunas de ellas.

Cuestionario de presencia Igroup (IPQ) [38]. El cuestionario IPQ analiza tres subescalas diferentes: la presencia espacial, que es la sensación de estar físicamente en el EV; la participación, es la comprobación de la atención e inmersión dedicada al EV; y, por último, el realismo experimentado, que es la medición de la experiencia subjetiva dentro del EV. El cuestionario está compuesto por un total de 14 ítems divididos entre las diferentes subescalas y evaluados del 1 al 7.

Cuestionario Slater-Usuh-Steed (SUS) [34]. Este cuestionario consta de tres ítems evaluados en una escala del uno al siete. Las diferentes preguntas hacen referencia a la sensación de encontrarse en el mundo virtual, la medida en la que la experiencia virtual constituyó una realidad para el usuario, olvidándose del mundo real, y la medida en la que el usuario recuerda el EV como un sitio en el que ha estado y no como un conjunto de imágenes o un video. Las puntuaciones para este cuestionario se obtienen como la media de los 3 ítems, los cuales se evalúan en una escala del 1 al 7, de donde se extrapola que el usuario ha sentido presencia si esta media es superior a 4.

Cuestionario de presencia (PQ) [39]. El cuestionario mide el grado en el que los individuos experimentan la sensación de presencia en un EV y la influencia de diversos factores contribuyentes sobre la intensidad de la experiencia. Los elementos determinantes son los factores de control, sensoriales, de distracción y de realismo. Un total de 32 ítems, los cuales se evalúan en una escala del 1 al 7, divididos entre los factores anteriores forman el cuestionario PQ, incluyendo ítems relacionados con la

respuesta auditiva y háptica de posibles dispositivos. Un análisis de clúster de los datos del cuestionario PQ identificó tres subescalas principales.

- *Implicación/Control*. Esta subescala cuantifica el grado en el que un individuo es capaz de controlar los eventos que ocurren en un EV, así como la capacidad del entorno de responder a las acciones iniciadas por el usuario. Está formada por 11 ítems del cuestionario.
- *Natural*. Esta subescala analiza la validez ecológica del entorno, es decir el grado en el que las interacciones y el sistema de navegación del EV son congruentes a los equivalentes del mundo físico. Está formada por 3 ítems del cuestionario.
- *Calidad de la interfaz*. Esta subescala examina la interferencia de los dispositivos de control y visualización en el rendimiento de las tareas que se deban realizar en el EV. Está formada por 3 ítems del cuestionario.

Algunos estudios han modificado algunos de los ítems de los cuestionarios anteriores para analizar diferentes variables y ajustarlas a los EV que estaban analizando [40]. También se han propuesto otras medidas objetivas para la cuantificación de la presencia que incluyen el método de comparación pareada, donde a los participantes se les pide que comparen su sentido de presencia en diferentes entornos virtuales [41].

1.2.3.2 Medidas objetivas

Si bien los cuestionarios han sido los métodos más comunes y directos para cuantificar la presencia, otros autores han buscado el grado de relación que podría existir entre esta sensación y diversas medidas objetivas como medidas comportamentales o neurofisiológicas. Una gran ventaja de este tipo de medidas es que pueden ser tomadas durante las experiencias de RV, permitiendo monitorizar en tiempo real todos los eventos que ocurran en el EV.

Medidas conductuales

Las medidas conductuales permiten analizar cómo actúan los usuarios durante el experimento, así como la posible relación de su rendimiento con la presencia. Se han encontrado diferentes tipos de medidas comportamentales.

Respuestas posturales. Este tipo de medidas estudian las posibles relaciones entre la postura de los individuos y la presencia que están sintiendo en el EV. La postura corporal ha sido relacionada con una gran cantidad de variables como la cognición corporal o las emociones [42], medidas relacionadas con la presencia.

Discrepancias entre el mundo real y el virtual. Otra forma de cuantificar la presencia se relaciona con la imposibilidad de discernir entre un estímulo que está ocurriendo en el EV y otro que ocurre en el mundo real. En este tipo de experimentos se suele utilizar un mismo estímulo en el EV y en el mundo real, localizándolo en diferentes posiciones [43]. El usuario debe de indicar dónde cree que se encuentra la fuente del estímulo, si esta indicación está más cercana al estímulo virtual, el usuario estaría más inmerso en el EV, olvidándose del mundo real, por lo que se asume que estaría sintiendo más presencia.

Rendimiento de las tareas. Algunos autores han propuesto utilizar las medidas de rendimiento durante algunas tareas en RV como método para cuantificar la presencia [41]. Si bien las medidas de rendimiento son muy útiles para comprobar la efectividad del entrenamiento en un EV, la relación entre la presencia y estas medidas está poco clara.

La principal desventaja de las medidas comportamentales radica en la relación que existe entre estas variables y los contenidos de los EV, lo que no las hace generalizables a cualquier tipo de entorno. Por ejemplo, no se puede afirmar que la posible relación que podría existir entre el tiempo necesario en realizar una tarea y la presencia sentida por el usuario para un tipo de ejercicio y entorno concreto pueda extrapolarse a cualquier EV.

Medidas neurofisiológicas

La RV ha abierto un amplio campo de posibilidades y aplicaciones en psicología, neurociencias y ciencias cognitivas. Además, la RV no sólo se usa como una herramienta, la presencia también ha sido considerada como objeto de estudio en estas áreas, siendo relacionada con varias de las medidas analizadas. Se han utilizado técnicas como la electroencefalografía (EEG) y la imagen por resonancia magnética funcional o, del inglés, *functional magnetic resonance imaging* (fMRI) para tratar de conocer las bases neurales de esta.

Electroencefalografía. El EEG refleja la actividad eléctrica del cerebro y, en particular, los potenciales postsinápticos en la corteza cerebral. Es decir, es un índice de cambios en la actividad neuronal [44]. El EEG se obtiene a partir de la diferencia de voltaje en el tiempo entre la actividad eléctrica medida por un electrodo conectado al cuero cabelludo y el electrodo de referencia, situado en otro punto del cuero cabelludo o del cuerpo del individuo.

El EEG suele medirse simultáneamente desde varios electrodos colocados en diferentes posiciones, cubriendo los lóbulos frontal, parietal, occipital y temporal del cerebro. Se han establecido diferentes acuerdos sobre dónde colocar los electrodos como el sistema internacional 10-20 [45], el sistema 10-10 [46] y el sistema 5-5 [47]. En la actualidad, existen diversos sistemas de EEG con una cantidad variable de electrodos, desde 8 electrodos, como el sistema StarStim (Neuroelectrics Barcelona, España), hasta sistemas con más de 256 electrodos como el TrueScan (Deymed, Kudrnáčova, República Checa) (Figura 5). Este aumento de electrodos se corresponde con el objetivo de aumentar el muestreo espacial del EEG, lo cual permitiría conocer mejor las fuentes que generan las señales cerebrales.

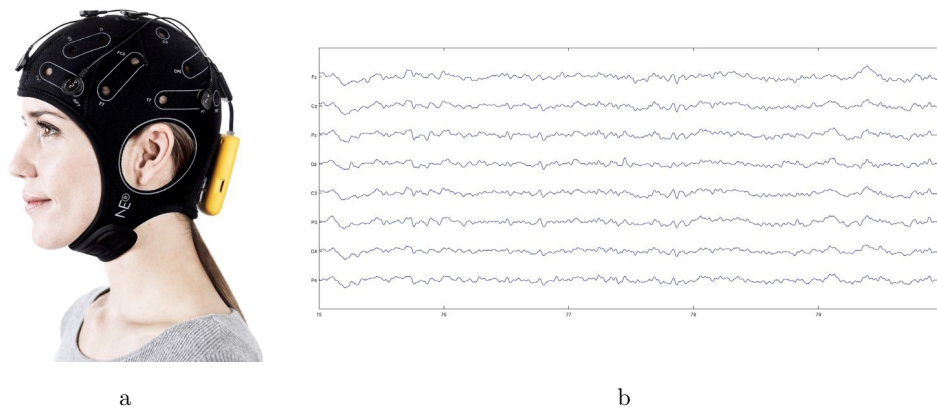


Figura 5. Sistema de electroencefalografía. a) Sistema comercial StartStim y b) ejemplo de una señal obtenida con el sistema.

Varios factores son los determinantes a la hora de conocer la calidad de la señal con la que se registrarán los potenciales postsinápticos en el cuero cabelludo. Estos factores incluyen la amplitud de la señal en el córtex, el tamaño de la región en la cual están

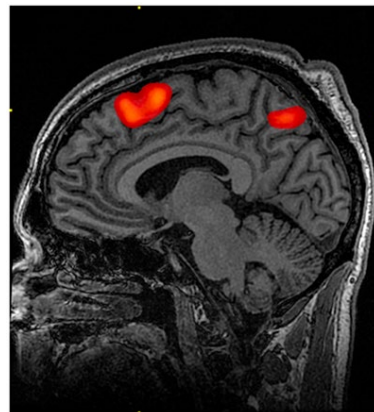
apareciendo los potenciales postsinápticos, la proporción de células de la región que se encuentran en sincronía, la localización y la orientación de la región cortical activada en relación con el cuerno cabelludo y la cantidad de atenuación que podría presentarse por la densidad y el grosor del cráneo y otras capas de tejidos. En un cerebro sano, la diferencia de pico a pico común se encuentra en torno a $100 \mu\text{V}$ [44].

El EEG se ha utilizado para analizar multitud de tareas ya que, gracias a su resolución temporal, permite diferenciar entre tareas funcionales inhibitorias y las actividades excitadoras. En cambio, cuenta con importantes limitaciones con respecto a su uso como localizador anatómico tridimensional de la actividad cerebral, es decir, esta señal no es óptima para analizar las fuentes de origen de determinadas señales neuronales.

Imagen por resonancia magnética funcional. La fMRI es una técnica de imagen que permite visualizar cambios en el metabolismo cerebral que varían con el tiempo (Figura 6). Estos cambios pueden ser consecuencia de cambios en el estado cognitivo de los usuarios inducidos por alguna tarea o el resultado de algún proceso no regulado de un cerebro en reposo [48].



a



b

Figura 6. Sistema de resonancia magnética funcional. *a)* Sistema comercial Vintage Titan T3 y *b)* ejemplo de imagen tomada con el sistema.

Esta técnica ha sido utilizada en gran número de estudios de neurociencia cognitiva para aplicaciones clínicas, monitorización de tratamientos y como biomarcador en farmacología. Tiene una resolución espacial que puede ir de 1 a 3 mm³ dependiendo de la cantidad de regiones que se desean analizar. Respecto a la resolución temporal, la fMRI es capaz de realizar una imagen del cerebro completo de 2 a 3 s dependiendo de cómo son adquiridos los datos y de la resolución espacial utilizada [49].

Gracias a las mejoras de resolución temporal y espacial, esta técnica permite analizar las fuentes de origen de las señales neuronales, lo que podría ser de utilidad para conocer los mecanismos subyacentes de la presencia y saber qué áreas son capaces de suscitar esta sensación.

Por otro lado, esta técnica tiene una serie de inconvenientes. La medida es muy dependiente del ruido, obteniendo artefactos a alta frecuencia debidos a los procesos fisiológicos que acompañan a la frecuencia cardíaca y a la respiración. Además, el usuario debe de permanecer completamente inmóvil durante el experimento, lo que dificulta en gran medida su uso en experimentos de RV. Para suplir dicho defecto, se han desarrollado plataformas que permiten la exposición de un EV durante la captura de la señal de fMRI. Estas estructuras permiten observar el EV mientras que el usuario permanece en posición de supinación dentro de la máquina de resonancia magnética.

1.2.4. Estudios previos sobre presencia

Diversos estudios previos han analizado la relación entre la sensación de presencia y algunos factores determinantes definidos en el subapartado anterior. Además, se han realizado estudios en los que se han observado variaciones de presencia respecto a cambios en las características del medio utilizado.

1.2.4.1 Facilitación de la presencia

Algunos estudios han analizado la influencia de la estereoscopia en la sensación de presencia. La estereoscopia es la técnica mediante la cual se crea la ilusión de profundidad en el EV mostrando imágenes diferentes a cada ojo del usuario.

En un estudio de Freeman *et al.* [50], 24 sujetos sanos llevaron a cabo cuatro condiciones basadas en dos variables, la estereoscopia y el estímulo utilizado, el cual

variaba entre videos, imágenes y audios. Los resultados mostraron que la variación entre estereoscopia y la monoscopia alteraba la postura de los usuarios de forma automática. Se observaron mayores niveles de presencia en las condiciones donde se utilizó la estereoscopia. Los autores concluyeron que al aumentar el realismo de una pantalla en movimiento al agregar información estereoscópica se incrementaron las respuestas posturales a la pantalla y las calificaciones subjetivas de presencia.

Otro factor tecnológico que varía la presencia es el tipo de dispositivo de visualización utilizado para mostrar el EV. Como se ha descrito anteriormente, algunos de los ejemplos de dispositivos de visualización más representativos son las pantallas de ordenador, los HMD o el sistema CAVE.

Muchos estudios han comparado la presencia promovida por diversos dispositivos de visualización. Axelsson *et al.* [51] analizó la presencia promovida por un sistema CAVE en comparación con la sensación de presencia suscitada por una pantalla de ordenador. Los 44 usuarios que participaron en el experimento debían resolver una serie de tareas en un EV. La presencia fue evaluada con una única pregunta, en la cual los usuarios indicaban, de 0 a 100, si se sentían dentro del EV. Los usuarios reportaron un mayor nivel de presencia en el sistema CAVE.

También se han realizado experimentos similares comparando sistemas CAVE con HMD. Sin embargo, para poder interpretar correctamente los resultados hay que tener en cuenta el momento temporal de cada estudio, pues las características de dichos dispositivos han ido evolucionando por separado. Los experimentos más antiguos reportan que la presencia generada por sistemas CAVE era mucho mayor que la generada por los HMD [52–55]. En cambio, los estudios más actuales que analizan la presencia con estos dispositivos obtienen valores mayores de presencia en los HMD [56]. Esto podría deberse a los avances tecnológicos de los HMD actuales y a la habilitación de la navegación natural, los cuales podrían haber promovido una mayor sensación de presencia.

Otros estudios se han focalizado en el análisis del campo de visión, del inglés, *field of view* (FOV), definido como los ángulos horizontales y verticales que definen la cantidad del entorno que puede observarse.

Por otro lado, Lin *et al.* [57] estudiaron los efectos del FOV en la presencia, disfrute, memoria y mareos. Se desarrolló una escala diseñada para valorar todos estos

parámetros. Para el estudio se recogieron datos de diez sujetos con cuatro variaciones de FOV (60°, 100°, 140° y 180°). El EV se presentó como un simulador de conducción. Los resultados indicaron que el disfrute, la presencia y los mareos variaron en función del FOV utilizado para la visualización del entorno, por lo que se obtuvieron mayores niveles de presencia con mayor cantidad de grados de FOV.

El estudio de Kim y Biocca [58] sumergió a 96 sujetos en un programa de televisión manipulado por medio de dos variables independientes: el FOV (9,8°, 21,5° y 33,7°) y la iluminación. Los usuarios debían realizar seis condiciones, fruto de la combinación de las dos variables independientes. Las variables dependientes fueron memoria, confianza en la marca e intención de compra. Durante el experimento las dimensiones de las pantallas del televisor fueron manipuladas mientras que la distancia de visualización se mantuvo constante. La presencia se cuantificó empleando su propia escala de telepresencia. No se encontraron cambios significativos en la presencia al realizar las variaciones de FOV ni de iluminación de la escena.

Por último, Hendrix y Barfield [59] analizaron la relación de la presencia con diferentes aspectos como la ausencia de seguimiento de la cabeza, la ausencia de señales estereoscópicas y la variación del campo de visión geométrico (FOV geométrico) utilizado para crear la imagen visual proyectada en la pantalla. En el estudio, los usuarios navegaron por un EV y completaron un cuestionario diseñado para cuantificar el nivel de presencia experimentado por cada participante dentro del EV. Los resultados mostraron que el FOV geométrico empleado para el diseño de la pantalla visual tuvo gran influencia en el nivel de presencia, con más presencia asociada con un FOV geométrico de 50° y 90° en comparación con el FOV de 10°.

1.2.4.2 Uso de medidas subjetivas

Como se ha descrito anteriormente, la cuantificación de la presencia ha sido llevada a cabo, tradicionalmente, mediante cuestionarios. Un estudio llevado a cabo por Schwind *et al.* [60] identificó los diferentes cuestionarios utilizados para analizar la presencia, organizándolos según el número de citas con los que contaban los artículos originales donde aparecían. Los resultados de dicho estudio mostraron que los cuestionarios más utilizados fueron el SUS [34], el PQ [39] y el IPQ [38], definidos en el subapartado 1.2.3.1. Además, en este artículo se estudiaron las variaciones que

podrían tener las respuestas de estos cuestionarios, cuando estos mismos se presentaban en un HMD o en papel. Los resultados obtenidos mostraron que no existía ninguna influencia del HMD en las respuestas y que, por lo tanto, los resultados eran comparables.

Como resume Schwind *et al.* [60] en la introducción de su artículo, más de cinco mil estudios diferentes han utilizado algunos de estos cuestionarios para cuantificar la presencia de manera satisfactoria. Bien es sabido que, aunque este tipo de cuestionarios se sigue utilizando en la actualidad, la tendencia es utilizar estas medidas en conjunto con otras técnicas y medidas objetivas.

1.2.4.3 Uso de medidas objetivas

Medidas conductuales

Diversos estudios han analizado algunos de los aspectos comportamentales como correlatos del nivel de presencia. Este tipo de medidas están relacionadas con procesos, más o menos objetivos, que surgen en los individuos durante la experiencia virtual, como la postura corporal.

En el estudio de Freeman *et al.*, descrito en el subapartado anterior [50], además de las variables ya comentadas, se analizaron los cambios automáticos de la postura de los usuarios a través de un dispositivo de seguimiento magnético. Tanto los cuestionarios de presencia como la variación postural fueron mayores en la presentación estereoscópica, lo que podría indicar una relación entre ambas variables. Sin embargo, esta variable no pudo usarse como sustituta de las medidas subjetivas debido a que no correlacionaron significativamente entre ellas.

En un estudio llevado a cabo por Slater *et al.* [43] se analizaron tanto medidas subjetivas como comportamentales relacionadas con la presencia. Aunque el experimento trataba de encontrar una relación entre las sombras dinámicas y la presencia, los investigadores decidieron realizar un experimento paralelo para encontrar una posible medida conductual relacionada con esta sensación. El entorno mostraba una radio en diferentes momentos de la experiencia mientras una radio real reproducía un sonido en una posición del laboratorio. Los usuarios debían de señalar la radio y apagarla mediante un botón conectado al ratón que utilizaban para navegar

por el EV. Dicho botón era un dispositivo infrarrojo que permitía el control remoto de la radio. Durante el experimento, los investigadores desplazaban la radio real en línea con la posición donde debería de estar la radio virtual. La idea era que un alto grado de presencia llevaría a que el sujeto apuntara hacia la radio virtual en lugar de a la real. La medida obtenida fue la variación en ángulos entre la radio real y la virtual. Este valor correlacionó con los cuestionarios de presencia durante el experimento. Sin embargo, aunque esta medida fue útil para este experimento, no se puede extrapolar a otros experimentos.

Algunos autores han logrado encontrar tendencias a la correlación entre el rendimiento de las tareas en la experiencia virtual y la presencia [61]. En cambio, otros han reportado efectos opuestos. Por ejemplo, eliminar información redundante de un dispositivo de control de tráfico aéreo resultó aumentar el rendimiento de la tarea y disminuir la presencia [62]. Otros estudios han analizado medidas similares como el tiempo de finalización y la cantidad de errores en una tarea [63] o el número de acciones requeridas para realizar una tarea [64]. Si bien en la mayoría de estudios se han hallado correlaciones entre estas variables y la presencia, esto no significa que estas mismas variables en otros entornos puedan proporcionar la misma validez. Además, este tipo de medidas necesitan EVs interactivos, en los cuales se deba realizar alguna tarea para poder encontrar la posible relación con la presencia, lo cual no siempre es posible (por ejemplo, en videos 360°).

Medidas neurofisiológicas

El EEG se ha investigado como una posible herramienta capaz de obtener indicadores objetivos de presencia, detectar estados cerebrales y manifestar las posibles variaciones entre estar en un EV y volver al mundo real [65]. Aunque diversos estudios han utilizado conjuntamente EEG y RV, pocos han analizado la sensación de presencia.

Baumgartner *et al.* [66] fueron los primeros que investigaron los fundamentos neurofisiológicos de la presencia espacial en RV utilizando EEG. En el estudio participaron 12 niños y 11 adolescentes sanos. Los sujetos observaron diversos escenarios formados por montañas rusas virtuales (que incluían subidas, bajadas y bucles) y un escenario control en el que la montaña rusa sólo realizaba movimientos

horizontales. Se obtuvieron datos de EEG y actividad electrodérmica² durante el experimento. Los resultados indicaron que, en comparación con la condición control, experimentar las experiencias de las montañas rusas incrementó tanto los niveles la actividad electrodérmica como la actividad neuronal en las áreas relacionadas con la navegación espacial. Para obtener estas áreas se utilizó el método de aproximación de *Low resolution electromagnetic tomography*. Además, las áreas del cerebro que reciben aferentes homeostáticos de sensaciones somáticas y viscerales fueron altamente activadas. Los niños presentaron altos niveles de presencia y diferencias en el patrón de activación del área frontal. Mientras que los adolescentes mostraron un incremento de la actividad cerebral en las áreas prefrontales, las cuales están relacionadas en el control de las funciones ejecutivas, los niños obtuvieron una disminución de actividad en estas áreas. Estudios neurofisiológicos recientes han demostrado que el área frontal continúa en desarrollo hasta alcanzar la edad adulta, lo que podría ser una explicación de esta variación de actividad en los individuos.

En el estudio de Hunter *et al.* [67] se demostró que los usuarios podían experimentar una fuerte ilusión de presencia durante un escaneo cerebral mediante fMRI, aun con los inconvenientes que esta aporta a nivel de inmovilización de la cabeza y ruido ambiente. Este estudio no analizó ningún dato de fMRI, sino que sólo observo si era posible promover presencia en ese tipo de entorno. Baumgartner *et al.* [68] también observaron mediante fMRI las posibles áreas cerebrales que podrían estar vinculadas con la presencia. Dos grupos de participantes fueron reclutados para el estudio. El primer grupo estuvo formado por 52 adultos sanos, mientras que el segundo grupo estuvo formado por 25 niños sanos menores de 11 años. El experimento consistía en la visualización de dos tipos de EV formados por montañas rusas, las mismas utilizadas en el artículo anterior del mismo autor [66]. Cada condición estaba formada por tres fases donde la atracción variaba de movimientos, velocidades y sonidos. Obteniendo la diferencia entre la exposición de un EV con alta carga de presencia y baja carga se obtuvo que, para ambos grupos, se activaron una gran cantidad de áreas cerebrales relacionadas con el procesamiento egocéntrico espacial (flujo visual dorsal, que incluye lóbulo parietal superior e inferior y el precúneo), el análisis visual y el reconocimiento de objetos (flujo visual ventral, incluyendo giro fusiforme, giro

² Esta medida fisiológica será explicada en el subapartado 1.3.3.2

temporal inferior y medio), procesamiento sensorio-motor (incluyendo giro postcentral y corteza premotora), procesamiento acústico (corteza auditiva) y el procesamiento de las emociones (ínsula). La activación del córtex prefrontal dorso-lateral, el cual modulaba la red, correlacionó con las medidas subjetivas de presencia, regulando descendentemente la activación del flujo de procesamiento visual egocéntrico dorsal, y regulando ascendentemente las áreas del córtex prefrontal medial, las cuales están relacionadas con los pensamientos auto-reflexivos e independientes del estímulo. Estas estrategias no fueron encontradas en el grupo de niños, lo que podría estar atribuido a la falta de maduración del córtex prefrontal de los jóvenes.

Las medidas relacionadas con las áreas del cerebro y su implicación con la presencia prometen tener un amplio potencial ya que no se ven influenciadas por la subjetividad de los usuarios ni de los experimentadores. En cambio, la inmovilización de los usuarios para realizar las pruebas imposibilita su utilización para una gran cantidad de EV. Además, el análisis de los datos obtenidos mediante fMRI puede ser extremadamente complejo debido a lo poco que se conoce sobre los procesos neuronales y la complejidad de éstos a la hora de producir sensaciones como la presencia.

1.3. Corporización

1.3.1. Definición

Durante años la cognición se ha considerado como un proceso relacionado únicamente con la lógica. Sin embargo, el interés por descubrir los mecanismos de la mente ha promovido la propuesta de teorías que le otorgaban gradualmente más y más importancia al cuerpo.

La teoría de la *embodied cognition* defiende que muchas características de la cognición están determinadas por los aspectos del cuerpo en el que habitamos [69]. Estas características incluyen desde constructos mentales de alto nivel, como pueden ser los conceptos y las categorías, hasta el desempeño de tareas cognitivas. Los aspectos del cuerpo están formados por el sistema motor, el sistema perceptivo, las interacciones corporales con el entorno y las relaciones con éste. Esta teoría abarca un área de investigación en torno a la psicología social y cognitiva, incluyendo áreas como la interacción social y la toma de decisiones [70].

La dependencia de la cognición con el cuerpo y sus interacciones ambientales se ha defendido justificando que la cognición en sí misma no es un fin, sino más bien un medio para conseguir los objetivos de un sistema biológico. Sin embargo, la cognición no se establece como un comportamiento adaptativo, sino que requiere de un procesamiento de la información, una transformación o comunicación de la información entrante, cuya adquisición implica exploración y modificación del entorno [71].

Diversos estudios defienden esta teoría. Se puede observar un ejemplo en el estudio de la *Yale University* llevado a cabo por Williams y Bargh [72]. En este experimento se indicaba a los sujetos que fuesen a un laboratorio alejado del lugar de reunión inicial. Durante el trayecto, un investigador pedía a los individuos que sujetaran una taza de café mientras el investigador apuntaba sus nombres. En algunos de los casos la taza se encontraba caliente, mientras que en otros fría. Al finalizar el recorrido, los participantes debían describir el carácter de una persona desconocida para ellos. Los usuarios que habían sujetado la taza caliente tendieron a sentir al desconocido como alguien cercano y de confianza mientras que el otro grupo respondió

antagónicamente. Este estudio proporcionó una evidencia preliminar de que la aplicación de criterios irracionales ligados a percepciones sensoriales más primarias podría influenciar en las categorizaciones de las personas.

Otro estudio muy ilustrativo de *embodied cognition* fue el desarrollado por Strack *et al.* [73]. En este estudio los participantes debían sostener un lápiz, bien entre sus dientes o con sus labios, mientras puntuaban una serie de dibujos según el estado de ánimo que les producían (Figura 7).



Figura 7. Capturas de un participante del estudio de Wagenmakers *et al.* Representación del estudio de *embodied cognition*, donde un usuario coge a) un lápiz entre sus dientes y b) entre sus labios.

Como resultado, los usuarios reportaron que los dibujos eran más alegres cuando sostenían el lápiz con los dientes. Los autores sugirieron que los resultados podrían deberse a que, al aguantar el lápiz de esta forma, se involucran en el agarre diversos músculos relacionados directamente con la sonrisa, lo que predispondría a la diversión y alegría. En cambio, al aguantar el lápiz con los labios, la cara imita un gesto de enfado y tristeza, lo que promovería respuestas más bajas en el cuestionario. Este

estudio mostró cómo una modificación artificial de los músculos faciales podía influir en la manera en que los usuarios percibían su entorno.³

En los últimos años existe un creciente consenso en la comunidad neurocientífica acerca de la percepción corporal. Los últimos estudios parecen indicar que la percepción del propio cuerpo en el espacio depende de la integración multisensorial. La información aferente sobre el estado de articulaciones, músculos, tendones y piel, así como las señales aferentes visuales, vestibulares y auditivas alcanzan áreas de asociación de la corteza cerebral en los lóbulos frontal, parietal y temporal, donde se integran [74]. La representación corporal es una modelización dinámica que se actualiza constantemente en base a las señales sensoriales disponibles de distintas modalidades. Por ello, parece probable que la identificación de segmentos corporales sea realizada de manera similar, mediante procesos de integración multisensorial [74].

En el día a día experimentamos nuestro ser dentro de nuestro cuerpo, un cuerpo que sentimos nuestro, que somos capaces de localizar, aunque no lo veamos y que podemos mover de acuerdo a nuestras intenciones, obedeciendo a nuestra voluntad. Estas sensaciones normalmente se experimentan conjuntamente emergiendo de un solo cuerpo, el biológico, dando coherencia a nuestro yo y a nuestra representación corporal. Sin embargo, algunos estudios sobre la percepción del cuerpo han revelado una forma de modificar la sensación sobre el cuerpo de un individuo. La cuantificación de esta alteración dio lugar a la definición de la sensación de *embodiment* o corporización.

La corporización es un constructo psicológico compuesto por diferentes componentes. Puede ser definido como la sensación de que el cuerpo de un individuo le pertenece [75], como la auto conciencia corporal [76], como el conocimiento corporal [77] o como la sensación del propio cuerpo [75]. Aunque hay múltiples definiciones, la corporización también puede ser entendida como la representación de un elemento (corporal o no) dentro del esquema corporal [78]. Estudios recientes han centrado sus

³ Aunque el estudio de Strack *et al.* se convirtió en un ejemplo paradigmático de *embodied cognition*, un estudio reciente llevado a cabo por Wagenmakers *et al.* [292] no consiguió replicar los mismos efectos, poniendo en entredicho los resultados del estudio preliminar.

esfuerzos en unificar aspectos de las teorías de la corporización y en identificar sus subcomponentes, como la propiedad, la agencia y la localización [79].

La propiedad es definida como la sensación de que el cuerpo en el que una persona habita es suyo, o, dicho de otra forma, la auto-atribución de un cuerpo [80]. Tiene un carácter posesivo e implica que el cuerpo es la fuente de las sensaciones experimentadas. La propiedad es constante y omnipresente, y no sólo se produce durante el movimiento activo, sino también durante movimientos pasivos y el reposo. Se ha propuesto que el sentido de propiedad del cuerpo surge de una combinación de diversas influencias [81]:

- *Información sensorial aferente.* La información llega a nuestro cerebro desde nuestros órganos sensoriales. Por ejemplo, información visual, táctil y propioceptiva.
- *Información sensorial eferente.* Diversos procesos cognitivos que pueden modular el procesamiento de los estímulos sensoriales. Por ejemplo, la existencia de una semejanza humana suficiente para suponer que un cuerpo artificial puede ser el cuerpo de uno.

Por otro lado, la agencia se refiere a la sensación de poder mover y tener el control motor global sobre un cuerpo. El sentido de agencia resulta de la comparación entre la predicción de las consecuencias sensoriales de las acciones propias y las consecuencias sensoriales reales [82]. Cuando las consecuencias predichas de la acción y sus consecuencias reales coinciden, lo cual puede comprobarse a través de correlaciones visomotoras síncronas durante el movimiento activo, uno se siente el agente de esas acciones. Se ha reportado que las discrepancias temporales mayores a 150 ms entre la retroalimentación visual de la acción y el movimiento real afectan negativamente el sentimiento de agencia [83]. La agencia sólo puede ser creada a partir de movimientos voluntarios y acciones que activen señales eferentes.

Por último, la localización se define como la autoubicación o volumen donde uno se siente ubicado. En condiciones normales, la autoubicación y el espacio corporal coinciden, dado que uno se siente ubicado dentro de un cuerpo físico [84]. Sin embargo, esta colocación puede descomponerse cuando las personas tienen experiencias extracorporales en las que se perciben a sí mismas fuera de su cuerpo físico [85]. La localización está altamente determinada por la perspectiva visoespacial (Figura 8), la cual, en el mundo real es egocéntrica, influyendo directamente en el lugar donde el

individuo siente que se encuentra [86,87]. Diversos estudios han mostrado que las respuestas fisiológicas ante una amenaza a un cuerpo artificial son mayores si se observa al cuerpo desde una perspectiva en primera persona que desde una perspectiva en tercera persona [88,89].

Tanto el sistema vestibular como el táctil desempeñan un papel importante en la localización. El sistema vestibular contiene información de la traslación y rotación de la cabeza, además de su orientación. Se ha observado que una disfunción de algunas de estas variables puede favorecer a que la perspectiva visual se perciba fuera de los límites corporales [89]. El sistema táctil es la frontera entre el cuerpo y el entorno y está relacionado con la codificación que realiza el cuerpo del espacio que lo envuelve. Diversos estudios han reportado que la estimulación congruente puede modular la información táctil, tal que ésta predomine a la perspectiva visual y, por lo tanto, modifique la localización [84].

No existe un consenso entre la independencia de los subcomponentes de la corporización. Algunos autores determinan un modelo independiente [90,91], mientras que otros afirman que podrían estar relacionados entre sí [92]. Con el fin de poder diferenciar entre las sensaciones, se necesita un marco metodológico para comparar cada uno de los subcomponentes por separado.

En defensa del modelo independiente, Kalckert y Ehrsoon [91] realizaron un estudio donde se replicó una versión de la ilusión de la mano de goma o, del inglés, *Rubber Hand Illusion* (RHI). El RHI es una ilusión corporal que permite al participante llegar a sentir que una mano de goma forma parte de su cuerpo. Para ello se realiza una estimulación visotáctil sincrónica de la mano de goma y de la mano del individuo, el cual permanece oculto a la vista (Figura 8). Este proceso será explicado con detenimiento más adelante. Concretamente, en este experimento el participante podía controlar los movimientos del dedo índice de la mano de goma, colocada delante del usuario y visible en todo momento, con su propio dedo, oculto durante el experimento.



Figura 8. Captura del experimento de Kalckert y Ehrsson. Método utilizado para realizar la estimulación visotáctil.

El estudio contaba con diferentes condiciones en las que se variaba el retraso entre los movimientos (síncrono o asíncrono), el modo de movimiento (activo o pasivo) y la posición de la mano de goma (anatómicamente congruente al participante o no). Los resultados reportaron que: primero, el movimiento asíncrono eliminó la sensación de agencia y de propiedad de los usuarios; segundo, los movimientos pasivos eliminaron la sensación de agencia, pero dejaron intacta la propiedad; por último, el posicionamiento incongruente de la mano de goma disminuyó la propiedad, pero no eliminó la agencia. Estas variaciones independientes entre ambas sensaciones podrían demostrar una posible independencia entre los subcomponentes. Por otro lado, Ma y Hommel [92] llevaron a cabo un estudio donde se realizaba una versión virtual del RHI. En este experimento los usuarios debían realizar movimientos con su mano, la cual se encontraba oculta. Estos movimientos eran transferidos a una mano virtual que estaba proyectada sobre una mesa colocada delante del usuario, de forma congruente al cuerpo de éste. La sincronía entre los movimientos de ambos cuerpos suscitó a los participantes la sensación de propiedad de la mano virtual. Con este estudio, los autores trataron de demostrar una posible relación directa entre la agencia y la propiedad. Además de estos estudios, se han realizado experimentos más complejos introduciendo medidas neurofisiológicas para tratar de determinar las áreas del cerebro reclutadas para cada sensación, los cuales se resumen en el siguiente subapartado.

La corporización se ha utilizado tradicionalmente para manipular e investigar cómo el cerebro integra información multisensorial aferente (tacto, visión y propiocepción) con el objetivo de configurar una representación mental de las partes

del cuerpo y del espacio alcanzable (peripersonal). Toda la literatura existente, que involucra participantes sanos, evidencia una actualización constante del esquema corporal [91,93,94], supuestamente, para preparar al cuerpo para movimientos venideros [95]. Este mecanismo no sólo se confirma, sino que también se potencia, después de cambios fisiopatológicos en el cerebro [96,97]. Sin embargo, pese a que el deterioro de los procesos sensoriales con la edad es ampliamente conocido, por ejemplo, en agudeza visual [98,99], en coordinación motriz [100], en percepción auditiva [101] y en propiocepción [102], y que se han encontrado cambios neurofisiológicos relacionados con la edad tanto en áreas cerebrales localizadas como en redes cerebrales distribuidas [103,104], la investigación sobre los mecanismos de la corporización durante el envejecimiento es escasa.

1.3.2. Facilitación

Para poder analizar y cuantificar la corporización se necesita observar cada uno de sus subcomponentes por separado. Existen diversas estrategias para separar estos subcomponentes. Uno de los métodos utilizados para resolver problemas de esta índole, donde podemos alterar la entrada de un sistema y observar sólo la salida de él, es la ingeniería inversa. Evidentemente, este método no se puede aplicar como en ingeniería, es decir, no se puede desconectar el cerebro o dañarlo, por lo que en la práctica se usa de otra manera, creando “pequeños errores o variaciones” en él, las cuales dan lugar a ilusiones corporales.

Una ilusión corporal es un fenómeno psicológico que permite variar la percepción del cuerpo de un individuo de forma significativa respecto a su configuración natural mediante estimulación multisensorial y/o sensorimotora. Las ilusiones corporales proveen información acerca de cómo el cerebro es capaz de registrar la percepción corporal en tiempo real, así como los estímulos que la podrían modificar [105]. Gracias a estas ilusiones somos capaces de variar los diferentes subcomponentes de la corporización por separado, lo que permite analizarlos y cuantificarlos mediante cuestionarios y medidas fisiológicas.

Se pueden encontrar diferentes tipos de ilusiones corporales.

- *Ilusión de distorsión corporal.* Consigue modificar drásticamente el tamaño o la postura de una parte o partes del cuerpo de un individuo sin necesidad de que el cambio sea anatómicamente correcto respecto al cuerpo humano (Figura 9a).
- *Experiencias extracorpóreas.* Modifican la localización espacial original respecto a la perspectiva visual congruente al cuerpo [106] o, lo que es lo mismo, permiten observar el cuerpo desde la distancia [87] (Figura 9b).
- *Ilusión de propiedad.* Permiten tomar como parte del cuerpo algún elemento que antes no formara parte de éste, desde una mano de goma hasta un cuerpo completo (Figura 9c).

Uno de los experimentos más utilizado para replicar estas ilusiones corporales es, como se introdujo anteriormente, el RHI [107] (Figura 9c).

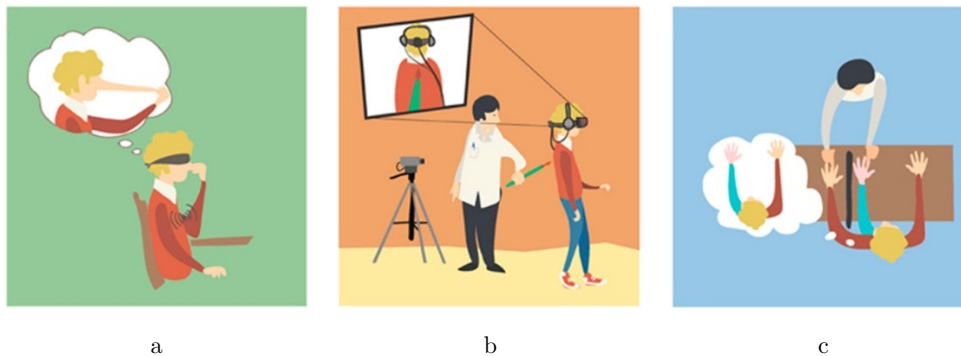


Figura 9. Representaciones gráfica de distintas ilusiones corporales. Entre ellas se pueden encontrar: a) una ilusión de distorsión corporal, b) una experiencia extracorpórea y c) una ilusión de propiedad.

1.3.2.1 Ilusión de la mano de goma

El RHI implica la interacción intermodal de la vista, el tacto y la propiocepción para crear una sensación convincente de propiedad sobre una parte del cuerpo externa [108], permitiendo obtener diferentes parámetros de la corporización separados entre sí.

En el RHI un participante sitúa ambas manos hacia abajo sobre una mesa. La mano no dominante se sitúa en el lado externo de una pantalla para evitar que el participante pueda verla. A su vez, se coloca una mano de goma de la misma lateralidad a la mano oculta en el lado interno de la pantalla, en una posición anatómicamente plausible desde el punto de vista del participante. Por tanto, éste ve en la mesa su mano dominante y una mano de goma donde tendría que estar su otra mano, o, mejor dicho, donde podría estar su otra mano. Durante el experimento, el investigador acaricia, típicamente con un pincel, a una frecuencia aproximada de 1 Hz la mano de goma y la mano escondida al mismo tiempo en los mismos dedos mientras el sujeto dirige su mirada hacia la mano de goma. De este modo, el sujeto ve que la mano de goma está siendo acariciada en los dedos mientras que al mismo tiempo está sintiendo que su otra mano está siendo acariciada en los mismos dedos (Figura 10).

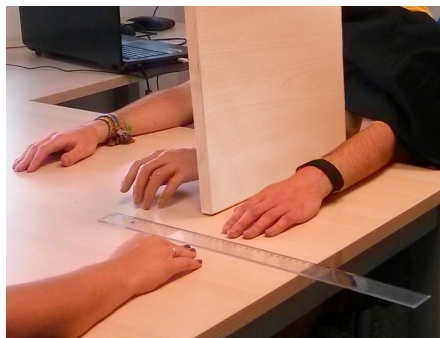


Figura 10. Montaje experimental del *Rubber Hand Illusion*.

En algunas ocasiones, con el paso del tiempo el sujeto tiene la sensación de que la mano de goma le pertenece. De hecho, cuando se produce la ilusión el sujeto se alerta cuando la mano de goma se ve amenazada [93]. Como prueba de ello, al terminar el experimento, se suele golpear la mano de goma con un martillo, provocando un reflejo de retirada de la misma en los sujetos que se han apropiado de dicha mano. Este experimento revela algunos hechos sobre cómo el cerebro crea una imagen corporal del cuerpo humano.

El RHI ha sido replicado para el análisis de la corporización durante el presente trabajo.

1.3.3. Medidas

1.3.3.1 Medidas subjetivas

La evaluación subjetiva de la corporización se suele llevar a cabo tras la experimentación. A continuación, se describe uno de los cuestionarios más utilizados, tanto en su forma original como en sus distintas variaciones, el *Embodiment of Rubber Hand Questionnaire* (ERHQ) [79]. El ERHQ es un cuestionario que consta de 10 ítems que evalúa la fuerza de la corporización obtenida durante el RHI. Específicamente, cinco elementos evalúan la propiedad del cuerpo, el grado de propiedad de la mano de goma; tres elementos evalúan la localización, el grado en que la mano de goma está alineada con la representación de la mano real; y los dos elementos restantes evalúan la agencia, la medida en la que la mano de goma se puede mover voluntariamente. Curiosamente, se ha notificado que estos tres factores explican hasta un 79.0% y 76.2% de la varianza de la corporización en condiciones síncronas y asincrónicas, respectivamente [79]. Los subcomponentes de la corporización se definen como la puntuación promedia de cada uno de sus correspondientes subapartados.

Distintos estudios han utilizado variaciones de este cuestionario. Por ejemplo, en el estudio de Kalckert y Ehrsson [109] se utilizaron los 10 ítems típicos del cuestionario más 8 ítems que sirvieron como preguntas control para el experimento. Estos elementos añadidos hacían referencia a la propiedad y a la agencia, realizando preguntas como: “¿Sientes que podrías tener más de una mano derecha?”. Las preguntas control fueron creadas en base a otros ítems añadidos por otros autores en diversos estudios [107,110].

1.3.3.2 Medidas objetivas

Diversos autores han intentado hallar la posible relación entre diversas medidas objetivas y la corporización. En la bibliografía se han utilizado medidas comportamentales, las cuales referencian a la actuación del usuario durante el experimento y medidas fisiológicas y neuro fisiológicas, las cuales recogen cambios intrínsecos a los individuos. Aun con todo esto, cabe destacar que en la gran parte de los experimentos de RHI se continúan usando medidas subjetivas a partir de

cuestionarios específicos, puesto que siguen siendo, aun con sus limitaciones, la manera más directa e inmediata de cuantificar estos constructos psicológicos [111].

Medidas conductuales

Este tipo de medidas intentan analizar y cuantificar los cambios observables en la conducta de un individuo durante el experimento de RHI. Tradicionalmente la medida más utilizada para cuantificar la corporización durante el RHI es la deriva propioceptiva.

La deriva propioceptiva es la diferencia entre la estimación de la mano real del participante y dicha mano, que es causada por el experimento [81,112]. Comúnmente, para analizar la deriva propioceptiva, los participantes deben sentarse frente a una mesa con las manos en la superficie y las palmas hacia abajo (Figura 11). Tras esto, se les pide que cierren los ojos e indiquen el centro de su mano no dominante, que estaba a punto de ser o había sido estimulada durante el experimento, con el dedo índice de su mano dominante no estimulada, sin llegar a tocarla [113]. El experimentador mide la diferencia entre la posición percibida y la posición real de la mano con la ayuda de una regla. La deriva propioceptiva se define como la diferencia entre estas mediciones antes y después del experimento. Se cree que una variación de la percepción del usuario hacia la mano de goma indica un predominio de la información visual sobre la propiocepción y por lo tanto, una propiedad del individuo sobre esta mano [81,107].



Figura 11. Protocolo experimental para calcular la deriva propioceptiva durante el experimento del *Rubber Hand Illusion*.

Medidas fisiológicas

Actividad electrodérmica

Existen diversos acrónimos y nombres que describen la actividad electrodérmica o, del inglés, *electrodermal activity* (EDA), como la respuesta galvánica o la conductancia de la piel. También han sido utilizados otros términos, como respuesta electrodérmica o respuesta de la conductancia de la piel, los cuales actualmente están identificados con cambios específicos en la señal y no con la señal en sí misma. En el presente trabajo se seleccionó el término de EDA para unificar todas las definiciones [114,115].

La EDA es el cambio en la conductividad de la piel relacionado con estímulos ambientales como la luz, sonido, olor, etc. La piel, además de cumplir la función de aislar el organismo del medio ambiente y de mantener el balance hídrico, también es una buena conductora de la electricidad. Esto se debe a que las glándulas sudoríparas actúan de resistencias eléctricas de manera que, al llenarse de sudor, su resistencia disminuye (la conectividad aumenta). Por ello, se puede deducir que la amplitud de la respuesta eléctrica de la piel depende de la cantidad de secreción que es llevada hasta los conductos y de la cantidad de glándulas sudoríparas activadas. Según la función y el posicionamiento de las glándulas sudoríparas, podemos dividir las en dos grupos:

- *Apocrinas*. Se encuentran en zonas cutáneas con alto contenido piloso y están relacionadas con aspectos odoríferos del ser humano.
- *Ecrinas*. Distribuidas por toda la superficie cutánea, con una mayor concentración en manos y pies (200-600 glándulas por cm^2), y relacionadas con funciones termorreguladoras. Se encuentran invadas por fibras simpáticas (controladas por el sistema nervioso simpático) encargadas de la secreción del sudor, inodoro y de alto contenido acuoso. Además de la sudoración termorreguladora, estas glándulas tienen un componente de control emocional regulado por el córtex cingulado anterior, el sistema límbico y el hipotálamo.

Entre otras funciones, La región del hipotálamo es responsable de las expresiones fisiológicas relacionadas con las emociones, pues regulando la actividad del sistema nervioso autónomo a través de su influencia sobre el tronco encefálico. Hay varias

emociones implicadas en la activación del control emocional. Fundamentalmente estas emociones son las que preparan al organismo para un ataque o defensa, como por ejemplo el temor, la ansiedad, etc. Sin embargo, esta activación también se produce por otros estados como la alegría, o cualquier estímulo con alto contenido emocional o significativo para el sujeto.

Para medir la EDA se aplica una corriente continua de baja intensidad de forma no invasiva sobre la piel [114], y se mide esta corriente en un lugar cercano para observar los cambios de conductividad producidos en esta señal. Por ello, lo que realmente se mide es la resistencia que opone la piel a esta corriente o la propia conductividad eléctrica. Este parámetro se mide en siemens (S). Y se calcula mediante la fórmula:

$$C = \frac{I}{V}$$

, donde C es la conductancia de la piel, I es la corriente observada en la piel y V es el voltaje aplicado entre dos electrodos colocados en la piel (± 200 mV).

Por un lado, podemos identificar la conductividad eléctrica tónica (o nivel de conductividad de la piel). Dicha conductividad es la línea basal de la conductividad de la piel, la cual se define, en ausencia de estímulos ambientales. Este nivel aparece cuando se secreta el sudor en la piel o cuando éste es reabsorbido por las glándulas sudoríparas. Por otro lado, es posible identificar la conductividad eléctrica fásica, la cual, como se ha comentado, está relacionada con los estímulos ambientales y la activación del sistema nervioso autónomo. Esta conductividad implica un aumento en la conductancia de la piel durante un intervalo entre 10 y 20 s antes de retornar al nivel de conductividad basal y aparece cuando se llenan las glándulas sudoríparas.

Se pueden identificar varios parámetros relacionados con la medida de la EDA:

- *Amplitud.* Diferencia entre el nivel tónico en el momento de generar la estimulación y el pico máximo que se presenta en el momento de la respuesta.
- *Tiempo de latencia.* Tiempo entre el momento de realizar el estímulo y de que aparezca una respuesta en el sujeto.

- *Tiempo de elevación.* Intervalo transcurrido entre el inicio de la respuesta y el momento en el que se presenta el pico.
- *Tiempo medio de recuperación.* Lapso de tiempo transcurrido entre el pico de la respuesta y el momento en el que la línea de la respuesta regresa a la mitad del valor de pico.

Para esta prueba podemos encontrar dos tipos de sujetos: lábiles, los cuales tienen una alta frecuencia de respuesta instantánea y una habituación lenta a estímulos, y estables, que representan el caso contrario a los anteriores.

Temperatura de la piel

La temperatura corporal permite evaluar la eficiencia de la regulación térmica que se presenta en el cuerpo humano en función de los cambios en la temperatura ambiental y la intensidad de la actividad realizada [116]. La temperatura periférica depende directamente de esta temperatura, aunque varía respecto a la temperatura corporal interna debido a su gran dependencia con la temperatura ambiental y los cambios de humedad que sufre la piel. El sistema de termorregulación es el encargado de mantener estas temperaturas estables y para ello se hace uso de los siguientes componentes:

- *Vías aferentes termoceptivas.* Desde donde se recoge la información térmica y se envía a los centros termorreguladores. Podemos encontrar dos tipos de vías principales: los receptores físicos, entre los que se incluyen el sistema cardiovascular y algunos órganos como riñones, hígado o pulmones, y los receptores químicos, distribuidos en los nervios periféricos.
- *Centros termorreguladores o de integración.* Son los sistemas encargados de integrar la información de las vías aferentes, elaborar un juicio sobre la temperatura y emitir una respuesta que, o bien modifica la temperatura, o la mantiene intacta. Aunque tradicionalmente se tomó como único centro termorregulador el hipotálamo anterior, en la actualidad se sabe que forman parte de sistema de control central las siguientes estructuras: la región preóptica del hipotálamo anterior, sensible a señales de calor, la región del hipotálamo posterior, sensible a señales de frío, el sistema límbico, la sustancia reticular del tronco y los ganglios del sistema nervioso autónomo [117].

- *Vías eferentes termoelectoras.* Donde distintos tipos de sistemas son los encargados de elevar o disminuir la temperatura según lo dictado por los centros reguladores. Los mecanismos principales de termogénesis son el aumento de la tasa metabólica basal, las contracciones rítmicas involuntarias y el aumento de la lipólisis en el tejido graso. Respecto a mecanismos de termólisis encontramos la vasodilatación cutánea, el aumento de la sudoración, la taquicardia y la taquipnea (aumento de la evaporación de agua).

Una de las formas de obtener la temperatura periférica es analizando la temperatura de la piel, por ello en el presente trabajo se usará dicha medida. La temperatura de la piel refleja el estado de intercambio de calor entre el cuerpo humano y la temperatura del medio ambiente.

Actividad electromiográfica

La electromiografía (EMG) o actividad electromiográfica es una técnica que registra y evalúa la actividad eléctrica producida por los músculos esqueléticos. La fuente eléctrica de la actividad electromiográfica es el potencial de la membrana muscular, cuyo valor suele ser alrededor de 90 mV, si bien este valor puede variar de 20 y 30 mV dependiendo del músculo en observación. La EMG se puede calcular de manera superficial (sEMG) o intramuscular. En los estudios del presente trabajo se ha utilizado sEMG, ya que el método intramuscular, pese a proporcionar mayor precisión en la localización de la activación, es un método invasivo y no necesario en nuestro caso. El registro de sEMG se lleva a cabo mediante electrodos que se adhieren a la piel sobre el vientre del músculo o grupos musculares que se pretenden estudiar. Los electrodos monitorizan la respuesta temporal de la activación muscular y de las unidades motoras existentes bajo la superficie analizada.

Una unidad motora se define como una neurona motora, o motoneurona, y todas las fibras musculares que inerva. Cuando una unidad motora se activa, el impulso o potencial de acción se desplaza desde la neurona motora hacia el músculo. Cuando el potencial de acción alcanza la unión neuromuscular, área donde el nervio hace contacto con el músculo, se transfiere un potencial a todas las fibras musculares inervadas por la unidad motora particular. La suma de toda esta actividad eléctrica se conoce como potencial motor. La actividad electrofisiológica creada por los potenciales motores de las múltiples unidades motoras existentes en un determinado

punto es la conforma la actividad EMG. La composición de la unidad motora, el número de fibras musculares por unidad motora, el tipo metabólico de las fibras musculares y muchos otros factores afectan a la forma de los potenciales motores.

Medidas neurofisiológicas

Diversos estudios han intentado identificar los mecanismos cerebrales que subyacen a la corporización mediante técnicas como el EEG y la fMRI, las cuales han sido previamente definidas.

1.3.4. Estudios previos sobre corporización

En este apartado se resumen algunos de los estudios que han utilizado las diferentes ilusiones corporales comentadas anteriormente para promover la corporización, haciendo especial hincapié en los estudios de RHI.

1.3.4.1 Facilitación de la corporización

Las ilusiones corporales permiten variar alguno de los subcomponentes de la corporización sin alterar el resto, lo que permite analizar y cuantificar dicho subcomponente aislando otras posibles interferencias. A continuación, se describen algunos de los artículos más relevantes relacionados con las ilusiones corporales para el presente trabajo.

Ilusión de distorsión corporal

Como se comentó anteriormente, mediante este tipo de ilusión se permite alterar una parte del cuerpo del individuo, ya sea en volumen o en orientación. Uno de los métodos utilizados para inducir este tipo de ilusiones son las ilusiones kinestésicas. Estas ilusiones consisten en la estimulación vibro-táctil de un músculo del usuario para crear un movimiento ilusorio en una parte estática del cuerpo, creando así un estado propioceptivo no verídico [118]. Esta estimulación puede incluso producir la impresión de un cambio de tamaño en una parte del cuerpo inamovible [119–121]. Aunque la distorsión puede replicarse en numerosas partes del cuerpo existen dos experimentos que destacan por encima del resto: la ilusión de Pinocho [121] y la ilusión de la nariz fantasma [122].

Durante la ilusión de Pinocho, realizada por primera vez por Lackner [121], el usuario permanece con los ojos cerrados y tocándose la punta de la nariz, en ese momento se coloca un estimulador vibro-táctil a 100 Hz en la parte superior del bíceps. Hacer vibrar la piel por encima de un tendón excita los receptores motores del músculo creando la sensación al usuario de que está enderezando el codo y por ende la articulación extendiéndose (Figura 12). Este proceso confunde al cuerpo que, supuestamente, intenta reacondicionar el esquema corporal sin éxito, resultando en la creación de un miembro fantasma que simula una nariz alargada. El cerebro integra la sensación táctil del dedo con el movimiento del brazo y llega a la conclusión errónea de que la nariz está creciendo para llenar el vacío. Esta ilusión es una herramienta importante para comprender cómo el cerebro calcula el tamaño y la forma del cuerpo.

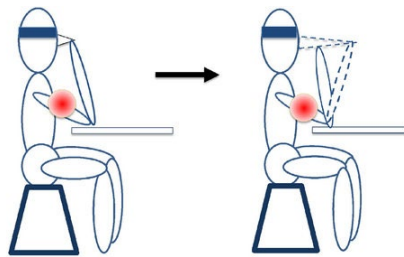


Figura 12. Esquema de la ilusión de distorsión corporal realizada por el grupo de Lackner *et al.*

No solo mediante estimulación vibro-táctil se pueden alcanzar este tipo de ilusiones, por ejemplo, mediante la ilusión de la nariz fantasma (Figura 13), realizada por Hirsten *et al.* [122], se puede simular en un usuario un aumento del tamaño de la nariz mediante una correlación temporal entre información propioceptiva no distorsionada y una entrada táctil, realizada por medio de un investigador u otro elemento. Para realizar esto, el experimentador coloca el dedo de un participante con los ojos vendados sobre la nariz de otro usuario mientras toca la nariz del participante con su dedo. Tras esto, el experimentador realiza una serie de movimientos lentos en la nariz del sujeto adelantado, los cuales son replicados por el investigador en la nariz del sujeto atrasado. Al realizarse simultáneamente ambos movimientos, el participante experimenta la ilusión de que su nariz es inusualmente alargada.



Figura 13. Representación de la ilusión de la nariz fantasma llevada a cabo por el experimento de Hirsten *et al.*

Ilusión de propiedad del cuerpo

En comparación con las ilusiones anteriores en las que se modificaban elementos del cuerpo, bien la estructura corporal o la localización, este tipo de ilusión permite a los participantes percibir objetos que no forman parte de su cuerpo (por ejemplo, miembros artificiales) como parte de su propio cuerpo y como la fuente de sensaciones corporales asociadas. Mediante estas ilusiones los participantes son capaces de sentir como suyos objetos como brazos de goma mediante el RHI [107], piernas protésicas a través de la ilusión *Rubber Leg Illusion* [123], e incluso un cuerpo entero mediante la ilusión llamada *Full Body Illusion* [124,125].

La ilusión de propiedad también ha sido inducida a través de avatares virtuales usando HMDs, los cuales permiten la observación del avatar desde un punto de vista congruente a la visualización de un cuerpo real [88,110,126]. Estas *Full Body Illusion* fueron inducidas a través de estimulación visotáctil [110], visomotora [127] e información viso-propioceptiva [128]. Además, se observó que las respuestas subjetivas y propioceptivas dadas por los participantes de estos estudios correlacionaban análogamente con las respuestas producidas por el RHI [110,126,128].

Tradicionalmente, estos experimentos han sido realizados utilizando una muestra de adultos jóvenes, principalmente estudiantes, pues son la población a las que los investigadores, tienen más fácil acceso. Pocos estudios analizan este tipo de

ilusiones en participantes de otras edades. Además, los pocos artículos existentes sobre los efectos relacionados con la edad y la corporización han evaluado las respuestas subjetivas y conductuales utilizando cuestionarios a medida y contando únicamente con la deriva propioceptiva como medida objetiva.

El estudio de Cowie *et al.* [129] comparó las respuestas a cuestionarios y la deriva propioceptiva en tres grupos de niños con diferentes edades (4-5, 6-7 y 8-9 años) y un grupo de adultos jóvenes (edad promedio 23,9 años). Los investigadores encontraron una corporización comparable en todos los grupos, si bien la deriva propioceptiva fue mayor en los niños, lo cual se explicó sugiriendo que dicho aumento podría haber sido promovido por las diferencias de desarrollo en los procesos cerebrales que subyacen a la propiedad corporal [129,130]. Otro estudio llevado a cabo por Dummer *et al.* [131], el cual involucró a adultos y a jóvenes (17-24 años), examinó diferentes condiciones de movimiento (activo, pasivo y asincrónico) durante el RHI y también mostró que no hubo efecto de la edad en la corporización durante el RHI. Por el contrario, las respuestas de los participantes en el rango de 20-60 años de una versión modificada del RHI realizada por Graham *et al.* [132], donde la mano de goma fue reemplazada por un video en tiempo real de la mano real que se estaba acariciando, indicaron una disminución de la corporización y un aumento de la deriva propioceptiva con la edad.

El estudio de Tajadura-Jiménez *et al.* [133] evaluó las diferencias relacionadas con la edad en un grupo de jóvenes (17-38 años) durante la ilusión de *enfacement*, un experimento similar al RHI. En este experimento se acariciaba la cara de un participante en sincronía con un video pregrabado que mostraba a otros individuos siendo acariciados análogamente. Los autores reportaron que los participantes más jóvenes experimentaron mayor corporización y sugirieron que la plasticidad de la propiedad de la propia cara del participante podía disminuir con la edad. Por lo tanto, los artículos existentes proporcionan una base de estudio interesante, pero la ausencia de estudios que involucren rangos de edad más amplios, condiciones controladas comparables y correlatos fisiológicos limitan la extrapolación de los resultados preliminares.

Experiencias extracorpóreas

Otra importante clase de ilusión corporal son las experiencias fuera del cuerpo o extracorpóreas, las cuales permiten modificar la localización del yo de un individuo, produciendo la ilusión de que el sujeto se encuentra fuera de su cuerpo.

Uno de los experimentos más representativos de las experiencias extracorpóreas fue el llevado a cabo por Ehrsson *et al.* [87]. En el experimento, un grupo de participantes fueron capaces de observar su propia espalda en directo a través de un HMD gracias a una cámara situada tras ellos, que enviaba las imágenes directamente al casco, imitando una vista en tercera persona del propio usuario (Figura 14). Tras una estimulación táctil de la parte superior del pecho del participante, mientras que este está viendo la estimulación a través de las HMD, se consiguió que los participantes experimentaran una desviación de la localización de su yo hacia el punto de vista de la cámara.



Figura 14. Experimento llevado a cabo por Ehrsson *et al.* donde se inducía una experiencia extracorpórea en uno de los participantes de su estudio

Este estudio ha sido replicado diversas veces bajo diferentes condiciones. Por ejemplo, otro estudio similar [106] realizaba una estimulación táctil en la espalda de los participantes mientras que, a través del HMD, observaban diversas imágenes según la condición en la que se encontraban, pudiendo estar sincronizadas o no con la estimulación táctil. Estas imágenes podía ser su propia espalda que estaba siendo grabada desde una cámara tras él, un maniquí que se estaba siendo estimulando de

forma similar a la espalda del usuario o un objeto metálico no corpóreo. Los resultados mostraron la mayor desviación de localización cuando la estimulación fue sincrona y cuando se mostraba su propia espalda en el HMD.

Recientemente ha sido presentado el sistema *The Machine To Be Another* (BeAnotherLab, Barcelona, España) el cual permite a un individuo observar el mundo desde el punto de vista de otra persona. El sistema incorpora una cámara móvil anclada a un armazón robótico, transportado por el investigador u otro usuario, dependiendo del experimento, y un HMD que utiliza el participante. La cámara rota de acuerdo a la orientación del HMD emitiendo vídeo congruente a estos movimientos. Este sistema permite a los participantes, entre otras cosas, verse a sí mismos desde una perspectiva en tercera persona y sentir la ilusión de que se están tocando a sí mismos desde fuera. El estudio de Cebolla *et al.* [134] utilizó este sistema como parte de una intervención basada en compasión en comparación con una intervención tradicional basada en meditación. Los resultados mostraron mayores mejoras tras 2 semanas de uso de este sistema en referencia a la intervención tradicional (Figura 15).



Figura 15. Experimento llevado a cabo por Cebolla *et al.* donde se utilizaba *The Machine To Be Another* para promover una experiencia extracorpórea.

Diversos hallazgos han demostrado que la localización percibida a través de estas ilusiones podría ser similar a los informes de pacientes que experimentan experiencias extracorpóreas de origen neurológico [135]. Este tipo de ilusiones podría proporcionar un punto de referencia importante para estudiar el papel de la integración multisensorial en la localización y en la propiedad corpórea [86,136].

1.3.4.2 Uso de medidas subjetivas

Una gran parte de los estudios que utilizan la ilusión del RHI para facilitar la corporización hacen uso del cuestionario ERHQ o alguna modificación del mismo. Por ejemplo, el estudio llevado a cabo por Petkova y Ehrsson [94] llevó a cabo una estimulación del RHI tradicional concluyendo, gracias a este cuestionario, que el 53% de los participantes del estudio (de un total de 63) fueron capaces de sentir la mano de goma como suya. Este valor no es constante en la literatura, aunque sí aproximado, si bien ha alcanzado cotas más elevadas en algunos experimentos, como en el estudio de Kalckert y Ehrsson [91], el cual reportó una tasa de éxito del 78% (de un total de 40) para la condición tradicional y síncrona.

Aun existiendo esta disparidad en los resultados, la mayoría de los estudios que replican esta ilusión consiguen que, al menos, la mitad de sus usuarios sientan la mano de goma como parte de su cuerpo, logrando altos niveles de propiedad sobre ésta.

1.3.4.3 Uso de medidas objetivas

Medidas conductuales

Las medidas conductuales analizan y cuantifican algunos cambios en el comportamiento de un individuo para tratar de relacionarlos con la variación los subcomponentes de la corporización. Durante el RHI la medida conductual más utilizada es la deriva propioceptiva.

Uno de los primeros estudios que analizó esta medida fue el llevado a cabo por Tsakiris y Haggard [81]. Este estudio recoge diferentes experimentos relacionados con el RHI donde se variaban diferentes parámetros como el elemento a mostrar (una mano de goma colocada congruente e incongruentemente al cuerpo y un objeto neutro) o la forma y la sincronía del acariciado. Los resultados evidenciaron que, para las condiciones donde el acariciado era síncrono y la mano de goma se encontraba congruente respecto al usuario, aparecía una desviación media de la localización percibida de la mano real del sujeto hacía la mano de goma de aproximadamente 3 cm. Además, este estudio también detectó que, si se les preguntaba a los participantes

sobre el centro de su mano, la deriva era mayor que si se les preguntaba dónde se encontraba su dedo pulgar.

Otros artículos más actuales han conseguido replicar resultados similares utilizando no sólo el RHI convencional. El experimento llevado a cabo por Asai [112] replicó el RHI sustituyendo la mano de goma por una proyección de la mano real del participante. Los resultados respecto a la deriva propioceptiva revelaron un desplazamiento de la localización percibida del centro de la mano real hacia la mano de goma de aproximadamente 4 cm en la condición síncrona. En el estudio de Rohde *et al.* [137] también se analizó la deriva propioceptiva en un experimento de RHI en el cual, a través de un sistema de espejos, el usuario observaba su mano replicado en otro lugar del espacio. Los resultados mostraron una deriva hacia la mano de goma de 6.5 cm en la condición síncrona.

Medidas fisiológicas

Tradicionalmente, el análisis de medidas fisiológicas durante experimentos cognitivos se ha utilizado para tratar de objetivar los resultados dados por los sujetos del estudio. Un gran número de estudios han investigado los correlatos fisiológicos subyacentes al RHI en diferentes poblaciones bajo diferentes condiciones, principalmente examinando variaciones en la temperatura de la piel y la respuesta galvánica. A continuación, se resumen algunos de los estudios más representativos.

Actividad electrodérmica

Armel y Ramachandran [93] presentaron en 2003 un estudio con 40 sujetos sanos, dividido en tres experimentos. En el primero de ellos se realizó el RHI convencional, con dos condiciones, síncrona y asíncrona. En el segundo experimento se realizó el RHI convencional realizando la estimulación sobre el aire, quitando la mano de goma del campo de visión del participante. En la tercera condición se colocó una mano de goma mucho más alargada que la real. Las medidas se obtuvieron mediante dos electrodos Ag-AgCl y el sistema Biopac MP100 (BIOPAC Systems, CA). Los datos fueron analizados calculando una línea base definida como la diferencia entre la media aritmética de la EDA un segundo previo al estímulo y el pico superior de señal tras el estímulo (de 1 a 5 s). Los resultados reflejaron que, en el segundo experimento, al no estimular ningún objeto, el aumento de la EDA fue muy leve. Concretamente, cuando

la estimulación se hizo sobre el aire, la variación de la EDA fue de 0,03 mS. De este estudio se deduce que sólo pueden considerarse variaciones relevantes aquéllas que exceden 0,03 mS [138]. En el primer y tercer experimento, se detectó un aumento de la EDA durante el movimiento síncrono mayor a 0,03 mS, si bien en el tercer experimento, la EDA presentó un incremento menor que en el primero.

Un estudio de Ehrsson *et al.* [139] con 18 personas con miembros amputados usó la EDA para corroborar la ilusión. El experimento consistió en el RHI convencional con dos condiciones, síncrona y asíncrona, y con una amenaza final mediante una aguja. Las medidas se realizaron, como en el primer estudio [93], mediante el AT64 Portable SCR (Autogenic Systems, IL) y dos electrodos Ag-AgCl a una frecuencia de 8 Hz. Como resultado se observó un aumento medio de EDA de 0,35 mS sobre la línea base. Los investigadores no encontraron relación entre el tiempo que había pasado desde la amputación y la EDA.

D'Alonzo y Cipriani [140] utilizaron un elemento vibrador conectado a los dedos de la mano real de 20 sujetos sanos. El experimento contenía seis condiciones diferentes, entre las que se encontraba el RHI convencional síncrono y asíncrono, realizado con pincel o con toques, y una condición incongruente en la que se aplicaba estimulación mediante acariciado o toque en la mano de plástico y estimulación vibrotáctil en la mano real. Para adquirir la señal se utilizó la pulsera Q-Sensor (Affectiva, MA), a partir de la cual se calculó el valor de pico entre 1 y 10 s después del estímulo. Los resultados mostraron un aumento de la EDA mayor con acariciado síncrono que asíncrono, sin variaciones respecto a la versión incongruente.

Ma y Hommel [141] reclutaron a 18 sujetos sanos a los que les situaron la mano derecha bajo una caja situada entre ellos y la pantalla de un PC. A la mano oculta se le colocaron diversos sensores para así reconocer sus movimientos. En la pantalla se mostró una mano similar a la del usuario, la cual, gracias a los sensores, era capaz de imitar los movimientos de la mano real bajo la caja. Un guante de datos Cyberglove (CyberGlove Systems, CA) producía una pequeña vibración al tocar la mano de plástico, realizando así un RHI mediante vibración. Se estudió una condición síncrona y otra asíncrona y, al finalizar cada condición, los sujetos veían una pelota o un cuchillo acercarse a la mano virtual. El elemento usado para la medición fue un Biopac M100, el cual calculaba tanto la EDA como el movimiento de la mano. La EDA se calculó como en el estudio descrito previamente de Armel y Ramachandran

[93]. Los resultados mostraron un cambio mayor de EDA al percibir el golpe cuando los movimientos de la mano virtual y la vibración eran sincrónicos a la de la mano real.

Reinersmann *et al.* [142] exploraron los efectos del RHI en 69 sujetos, entre los que se encontraban algunos con dolor regional y otros sanos. Se realizó el experimento una vez sobre la mano dolorida y más tarde sobre la mano sana. Para registrar la EDA se colocaron dos electrodos en la mano no estimulada, tal y como se ha descrito previamente. No se encontraron cambios entre los participantes sanos y los sujetos con dolor regional.

Temperatura de la piel

Moseley *et al.* [143] fueron uno de los pioneros en utilizar mediciones de temperatura en experimentos de RHI. En este experimento, que involucró a 34 participantes sanos, se realizó el protocolo de experimentación convencional de RHI midiendo la temperatura en diferentes momentos del experimento y en varias localizaciones (Tabla 1).

Tabla 1. Diferentes condiciones en el estudio de Mosley *et al.*

<i>Condición</i>	<i>Descripción</i>	<i>Resultados</i>
1º	La temperatura se midió antes de realizar el experimento y tras él, después de haber quitado la mano de goma de la vista del sujeto.	Disminución de $0,27 \pm 0,11^\circ\text{C}$
2º	Se midió la temperatura en la mano no estimulada para comprobar si la disminución se produce en ambas extremidades o sólo en la estimulada.	No se encontró variación
3º	Se realizó el acariciado con proceso asíncrono, se midió la temperatura tanto en la mano estimulada como en la no estimulada.	Reducción en la mano estimulada de $0,24 \pm 0,13^\circ\text{C}$

4º	Se situó el medidor de temperatura en el tobillo y en la mano estimulada para comprobar si está relacionado el cambio entre diferentes miembros.	No se encontró variación
5º	Se colocó la mano estimulada a la vista, sin situar ninguna mano de goma, estimulándola con el pincel para demostrar que la disminución de la temperatura no depende del acariciado, sino del experimento de RHI.	No se encontró variación
6º	En vez del acariciado se realizó una vibración en el índice de ambas manos y en vez de medir la temperatura, se realizó un test para comprobar la variación.	17% de los participantes sintieron la disminución.

Respecto al instrumental utilizado, se usó un termómetro láser AutoPro (Raytek, CA), con el cual se tomó una muestra de temperatura cada 30 s en el nacimiento del dedo índice y el anular y en la muñeca, obteniendo un total de 15 muestras en cada condición.

Otro trabajo que estudia la temperatura es el llevado a cabo por Hohwy y Paton [144] en 2010, con un total de 43 participantes sanos repartidos en los diferentes experimentos. En este caso se realizaron tres experimentos. El primer experimento se realizó en un EV que el sujeto visualizaba mediante un HMD. En este experimento se realizó el acariciado básico con dos condiciones. En la primera condición se fue tocando la mano real con el dedo y después de 10-20 s, se preguntó a los participantes si sentían el toque con el dedo virtual que veían o con el dedo real del investigador. A los 30 s se repitió la pregunta. En la segunda condición, comenzó el acariciado hasta los 10 s, en los que se realizó la misma pregunta y seguidamente se detuvo el acariciado. Se volvió a realizar la pregunta a los 30 y 60 s sin acariciar. Las dos condiciones se repitieron dos veces, una de manera síncrona y otra asíncrona. En el segundo experimento se introdujo la mano de goma en el EV. Este experimento también incorporó dos condiciones. En la primera se realizaron 60 s de toques en la mano de goma y en la real y, seguidamente, se elevó el dedo del experimentador sobre la mano de goma 5 cm, y los toques continuaron 3 minutos en la mano real. En la segunda

condición se realizaron toques en la mano real durante 30 s. Seguidamente la mano de goma se cambió por una caja blanca. El último experimento consistió en tres minutos de toques entre la mano real y una caja blanca visualizada gracias al casco de RV. Para realizar las medidas se usó un termistor Murata NTH4G (Murata, Japón), con sus sensores situados en el nacimiento de dedo índice y anular. Los resultados obtenidos muestran una variación al alza de la temperatura en todos los experimentos, con una media de $0,11^{\circ}$ en aquellos usuarios que sintieron la ilusión de propiedad sobre la mano de goma. Los investigadores no encontraron una explicación al fenómeno, pero usaron la temperatura como un medio para demostrar una diferencia de sensación en el RHI entre condiciones.

Kammers *et al.* [145] realizaron el RHI básico a diez sujetos sanos, pero colocaron la mano experimental sobre una placa termoeléctrica conectada a una bomba de calor Peltier. Se varió la temperatura entorno a cinco niveles que correspondían a cada condición del experimento añadiendo, además, la condición de acariciado síncrono y asíncrono. La medición de la temperatura se realizó mediante un termómetro láser antes y después del impulso, en la superficie dorsal de la falange media del dedo índice del participante. Tras eso, se calculó la variación de la temperatura entre la medida al comenzar el experimento y al finalizarlo. Los resultados indicaron que al inducir frío en la mano, ésta se enfrió hasta un punto determinado, y que este efecto se vio aumentado por la aplicación del RHI. Al inducir calor, ocurrió algo similar: la temperatura aumentó hasta cierto punto, lo cual se vio aumentado al realizar el RHI.

Thakkar *et al.* [146] estudiaron en RHI en una muestra de 24 sujetos esquizofrénicos y 21 sujetos sanos. El procedimiento de estimulación fue el convencional, utilizando cuatro condiciones, síncrono, asíncrono, mano derecha y mano izquierda. Las medidas se realizaron con un termómetro Fluke Corporation (Everett, WA). Se midió la temperatura en tres puntos de cada mano, nacimiento del índice y el meñique y en la muñeca, y se calculó la temperatura media. Cada mano y cada condición se midieron por separado. Seguidamente, se calculó la diferencia entre la línea base y la media obtenida. Los resultados obtenidos mostraron que en las personas sanas, cuando el experimento se llevó a cabo sobre la mano izquierda, la temperatura de la mano estimulada aumentó. En cambio, cuando el experimento se llevó a cabo sobre la derecha, la temperatura de la mano estimulada disminuyó. Los autores defendieron que un cambio en la temperatura podría ser un efecto del RHI o también

producto de la excitación durante el experimento. En el primer caso, el aumento o disminución de la temperatura según el brazo podría depender del hemisferio cerebral correspondiente al miembro sobre el que se le aplica el experimento.

En el artículo de Llobera *et al.* [147] fueron reclutados un total de 40 sujetos sanos, que se distribuyeron en dos grupos. El experimento utilizó RV para situar a los participantes frente a un espejo, en el cual se reflejaban sus movimientos. Se realizaron dos condiciones diferentes, la primera en la que el movimiento observado en el espejo fue síncrono con el realizado por la mano virtual, y la segunda condición en la que hubo una falta de sincronía entre el movimiento de la mano virtual y el reflejo en el espejo virtual. Además, en esta condición, el cuerpo reflejado se vio distorsionado con respecto al real. Para realizar la medida de la temperatura se usó el sistema CASE IV QST (WR Medical Electronics Co., MN). Se realizaron 20 medidas antes del experimento y otras tantas después, las cuales se promediaron para obtener la temperatura previa y posterior al experimento. Los resultados indicaron que la ilusión de agencia es mayor en la primera condición, mientras que la ilusión de propiedad fue más fuerte en la segunda, quizás debido al hecho de que la postura del cuerpo estaba distorsionada y podría producir un malestar que influía en la fuerza de la ilusión. En la primera condición hubo una variación media de temperatura de $0,29 \pm 0,07^\circ$, mientras que en la segunda, la variación fue menor, y equivalente a $-0,06 \pm 0,10^\circ$.

El estudio Rohde *et al.* [113] en 2013 reclutó a 52 sujetos sanos, cuyas manos se estimularon mediante dos brazos mecánicos. El estudio constó de tres condiciones con diferentes fases. La temperatura de la mano real fue medida mediante un termómetro de infrarrojos *Voltcraft IR 1020-50D* (Voltcraft, Francia) (Tabla 2).

Tabla 2. Resumen del estudio Rohde *et al.*

<i>Condición</i>	<i>Descripción</i>	<i>Resultados</i>
1º	Los participantes replican un RHI convencional alternando 200 s de acariciado síncrono y asíncrono. Cuantifican la temperatura al finalizar cada tipo de acariciado.	Se encontraron diferencias de temperatura durante el experimento
2º	Mismo tipo de acariciado, alternando entre síncrono y asíncrono, durante siete minutos. Se tomó la temperatura manualmente seis veces a partir de los últimos dos minutos, cada 20 segundos.	La temperatura disminuyó en el orden de 0,25°C.
3º	Se replicó el RHI convencional síncrono durante siete minutos. Se tomó la temperatura manualmente seis veces a partir de los últimos dos minutos, cada 20 segundos.	La temperatura disminuyó en el orden de 0,19±0,11°C, tanto en la mano estimulada como en la no estimulada

Los resultados mostraron que no hubo grandes diferencias en la variación de la temperatura en ambas manos entre los diversos métodos de aplicación. Diversos factores pudieron haber intervenido en el experimento, como el contexto social, la fuerza del acariciado, la luz, las irregularidades del acariciado o la excitación del sujeto. Además, no se encontró una correlación entre la sensación de propiedad y la variación de temperatura.

Finalmente van Stralen *et al.* [148] presentaron un estudio con 21 participantes que incluyó ocho condiciones. Las condiciones variaron la velocidad del acariciado (3/30 cm/s), la sincronía y el elemento para realizar el acariciado (pincel suave o malla de plástico). La temperatura se midió mediante un termómetro laser AutoPro (Raytek, CA) en la falange de ambas manos (estimulada y no estimulada) al iniciar y finalizar cada etapa del experimento, y se calculó la diferencia entre el inicio y el final de cada condición. Se observó que en la mano no estimulada no hubo cambios, pero, por el

contrario, la mano estimulada con un elemento suave disminuyó su temperatura en media 0,45°C. Las mayores tasas de éxito en la elicitación de la ilusión de propiedad se obtuvieron con el pincel suave y con una velocidad de 3 cm/s. Como en el estudio anterior, no se encontró una correlación entre la temperatura y la corporización.

Actividad electrodérmica

Slater et al. presentaron en 2008 [149] un estudio con 21 usuarios sanos donde se analizó la actividad muscular del brazo de los participantes durante la realización de una versión del RHI virtual. Los participantes contaban con unas gafas estereoscópicas pasivas que le permitían observar un brazo virtual representado sobre una gran pantalla, mientras que su brazo permanecía oculto tras un panel. El experimentador realizaba una serie de toques sobre el brazo real del participante mientras que los mismos toques se reproducían en el entorno virtual. Al acabar la estimulación el brazo virtual rotaba 90° mientras se analizaba el sEMG del brazo. Los resultados mostraron una correlación positiva entre la activación muscular y la sensación de propiedad sobre la mano virtual mientras se realizaba la rotación, indicando una posible relación entre ambas variables.

Otros estudios han utilizado el sEMG para analizar diferentes partes del cuerpo de los participantes durante el RHI. Por ejemplo, en el estudio llevado a cabo por Riemer et al. [150] utilizó el sEMG para cuantificar los parpadeos de los ojos durante el experimento del RHI, analizando si existía un aumento en la frecuencia del parpadeo durante diversas condiciones. Otro estudio llevado a cabo por Sato et al. [151] utilizar esta misma señal, obtenida desde el antebrazo de usuarios que habían sufrido una amputación, para controlar una mano de goma robotizada, simulando los movimientos que haría su mano real. En este experimento se analizó si el movimiento sincrónico de la mano de goma controlado por el participante podía promover la ilusión de propiedad sobre la misma.

Medidas neurofisiológicas

Aunque el experimento del RHI ha sido replicado en multitud de estudios de neurociencia para determinar la influencia de la integración sensorial en la representación del cuerpo, no se conoce la base neuronal que subyace a esta ilusión.

Un estudio llevado a cabo por Tsakiris *et al.* [152] descubrió, mediante fMRI, indicios de las posibles fuentes de activación de la propiedad y la agencia. La relación entre dichas sensaciones ha sido foco de mucha especulación ya que existen dos modelos que intentan definirla. Como se describió anteriormente, el modelo aditivo [90] defiende que hay una relación muy estrecha entre los dos subcomponentes y que no puede existir una sin la otra, en cambio el modelo independiente defiende que se tratan de experiencias diferentes, proviniendo de diferentes estímulos externos y reclutando distintas áreas cerebrales. Este estudio encontró una posible relación entre la propiedad y estructuras corticales medias, y la agencia y el área premotora y parietal. Por ello, los resultados del estudio sustentan el modelo independiente al no encontrarse respuestas comunes entre ambos constructos. Otros estudios también han hallado relaciones entre la propiedad con otras áreas cerebrales como la ínsula o el área premotora, únicamente cuando se realiza la estimulación táctil durante el RHI [124,152].

1.4. Ictus

1.4.1. Definición

Se denomina ictus o enfermedad cerebrovascular al trastorno brusco de la circulación cerebral que altera de forma transitoria o permanente la función de una región determinada del encéfalo. Según la naturaleza de la lesión vascular, los ictus pueden dividirse en dos grandes grupos atendiendo a su mecanismo de producción: la isquemia cerebral (80-85%) y la hemorragia cerebral (15-20 %) (Figura 16).

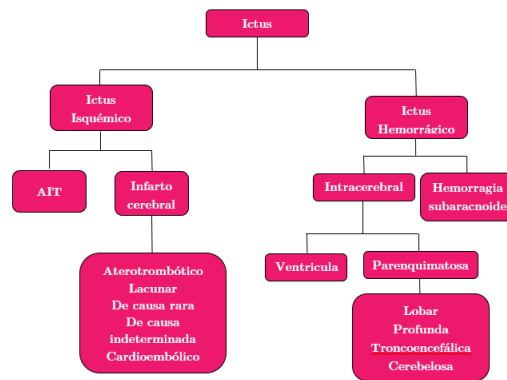


Figura 16. Clasificación del ictus.

En función del tiempo que dura el proceso isquémico se distingue entre el ataque isquémico transitorio, que consiste en un episodio breve, en general menos de una hora, de disfunción focal originado por isquemia cerebral o retiniana sin evidencia de infarto cerebral; y el infarto cerebral, cuando los síntomas neurológicos permanecen más de 24 horas evidenciándose una necrosis del tejido. Según su etiología, inferida de los mecanismos fisiopatológicos de producción sobre la base de la clínica y exámenes complementarios, se diferencian distintos subtipos de infarto cerebral: aterotrombótico, cardioembólico, lacunar, de causa rara y de origen indeterminado. El ictus hemorrágico supone una extravasación de sangre a la cavidad craneal por rotura de un vaso sanguíneo. Según su localización, podemos clasificar la hemorragia en

parenquimatosa (lobar, profunda, tronco encefálica o cerebelosa), ventricular o subaracnoidea.

El ictus representa la segunda causa más frecuente de muerte en el mundo [153] y una de las principales causas de discapacidad en adultos [154], afectando a más de 17 millones de personas cada año. Existen tres medidas principales utilizadas para observar el impacto de una enfermedad sobre la población.

Primero, la incidencia del ictus es el número de nuevos ictus que ocurren cada año, lo cual depende de factores de riesgo no modificables, como la edad, y otros que modificables, como el alcohol o el ejercicio. Según estudios realizados en diferentes países⁴, la tasa de incidencia anual del ictus ajustada a la población europea se establece, en media, en 141 por cada 100.000 habitantes, observando la mayor incidencia en *Orebro* (Suecia) con una tasa de 254 por 100.000 y la menor en *Valle de Aosta* (Italia) con una tasa de 80 por 100.000. Concretamente, en España se han realizado dos estudios donde se recabó esta información. En el primer estudio, llevado a cabo en Menorca [155], se observaron unas tasas de 166 por 100.000 en hombres y de 66 por 100.000 en mujeres. El segundo estudio se realizó en cinco áreas geográficas de España (Lugo, Almería, Segovia, Talavera de la Reina y Mallorca), obteniendo una tasa de incidencia 147 por 100.000. Teniendo en cuenta todos estos datos, se ha observado una reducción significativa (42%) de la incidencia del ictus desde 1980 en los países con rentas altas en comparación con un aumento del 52% en países con rentas bajas y medias [156]. La hipótesis es que este descenso es debido a la implantación de programas de prevención del ictus, por una parte, como al consumo más controlado de tabaco y el alcohol, por otro.

Segundo, la letalidad es el número de personas que fallecen como consecuencia del ictus en el primer mes. Esta medida guarda relación con la gravedad del ictus, así como con la calidad de la asistencia a la enfermedad. La tasa de letalidad por cada 100.000 casos oscila entre 270 en Hungría y 47 en Francia. Concretamente en España se obtuvo una tasa de letalidad de 62 por 100.000 casos. Un estudio ha reportado que en los últimos años, las tasas de letalidad han disminuido significativamente [157],

⁴ Datos obtenidos del documento “El impacto del ictus en Europa”, presentado por el Kings College of London en colaboración con Alianza Europea Contra el Ictus [293].

pudiendo deberse a diferentes componentes como, nuevamente, un mejor control de los factores de riesgo o a un tratamiento en las fases más agudas de la enfermedad.

Tercero, la prevalencia describe el número de supervivientes de ictus en la población señalando las necesidades de rehabilitación que deben de satisfacerse. Existe un menor número de estudios que recaben la información sobre esta variable. En España se llevó a cabo un estudio entre 1991 y el año 2002 en el que, mediante encuestas a domicilio, se calculó que existía una prevalencia del 6,4% en la población mayor de 70 años [158].

En resumen, el número de casos de ictus nuevos y muertes relacionadas, al ajustarlas por edad, han disminuido en los últimos años en todos los países de la unión europea. Este decremento se atribuye a unas estrategias eficaces de prevención como son el control de la hipertensión arterial y el abandono paulatino del tabaquismo en un gran grupo de población. Sin embargo, debido al envejecimiento generacional de la población europea y a la asociación directa que existe entre el riesgo de ictus y la edad, el número de personas que sufren ictus sigue aumentando. Según datos del estudio *Global Burden of Disease* de 2015 [159] y la oficina de estadística de la unión europea, se prevé un aumento del número total de episodios de ictus en la Unión Europea del 34% hasta el 2035. Las mejoras médicas acontecidas en los últimos años han permitido un aumento significativo en las tasas de supervivencia, aumentando a su vez el número de personas que viven con las secuelas del ictus y que necesitan una rehabilitación especializada, lo que conlleva una carga creciente para las familias, sociedades y sistemas sanitarios. En total se espera que aumente un 25% en media el número de supervivientes de ictus en la unión europea, así como un aumento del 45% en la mortalidad debida a esta enfermedad.

1.4.2. Consecuencias

Las personas que han sufrido un ictus pueden experimentar una gran variedad de limitaciones y complicaciones tras el accidente. Estas secuelas pueden ser de mayor o menor severidad dependiendo de diversos factores como el tipo de ictus, la zona cerebral lesionada, el tiempo transcurrido desde la aparición de los síntomas hasta la atención médica, etc. Respecto a las secuelas producidas por la enfermedad existen diferentes tipos entre las que se destacan las físicas, las cognitivas y las psicológicas.

Las secuelas físicas más comunes en un ictus son las relacionadas con las funciones motoras en las que se engloban la falta de coordinación (ataxia), la pérdida total o parcial de las funciones motoras (plejía o parálisis) y la debilidad o ausencia parcial de movimiento voluntario (paresia). Según la focalización de la paresia se pueden reconocer diversos tipos de secuelas como la monoparesia, cuando sólo se ve afectado un miembro, superior o inferior, la paraparesia, cuando afecta a ambos miembros inferiores, la hemiparesia, cuando se ven afectados los dos miembros de una mitad del cuerpo, o tetraparesia, cuando la paresia afecta a los cuatro miembros (Figura 17).

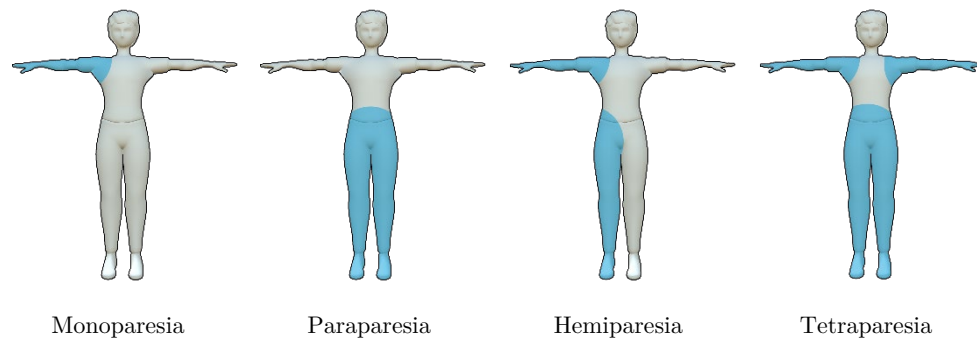


Figura 17. Tipos de paresia.

Concretamente la hemiparesia resulta ser la secuela motora más común tras un ictus. Uno de los efectos principales de esta dolencia son los problemas evidentes producidos en la marcha de los usuarios con ictus, la cual se ve ralentizada a cambio de un coste de oxígeno elevado. Estos problemas derivan en una movilidad reducida que suele desembocar en la inmovilidad o inactividad del individuo, lo que conlleva una pérdida de masa muscular, un aumento de grasa corporal, un aumento de las limitaciones de la movilidad articular y una reducción de la densidad mineral ósea.

Además, todos los individuos afectados por un ictus, con mayor o menor índice de secuelas físicas, pueden llegar a sufrir, en periodos posteriores, alguna de las siguientes complicaciones físicas:

- *Alteraciones sensitivas.* Los individuos con ictus pueden sufrir alteraciones sensoriales en el tacto, lo cual puede afectar a la sensibilidad de la piel y a la propiocepción (la percepción del tacto fino y la aptitud para ubicarlo con corrección). Esta complicación puede estar asociada a los déficits motores.
- *Hombro doloroso.* Hasta el 72% de los individuos con ictus experimentan, al menos, un episodio de hombro doloroso durante su primer año. Suele relacionarse con complicaciones motoras del miembro superior.
- *Síndrome del dolor central.* Es un dolor comúnmente presente en las extremidades de individuos con ictus, el cual está relacionado con un daño en el tálamo. El dolor empeora con el movimiento y los cambios de temperatura.
- *Variación anómala del tono postural.* Esta variación puede manifestarse como una debilidad o disminución del tono muscular, llama hipotonía, o como un aumento reflejo e involuntario del tono, llama hipertonía o espasticidad (Figura 18). La espasticidad es uno de los problemas más frecuentes tras un ictus (19-38% de los usuarios) [160,161], prevaleciendo en el 17% de los individuos con ictus tras el primer año, siendo discapacitante en el 4% de los casos [162]. Se puede definir como una alteración caracterizada por una pérdida del balance entre la contracción y relajación de los músculos que lleva a un estado rigidez y espasmos musculares involuntarios, resultantes de mínimos estímulos internos o externos [5].



Figura 18. Ejemplos de espasticidad en un usuario con ictus.

Estas dolencias no sólo suponen un gran problema a la hora de la rehabilitación y el diagnóstico de estos individuos, sino que dificultan la realización de sus actividades básicas de la vida diaria, como subir escaleras, vestirse, ir al baño o alimentarse.

A parte de las secuelas físicas, tras un ictus también son comunes diversas secuelas cognitivas. Algunas de estas secuelas pueden reproducirse durante un periodo de tiempo corto, como la desorientación y la amnesia postraumática tras el estadio del coma, o pueden llegar a ser permanentes. Dentro de este grupo existen diferentes tipos de dificultades:

- *Dificultades atencionales.* Dentro de las dificultades atencionales más frecuentes se encuentran la lentitud, la fatigabilidad, la distraibilidad, la dificultad para pasar de una tarea a otra o la dificultad para prestar atención a dos tareas simultáneamente
- *Dificultades de memoria.* Al encontrarse repartida entre múltiples regiones diferentes del cerebro [163,164], una lesión en alguna de estas áreas puede desencadenar la pérdida de memoria.

Además de las dificultades producidas, también existen diversas alteraciones que deben ser tenidas en cuenta cuando se analizan las consecuencias de un ictus.

- *Alteraciones perceptivas.* Se pueden producir alteraciones del sistema perceptivo provocando dificultades en el reconocimiento de objetos, que pueden ser de distinta naturaleza en función de las regiones dañadas.
- *Alteraciones ejecutivas.* Las funciones ejecutivas son las capacidades cognitivas más complejas que realiza el cerebro, interviniendo, por ejemplo, en formular metas, iniciar y regular una conducta, generar estrategias de actuación, organizar los pasos a seguir para alcanzar un objetivo, etc. Tras un ictus suelen verse afectadas algunas de estas funciones, alterando las capacidades del usuario en el desempeño de estas tareas.

Conjuntamente con estas secuelas, existen otras que pertenecen al ámbito psicológico. Tras un ictus es frecuente que la persona afectada muestre, en mayor o menor medida, cambios de personalidad o variaciones en su conducta. Las alteraciones psicopatológicas más importantes son:

- *Depresión.* Esta alteración ha sido la más estudiada en la bibliografía [165,166], pues su prevalencia varía desde un 20% hasta el 50% de los casos con ictus [167]. Existen muchos factores de riesgo asociados a la depresión, como la localización de la lesión, el género, la autonomía, etc. [168]. Las personas más jóvenes presentan tasas de depresión más altas [169], dato que

puede estar directamente relacionado con una mayor aceptación de la discapacidad en edades más avanzadas. El impacto de la depresión en la recuperación funcional de los individuos con ictus es importante [169]. La depresión tras el ictus está relacionada con peores resultados funcionales [170], peor calidad de vida [171] y mayor mortalidad [172].

- *Ansiedad.* La prevalencia de esta alteración también es muy elevada. Existen diversos estudios que reportan que entorno al 27% de los individuos con ictus mostrarán esta sintomatología en los tres meses siguientes al accidente [173]. El impacto de los trastornos de ansiedad en las personas con ictus se asocia con peores resultados en calidad de vida [174].
- *Labilidad emocional.* También conocido como incontinencia emocional, es una forma de desinhibición de las emociones. Las personas que los padecen presentan dificultades para suprimir sus respuestas emocionales ante niveles bajos de estimulación, por lo que sus respuestas se convierten en inapropiadas o exageradas. Los estudios existentes han reportado que en torno el 15% de los individuos con ictus habían sufrido esta alteración en algún momento [175].

Además de las alteraciones psicopatológicas existen otros trastornos conductuales consecuencia del ictus entre los que se pueden destacar: irritabilidad, agresividad, euforia, desinhibición, infantilismo, falta de juicio social, cambios frecuentes de humor y apatía.

Además de las implicaciones que todas las secuelas descritas pueden tener en la funcionalidad de los sujetos, cabe destacar su posible efecto en la capacidad de promover sensaciones más complejas como la corporización o la presencia. Por una parte, las posibles alteraciones de su esquema corporal derivados de algún grado de paresia podrían interferir, por ejemplo, en la capacidad de corporización, causando alteraciones en estos mecanismos. Por otra parte, las dificultades cognitivas podrían suponer, en igual o mayor medida, un obstáculo en la generación de estas sensaciones. Además, las alteraciones emocionales y conductuales derivadas de las diferentes alteraciones psicopatológicas podrían alterar las percepciones subjetivas, afectando el juicio de los sujetos.

1.4.3. Estudios previos sobre realidad virtual

La capacidad de la RV de recrear entornos controlados, inmersivos e interactivos, que permiten a los participantes vivir experiencias intensas y personalizadas, ha motivado su uso a nivel terapéutico en diferentes poblaciones neurológicas, especialmente en ictus, con resultados muy prometedores. La RV puede añadir beneficios a la rehabilitación convencional en tanto que permite generar estímulos adaptables a cada usuario, los cuales pueden ser registrados y analizados por los profesionales. Además, permite la gamificación⁵ de ejercicios que, en la práctica, pueden llegar a ser tediosos para los usuarios, aumentando su motivación y rendimiento [176]. Todos estos beneficios han permitido desarrollar diferentes estrategias de rehabilitación con esta tecnología. Se pueden encontrar estudios que investigan los efectos de la RV en rehabilitación motora, cognitiva y psicológica.

Respecto a la rehabilitación motora, existe una revisión, la cual se actualiza bianualmente, donde se resumen y analizan los estudios que utilizan RV para este tipo de rehabilitación. La última versión, llevada a cabo por Laver *et al.* [10] analizó los resultados de 72 experimentos en los cuales participaron un total de 2470 participantes. Los estudios fueron divididos entre los que rehabilitaban las funciones del miembro superior, la marcha, los que entrenaban las actividades de la vida diaria o los que mejoraban la calidad de vida. Los autores de esta revisión concluyeron que el uso de la RV y de los videojuegos interactivos no son más beneficiosos que una terapia convencional. En cambio, la RV sí que podría ser beneficiosa mejorando las funciones de los miembros superiores y entrenando las actividades de la vida diaria cuando se utiliza junto a la rehabilitación tradicional. Esta revisión también mostró que la cronicidad o severidad del ictus, así como el uso de sistemas comerciales o creados específicamente para el estudio no son determinantes para los resultados. Aun con las bajas correlaciones obtenidas, las gráficas (Figura 19) obtenidas de la revisión muestran que el uso de la RV para la rehabilitación sí que tiene efectos mayores que la rehabilitación tradicional en la mayoría de estudios, aunque en el meta análisis estos

⁵ La gamificación es la aplicación de estrategias, técnicas y dinámicas inherentes del juego en actividades no lúdicas.

efectos no sean significativos. Se necesitaría un incremento de los estudios controlados para permitir alcanzar esta significación esperada.

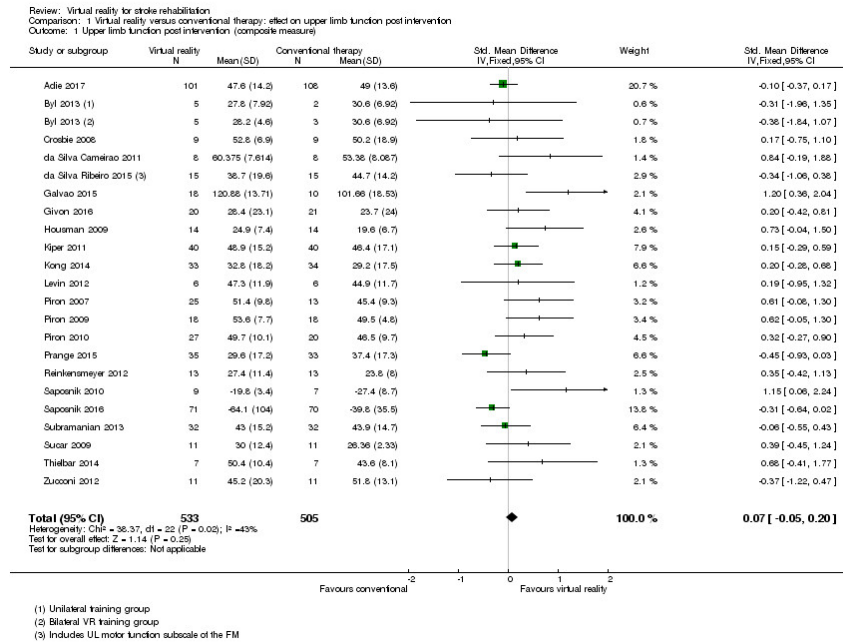


Figura 19. Comparación de estudios de realidad virtual y terapia convencional. Efecto en las funciones del miembro superior tras una intervención.

Paralelamente a la rehabilitación motora, otros estudios han investigado la posible repercusión de la RV en la rehabilitación cognitiva. Contrariamente a la rehabilitación motora, no existe ninguna revisión que resuma y analice los artículos de rehabilitación cognitiva. Tradicionalmente se han utilizado entornos basados en tareas de la vida diaria para realizar este tipo de rehabilitación. Por ello se van a analizar algunos de los más utilizados.

Diversos estudios mostraron correlaciones moderadas entre el rendimiento de sujetos sanos y con ictus en tareas relacionadas con hacer compra con diversos test neuropsicológicos [177–180]. Además, estas correlaciones también se hallaron entre el rendimiento de estas tareas cuando se ejecutaban de manera virtual y real [179]. Por otro lado se encontraron resultados similares cuando el entorno utilizado fue un centro

comercial [181]. Otros estudios demostraron que este tipo de entornos podrían promover mejoras a la hora de realizar ejercicios de multitarea [182] o de funciones ejecutivas [183]. El uso de entornos basados en tareas como cruzar la calle, conducir o caminar virtualmente podrían ser utilizados para mejorar el nivel de negligencia que padecen algunos usuarios con ictus, así como su habilidad de conducción o de retención de rutas predeterminadas, con una eficiencia comparable a las tareas de escaneo visual utilizadas tradicionalmente [184] o a las tareas relacionadas con la conducción [185] o con caminar en el mundo real [186]. Similar a estas tareas, también se han utilizado ciudades virtuales para mejorar la atención [187], las funciones ejecutivas [187] e incluso la memoria [188] de los usuarios con ictus. La efectividad de este tipo de rehabilitación basada en RV se ha estudiado junto con una terapia convencional, mostrando mejoras en los participantes en las condiciones cognitivas, en la atención y en la fluidez mental [189], y sin ella, mostrando mejorías de atención y memoria [190]. Además, este último estudio realizó la intervención con pantallas inmersivas y no inmersivas, sin encontrar efecto en la tecnología utilizada.

1.4.4. Estudios previos sobre presencia

Aunque existen multitud de estudios que investigan distintos efectos derivados de la interacción con aplicaciones de RV en individuos con ictus [191], sólo un reducido número de ellos cuantifica la sensación de presencia, pese a la gran relevancia que se ha atribuido a este constructo en la literatura.

En un artículo de Fung *et al.* [192] se analizó la presencia experimentada por un grupo de sujetos con ictus y otro de sanos que utilizaron un sistema de rehabilitación diseñado por los investigadores mediante el cuestionario PQ. En el estudio, los participantes debían navegar a través de dos EVs mediante una cinta andadora especialmente diseñada para el experimento. Un entorno mostraba una escena estática mientras el otro entorno mostraba un cruce de calles que se debía de cruzar. El estudio registró en tiempo real tanto la velocidad de la cinta como la progresión del individuo en la escena, permitiendo variar la configuración del escenario en vivo dependiendo de los resultados de estas variables. Las pruebas preliminares del sistema de rehabilitación reportaron una fuerte sensación de presencia en ambos grupos, la cual se atribuyó a la recreación, mediante la cinta andadora, de la forma de

andar de un individuo en el mundo real. Desgraciadamente, los autores no estimaron posibles diferencias entre grupos de participantes.

El artículo de Rand *et al.* [40] analizó el uso de un supermercado virtual como herramienta de evaluación. Los participantes interactuaron mediante el sistema de captura de video de GestureTek's GX (GestureTek, Toronto, Canadá), el cual les permitía navegar por la tienda virtual mediante gestos. En el estudio se comparó la presencia provocada por el entorno virtual en un grupo de sujetos con ictus y tres grupos de controles sanos, de distinta edad. Para cuantificar la presencia evocada utilizaron el *Short Feedback Questionnaire*, el cual está basado en el cuestionario de presencia PQ. Además de la presencia, se analizaron otros parámetros como el tiempo en realizar la tarea, la diversión o el esfuerzo físico. Respecto a la presencia, todos los grupos evaluaron la presencia con puntuaciones muy altas, sin que existieran diferencias significativas entre las apreciaciones de los distintos grupos. En cambio, sí se obtuvieron diferencias significativas en aquellas variables que analizaban el rendimiento de las tareas (tiempo en realizar la compra, número de productos elegidos correctamente etc.). Esto podría demostrar que, pese a las dificultades que pueden presentar los individuos con ictus al realizar tareas motoras y cognitivas, son perfectamente capaces de sentirse en el mundo virtual y formar parte de él.

1.4.5. Estudios previos sobre corporización

Tras un ictus, la posible alteración de la integridad de las vías aferentes [193], del resto del cuerpo al cerebro, y eferentes, del cerebro al resto del cuerpo, y del procesamiento de la información, puede afectar a la integración multisensorial. Dada la relevancia de estos procesos en el sentido de corporización, los sujetos que han sufrido un ictus pueden presentar alteraciones en estas percepciones [74]. Como prueba, se ha reportado que sujetos con lesiones frontales y parietales son incapaces de reconocer sus extremidades como propias [75,194]. Además, estas alteraciones no siempre están acompañadas de la incapacidad de percibir estímulos en el lado afectado, lo cual indica que no son simplemente el resultado de alteraciones en la sensación táctil asociada con la lesión en la corteza somatosensorial. Al contrario, estas observaciones sugieren que las áreas de asociación de los lóbulos frontal y parietal son responsables de generar la corporización, aunque dicen muy poco sobre cuáles son los mecanismos neuronales subyacentes a estos procesos.

H.E Van Stralen *et al.* [195] llevaron a cabo un estudio sobre el efecto del RHI en una mujer de 78 años que había sufrido un ictus. La participante presentaba trastornos psiquiátricos a partir del accidente que afectaban a su brazo izquierdo, severamente afectado a nivel sensoriomotor. Se le realizó el experimento del RHI para cuantificar la propiedad que era capaz de sentir bajo cuatro condiciones diferentes, correspondientes al acariciado síncrono y asíncrono en la mano izquierda y derecha. Cada condición fue repetida cuatro veces. Para cuantificar los resultados se registró la deriva propioceptiva [81] y la temperatura de la piel, y se utilizó el cuestionario ERHQ para medir la corporización. Los resultados más destacados aparecieron en la condición síncrona mientras se realizaba la estimulación en el lado contralateral a la lesión, mostrando una deriva propioceptiva de 8,5 cm hacia la mano de goma y una disminución de la temperatura de la piel. En lo que respecta a la sensación de corporización, se obtuvieron valores altos para la propiedad, mientras que los valores más bajos fueron registrados en las respuestas relacionadas con la agencia. Estos resultados podrían demostrar que la participante fue capaz de sentir como suya la mano donde se realizó la estimulación. Otro estudio llevado a cabo por Burin *et al.* [196] llevó a cabo el RHI convencional en una muestra de ocho sujetos con ictus tanto en la mano menos afectada como en la mano más afectada por la lesión. Los resultados evidenciaron propiedad sobre la mano de goma cuando el experimento se aplicó sobre la mano más afectada, pero, en cambio, este efecto no se replicó cuando la mano estimulada fue la contraria.

Aunque la naturaleza del ictus y sus deficiencias derivadas podrían proporcionar un marco interesante para estudiar los constructos de la corporización [78], como muestran los resultados presentados, se han realizado muy pocas investigaciones en esta población.

1.5. Limitaciones de la literatura existente

1.5.1. Presencia

Las principales limitaciones de la investigación sobre presencia en individuos con ictus se deben a dos causas principales.

Primero, los estudios hasta la fecha en sujetos con ictus se han centrado en investigar los efectos de la interacción con aplicaciones de RV, asumiendo que esta población era capaz de experimentar estas realidades de manera efectiva, de la misma manera que lo harían los sujetos sanos. Sin embargo, las consecuencias producidas por ictus podrían alterar estas percepciones, modificando la manera en que los individuos se sienten presentes en el mundo virtual, lo cual podría tener implicaciones en el efecto de la interacción.

Segundo, la fuerte relación entre presencia e inmersión, siendo esta última tan dependiente del desarrollo tecnológico, podría hacer que algunos de los hallazgos acerca de la presencia hayan dejado de ser válidos en la actualidad. Así pues, los principales axiomas de la presencia en los que se basa la literatura podrían estar variando en los últimos años debido a las diferencias tecnológicas existentes entre los dispositivos utilizados en la bibliografía y los actuales. Un ejemplo de estos cambios de axiomas puede observarse en la presencia provocada por los dispositivos de estimulación visual más representativos de la RV, como los sistemas CAVE y los HMD. Hasta hace algunos años, el sistema CAVE era capaz de generar mayor presencia que los HMD [52–55]. En cambio, los estudios actuales muestran justo lo contrario [56].

1.5.2. Corporización

Las principales limitaciones de la investigación sobre corporización en individuos con ictus se deben a tres causas principales.

Primero, el número de estudios que investigan los mecanismos de la corporización en sujetos con ictus es muy escaso, y los estudios existentes se limitan a

muestras de sujetos muy pequeñas y no controladas, lo cual dificulta la interpretación y generalización de los hallazgos.

Segundo, los estudios preliminares de corporización en sujetos con ictus parecen indicar que estos sujetos son capaces de sentir propiedad sobre una mano de goma durante la ilusión del RHI [146], concretamente, cuando se aplicaba la ilusión sobre la mano más afectada [196]. Estos estudios se limitan a analizar la corporización de los sujetos mediante medidas subjetivas como cuestionarios, que pese a ser válidos, podrían corroborarse con otro tipo de medidas no conscientes, como las respuestas fisiológicas. Sin embargo, los estudios hasta la fecha no incorporan este tipo de medidas.

Finalmente, debido a la mayor incidencia del ictus en usuarios de edad avanzada, los resultados que se obtendrían de la aplicación del RHI en estos sujetos, a priori, no podría ser comparada con los resultados de la literatura, la cual utiliza, en su mayor parte, adultos jóvenes como sujetos de los estudios.

1.5.3. Presencia y corporización

Aunque parece razonable que estar presente en un entorno virtual puede llegar a promover la sensación de tener, mover o estar en un cuerpo, y viceversa, la literatura se ha centrado en analizar cada uno de estos constructos por separado y, consecuentemente, las interacciones entre la corporización de un avatar y la presencia en un EV permanecen inexploradas. El único intento de explicar esta relación [197] sugirió que la perspectiva con la que se observaba el EV influía en la propiedad y en la localización del usuario respecto a un avatar virtual, pero no variaba la presencia ni la agencia, lo que contradice otros artículos previos que analizaron la presencia en condiciones similares [198–200]. Como ya se ha descrito previamente, la literatura existente sobre presencia e inmersión facilitada por un EV en individuos con ictus es muy escasa y, además, no existen estudios previos que analicen la corporización de estos sujetos en un EV. Por ello, las posibles relaciones entre la presencia y la corporización de individuos con ictus durante la exposición e interacción con un EV, lo que podría afectar a la experiencia y al comportamiento en estos entornos, se desconocen.

1.5.4. Sistemas de estimulación visual y de registro corporal

Para la consecución de los experimentos necesarios para solventar las preguntas que han surgido al realizar el análisis de las limitaciones son necesarios el uso de dispositivos de estimulación visual y de registro corporal. Para poder ser utilizados en los experimentos, estos dispositivos deben de caracterizarse, eligiéndose así el sistema más óptimo para cada experimento. El sistema de estimulación visual elegido deberá mostrar el EV donde poder analizar la relación entre la presencia y la inmersión, así como hallar la posible relación entre la presencia y la corporización de usuarios con ictus al variar la perspectiva y la inmersión. El sistema de registro corporal será utilizado para controlar la interacción con el EV por medio de un avatar controlado sincronamente.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis principal

La hipótesis principal del presente trabajo fue que la sensación de presencia y corporización en un entorno de RV se mantienen tras un ictus y se ven igualmente modulados por la perspectiva y la inmersión que en usuarios sanos.

1.6.2. Hipótesis secundarias

Derivadas de la hipótesis principal, se plantearon las siguientes hipótesis secundarias:

Primero, se esperó que los avances tecnológicos en los dispositivos de estimulación no hubieran modificado la relación entre presencia e inmersión, por la cual, a igualdad de contenido, debería obtenerse una sensación de presencia más intensa a mayor nivel de inmersión.

Segundo, aunque la mayor parte de los estudios de corporización se habían llevado a cabo en adultos jóvenes, se esperaba que la capacidad de corporización se mantuviera con la edad, lo cual respaldaría el efecto de algunas aplicaciones en población sana de edad avanzada. Esta hipótesis también apoyaría, parcialmente, la hipótesis principal, puesto que el ictus tiene una incidencia predominante en individuos con edades más avanzadas.

Tercero, como la capacidad de corporización se mostró transparente a la naturaleza de los estímulos, se esperó que la corporización tras un ictus también se evidenciara en el mundo real.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo principal

Teniendo en cuenta la hipótesis principal del presente trabajo, el objetivo principal del mismo fue determinar y comparar la sensación de presencia y corporización en un entorno de RV de un conjunto de sujetos sanos y con ictus ante distintas condiciones de inmersión y representación espacial.

1.7.2. Objetivos secundarios

Considerando las hipótesis descritas anteriormente, los objetivos secundarios de este trabajo fueron:

Primero, caracterizar los dispositivos de visualización y seguimiento corporal disponibles.

Segundo, determinar la sensación de presencia en sujetos sanos bajo distintas condiciones de inmersión.

Tercero, determinar la sensación de corporización en sujetos sanos de distintas edades.

Finalmente, determinar la sensación de corporización en sujetos que habían sufrido un ictus en un entorno real con medidas subjetivas y objetivas.

1.8. Estructura de la tesis

El presente trabajo se ha dividido en cuatro capítulos principales y una sección de anexos.

En el Capítulo 1 se introduce la motivación de este trabajo. Se definen los conceptos de RV, presencia y corporización, explicando sus posibles medidas y realizando un estado del arte sobre la bibliografía previa que las ha utilizado.

En el Capítulo 2 se describen y caracterizan los instrumentos utilizados en la experimentación. En concreto se describen los sistemas de estimulación visual Oculus Rift y HTC Vive, los sistemas de registro corporal Kinect v1 y Kinect v2 y los sistemas de registro fisiológico Q Sensor y Refa, los cuales permiten medir la EDA, la temperatura de la piel y el sEMG. Además de la descripción, se presentan estudios donde se caracterizan tanto los sistemas de estimulación visual como los de registro corporal y fisiológico.

En el Capítulo 3 se describen los estudios realizados para investigar todas las hipótesis planteadas. El primer estudio trató de determinar la posible relación existente entre la presencia y la inmersión en un entorno de RV con una muestra de usuarios sanos. Para ello se desarrolló un EV interactivo que hacía uso del sistema de estimulación audiovisual y de registro corporal caracterizados previamente. El segundo estudio investigó el papel de la edad en la corporización. Para obtener esta variable se aplicó el paradigma del RHI a una muestra de sujetos sanos de los cuales se obtuvieron registros subjetivos, conductuales y fisiológicos. El tercer estudio comparó la intensidad de corporización generada por esta misma ilusión en sujetos con ictus y sujetos sanos. En este estudio también se analizaron respuestas fisiológicas. El último estudio caracterizó la relación entre la presencia y la corporización, tanto en sujetos sanos como con ictus, dentro de la RV.

En el Capítulo 4 se resumen las conclusiones presentadas en los estudios descritos en el capítulo anterior.

En la Sección Anexos se proporcionan los cuestionarios empleados en los experimentos llevados a cabo.

Finalmente, se listan las referencias bibliográficas, así como los méritos relacionados con el trabajo descrito en el presente documento

Capítulo 2.

*Caracterización de los sistemas de
estimulación y registro*

2.1. Sistemas de estimulación visual

A lo largo de la historia se han presentado multitud de sistemas que han facilitado la inmersión en entornos de RV. En 1956 el cinematógrafo Morton Heilig diseñó el primer sistema de RV, al que denominaría Sensorama [201] (Figura 20a). Este sistema introducía al usuario en el EV combinando video 3D a color, audio, estimulación vibro-táctil, olor e incluso efectos atmosféricos como aire o agua, creando un sistema altamente inmersivo. A lo largo de los años, los dispositivos fueron perfeccionándose, hasta que Ivan Sutherland presentó en 1968 el primer HMD, bajo el nombre “La espada de Damocles” [202] (Figura 20b)⁶. Este primer HMD contaba con una serie de elementos móviles y cámaras que permitían al usuario observar formas en 3D que cambiaban de perspectiva respondiendo a los movimientos de la cabeza. El dispositivo nunca salió al mercado debido, entre otras cosas, a que su peso le obligaba a estar suspendido del techo por diversos brazos mecánicos, como si de un periscopio se tratara. Al contrario, otros sistemas comerciales fueron apareciendo con el tiempo, como el sistema Sega VR o el Virtual Boy, pero ninguno llegó a extenderse ampliamente en el mercado.



a



b

Figura 20. Ejemplos de los primeros dispositivos de realidad virtual. a) Simulador Sensorama y b) dispositivo “espada de Damocles”.

⁶ Ivan Sutherland fue premiado con el Premio Fundación BBVA – Fronteras del Conocimiento el 19 de febrero de 2019 en la categoría de Tecnologías de la Información y la Comunicación por revolucionar la interacción humano-máquina a través de los gráficos por ordenador y de la realidad virtual.

En los últimos años se han presentado un número creciente de HMDs [26–28,203], debido, en gran parte, al creciente interés en la RV. Estos dispositivos presentan grandes mejoras respecto a los sistemas desarrollados hasta el momento, aumentando la resolución de las pantallas, incrementando su FOV y, sobre todo, obteniendo frecuencias de refresco de pantalla más altas. Asimismo, los nuevos HMD permiten a los usuarios moverse libremente dentro de un entorno limitado gracias a la inclusión de mecanismos de seguimiento incorporados que estiman la posición y orientación de la cabeza en tiempo real. Este seguimiento es determinante para los entornos de RV en los que el usuario debe moverse como, por ejemplo, simuladores de navegación o aplicaciones de rehabilitación motora. En cambio, sus características y fiabilidad no han sido investigadas.

2.1.1. Oculus Rift

El sistema Oculus Rift es un HMD desarrollado y fabricado por Oculus VR, una división de Facebook Inc (Facebook Inc., Cambridge, MA, EEUU). Este sistema ha pasado por diversos modelos de preproducción (Figura 21), dos de los cuales fueron vendidos al público, si bien permanecían todavía en desarrollo.



Figura 21. Versiones para desarrolladores del sistema Oculus Rift presentadas en a) 2013 y b) 2014 correspondientemente.

La primera versión de este HMD (Figura 21a) contaba con una resolución de 640x800 píxeles por ojo y un FOV diagonal de 110°. La segunda versión (Figura 21b) realizó mejoras sobre la versión ya existente aumentando la resolución y el refresco de pantalla. Además, incorporó un sistema de posicionamiento que permitía el

seguimiento del casco en un área muy limitada. Finalmente, el 28 de marzo de 2016 fue lanzando la versión definitiva del sistema, la cual ya estaba pensada para usuarios finales. Esta última versión cuenta con dos pantallas *Pentile OLED* con una resolución de 1080x1200 por ojo, un refresco de pantalla de 90 Hz y 94° de FOV horizontal y 93° de vertical. Además, cuenta con un sistema integrado de auriculares que proporcionan un efecto de audio 3D.

El sistema de seguimiento del casco utiliza una cámara infrarroja en forma de micrófono, llamada sensor Constellation. El sensor está diseñado inicialmente para ser fijado en una mesa convencional e inclinado hacia el HMD, aunque cuenta con un sistema desmontable y puede ser colocado en otro lugar. El casco está equipado con una serie de LEDs infrarrojos situados bajo su superficie y configurados para parpadear realizando un patrón específico. Al conocer previamente la configuración de los LEDs y su patrón, el sistema puede determinar la posición del dispositivo. La integración del sistema con el software de desarrollo utilizado se realizó mediante el *plugin* 1.10.0 conferido por el fabricante de Oculus Rift (Figura 22).



Figura 22. Sistema Oculus Rift CV1 formado por *a)* el casco de visualización y por el *b)* módulo de seguimiento Constellation.

2.1.2. HTC Vive

El sistema HTC Vive (Figura 23) es un HMD desarrollado por HTC (HTC Corporation, Taoyuan City, Taiwan) y Valve Corporation (Valve Corporation, Kirkland, WA, EEUU). El sistema fue presentado en marzo de 2015 y lanzado finalmente el 7 de junio de 2016.

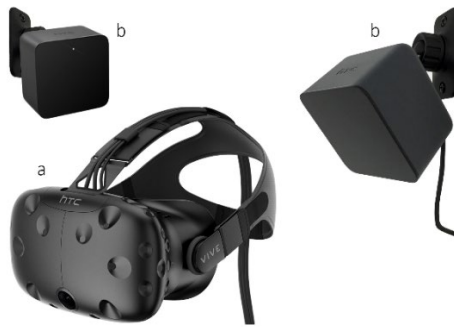


Figura 23. Sistema HTC Vive formado por *a)* el casco de visualización y *b)* por diversos módulos de seguimiento.

El casco de visualización del sistema cuenta con dos paneles OLED con una resolución de 1080x1200 píxeles por panel, un refresco de pantalla de 90 Hz y un FOV de 110° horizontal y de 113° vertical. Este sistema cuenta con una cámara localizada en la parte delantera del casco que permite observar el entorno que rodea al usuario sin necesidad de quitarse las gafas. Esta cámara también permite identificar objetos estáticos cercanos al casco, advirtiendo al usuario de una posible colisión.

Respecto al posicionamiento, el sistema HTC Vive utiliza dos estaciones base diseñadas para ser fijadas en la pared, por encima de la altura de la cabeza (idealmente sobre 2 m) que deben colocarse una frente a la otra a una distancia máxima de 5 m inclinadas hacia el HMD (Figura 23). De forma similar a los faros, las estaciones base incluyen una serie de LEDs estacionarios que parpadean a 60 Hz y dos emisores de láser giratorios activos que arrojan un rayo de luz después de cada flash. El casco contiene una constelación de fotodiodos que recibe esta información infrarroja estimando la posición y orientación del casco a partir del retardo entre el

flash recibido por el conjunto de fotodiodos y el emitido por el emisor giratorio. La integración del sistema con el software del estudio se realizó mediante el *plugin* 1.1.1 otorgado por el fabricante de HTC Vive⁷.

2.1.3. Características de los sistemas estimulación visual

Las características de los sistemas Oculus Rift y HTC Vive se muestran en la (Tabla 3).

Tabla 3. Comparativa de las especificaciones de los sistemas Oculus Rift y HTC Vive.

	<i>Oculus Rift</i>	<i>HTC Vive</i>
Pantalla	OLED	OLED
Tamaño de pantalla	90 mm · 2456 ppi	91,9 mm · 2447ppi
Resolución	2160x1200 píxeles	2160x1200 píxeles
Frecuencia de refresco de pantalla	90 Hz	90 Hz
Campo de visión:		
Horizontal	94°	110°
Vertical	93°	113°

⁷ Tanto el sistema Oculus Rift como el HTC Vive necesitan un ordenador con gran potencia de procesamiento (con respecto a las especificaciones estándar del momento) para funcionar. Para este estudio se utilizó un ordenador de gama alta preparado para RV, equipado con un Intel® Core™ i7-6700K 8 núcleos a 4,00 GHz, 16 GB de RAM y una NVIDIA® GeForce® GTX 980 con 12 GB de GDDR.

Capítulo 2

Tipo de lentes	Fresnel	Fresnel
Ajuste de la lente	IPD (58–72 mm), distancia Inter pupilar (ajustable)	IPD (60.8–74.6 mm), distancia Inter pupilar (ajustable)
Sensores	Acelerómetro, giroscopio y magnetómetro	Acelerómetro y giroscopio
Cámara integrada	No	Sí
Audio	Micrófono, auriculares de audio espacial 3D supra aurales integrados (extraíbles)	Micrófono, acople para sonido externo
Conexiones inalámbricas	Bluetooth	Bluetooth
Puertos	Conector propietario (HDMI/USB 3.0)	HDMI 1.4, USB 3.0 2
Materiales usados	Plástico, tejido infrarrojo transparente, cristal y espuma de caucho.	Plástico, cristal y espuma de caucho.
Peso (cable no incluido)	470 g	563 g

2.1.4. Estudio comparativo de sistemas de estimulación visual

2.1.4.1 Hipótesis y objetivos

La hipótesis principal del estudio fue que los nuevos sistemas de estimulación visual tenían las características óptimas para ser utilizados como una alternativa factible para su uso en aplicaciones de salud basadas en RV.

Por ello, el objetivo de este estudio fue doble: en primer lugar, comparar el área de trabajo, la precisión y el *jitter* que producen los diversos sistemas de seguimiento de los cascos de RV más reconocidos de la última generación, el sistema Oculus Rift y el HTC Vive, y, en segundo lugar, determinar el rango de trabajo de los dos sistemas⁸.

2.1.4.2 Procedimiento

Se analizaron una serie de variables objetivas para comparar ambos sistemas de seguimiento:

- *Área de trabajo*. Área donde los sistemas de seguimiento eran capaces de rastrear los cascos de RV. Ambos fabricantes recomendaban un área de trabajo inicial para el funcionamiento óptimo de su sistema.
- *Precisión*. Diferencia entre la posición real del casco y la posición que indicaban los sistemas de seguimiento.
- *Jitter*. Variación o error en la posición que indicaban los sistemas de seguimiento cuando el casco se encontraba totalmente detenido en un punto.

Para estimar el área de trabajo, la precisión y el *jitter* se diseñó una rejilla sobre el suelo de 10×10 cuadrados de 50×50 cm cubriendo un área de 25 m². La cámara de seguimiento de Oculus Rift se fijó a una altura de 70 cm, centrada a lo largo del eje

⁸ Los resultados de este estudio se encuentran publicados en el siguiente trabajo: Borrego A., Latorre J., Alcañiz M., Llorens R. Comparison of Oculus and HTC Vive – Feasibility of the tracking system for virtual reality-based rehabilitation. *Games for Health Journal*, 2018. 7 (2).

x, en $x=2,5$ m, $y=-0,75$ m. Las estaciones base del HTC Vive fueron colocadas en un lateral de la rejilla a una altura de 250 cm, en las posiciones $x=1,5$ m, $y=3,0$ m y $x=5,0$ m, $y=-0,5$ m, respectivamente, una orientada hacia la otra e inclinadas 40° , a la distancia máxima recomendada por el fabricante (5 m) (Figura 24b).

Los HMD fueron colocados secuencialmente en todos los puntos de intersección y bordes de la rejilla (121 puntos en total) a 1,7 m y 1,3 m, las alturas aproximadas de la cabeza de un sujeto cuando este se encuentra de pie y sentado, respectivamente. Se utilizó un dispositivo específicamente diseñado que impidió el movimiento de los HMD y permitió el ajuste de la altura [56,204]. En aquellos puntos donde los datos de seguimiento estaban disponibles, se registró durante 5 s la posición de cada HMD, siempre orientados en dirección $-\vec{y}$ (Figura 24). Ambos dispositivos no fueron medidos a la vez.

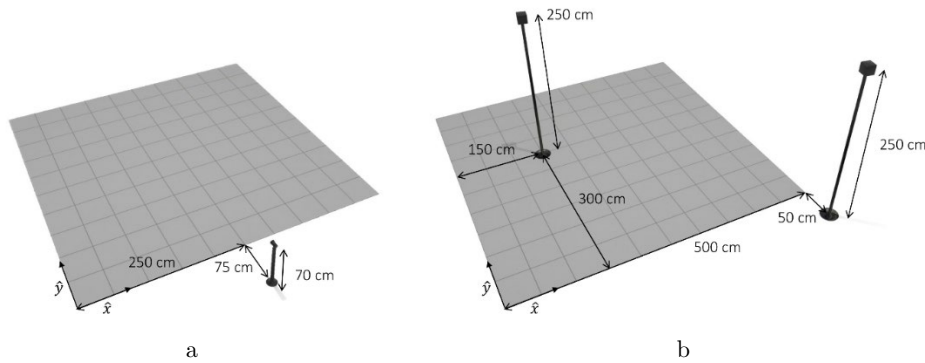


Figura 24. Posicionamiento de los dispositivos de seguimiento para el sistema a) Oculus Rift y b) HTC Vive.

Para estimar el rango de trabajo de ambos sistemas, se fijó una cinta métrica en el suelo a lo largo del eje longitudinal de la cámara de seguimiento del sistema Oculus Rift y otra en el mismo eje en una de las estaciones base del sistema HTC Vive. Siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente, con la posición de ambos HMD siempre orientada a la cámara de seguimiento o estación base, se registraron las posiciones cada 25 cm durante 5 s en ambas alturas, 1,3 m y a 1,7 m, alejándose de los sensores de seguimiento hasta que no se obtuvieran datos de posicionamiento.

2.1.4.3 Análisis de los datos

Análisis de señal

La precisión (p) fue estimada como la diferencia media entre la posición del HMD medida en el mundo real y su posición estimada. El *jitter* (j) fue calculado como la desviación estándar de la posición estimada en un intervalo de tiempo.

$$p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i - \tilde{X}_i|$$

$$j = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{X_i^2}{N} - \bar{X}^2}$$

, donde N es el número de mediciones proporcionadas por el sistema de seguimiento en 5 s, la cual depende del tamaño del área de seguimiento; X_i es la posición real de la cámara; \tilde{X}_i es la posición estimada; y \bar{X} es la posición media durante estos 5 s. Se estimaron la media y la desviación estándar para la precisión y el *jitter*. Los datos se analizaron por separado dentro y fuera del área de trabajo recomendada por los fabricantes: un círculo de radio de 50 cm centrado en el eje longitudinal de la cámara y a 1,25 m de distancia de la cámara de seguimiento, en el caso del Oculus Rift, y el área interna del rectángulo definido por las estaciones base, en el caso del HTC Vive. Todos los análisis se realizaron con el programa MATLAB 2013b (The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA).

2.1.4.4 Resultados

Los resultados experimentales mostraron un área de trabajo de 11,75 m² para el sistema Oculus Rift y 24,87 m² para el sistema HTC Vive en las diferentes alturas, las cuales superaron en gran medida las áreas de trabajo recomendadas máximas de 2,75 m² y 6,25 m² para ambos dispositivos, respectivamente. El área de trabajo de ambos dispositivos se muestra en la Figura 25.

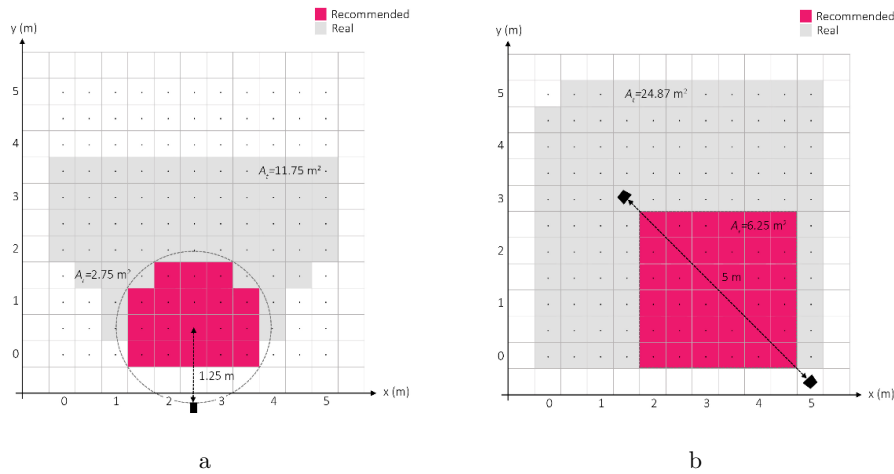


Figura 25. Comparación del área de trabajo recomendada y real registrada para el sistema a) Oculus Rift y b) HTC Vive.

Respecto a la precisión y al *jitter*, ambos dispositivos obtuvieron mejores resultados en ambos parámetros dentro del área de trabajo recomendada (Tabla 4). Se obtuvieron valores similares para la precisión y el *jitter* en ambas alturas para ambos dispositivos, a excepción de la precisión del HTC Vive, que era mejor en alturas más bajas. Los dos HMDs mostraron un rendimiento comparable en la altura de 1,3 m, ya sea dentro del área de trabajo recomendada o fuera de ella. Sin embargo, en la altura de 1,7 m, el HTC Vive presentaba una precisión menor y un *jitter* superior.

El rango de trabajo del sistema de seguimiento Oculus Rift fue de 4,25 m en ambas alturas, comenzando a 0,25 m de distancia de la cámara. El HTC Vive presentó un mayor rango de trabajo, 6,75 m y 7 m a la altura de 1,3 m y 1,7 m respectivamente.

Tabla 4. Valores medios de la precisión y el *jitter* de los sistemas de estimulación visual a diferentes alturas, tanto dentro como fuera del área de trabajo. Los datos están expresados en términos de media y desviación estándar.

	<i>En el suelo (0 m)</i>		<i>Sentado (1,3 m)</i>		<i>De pie (1,7 m)</i>	
	<i>Oculus Rift</i>	<i>HTC Vive</i>	<i>Oculus Rift</i>	<i>HTC Vive</i>	<i>Oculus Rift</i>	<i>HTC Vive</i>
Precisión(cm)						
Dentro	-	0,58±0,45	0,76±0,53	0,75±0,69	0,61±0,55	1,22±1,18
Fuera	-	0,85±0,84	1,03±0,74	0,93±0,72	0,92±0,75	1,49±1,38
Jitter (mm)						
Dentro	-	0,19±0,26	0,12±0,18	0,23±0,33	0,13±0,46	0,31±0,56
Fuera	-	0,27±0,37	0,25±0,48	0,32±0,44	0,36±0,54	0,44±0,99

2.1.4.5 Discusión

En este estudio se comparó el área de trabajo, la precisión, el *jitter* y el rango de funcionamiento de dos HMD de última generación. El HTC Vive proporcionó un área de trabajo de casi 25 m², el doble del área dada por el sistema Oculus Rift. Respecto al área de trabajo, también fue superior el sistema HTC Vive con una distancia alcanzable de 7 m respecto a los 4,25 m del sistema Oculus Rift. Ambos dispositivos mostraron un excelente rendimiento en términos de precisión y *jitter*.

Tanto el sistema Oculus Rift como el HTC Vive proporcionaron un área de trabajo que superó en gran medida los requisitos espaciales de la gran mayoría de los juegos serios o de las aplicaciones de rehabilitación motora no inmersivas basadas en RV utilizadas hasta el momento [9,205–209]. Además, las áreas de trabajo de estos HMD de última generación podrían mejorar los entornos utilizados habitualmente en las aplicaciones de rehabilitación motora como cocinas [210,211], pasillos de supermercados, [212,213] o calles [32,214] permitiendo una navegación natural,

replicando así la rehabilitación tradicional. La navegación dentro de estos entornos virtuales se ha realizado comúnmente mediante periféricos externos (joysticks, teclados, etc.). En cambio, la precisión de estos nuevos sistemas podría superar esta abstracción y permitir la navegación y exploración del EV de manera similar a la del mundo real. Esta capacidad también podría combinarse con otras técnicas para ampliar “virtualmente” el área útil de trabajo, como la generación dinámica de caminos [215], la redirección del camino o *redirect walking* [216] o la compresión de movimiento [217]. La navegación podría ser especialmente factible con el sistema HTC Vive, cuya área de trabajo es el doble de grande que el área proporcionada por Oculus Rift. El uso de dos estaciones base en HTC Vive, en contraste con el uso de una sola cámara en Oculus Rift, y su mecanismo de seguimiento específico, podría explicar esta diferencia. La incorporación de más cámaras a la configuración del Oculus Rift, que se habilitó a partir de la versión 1.6, publicada tras la realización del estudio, permitiría aumentar el área de trabajo, lo que podría, potencialmente, mejorar los resultados. Es importante resaltar que estas cámaras no estaban incluidas en el paquete estándar cuando se realizó el estudio⁹.

La gran área de trabajo del HTC Vive podría explicar su peor precisión para la altura de 1,7 m. Este hecho podría evidenciar una dependencia de la distancia con esta variable, que parece ser mayor para Oculus Rift. Sin embargo, el rendimiento de ambos sistemas de seguimiento, incluso en el peor de los casos, debe destacarse y ponerse en contexto. En primer lugar, la precisión del sistema Oculus Rift, cuyo valor promedio osciló entre 0,6 cm y 1,2 cm, representa menos del 0,35% de su rango de trabajo. A su vez, la precisión del seguimiento del HTC Vive, cuyo valor promedio osciló entre 0,9 cm y 1,5 cm, representa menos del 0,21% de su rango de trabajo. En segundo lugar, en ambos sistemas se observaron precisiones mayores, a ambas alturas, que los sistemas basados en cámaras ópticas o electromagnéticas, utilizados tradicionalmente en los sistemas de rehabilitación y en los EV de juegos serios, a la vez que proporcionaron un área de trabajo más grande [218]. En tercer lugar, en el caso del *jitter*, la diferencia fue todavía más notable. Los sistemas incluidos en el análisis introdujeron un *jitter* de sólo un 10% del proporcionado por otros sistemas de seguimiento de movimiento utilizados comúnmente en RV [218]. En cuarto lugar,

⁹ La versión que incluía más de un sensor fue lanzada el 14 de julio de 2017.

aunque la precisión del seguimiento de la cabeza de los HMD resultó ser hasta tres veces peor que las soluciones ópticas basadas en marcadores [56], el *jitter* fue hasta tres veces menor que en estos sistemas. Además, los HMD analizados no requieren de la fijación de múltiples marcadores al techo, lo que hace que el ajuste sea más fácil y asequible. Finalmente, y más importante, los resultados deben tener en cuenta la percepción humana. La cabeza de un individuo que observa de forma pasiva información visual estática en una pantalla LCD realiza una serie de movimientos anatómicos involuntarios en torno a 2 cm de promedio, con picos de 3 a 4 cm [219]. Estos movimientos involuntarios e imperceptibles para el individuo son del orden de 45 a 90 veces más grandes que el *jitter* introducido por los sistemas analizados. Curiosamente, la oscilación natural de la cabeza en condiciones similares fue casi de dos órdenes de magnitud mayor que el *jitter* proporcionado por el seguimiento de la cabeza de los HMD, lo que podría hacerlo virtualmente imperceptible previniendo así mareos y otros efectos secundarios.

Como conclusión, se podría afirmar que los resultados experimentales del área de trabajo, la precisión y el *jitter* en los HMD de última generación respaldan el uso de estos dispositivos no solo como una alternativa factible para su uso en aplicaciones de salud basadas en RV o en sistemas de rehabilitación motora, sino también para permitir la navegación y la exploración de entornos virtuales de tamaño real, sin ningún efecto adverso notable.

2.2. Sistemas de registro corporal

Los sistemas de seguimiento son usados comúnmente en intervenciones basadas en RV para detectar los movimientos de los usuarios en el mundo real y transferirlos a un EV. Existen diferentes soluciones basadas en diferentes principios físicos, los cuales definen principalmente sus parámetros de rendimiento.

Para hacer posible la interacción 3D con el EV es necesario establecer la correspondencia entre los movimientos en el mundo real y virtual. La interacción de los usuarios puede ser facilitada por diferentes dispositivos, tales como sistemas de seguimiento, dispositivos de control (mandos), rastreadores oculares (*eye-trackers*), guantes, etc. Los sistemas de seguimiento ubican la posición de marcadores o sensores específicos en el mundo real y transfieren su posición 3D al EV [220]. En consecuencia, es posible conocer la ubicación de extremidades, articulaciones u otras partes del cuerpo al fijar estos marcadores o sensores en esos puntos anatómicos. Existen diferentes tecnologías de seguimiento que dependen del principio físico en el que se basan: magnético, óptico, mecánico, inercial, híbrido, etc. Los recientes avances en la visión artificial han facilitado la obtención de la pose humana utilizando imágenes de profundidad [221]. A pesar de que no se puede considerar como un sistema de seguimiento en el sentido literal, el seguimiento del esqueleto proporciona la posición 3D de muchas articulaciones del cuerpo.

Independientemente de la tecnología utilizada, los sistemas de seguimiento se pueden clasificar de acuerdo con sus parámetros de rendimiento: precisión, *jitter*, latencia, etc. [222]. El rendimiento de los sistemas de seguimiento afecta directamente a la experiencia virtual, ya sea debido a factores físicos o psicológicos [223]. Por ejemplo, una precisión deficiente puede causar incongruencias entre el movimiento y su representación en el EV, el uso de sensores portables o *wearables* puede afectar los patrones de movimiento, etc. Estas incongruencias con la interacción natural pueden afectar la inmersión en el EV. Además, un mal desempeño puede causar medidas erróneas produciendo una interpretación poco rigurosa. Esto es especialmente crítico en las aplicaciones de rehabilitación motora.

Para que un sistema de seguimiento sea inmersivo, y por lo tanto permita promover una gran sensación de presencia, debe replicar el movimiento en el EV de forma ecológica con la realidad y ser poco invasivo. Siguiendo estos principios, para

los estudios presentados en el presente trabajo (Sección 3.1 y 3.4) fue utilizado el sistema Kinect, desarrollado por Microsoft (Microsoft, Redmond, WA, EEUU), un sistema basado en una cámara de profundidad de bajo coste, que permite capturar la posición de las principales articulaciones humanas sin necesidad de colocar ningún marcador ni sensor en el cuerpo del individuo.

La Kinect es una cámara infrarroja de bajo coste que permite la captación y el seguimiento de una persona, estimando la posición y rotación 3D de sus principales articulaciones. La captación de estos puntos permite capturar el movimiento del cuerpo humano y transmitir esta información al mundo virtual, permitiendo al usuario interactuar con el EV mediante sus movimientos reales, sin la necesidad de portar sensores o marcadores. Inicialmente el dispositivo fue pensado para ser usado en sistemas de videojuegos pero su uso se ha extendido a otros campos, como la medicina y la rehabilitación, donde se ha utilizado, por ejemplo, para evaluar parámetros espaciotemporales [224] y cinemáticos [225,226] de la marcha humana.

Actualmente existen dos versiones de este dispositivo cuyas principales diferencias son la tecnología utilizada para obtener la captura del movimiento y la resolución de las cámaras¹⁰.



Figura 26. Versiones del dispositivo Kinect. A la izquierda la *a*) Kinect v1 y a la derecha la *b*) Kinect v2.

¹⁰ Microsoft presentó la versión 4 de la Kinect el 21 de marzo de 2019 renombrada como Kinect Azure. La 3ª versión del dispositivo se encontraba integrada con el casco de realidad mixta Hololens y no se podía utilizar por separado.

2.2.1. Microsoft Kinect v1

La primera generación de dispositivos Kinect (Figura 26a) apareció en el mercado en noviembre de 2010. Tras dos años, en febrero de 2012, Microsoft lanzó un kit de desarrollo de software que permitiría la conexión de este dispositivo con el ordenador. La primera versión de Kinect incluía una cámara RGB de 640x480 píxeles con un filtro de Bayer trabajando a 30 fotogramas por segundo, y era capaz de funcionar a 1280x1024 disminuyendo la frecuencia de muestreo. La cámara de profundidad y la infrarroja contaban con una resolución de 640x480 píxeles. Esta cámara incorporaba un mecanismo de inclinación motorizado que le permitía ajustarse automáticamente dependiendo de su colocación.

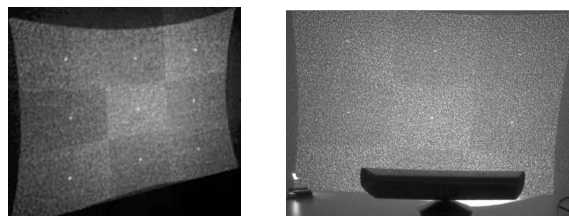


Figura 27. Patrón de haces de luz infrarroja emitidos por la Kinect v1 y capturados mediante una cámara de visión nocturna.

La Kinect v1 estimaba la profundidad mediante una tecnología llamada “principio de proyección de patrones” o “luz estructurada”, mediante la cual un patrón infrarrojo conocido es proyectado sobre la escena y, a partir de su distorsión, es

posible estimar la profundidad. Para ello, el sistema constaba de una fuente y un sensor de infrarrojos distribuidos en su eje longitudinal. La fuente infrarroja emitía un haz que se dispersaba en un patrón específico de motas que se proyectaba continuamente sobre la escena [227], utilizando una técnica de codificación de luz para evitar la sincronización con otras posibles fuentes (Figura 27). En primer lugar, el sensor de profundidad proyectaba el patrón sobre una superficie lisa a una distancia conocida para poder calibrarse. Una vez calibrado el sistema, la información de profundidad podía ser estimada a partir de la disparidad que existía entre cualquier objeto que infiriera en el campo de visión de la cámara de profundidad y el patrón original creado en la calibración [228]. El procesamiento de estimación de la pose analizaba cada píxel de la imagen de profundidad y lo clasificaba como parte del fondo o parte del usuario. Esta decisión era llevada a cabo por un algoritmo entrenado con un gran número de poses humanas para estimar la probabilidad de que cada píxel perteneciera a un segmento del cuerpo de una posible pose humana. Finalmente, el algoritmo calculaba la posición de 20 articulaciones del cuerpo que definían el esqueleto más plausible que se ajustaba a la postura (Figura 29a) [221].

2.2.2. Microsoft Kinect v2

La segunda versión de Kinect (Figura 26b) fue lanzada en noviembre de 2013 e incluye diversas mejoras respecto a su antecesora. Esta versión incorpora una cámara RGB con una resolución de 1920x1080 píxeles funcionando a 30 fotogramas por segundo, y mejora, además, el resto de sensores y tecnologías utilizadas, pudiendo incluso llegar a realizar el seguimiento de los usuarios a oscuras gracias a su sensor infrarrojo activo.

La tecnología que utiliza la cámara de profundidad en este dispositivo se denomina *Time-of-Flight* (Figura 28). Esta tecnología determina la profundidad de la escena emitiendo un haz de luz y calculando el tiempo desde la emisión hasta una posible recepción del mismo al rebotar en algún objeto [229].

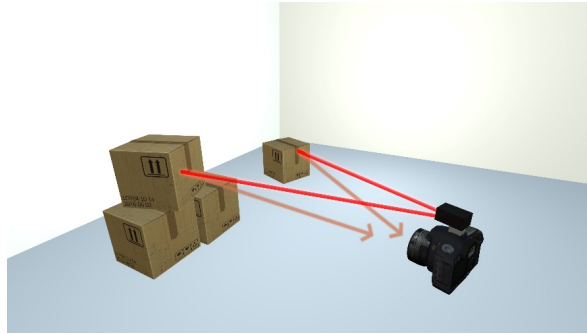


Figura 28. Esquema del funcionamiento de una cámara Time-of-Flight.

Para llevar a cabo este procedimiento, La Kinect v2 emite constantemente luz infrarroja modulada en intensidad en el espectro cercano. Debido a la distancia existente entre la fuente emisora del infrarrojo y el objeto a detectar, se produce un desplazamiento temporal en la señal óptica que equivale a un desplazamiento de fase en la señal periódica. Este cambio se detecta en cada píxel del sensor y puede transformarse fácilmente en la distancia (d) entre el sensor y el objeto [230].

$$d = \frac{c\varphi}{4\pi}$$

, donde d es la distancia, c la velocidad de la luz y φ el desplazamiento temporal.

Por lo tanto, la Kinect v2 emite constantemente luz infrarroja con ondas moduladas y detecta la fase desplazada de la luz que regresa a la óptica [231]. Para realizar todo ello, la cámara cuenta con una serie de componentes:

- *Unidad de iluminación.* Se utilizan una serie de LEDs infrarrojos que son capaces de modular la luz a alta velocidad.
- *Óptica.* Una lente recoge la luz reflejada y la envía al sensor de imagen. La óptica contiene un filtro paso banda que sólo permite pasar la luz que tenga la misma longitud de onda que la emitida por la unidad de iluminación suprimiendo el ruido de otras fuentes.
- *Sensor de imagen.* Es el encargado de medir el tiempo que tarda la luz desde la unidad de iluminación hasta el objeto y de vuelta al sensor.

- *Controlador electrónico.* Se encarga de sincronizar la unidad de iluminación y el sensor, para lo que incorpora un procesador a alta frecuencia que permite enviar la señal en pocos picosegundos. Cuanto más lento sea este procesador más error podrá existir en la medida.

Con todos estos componentes la cámara es capaz de diferenciar la luz que se refleja en los objetos de una habitación y el entorno circundante, proporcionando una estimación de profundidad que permite calcular la forma de los objetos que observa [231]. El procesamiento de estimación de la pose la realiza de una forma similar a la Kinect v1, analizando píxel por píxel de la imagen de profundidad y clasificándolo según unas bases de datos almacenadas previamente en el *software*. Esta nueva versión del sistema Kinect permite analizar 25 articulaciones de 6 esqueletos diferentes al mismo tiempo (Figura 29b).

2.2.1. Características de los sistemas de registro corporal

Las características de los sistemas Kinect v1 y Kinect v2 se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de los sistemas de seguimiento y de estimación de la pose Kinect v1 y Kinect v2.

	<i>Kinect v1</i>	<i>Kinect v2</i>
Cámara de color	640x480 píxeles	1920x1080 píxeles
	30 Hz	30 Hz
Cámara de profundidad	640x480 píxeles	512x424 píxeles
Distancia de profundidad		
Máxima	3,5 m	4,5 m
Mínima	40 cm en modo cercano	50 cm

Campo de visión		
Horizontal	57°	70°
Vertical	43°	60°
Motor de inclinación	Sí	No
Articulaciones identificadas	20	25
Esqueletos completos identificado a la vez	2	6
USB	2.0	3.0
Sistema operativo	Windows 7 o superior	Windows 8.1 o superior

Asimismo, en la Figura 29 se pueden observar las diferentes articulaciones que son capaces de recoger cada uno de los sensores.

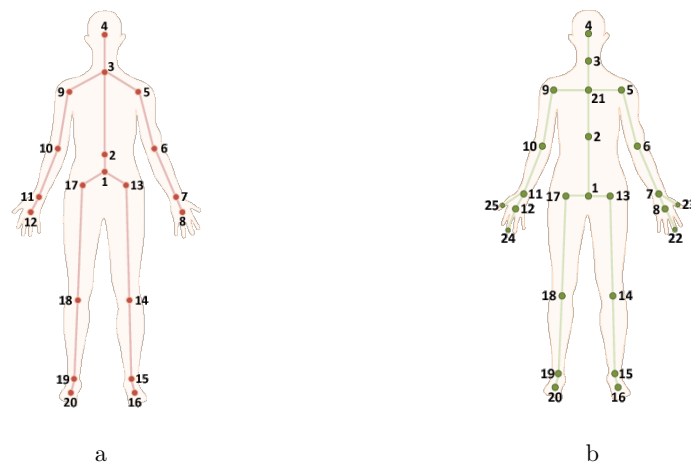


Figura 29. Localización de las articulaciones obtenidas por los dispositivos a) Kinect v1 y b) Kinect v2.

2.2.2. Fuentes de error

Existen multitud de fuentes de error que pueden afectar a estas cámaras [230]. A continuación, se enumeran las principales.

Luz de fondo ambiental. Como cualquier otra cámara, la cámara de profundidad de la Kinect puede obtener errores de sobresaturación en caso de un tiempo de exposición largo a este tipo de luz. Ambas versiones del sistema cuentan con filtros de paso banda que intentan reducir la cantidad de luz de fondo que llega al sensor. Este problema afecta en mayor medida al sensor de la Kinect v1 [232].

Desviaciones debidas a la temperatura. Un efecto común a muchos dispositivos técnicos es la deriva del sistema producida por los cambios de la temperatura, es decir, los valores de distancia en el caso de las cámaras Kinect, durante el calentamiento del dispositivo. La Kinect v2 necesita estar emitiendo constantemente la señal infrarroja para poder obtener las medidas de profundidad. Esta emisión activa y continua hace que el sistema se caliente mucho más que la Kinect v1. Por ello, esta segunda versión necesita de un enfriamiento activo para intentar disminuir, en todo lo posible, el error producido por estas altas temperaturas [233].

Error sistemático con la distancia. Ambos sistemas se ven afectados por un error sistemático al medir la profundidad. Para la Kinect v1 este error suele venir desencadenado por una calibración inadecuada y por la baja resolución de píxeles de su cámara, lo que complica la estimación de la ubicación de los puntos en el plano de la imagen, dando lugar a coordenadas imprecisas de los puntos reflejados del patrón de luz. Para la Kinect v2 este error viene producido por las aproximaciones matemáticas realizadas en los cálculos necesarios para poder obtener las distancias a partir de las distintas fases de la señal.

Efectos de multi trayecto del haz infrarrojo. Estos efectos son una fuente común de error en los sistemas de medición activos. La luz no sólo recorre el trayecto directo desde la unidad de iluminación a la superficie del objeto y de vuelta al detector, sino que también puede recorrer otros caminos indirectos dispersándose por objetos reflectantes de la escena o incluso dentro de las mismas lentes de la cámara.

Estos rayos dispersos pueden llegar en cualquier momento al sensor de la cámara, el cual realiza una aproximación errónea de la distancia recorrida por ese rayo.

Aunque algunas características de ambas versiones de Kinect han sido proporcionadas por el fabricante, determinadas características se desconocen. Para determinar el efecto de todas las posibles fuentes de error en los estudios llevados a cabo, se llevó a cabo un estudio para determinar los errores de precisión de las dos versiones de Kinect.

2.2.3. Estudio comparativo de sistemas de registro corporal

2.2.3.1 Hipótesis y objetivos

La hipótesis inicial del estudio fue que la segunda versión del dispositivo Kinect mejoraría las prestaciones de su antecesora, permitiendo una interacción precisa con un EV mediante los movimientos del usuario.

Por ello el objetivo de este estudio fue determinar y comparar la precisión y el *jitter* de ambas versiones del dispositivo Kinect¹¹.

2.2.3.2 Procedimiento

Las variables objetivas analizadas en este estudio fueron análogas a las obtenidas en el estudio anterior donde se caracterizó a los sistemas de estimulación visual. La precisión se definió como la diferencia entre la posición del tobillo del usuario en el mundo real y su posición estimada. El *jitter*, a su vez, puede definirse como la variación máxima de esta posición estimada en un intervalo de tiempo. Para ello se diseñó una rejilla de 6x6 con cuadrados de 25x25 cm impresa sobre una lámina de vinilo (Figura 30), la cual se fijó en el suelo.

¹¹ Parte de los datos de este estudio se encuentran publicados en el siguiente trabajo: Llorens R., Noé E., Naranjo V., Borrego A., Latorre J., Alcañiz M. Tracking systems for virtual rehabilitation: Objective performance vs. subjective experience. A practical scenario. *Sensors*, 2015. 15: 6586-606.

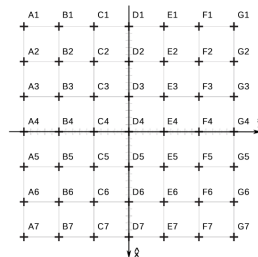


Figura 30. Rejilla diseñada para el estudio de comparación de sistemas de registro corporal.

La rejilla cubrió un área de $1,5 \text{ m}^2$, aproximadamente el área necesaria para poder llevar a cabo los experimentos de los siguientes apartados. Los dispositivos de seguimiento se colocaron a una distancia tal que permitiera a su campo de visión cubrir el área bajo estudio. Ambos sistemas Kinect fueron colocados a una altura de 80 cm y a una distancia de 250 cm y conectados a un ordenador¹² mediante sus conectores pertinentes.

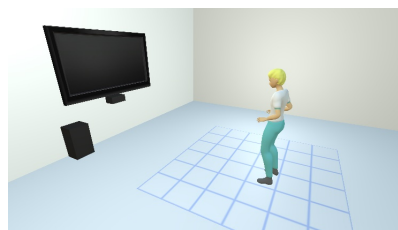


Figura 31. Montaje del sistema de seguimiento para el estudio de comparación de sistemas de registro corporal.

La posición de la articulación tibiotalar de un usuario fue estimada en todos los puntos de intersección (49 en total) con ambos dispositivos. Se utilizó ropa ajustada para evitar ruido adicional en la estimación de profundidad de los dispositivos de seguimiento. En cada punto se registró la posición de la articulación durante 5 s.

¹² El ordenador utilizado para generar las medidas incorporaba un Intel® Core™ i7-6700K con 8 núcleos a 4,00 GHz, 16 GB de RAM y una NVIDIA® Geforce® GTX 980 con 12 GB de GDDR. Una pantalla LED de 42" proporcionó retroalimentación audiovisual.

2.2.3.3 Análisis de los datos

Análisis de señal

La precisión y el *jitter* fueron calculados de acuerdo a las ecuaciones enunciadas en el subapartado 2.1.4.3.

2.2.3.4 Resultados

Los resultados de los registros se muestran en la Tabla 6. La segunda versión de Kinect proporcionó mayor precisión que la primera versión ($1,37 \pm 2,05$ cm frente a $2,95 \pm 1,37$ cm, respectivamente), observándose la mayor diferencia en los valores del eje y. Los valores de *jitter*, sin embargo, fueron muy similares entre ambas versiones.

Tabla 6. Precisión y *jitter* registrados en los puntos de intersección de la rejilla para los dispositivos Kinect v1 y v2. Números menores indican un menor error y una mayor precisión.

	<i>Kinect v1</i>	<i>Kinect v2</i>
Precision (cm)		
Eje x	$0,87 \pm 0,57$	$0,15 \pm 0,74$
Eje y	$2,36 \pm 1,41$	$0,56 \pm 0,35$
Eje z	$0,98 \pm 1,02$	$0,08 \pm 0,70$
Total	$2,95 \pm 1,37$	$1,37 \pm 2,05$
<i>Jitter</i> (cm)		
Eje x	$1,32 \pm 0,74$	$0,79 \pm 0,27$
Eje y	$0,31 \pm 0,33$	$0,68 \pm 0,29$
Eje z	$0,56 \pm 0,50$	$0,58 \pm 0,21$
Total	$1,52 \pm 0,86$	$1,24 \pm 0,31$

2.2.3.5 Discusión

En este estudio se comparó la precisión y el *jitter* de dos versiones del sistema de seguimiento corporal Kinect. La primera versión del sistema proporcionó una precisión de $2,95 \pm 1,37$ cm, con errores mayores en el plano YZ, es decir, en planos perpendiculares al plano de Kinect. La segunda versión obtuvo unos valores de precisión de $1,37 \pm 2,05$ cm, mejorando la precisión de su predecesora hasta disminuir su error a la mitad.

La comparación del error mostrado por la Kinect v1 con la literatura no es trivial. La mayoría de estudios previos contrastaron los resultados de Kinect v1 con otros sistemas de registro comparando la posición de los huesos creados a partir de las articulaciones detectadas [234], el cambio de la posición de las articulaciones durante un movimiento [235], la postura corporal [236] o la marcha [237]. Estos resultados validaron el uso de este dispositivo para las diferentes medidas que realizaban. La precisión obtenida en este estudio podría corroborar sus múltiples usos hallados en la literatura.

Los resultados obtenidos con la Kinect v2 están en línea con estudios previos donde se comparaba este dispositivo con algunos sistemas “*gold estándar*” de seguimiento de la pose [236]. En cambio, otro estudio halló un error mayor que el nuestro (5 ± 3 cm) cuando comparó la articulación de la rodilla dada por Kinect v2 con la dada por un sistema de seguimiento corporal profesional [238]. Estos datos se tienen que tomar con cautela ya que lo fue analizado en este estudio no solo fue el error de Kinect v2, sino también el error del sistema de seguimiento con el que se comparó el sistema.

Varios estudios han sido los encargados de comparar estos dispositivos entre sí. Uno de estos estudios comparó las técnicas utilizadas por sus cámaras de profundidad concluyendo que, para escenas sin elementos reflectantes, el sistema de detección *Time-of-Flight*, utilizado por la Kinect v2, podría tener un error de precisión menor para distancias mayores a un metro que el principio de proyección de patrones, utilizado por la Kinect v1 [230]. Otro estudio comparó la precisión de las articulaciones del cuerpo de un sujeto registradas por ambos dispositivos mientras que los usuarios realizaban movimientos que incluían una oclusión parcial de parte de sus cuerpos. Los resultados, en línea con los nuestros, mostraron que la Kinect v2

proveía de mayor precisión, así como mayor robustez a las oclusiones y a las rotaciones del cuerpo [234]. Además, también se ha analizado la precisión de estos sistemas ante movimientos concretos, un estudio [238] halló que la Kinect v1 no era capaz de analizar la rotación de la rodilla de forma correcta y que solo podía ser utilizada su sucesora al contar con una mejor precisión¹³.

Si bien la precisión de Kinect v2 mostró ser más elevada que la de su predecesora, los valores del *jitter*, aunque menores en la Kinect v2 al considerar todos los ejes, no variaron notablemente entre ambas versiones. Por ello, son esperables errores puntuales en el seguimiento corporal con este dispositivo, comparables a los de su primera versión.

Es importante destacar que ambos dispositivos fueron comparados a partir de su precisión y *jitter* en el seguimiento de la articulación del tobillo. Esta articulación fue investigada en particular, por dos motivos: primero, puesto que es especialmente importante en la interacción con el EV utilizado en los estudios del presente trabajo (Sección 3.1 y 3.4) y, segundo, puesto que estudios previos han reportado que su seguimiento supone un reto para estos dispositivos. En línea con lo anterior, la precisión de estos sistemas en las articulaciones del tren inferior ha mostrado ser inferior a la precisión obtenida en articulaciones del tren superior [234], siendo el tobillo la articulación peor registrada de esta parte inferior [239]. Pese a esto, la precisión obtenida por ambos sistemas se cree suficiente para facilitar una interacción satisfactoria con el EV desarrollado, lo cual viene avalado por el éxito de la interacción en intervenciones previas con estos dispositivos [9,240]. Cabe destacar, por tanto, que se espera que la precisión para calcular el resto de articulaciones sea similar o incluso superior a la evidenciada en nuestro estudio [226], lo cual debería facilitar la animación de un avatar completo.

Pese a que los datos de *jitter* presentados por ambos dispositivos en este estudio son comparables, la mayor precisión de Kinect v2, su mayor y más consistente

¹³ Tras la realización de este experimento fue publicada una revisión sobre los estudios que han validado las dos versiones de Kinect para la valoración de las funciones motoras, así como la introducción a diversas alternativas a estas cámaras [294]. La comparación que realizó esta revisión entre ambas versiones de Kinect está en línea con nuestros datos obtenidos en el estudio, comentando que, aunque la Kinect v2 no sobrepasaba en gran medida las características de la Kinect v1, sí que mejoraba la precisión del mapa de profundidad medido y el seguimiento de las articulaciones del cuerpo humano.

tasa de muestreo, la mayor precisión de su cámara de profundidad y las posibles actualizaciones de los entornos de desarrollo para esta cámara podrían otorgar un mayor rendimiento a la Kinect v2 respecto a su predecesora. Actualmente esta versión está siendo utilizada en multitud de estudios como método de seguimiento corporal para la valoración y la rehabilitación de diferentes tareas motoras como el equilibrio [236], la postura [236] o la marcha [241]. Además, su uso no se restringe a individuos sanos, sino que se ha extendido a la valoración y rehabilitación de las funciones motoras de sujetos con Parkinson [242] o ictus [226].

En conclusión, debido a estos motivos y a la discontinuidad de la producción de la Kinect v1, en los estudios del presente trabajo se utilizó la Kinect v2¹⁴ como método de interacción¹⁵.

¹⁴ Actualmente, la Kinect v2 también ha sido descatalogada y se espera una nueva versión de Kinect a finales de 2019 llamada Kinect Azure.

¹⁵ Actualmente están apareciendo diferentes alternativas a este tipo de cámaras, siendo algunas de las más prometedoras los sistemas, como OpenPose [7], que mediante el uso de inteligencia artificial y cámaras 2D son capaces de realizar el seguimiento de las articulaciones del cuerpo a gran escala. Sin embargo, aunque parece una tecnología muy prometedora, se encuentran en un desarrollo continuado y en la actualidad se desconoce la precisión de este método para su uso en estudios.

2.3. Sistemas de registro fisiológico

Las medidas fisiológicas han sido utilizadas tradicionalmente para intentar obtener una variable objetiva a una pregunta subjetiva, tratando de hallar una relación entre una sensación y un cambio fisiológico que podamos recoger mediante alguno de los sistemas existentes. Existen multitud de dispositivos que permiten obtener estas medidas. A continuación, se exponen los dispositivos utilizados en los estudios de este trabajo clasificados según la variable que muestrean.

2.3.1. Actividad electrodérmica

La definición de la EDA se proporcionó anteriormente (Sección 1.3.3.2).

En el presente trabajo se utilizaron dos sensores diferentes para determinar esta respuesta fisiológica, uno portable, el dispositivo Q Sensor, desarrollado y distribuido por Affectiva (Affectiva®, Waltham, MA, EEUU) y otro no portable, el amplificador Refa desarrollado por TMSI (Twente Medical Systems International BV, Oldenzaal, Países Bajos).

El dispositivo Q Sensor (Figura 32) fue uno de los primeros sensores de EDA con precisión científica que fue diseñado para ser llevado en la muñeca. Además de dos electrodos de Ag-AgCl encargados de transmitir y recoger la señal eléctrica que se utiliza para obtener la EDA, el dispositivo incorpora un sensor de temperatura de la piel y un acelerómetro de tres ejes capaces de obtener datos a 32 Hz.



Figura 32. Dispositivo portátil utilizado para medir la actividad electrodérmica Q Sensor.

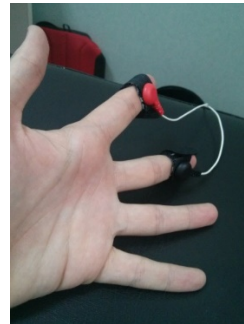
Este dispositivo es capaz de almacenar los datos de los sensores en su interior o de enviarlos en tiempo real a través de *bluetooth* a una aplicación *software* propietaria que debe estar instalada en un ordenador. Dicha aplicación muestra los datos obtenidos sin necesidad de aplicar ningún procesado previo y permite añadir una serie de marcas que pueden ser utilizadas como señalizadores de algún evento determinante del estudio¹⁶.

Por otro lado, el amplificador Refa (Figura 33a) es un sistema estacionario para la medición de EEG y otras señales fisiológicas. El sistema incluye ocho entradas electrofisiológicas unipolares, cuatro entradas electrofisiológicas bipolares y cuatro entradas auxiliares. Los sensores utilizados para la obtención de la EDA, conectados a las entradas al amplificador, constan de dos sensores con bandas que deben de colocarse en los dedos de la mano del usuario [139]. Las bandas se tienen que colocar en la falange medial de los dedos corazón e índice (o como configuración secundaria el anular). La posición de las bandas debe ser (Figura 33b):

- *Positivo (rojo)*. Colocado en el dedo índice o en el anular.
- *Negativo (negro)*. Situado en el dedo corazón.



a



b

Figura 33. Amplificador utilizado para medir la actividad electrodérmica a) Refa y b) sensores conectados a la mano.

¹⁶ Este dispositivo se encuentra actualmente descatalogado.

Los datos recogidos por el amplificador son enviados a través de un sistema propietario a una aplicación *software* en un ordenador a una frecuencia de 256 Hz. Para poder obtener la EDA, la señal debía ser recalculada como se describe en la siguiente ecuación:

$$EDA(n) = 10^6 \frac{5 - 10^{-6}x(n)}{6.6x(n)}$$

2.3.2. Temperatura de la piel

La definición de la temperatura corporal se proporcionó anteriormente (Sección 1.3.3.2).

En el presente trabajo la temperatura de la piel se registró, de igual manera que la EDA, mediante el dispositivo Q Sensor. Este dispositivo utiliza los mismos electrodos para obtener ambas medidas (Figura 34).



Figura 34. Sensores del dispositivo Q Sensor.

2.3.3. Actividad electromiográfica

La definición de la temperatura corporal se proporcionó anteriormente (Sección 1.3.3.2).

En los estudios realizados en el presente trabajo se registró la sEMG mediante dos electrodos Ag-AgCl conectados al amplificador Refa, el cual proporciona una frecuencia de muestreo de 256 Hz.



Figura 35. Sensorización de la electromiografía de superficie.

Capítulo 3.

Estudios

3.1. Presencia e inmersión en individuos sanos

3.1.1. Hipótesis y objetivos

La hipótesis principal del estudio fue que los avances tecnológicos en los dispositivos de estimulación no habían modificado la relación entre presencia e inmersión, por la cual, a igualdad de contenido, debería obtenerse una sensación de presencia más intensa a mayor nivel de inmersión.

Por ello el objetivo de este estudio fue determinar y comparar la presencia percibida por una muestra de sujetos sanos bajo diferentes condiciones de inmersión.

3.1.2. Participantes

Una muestra de individuos sanos mayores de edad sin problemas motores, cognitivos o psicológicos conocidos fue reclutada de la plantilla de trabajadores de la Universitat Politècnica de València y del Servicio de Neurorrehabilitación del Hospital Vithas Valencia al Mar (Valencia, España). Una muestra mínima de 60 participantes fue calculada para una potencia ($1-\beta$) de 0.95, un tamaño del efecto (η^2) de 0.5, un alfa (α) bilateral de 0.05, y una tasa de pérdidas del 10%.

Un total de 60 usuarios sanos (40 hombres y 20 mujeres) con una edad media de $33,83 \pm 11,03$ años y con una experiencia previa en videojuegos media de 5 sobre 10, participaron en el estudio.

El protocolo experimental fue aprobado por el Comité Ético de Investigación Clínica del Hospital Vithas Valencia al Mar. Todos los participantes dieron su consentimiento por escrito antes de participar en el estudio.

3.1.3. Materiales

Como tarea de control se utilizó una adaptación de una tarea de RV interactiva, la cual había sido administrada previamente en individuos con ictus con fines terapéuticos de manera satisfactoria [9,240]. El EV consistía en un suelo cuadrículado

infinito con un círculo central de 50 cm y un avatar con forma humana del mismo sexo que el participante, el cual replicaba síncronamente los movimientos del participante (Figura 36). El EV se observaba desde un punto de vista aloctérico (perspectiva en tercera persona). En el suelo, alrededor del círculo central, aparecían una serie de objetos de colores con diferentes formas (cubos, esferas y conos) con un volumen de 20x20x20 cm. El objetivo de la tarea en el EV era pisar los objetos que iban apareciendo antes de que desaparecieran con el pie más cercano a éstos, mientras se mantenía el otro pie dentro del círculo central. Una vez alcanzado el objeto, la pierna extendida debía recogerse hasta que el pie entrara dentro del círculo.

El entorno reproducía animaciones específicas y efectos de sonido cuando el elemento aparecía, desaparecía o era aplastado. Además, el EV proporcionaba información extrínseca a la tarea que mostraba el porcentaje de elementos aplastados con éxito y el tiempo que restaba para finalizar la tarea.



Figura 36. Entorno virtual mostrado en el estudio de presencia e inmersión. El entorno se observaba desde la perspectiva de tercera persona.

El EV se mostró mediante dos dispositivos de visualización diferentes: un HMD Oculus Rift CV1¹⁷ y una pantalla LED de 60" (LG, Seúl, Corea del Sur), la cual estaba fijada en la pared a aproximadamente 175 cm del suelo a una distancia de 2 m del centro del EV, identificado en el mundo real mediante una marca en el suelo. El HMD contaba con una resolución de 2160x1200 píxeles totales y una frecuencia de refresco de 90 Hz, y proporcionaba un campo de visión horizontal de 94° y vertical de 93°. La pantalla contaba con una resolución 1920x1080 píxeles, con una frecuencia

¹⁷ La viabilidad del uso del sistema de visualización Oculus Rift CV1 fue investigada en el estudio presentado en la subsección 2.1.4.

de refresco de 60 Hz, y proporcionaba un campo de visión horizontal aproximado de 37° y vertical de 11°, cuando el participante se encontraba sobre la marca del suelo que representaba el centro del EV. El audio del EV fue proporcionado por los auriculares integrados en el HMD o por los altavoces integrados en la pantalla. La interacción con el entorno fue llevada a cabo mediante el dispositivo de seguimiento Kinect v2¹⁸, la cual estaba fijada debajo de la pantalla en el eje central de ésta a una altura de 80 cm del suelo para garantizar el seguimiento de todo el cuerpo [226,243]. Este dispositivo proporcionó las posiciones de las principales articulaciones de los participantes a una frecuencia de muestreo de 30 Hz.

3.1.4. Procedimiento

Dos experimentadores se encargaron de dirigir las sesiones y de garantizar la seguridad y el confort de los usuarios. Los participantes, que no conocían previamente el propósito del experimento, fueron brevemente instruidos en el uso de los distintos dispositivos, y les fueron introducidos el procedimiento y las tareas que debían de realizar. Tras esta explicación, los participantes fueron colocados en el punto marcado en el suelo, que simbolizaba el centro del EV, orientados hacia la Kinect, y se dio comienzo al experimento.

Los participantes realizaron la tarea en el EV bajo dos condiciones de inmersión distintas en orden contrabalanceado y aleatorio, en las cuales recibieron estimulación audiovisual mediante el HMD o la pantalla. La interacción en ambas condiciones tuvo una duración de 10 minutos.

3.1.4.1 Medidas

Tras cada condición, los participantes evaluaron la presencia percibida mediante el cuestionario SUS [34]¹⁹.

¹⁸ La viabilidad del uso del sistema de registro de movimiento Kinect v2 fue investigada en el estudio presentado en la subsección 2.2.5.

¹⁹ El instrumento se ha definido en la subsección 1.2.3.1 y mostrado en el Anexo II.

3.1.5. Análisis de los datos

3.1.5.1 Análisis estadístico

Las pruebas de Shapiro-Wilk mostraron que nuestros datos se encontraban dentro de normalidad. Se realizó una prueba t de Student para muestras dependientes para comprobar si existían diferencias significativas entre condiciones. Se consideró que las puntuaciones en el cuestionario utilizadas superiores a 4 denotaban un reflejo significativo de la intensidad de la experiencia. Todos los análisis estadísticos se realizaron mediante el *software* SPSS Statistics, versión 22 (IBM, Armonk, NY, EE. UU.) para Windows.

3.1.6. Resultados

Los resultados evidenciaron que los participantes sintieron una sensación de presencia significativamente mayor ($p < 0,001$) al utilizar el HMD como dispositivo de estimulación audiovisual ($4,70 \pm 1,17$), en comparación con la pantalla ($3,65 \pm 1,30$) (Figura 37).

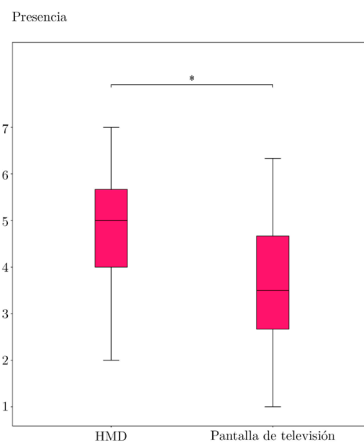


Figura 37. Sensación de presencia promovida por el *head mounted display* y la pantalla de televisión.

3.1.7. Discusión

Este estudio investigó la variación de la presencia ante distintas condiciones de inmersión en una muestra de sujetos sanos durante una tarea interactiva de RV. Las condiciones de inmersión fueron derivadas del uso de dos dispositivos de estimulación audiovisual, un HMD y una pantalla de última generación, que presentaron características técnicas distintas. Los participantes reportaron una sensación de presencia significativamente mayor cuando fue utilizado el HMD respecto a la pantalla.

Cabe destacar que la presencia reportada durante la interacción con la pantalla no alcanzó el umbral mínimo de significancia, por lo que, al contrario que el HMD, este dispositivo no logró promover la sensación de presencia de manera efectiva. Estos hallazgos deben ser puestos en contexto, puesto que algunos estudios anteriores han reportado que pantallas tradicionales [244] o grandes monitores [244–246], eran capaces de promover mayor sensación de presencia que sistemas HMD. Además, los sistemas CAVE han sido, tradicionalmente, los sistemas que mayor sensación de presencia han permitido promover en los usuarios [52–55], por encima también de sistemas HMD. En cambio, estudios más actuales han evidenciado un cambio de este paradigma, reportando mayores niveles de presencia al utilizar sistemas HMD, en comparación tanto con sistemas CAVE [56], como con pantallas tradicionales [247,248]. Los resultados del estudio presentado en este trabajo respaldan este nuevo escenario, y podrían apuntar al desarrollo tecnológico como origen del cambio. Así pues, las características de los dispositivos HMD de última generación podrían proporcionar un mayor nivel de inmersión que, a igualdad de condiciones, facilitase una mayor sensación de presencia que otros dispositivos no inmersivos, como pantallas.

En resumen, los HMD de última generación podrían proporcionar niveles de inmersión suficientes para generar una alta sensación de presencia en individuos sanos, por encima de la promovida por sistemas no inmersivos, como pantallas de televisión.

3.2. Corporización en individuos sanos de distintas edades

3.2.1. Hipótesis y objetivos

La hipótesis inicial del estudio fue comprobar que podía existir una variación en la corporización durante el experimento del RHI, tanto en las medidas subjetivas como objetivas, con la edad.

Por ello el objetivo de este estudio fue investigar las respuestas subjetivas, conductuales y fisiológicas durante el RHI en usuarios sanos de diferentes edades ²⁰.

3.2.2. Participantes

Una muestra de individuos sanos con edades comprendidas entre los 20 y los 80 años sin problemas motores, cognitivos o psicológicos conocidos fue reclutada del cuerpo estudiantil de la Universitat de València (València, España), la Universitat Politècnica de València y la Universitat Jaume I (Castellón, España) y del Servicio de Neurorrehabilitación del Hospital Vithas Valencia al Mar. Una muestra mínima de 84 participantes, distribuidos por edad en adultos jóvenes (entre los 20 y los 35 años), adultos maduros (entre 36 y 60 años) y mayores (entre 61 y 80 años), con al menos 28 participantes por grupo, fue calculada para una potencia ($1-\beta$) de 0.80, un tamaño del efecto (η^2) de 0.30, un alfa (α) de 0.05 y una tasa de pérdidas del 10%.

Un total de 93 individuos (40 hombres y 53 mujeres) participaron en el estudio. El grupo de adultos jóvenes estuvo formado por 41 participantes con una edad media de $26,83 \pm 4,29$ años. El grupo de adultos maduros estuvo formado por 28 participantes con una edad media de $49,43 \pm 7,67$ años. El grupo de mayores estuvo formado por 24 participantes con una edad media de $67,54 \pm 5,29$ años.

²⁰ Los resultados de este estudio se encuentran publicados en el siguiente trabajo: Palomo P., Borrego A., Cebolla A., Llorens R., Demarzo M., Baños R. Subjective, behavioral, and physiological responses to the rubber hand illusion do not vary with age in the adult phase. *Consciousness and Cognition*, 2017. S1053-8100 (16): 30416-0.

El protocolo experimental fue aprobado por el Comité Ético de Investigación Clínica del Hospital Vithas Valencia al Mar. Todos los participantes dieron su consentimiento por escrito antes de participar en el estudio.

3.2.3. Materiales

Para determinar la corporización se replicó el experimento del RHI explicado anteriormente (subapartado 1.3.2.1). Para ello, se utilizó un tablero vertical de 50×40×4 cm, una tela oscura de 1x1 m, dos pinceles de paletina y un martillo (Figura 38a). Además, se contó con un total de cuatro brazos de goma, correspondientes a las extremidades izquierda o derecha de ambos sexos (Figura 38b).

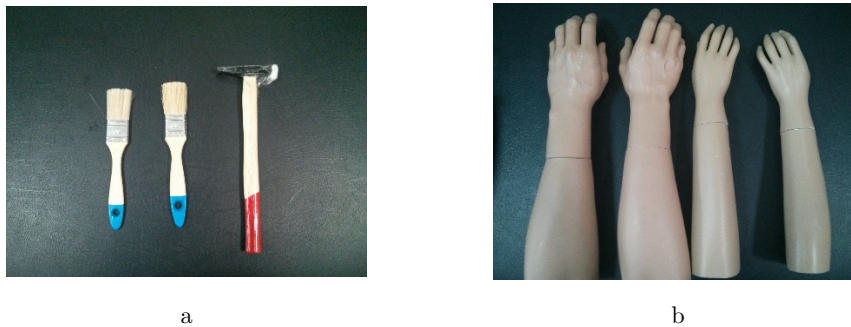


Figura 38. Herramientas utilizadas para reproducir el *Rubber Hand Illusion*. a) Pinceles, martillo y b) brazos de goma utilizados durante la experimentación.

La evaluación subjetiva se llevó a cabo utilizando el cuestionario ERHQ. Como respuesta conductual se analizó la deriva propioceptiva de los participantes.

3.2.4. Procedimiento

El estudio fue llevado a cabo por dos experimentadores en diferentes salas dedicadas, localizadas en las universidades y en el hospital. Las salas estaban insonorizadas y estaban libres de distractores.

Antes de comenzar el experimento, los participantes fueron brevemente instruidos sobre el mismo y el dispositivo Q Sensor se fijó en el brazo no dominante, sobre el cual se iba a realizar la estimulación. Los participantes se sentaron frente a

una mesa, en una posición cómoda, con ambos brazos apoyados sobre la mesa y las palmas hacia abajo. Se pidió a los participantes relajar y mantener esa posición durante 10 minutos para que se aclimataran a la temperatura y se estabilizara la EDA. Se colocó el tablero vertical frente al hombro izquierdo o derecho de los participantes, según si eran diestros o zurdos, respectivamente, para ocluir esa extremidad de su visión (Figura 39). Tras el periodo de aclimatación, se colocó la mano de goma correspondiente a las características de los participantes frente a éstos, a 15 cm de su mano real (medida entre los dedos índice) [249,250], y a 5,5 cm del tablero. La tela oscura se colocó de tal manera que ocluyera desde el hombro hasta el antebrazo de la mano de goma, con el objetivo de simular que ésta partía del propio cuerpo de los participantes. Tras el montaje experimental, los participantes recibieron la instrucción de mirar a la mano de goma y, tras esto, un experimentador, colocado al otro lado de la mesa, comenzó a estimular sincronamente la mano real de los participantes y la de goma con los dos pinceles de paletina. El acariciado se realizó mediante trazos de diferentes longitudes en una dirección proximal-distal, con una frecuencia aproximada de 1 Hz, comenzando cada acariciado en diferentes puntos de la mano [79,113,250]. Tras dos minutos de estimulación la mano de goma fue golpeada con el martillo.

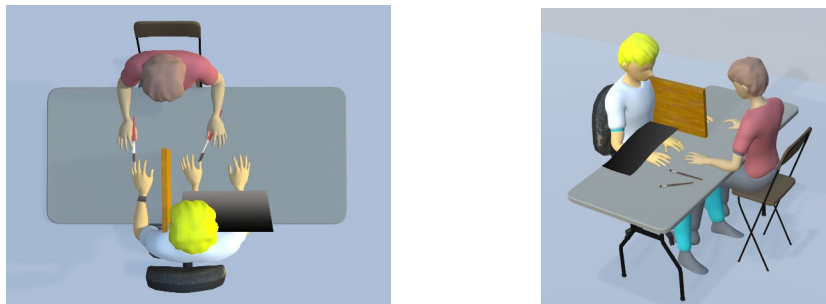


Figura 39. Montaje del experimento del *Rubber Hand Illusion* con usuarios sanos.

3.2.4.1 Medidas

La intensidad subjetiva de la ilusión se evaluó con el cuestionario ERHQ²¹. Además, se investigaron las respuestas conductuales con la deriva propioceptiva, la cual fue analizada antes y después del experimento, y las fisiológicas, con la EDA y la temperatura de la piel, cuyo análisis se describe en la subsección siguiente.

3.2.5. Análisis de los datos

3.2.5.1 Análisis de la señal

Respecto al análisis de la EDA, se calculó la diferencia entre el pico máximo de la señal tras el golpe del martillo y una línea base previa. Además, también se calculó el tiempo transcurrido entre el golpe de martillo y el pico máximo. El cálculo de la línea base se obtuvo del valor medio de los datos un segundo previo al estímulo.

$$EDA_{inicial} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N EDA(n)$$

, donde N es el número de muestras de la señal EDA en 1 s. Después se buscó el valor máximo entre uno y cinco segundos después del golpe y se calculó la diferencia con la línea base.

$$EDA_{final} = \max\{EDA_{n=1}^M\}$$

, donde M es el número de muestras de la señal de la EDA en 4 s (pues la señal se obtiene desde el segundo tras el golpe, hasta cinco segundos tras éste). Finalmente se obtuvo el tiempo (t_{max}) transcurrido entre el estímulo y dicho pico máximo y se calcularon las diferencias entre las estimaciones inicial y final de la EDA.

$$\Delta EDA = EDA_{final} - EDA_{inicial}$$

Atendiendo al trabajo de Armel y Ramachandran se consideró un aumento significativo de EDA cuando la diferencia superó el umbral de 0,03 mS [93,141,142].

²¹ El instrumento se ha definido en la subsección 1.3.3.1 y mostrado en el Anexo I.

Respecto a la temperatura, se obtuvieron las diferencias entre diversos momentos del experimento. Concretamente, se calculó la media de la temperatura durante 5 s en tres intervalos distintos del experimento: antes de comenzar la estimulación ($temp_{inicial}$), antes del golpe ($temp_{antes}$) y después del golpe ($temp_{después}$). Se utilizó un intervalo de 5 s para realizar las medidas por considerarse suficiente periodo temporal para obtener una media razonable [137]. Una vez obtenidas todas las medias se calcularon la diferencia de temperatura entre momentos antes del golpe y el valor inicial, y momentos tras el golpe y el valor inicial.

$$temp_1 = temp_{antes} - temp_{inicial} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$temp_2 = temp_{después} - temp_{inicial} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

El análisis de señal se llevó a cabo con el *software* MATLAB 2018b.

3.2.5.2 Análisis estadístico

Se realizaron pruebas Chi-cuadrado para determinar las diferencias en el porcentaje de participantes que sintieron los diferentes subcomponentes de la corporización. Aunque las pruebas de Shapiro-Wilk mostraron que nuestros datos violaban los supuestos de normalidad, se usaron pruebas paramétricas con resultados comparables. Se realizaron pruebas de ANOVA univariante para determinar las diferencias en la corporización, en la deriva propioceptiva y en los cambios en la temperatura de la piel y la conductancia entre los tres grupos de edad. Se realizaron pruebas de MANOVA para determinar las diferencias entre los diferentes constructos (propiedad, localización y agencia) entre los tres grupos. Finalmente, se calcularon las correlaciones de Pearson para la edad y las puntuaciones individuales para los constructos de la corporización. El nivel α se estableció en 0,05 para todos los análisis.

Todos los análisis estadísticos se realizaron mediante el *software* SPSS Statistics, versión 22 para Windows.

3.2.6. Resultados

3.2.6.1 Diferencias entre grupos de edad

El porcentaje de participantes que sintieron propiedad fue mucho mayor que los que sintieron localización y, sobre todo, agencia (Figura 40a). Se encontraron diferencias estadísticas entre los grupos en el porcentaje de participantes que sintieron propiedad sobre la mano de goma ($p=0,038$), con el grupo de mayor edad mostrando los mayores valores, pero no en la sensación de localización ($p=0,334$) o la agencia ($p=0,085$).

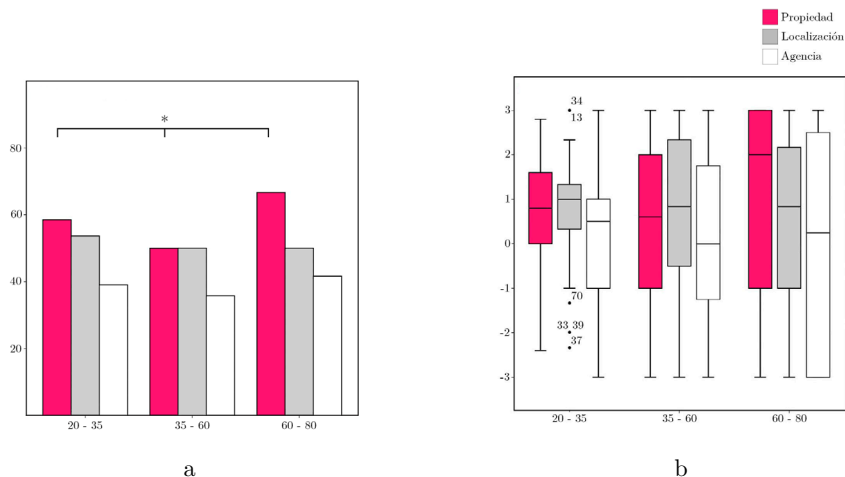


Figura 40. Resultados de *a*) porcentaje de participantes que sintieron propiedad, localización y agencia en los tres grupos de edad y *b*) la distribución de cajas y bigotes de cada subcomponente en cada grupo en el experimento del corporización con usuarios sanos.

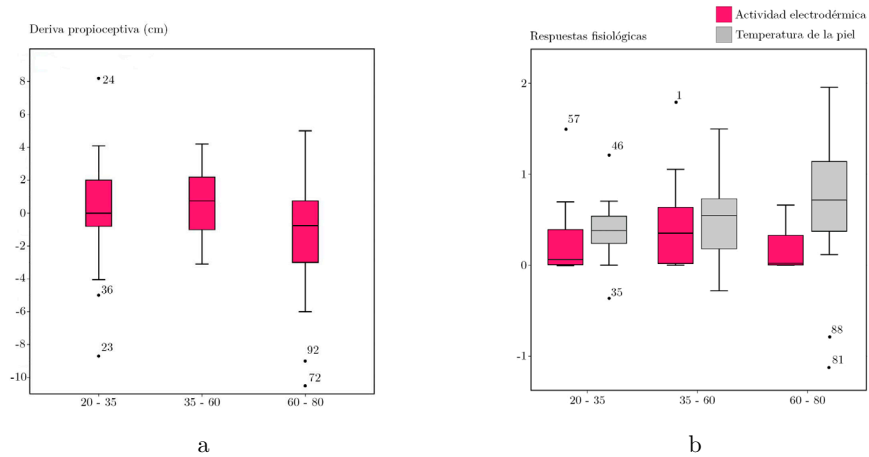


Figura 41. Resultados de a) de la deriva propioceptiva y b) la distribución de cajas y bigotes de la actividad electrodérmica y de la temperatura en los tres grupos de edad.

No se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos para la corporización en general ($p=0,889$, $\eta^2_p=0,003$), ni en ninguno de sus subcomponentes por separado: propiedad ($p=0,406$, $\eta^2_p=0,020$), localización ($p=0,895$, $\eta^2_p=0,002$) o agencia ($p=0,804$, $\eta^2_p=0,005$) (Figura 40b). Además, no se identificaron diferencias significativas entre los grupos en la deriva propioceptiva ($p=0,080$, $\eta^2_p=0,076$) (Figura 41a), ni en los cambios en la EDA ($p=0,070$, $\eta^2_p=0,070$) ni en la temperatura ($p=0,160$, $\eta^2_p=0,049$) (Figura 41b). Todos los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Respuestas subjetivas, comportamentales y fisiológicas del experimento del Rubber Hand Illusion en sujetos sanos.

	<i>Grupo 20-35</i>	<i>Grupo 35-60</i>	<i>Grupo 61-80</i>	<i>Significación</i>
Corporización	0,40±1,27	0,70±1,64	0,54±2,03	p=0,798
Propiedad	0,49±1,34	0,71±1,71	0,94±2,27	p=0,725
Localización	0,59±1,34	1,05±1,65	0,51±2,02	p=0,676
Agencia	-0,09±1,48	0,16±1,91	-0,43±2,55	p=0,359
Deriva propioceptiva (cm)	-0,05±3,02	0,65±2,25	-1,68±3,53	p=0,072
Temperatura de la piel (°C)	0,38±0,27	0,48±0,41	0,63±0,67	p=0,192
Actividad electrodérmica (mS)	0,23±0,33	0,40±0,44	0,18±0,26	p=0,102

3.2.6.2 Relación entre la edad y la corporización

La edad no correlacionó de manera significativa con la puntuación media de la corporización ($r=-0,01$, $p=0,943$), ni con las puntuaciones independientes de propiedad ($r=0,06$, $p=0,570$), localización ($r=-0,04$, $p=0,691$), agencia ($r=-0,11$, $p=0,286$), ni la deriva propioceptiva ($r=-0,16$, $p=0,132$), ni con cambios en la EDA ($r=0,02$, $p=0,874$). Sólo se identificaron correlaciones débiles, pero estadísticamente significativas entre la edad y la temperatura de la piel ($r=0,25$, $p=0,032$).

3.2.7. Discusión

Este estudio analizó el papel de la edad en los procesos de la corporización durante el experimento del RHI en adultos sanos. La hipótesis del estudio fue que existirían cambios tanto en la corporización como en las variables conductuales y fisiológicas. Sin embargo, no se identificaron diferencias significativas relacionadas con la edad,

con la única excepción de una correlación débil y significativa entre la edad y la temperatura de la piel.

El porcentaje de participantes que sintieron propiedad se encuentra en línea con los resultados obtenidos en la literatura en condiciones similares, el cual varía entre el 53% [94] y el 78% [91] en una muestra de adultos jóvenes. Aunque hubo diferencias entre los grupos, la ausencia de diferencias estadísticamente significativas y la covariabilidad entre la edad y los subcomponentes de la corporización sugieren que los participantes sintieron la experiencia con una fuerza comparable, independientemente de su edad. Concretamente, los participantes del grupo de mayor edad sintieron más propiedad de la mano de goma que los otros grupos. Sin embargo, la heterogeneidad dentro de los grupos, que se evidenció por una creciente varianza con la edad, podría explicar parte de estos resultados.

Las respuestas conductuales y fisiológicas mostraron resultados análogos. Los valores absolutos de la deriva propioceptiva fueron similares a los reportados en estudios anteriores con participantes sanos [94,150,251], sin lograr alcanzar diferencias estadísticamente significativas entre los grupos. El aumento de la EDA durante el experimento también se vio respaldado por estudios previos con usuarios jóvenes [93,141]. Respecto al aumento detectado en la temperatura de la piel, este es contrario a la hipótesis inicial, la cual indicaba una disminución de la temperatura relacionada con la fuerza de la ilusión [143]. Otros artículos han indicado que esta variación podría actuar en ambos sentidos [145]. Las medidas fisiológicas no mostraron diferencias significativas entre los grupos con la única excepción de una correlación débil entre la edad y la temperatura de la piel. Sin embargo, se dedujo que este efecto podría haber sido motivado por cambios en la función sudomotora relacionada con el envejecimiento [252] o por un artefacto estadístico, más que por la ilusión de corporización en sí misma.

La ausencia de diferencias significativas podría indicar respuestas comportamentales y fisiológicas comparables en todos los grupos. Las respuestas similares detectadas en la deriva propioceptiva en este estudio contradicen las diferencias relacionadas con la edad mostradas en un estudio previo [132]. Sin embargo, la dependencia de esta prueba con la integración propioceptiva, de la cual se conoce su declive con la edad [102], podría estar alterando los resultados. No obstante, es importante destacar que la asunción de esta medida como un correlato

de la corporización no siempre es válida, ni siquiera en el estudio previo mencionado [132]. En primer lugar, se han detectado efectos significativos de la deriva en condiciones en las cuales los participantes negaban la sensación de propiedad [251]. En segundo lugar, hay cierta controversia entre el aumento en la EDA y los mecanismos subyacentes a la corporización durante el experimento [141]. Y finalmente, la literatura sugiere que no existen evidencias reales de un enfriamiento de la mano durante el experimento del RHI [113], lo que contradice las posibles relaciones halladas anteriormente entre la propiedad percibida sobre el miembro de goma y la temperatura [144]. Estos resultados parecen evidenciar que la relación entre las percepciones subjetivas de la corporización y las respuestas fisiológicas y conductuales no es, ni mucho menos, lineal.

La ausencia de diferencias estadísticas entre los grupos de edad y la ausencia de covariabilidad entre la edad y cualquier otra medida sugirieron, sin embargo, que los mecanismos de la corporización están presentes y persisten con la edad con fuerza comparable, pero con varianza creciente. Las diferencias con la edad en la corporización reportadas previamente podrían deberse a que éstas se determinan a partir de la comparación entre adultos y un grupo de niños [129]. Aunque el presente estudio incluyó individuos dentro de un amplio rango de edad, todos los participantes fueron adultos (edad mayor a 20 años). Según esto, se podría conjeturar que la propiedad puede verse alterada por cambios cerebrales asociados con la pubertad y la adolescencia [253,254]. En etapas adultas, por el contrario, la corporización podría permanecer estable, como se muestra en este estudio. En línea con esto, la corporización no es solo el resultado de la integración multisensorial. Para ello es necesaria una interacción entre los estímulos aferentes y eferentes que facilite la síntesis corporal y la propiedad, y los datos sugieren que estos procesos pueden no deteriorarse con el envejecimiento [255–257]. Sin embargo, se ha observado una disminución de la corporización relacionada con la edad en participantes de 21 a 60 años en un experimento que utilizó una variación del RHI, en la que la mano de goma se mostraba en una pantalla que estaba colocada horizontalmente sobre una mesa [132]. Las diferencias en los rangos de edad de los participantes y las metodologías de ambos estudios podrían explicar las diferencias en los resultados. Para determinar la dependencia de los mecanismos de la corporización con la edad se requieren, por tanto, más estudios que profundicen en su entendimiento.

Capítulo 3

El presente estudio presentó diversas limitaciones que deberían tenerse en cuenta a la hora de analizar los hallazgos. Primero, en contra de los resultados mostrados en el presente estudio, la mayoría de los estudios previos han registrado las respuestas fisiológicas en la mano no estimulada debido a limitaciones en la instrumentación [93,141,144,145,251]. En segundo lugar, la ausencia de una condición asíncrona y de datos de neuroimagen impidieron un análisis de los efectos producidos por una estimulación incongruente y de los correlatos neuronales de las respuestas provocadas, respectivamente. Finalmente, la creciente varianza en las respuestas subjetivas con la edad podría enmascarar otros efectos. Sin embargo, aunque los métodos estadísticos utilizados no pueden garantizar la hipótesis nula, el amplio rango de edad de los participantes, las condiciones controladas del estudio y la inclusión de respuestas subjetivas y fisiológicas durante el RHI defienden que la sensación de la corporización, así como los correlatos comportamentales y fisiológicos, no varían con la edad²².

²² Estudios posteriores [295] confirmaron los resultados obtenidos con la única diferencia de que hallaron diferencias significativas entre la deriva propioceptiva y la edad. La pequeña muestra investigada en este estudio posterior (20 participantes) podría haber propiciado la aparición de estas diferencias significativas.

3.3. Corporización en individuos con ictus

3.3.1. Hipótesis y objetivos

La hipótesis principal del estudio fue que las alteraciones funcionales y fisiológicas derivadas del ictus promoverían diversas alteraciones en el esquema corporal lo que permitiría facilitar la corporización durante el RHI a los individuos con ictus respecto a los sujetos sanos.

Por ello el objetivo de este estudio fue investigar las respuestas subjetivas y fisiológicas durante el RHI en sujetos sanos e individuos con ictus²³.

3.3.2. Participantes

Una muestra de conveniencia de sujetos con ictus con suficientes capacidades motoras y cognitivas para participar en el experimento del RHI, tal como se describe en la Tabla 8, fue reclutada del Servicio de Neurorehabilitación del Hospital Vithas Valencia al Mar. Una muestra de individuos sanos, de edad y sexo emparejados a los participantes con ictus, y sin problemas motores, cognitivos o psicológicos conocidos fue reclutada de la plantilla de trabajadores y familiares del mismo centro.

Todos los participantes ambulatorios que habían sufrido un ictus y que estaban siendo atendidos en el centro asistencial fueron candidatos potenciales a participar en el experimento. De los 119 individuos que estaban participando en el programa de neurorehabilitación durante el reclutamiento, 20 de ellos (15 hombres y 5 mujeres), con una edad media de $59,5 \pm 8,9$ años, cumplieron los criterios de inclusión y exclusión y aceptaron participar en el estudio. Once participantes presentaban ictus isquémico y nueve ictus hemorrágicos. La etiología isquémica incluyó cuatro infartos totales y siete parciales de la circulación anterior. Las lesiones

²³ Los resultados de este estudio se encuentran publicados en el siguiente trabajo: Llorens R., Borrego A., Palomo P., Cebolla A., Noé E., Bermúdez i Badia S., Baños R. Body schema plasticity after stroke: Subjective and neurophysiological correlates of the rubber hand illusion. *Neuropsychologia*, 2017. 96:61-69.

se localizaron en el lóbulo derecho (n=10) y en el izquierdo (n=10) y tenían una cronicidad de $844,3 \pm 312,7$ días. Los participantes presentaron una puntuación media de $1,6 \pm 0,8$ en la *Modified Ashworth Scale*, y un índice de motricidad [258] medio de $54,3 \pm 14,9$ en los miembros más afectados. El deterioro sensorial en la mano y la muñeca de los participantes con ictus fue evaluado mediante la *Nottingham Sensory Assessment*, una herramienta estandarizada para el examen sensorial multimodal que evalúa la sensación táctil (el tacto ligero, la presión, la sensación de pinchazo, la discriminación entre diferentes temperaturas, la localización táctil y la estimulación simultánea bilateral), la cinestesia y el sentido estereognóstico. A su vez, obtuvieron una puntuación promedia de $1,2 \pm 0,8$ sobre 2 en la subescala de sensibilidad táctil, $0,9 \pm 0,9$ sobre 3 en la subescala de cinestesia, y $0,5 \pm 0,8$ sobre 2 en la subescala del sentido estereognóstico. Con respecto a su condición cognitiva, los sujetos obtuvieron una puntuación media en el *Mississippi Aphasia Screening Test* de $49,0 \pm 1,6$ sobre 50 y una puntuación media en el *Mini-Mental State Examination* de $27,2 \pm 2,2$ sobre 36. El protocolo experimental fue aprobado por el Comité Ético de Investigación Clínica del Hospital Vithas Valencia al Mar. Todos los participantes dieron su consentimiento por escrito antes de participar en el estudio.

Tabla 8. Criterios de inclusión y exclusión del estudio de corporización en individuos con ictus.

<i>Criterios de inclusión</i>	<i>Criterios de exclusión</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Edad de 50 a 80 • Cronicidad > 6 meses • Posibilidad de seguir instrucciones (<i>Mississippi Aphasia Screening Test</i> > 44). • Ausencia de déficits cognitivos severos (<i>Mini-Mental State Examination</i> > 23). 	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento del tono muscular como define la <i>Modified Ashworth Scale</i> > 3 • Rigidez de la articulación que impidió el posicionamiento del brazo • Daño del nervio periférico que afecte a las extremidades superiores • Alteraciones ortopédicas o síndrome de dolor de las extremidades superiores • Lesión visual o auditiva que no permita la posibilidad de interacción • Negligencia unilateral espacial • Asomatognosia

Un total de 21 sujetos sanos (13 hombres y 8 mujeres), con una edad media de $59,9 \pm 7,5$ años, que incluyó sujetos diestros ($n=16$) y zurdos ($n=5$) según el *Edinburgh Handedness Inventory* [259], participaron igualmente en el estudio.

3.3.3. Materiales

En el presente estudio se utilizaron los mismos materiales que los descritos en la sección 4.1.3, a los cuales se añadió el amplificador Refa, el cual registró la sEMG y la EDA en el brazo estimulado y en el no estimulado, respectivamente.

3.3.4. Procedimiento

El experimento fue llevado a cabo por dos experimentadores en una sala dedicada y libre de distractores del hospital Vithas Valencia al Mar. Antes de comenzar el experimento, todos los participantes fueron informados del procedimiento y objetivo del estudio y fueron equipados con los dispositivos de sensorización. El brazalete Q Sensor fue colocado, como en el estudio del subapartado 3.2, en el brazo estimulado con el objetivo de registrar la EDA y la temperatura de la piel de esta extremidad. La sEMG fue registrada, también en este brazo, mediante dos sensores dedicados, los cuales fueron fijados en el lado palmar (anterior) del antebrazo, uno en el punto medio del tercio distal y el otro entre el tercio medio y el proximal del brazo. Como se ha comentado anteriormente, estos sensores deben situarse entre las zonas de inervación del músculo o entre las zonas tendinosas, pero nunca sobre ninguna de ellas [260] (Figura 35). Por lo tanto, la sEMG registrada en este estudio corresponde a la actividad eléctrica producida principalmente por los músculos flexores de la muñeca y los dedos (palmar largo, flexor radial del carpo, flexor superficial de los dedos y pronador redondo). Finalmente, la EDA en el brazo no estimulado se registró con un sensor dedicado del amplificador Refa.

Tras la sensorización, se siguió el protocolo descrito en el estudio 4.1, con tres particularidades derivadas de la naturaleza de las consecuencias del ictus. Primero, a diferencia de los participantes sanos, los cuales recibieron la estimulación en el brazo no dominante, como en el estudio descrito anteriormente, los participantes con ictus recibieron la estimulación en el brazo más afectado (Figura 42). Segundo,

en el presente estudio no se investigó la deriva propioceptiva, pues los déficits motores que podían presentar los participantes con ictus podrían imposibilitar el proceso o confundir los resultados. Y, finalmente, un logopeda explicó las preguntas del cuestionario a los participantes con ictus y resolvió las dudas que surgieron.

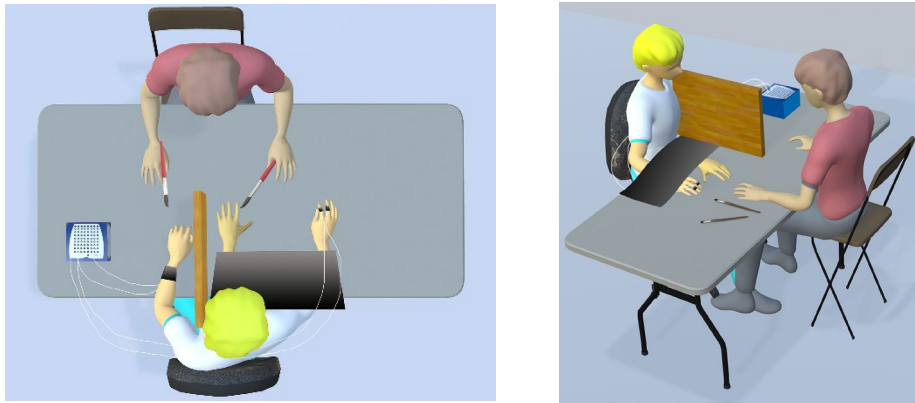


Figura 42. Montaje experimental del *Rubber Hand Illusion* con usuarios con ictus.

3.3.4.1 Medidas

La intensidad subjetiva de la ilusión se evaluó con el cuestionario ERHQ. Además, se analizaron las variables fisiológicas de la EDA, la temperatura de la piel y la sEMG, cuyo análisis se describe en la subsección siguiente.

3.3.5. Análisis de los datos

3.3.5.1 Análisis de señal

La variación en la sEMG se estimó como la diferencia entre los valores cuadráticos medios de la señal electromiográfica en los 5 s previos a la estimulación y en los 5 s previos al golpe de martillo. El resto de medidas fisiológicas se calcularon de la misma forma que en el estudio anterior.

El análisis de señal se llevó a cabo con el *software* MATLAB 2018b.

3.3.5.2 Análisis estadístico

Se comprobó la normalidad de las medidas utilizando test Shapiro-Wilk, mostrando que los datos violaban los supuestos de normalidad. Las comparaciones entre el grupo control y el grupo experimental en las puntuaciones del cuestionario y en los datos fisiológicos se realizaron mediante test U de Mann-Whitney para muestras independientes. Se realizaron análisis unidireccionales de covarianza para estimar la interacción entre las variables demográficas y clínicas con las respuestas subjetivas y fisiológicas. Se llevaron a cabo diversas pruebas Chi-cuadrado donde se comparó el porcentaje de participantes de los dos grupos que experimentaron la propiedad. El nivel α se estableció en 0,05 para todos los análisis (a dos caras).

Todos los análisis estadísticos se realizaron mediante el *software* SPSS Statistics, versión para Windows.

3.3.6. Resultados

3.3.6.1 Medidas subjetivas

Las puntuaciones en el cuestionario de corporización mostraron que las personas con ictus sintieron una sensación de propiedad y agencia significativamente mayor que los individuos sanos ($p=0,009$ y $p=0,046$, respectivamente), mientras que estas diferencias no emergieron en la sensación de localización ($p=0,656$) (Tabla 9).

Tabla 9. Resultados del cuestionario de corporización en usuarios sanos y con ictus.

	<i>Sujetos sanos</i>	<i>Sujetos con ictus</i>	<i>Significación</i>
Propiedad	0,9±1,9	2,3±1,2	$p=0,009^{**}$
Localización	1,1±1,9	0,9±0,9	$p=0,656$
Agencia	0,2±2,0	1,6±2,2	$p=0,046^*$

Los mismos resultados, expresados en términos del número de participantes que sintieron el efecto, también evidenciaron las diferencias entre grupos. Mientras que solo 16 participantes sanos (76,2%) sintieron la sensación de propiedad, todos los

participantes con ictus menos uno (95%) reportaron haber sentido este efecto ($p=0,010$). De manera similar, solo nueve participantes sanos (42,9%) sintieron agencia, frente a 16 participantes con ictus (80%) ($p=0,015$). Los análisis fueron replicados con solo aquellos usuarios que sintieron propiedad obteniendo resultados similares (Tabla 10). Ninguna variable demográfica o clínica covarió con los resultados de los participantes con ictus en ningún componente de la corporización. Además, los participantes con ictus que no sintieron la propiedad o la agencia (Figura 43) tampoco mostraron diferencias en las escalas demográficas o clínicas.

Tabla 10. Resultados del cuestionario de corporización en usuarios sanos y con ictus, en aquellos usuarios que sintieron propiedad.

	<i>Sujetos sanos que sintieron la ilusión</i>	<i>Sujetos con ictus que sintieron la ilusión</i>	<i>Significación</i>
Propiedad	1,9±0,9	2,6±1,2	p=0,017*
Localización	1,7±1,3	1±0,8	p=0,051
Agencia	1,1±1,3	1,6±2,2	p=0,421

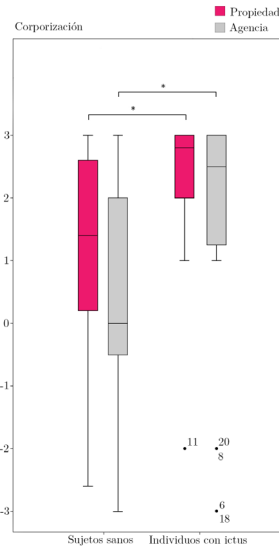


Figura 43. Diferencias significativas entre grupos en las variables de la corporización del experimento del corporización en usuarios con ictus.

3.3.6.2 Medidas fisiológicas

Todos los participantes, excepto tres individuos con ictus experimentaron un aumento en la temperatura media de la piel, siendo significativamente mayor en sujetos sanos (Tabla 10) (Figura 44). Al considerar solo a los participantes que experimentaron propiedad sobre la mano de goma, el aumento fue ligeramente mayor en sujetos sanos (de 0,70°C a 0,82°C), mientras que permaneció casi inalterado en los participantes con ictus (de 0,45°C a 0,47°C).

Todos los participantes menos un sujeto sano mostraron un aumento de la EDA en ambas manos durante el experimento (Tabla 10). Los datos en la mano no estimulada mostraron una respuesta similar en sujetos sanos e individuos con ictus. Sin embargo, los datos de EDA en la mano estimulada mostraron respuestas significativamente diferentes ($p=0,001$). En términos de número de participantes, los trece sujetos sanos que sintieron propiedad sobre la mano de goma experimentaron un aumento significativo de la EDA en la mano no estimulada y 11 (84,6%) en la mano estimulada. De manera similar, todos los participantes con ictus menos uno

(94,7%) experimentaron este aumento en la mano no estimulada. Sin embargo, este efecto solo se detectó en la mano estimulada en cuatro participantes (21,1%). Se detectaron resultados muy similares cuando solo se consideraron aquellos sujetos que sentían propiedad.

Respecto a la sEMG, los resultados evidenciaron diferencias significativas entre los sujetos sanos y los participantes con ictus ($p=0,005$) (Tabla 11). Si bien el experimento causó un aumento en la actividad muscular de los sujetos sanos, los participantes con hemiparesia experimentaron la tendencia opuesta, mostrando una disminución en la señal electromiográfica registrada. También se obtuvieron diferencias significativas, pero menores, cuando se tomaron en cuenta solo aquellos sujetos que sintieron la sensación de propiedad (los participantes sanos experimentaron una variación de $0,91\pm 3,07$ mV, y los participantes con ictus de $-0,74\pm 1,05$ mV).

De forma similar al apartado anterior, también se realizaron los análisis utilizando solo aquellos sujetos que sintieron propiedad durante la experimentación. Estos resultados mostraron valores similares a los obtenidos con toda la muestra (Tabla 12).

Tabla 11. Resultados de los datos fisiológicos en el estudio de corporización con individuos con ictus.

	<i>Sujetos sanos</i>	<i>Sujetos con ictus</i>	<i>Significación</i>
Temperatura de la piel (°C)	0,70±0,29	0,45±0,41	p=0,030*
Actividad electrodérmica (mS)			
Dominante/Menos afectado	1,13±0,90	1,14±0,38	p=0,375
No dominante/Más afectado	0,49±0,41	0,11±0,25	p=0,001**
Electromiografía (mV)	1,36±3,09	-0,81±1,08	p=0,003**

Tabla 12. Resultados de los datos fisiológicos en el estudio de corporización con individuos con ictus, en aquellos usuarios que sintieron propiedad.

	<i>Sujetos sanos que sintieron la ilusión</i>	<i>Sujetos con ictus que sintieron la ilusión</i>	<i>Significación</i>
Temperatura de la piel (°C)	0,77±0,27	0,47±0,42	p=0,020*
Actividad electrodérmica (mS)			
Dominante/Menos afectado	1,19±0,99	1,20±0,39	p=0,976
No dominante/Más afectado	0,46±0,25	0,11±0,25	p=0,001**
Electromiografía (mV)	1,20±3,04	-0,74±1,05	p=0,014*

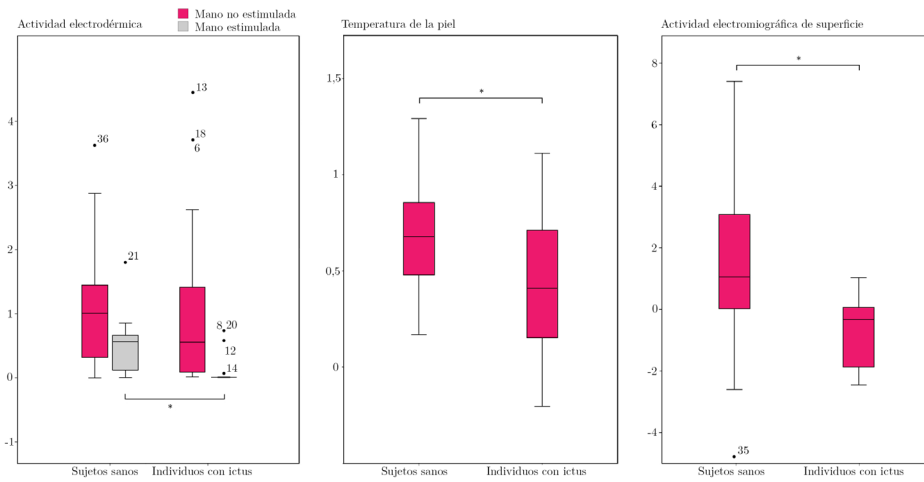


Figura 44. Diferencias significativas entre grupos en las respuestas fisiológicas del experimento del corporización en usuarios con ictus.

3.3.6.3 Interacción entre las respuestas subjetivas y fisiológicas

Fueron halladas correlaciones débiles, aunque estadísticamente significativas, entre la sensación de propiedad del cuerpo y la EDA de la mano estimulada y la sEMG, y entre la localización y la EDA de la mano no estimulada. También se detectó una tendencia a la significación entre la propiedad y la EDA de la mano no estimulada y entre la agencia y la EDA de la mano estimulada. No se encontraron otras interacciones significativas. En la Tabla 13 se muestran todos los resultados. Los análisis realizados con aquellos usuarios que solo sentían propiedad mostrar las mismas interacciones significativas.

Tabla 13. Interacciones entre la corporización y los registros fisiológicos en el estudio con individuos con ictus.

	<i>Propiedad</i>	<i>Localización</i>	<i>Agencia</i>
Actividad electrodérmica			
Dominante/No parético	r=0,307	r=0,426	r=0,119
	p=0,051	p=0,005**	p=0,460
No dominante/Parético	r=-0,334	r=0,100	r=-0,301
	p=0,033*	p=0,535	p=0,056
Temperatura de la piel			
	r=0,102	r=0,158	r=0,244
	p=0,527	p=0,323	p=0,124
Electromiografía			
	r=-0,314	r=0,027	r=-0,227
	p=0,046*	p=0,865	p=0,154

3.3.7. Discusión

En este estudio se compararon las respuestas subjetivas y fisiológicas de sujetos sanos y con ictus durante la realización del experimento del RHI. Los resultados mostraron que, en comparación con los participantes sanos, los individuos que habían sufrido un ictus experimentaron una mayor sensación de propiedad y agencia. A su vez, mostraron un menor aumento de la EDA y de la temperatura de la piel, así como una menor actividad de sEMG en la mano estimulada. Una posible plasticidad del esquema corporal de estos participantes y un aumento patológico del predominio de la entrada visual sobre la propiocepción podrían haber promovido estos resultados. Una posible desregulación sudomotora y el papel de la corteza premotora en este proceso podrían explicar las diferentes respuestas fisiológicas entre grupos, las cuales no evidenciaron una relación clara entre ellas, más allá de una relación débil entre la propiedad y la EDA y sEMG, y entre la localización y la EDA.

La sensación de propiedad alcanzada por los participantes sanos durante el experimento fue similar a los valores obtenidos en estudios previos. Diversos artículos que utilizaron el cuestionario ERHQ obtuvieron resultados de propiedad que, como ya se ha comentado en el estudio anterior, oscilaron entre el 53% [94] y el 78% [91] utilizando condiciones visotáctiles análogas. El efecto significativamente mayor detectado en los participantes con ictus contradice un estudio controlado que también incluyó participantes sanos [261]. Sin embargo, las diferencias en la muestra (no se reportó ningún informe sobre la condición de los participantes), la variación en el procedimiento y las herramientas de medición utilizadas podrían explicar esta diferencia. Por otro lado, nuestros resultados están en línea con artículos más recientes. Un estudio con individuos hemipléjicos que habían sufrido un ictus reportó que la estimulación de la mano afectada provocaba una ilusión más fuerte que la estimulación de la mano menos afectada, lo que se atribuyó a una interrupción del funcionamiento natural entre señales aferentes y eferentes [196]. Un estudio exploratorio previo con un sujeto que había perdido la propiedad de su mano tras el ictus también mostró los mismos resultados [195]. Curiosamente, en este último estudio se observó que la exposición visual a la mano de goma fue suficiente para provocar fuertes sensaciones de propiedad, lo que podría destacar el papel de la información visual en la ilusión en este tipo de sujetos. Otro estudio que involucró un participante que había sufrido un ictus con negligencia unilateral espacial mostró

que el experimento mejoró, temporalmente, el rendimiento del participante en las pruebas de negligencia [262]. A pesar de la poca información existente sobre cómo el ictus puede afectar a la corporización o al esquema corporal, informes clínicos de usuarios con ictus que sufren de trastornos de representación corporal podrían aportar información sobre los posibles efectos de esta patología en la corporización. Una posible hipótesis que podría explicar los altos porcentajes de propiedad corporal sentida por los participantes con ictus, es que éstos podrían haberse visto afectados por una alteración en su esquema corporal, derivada de la lesión y las posibles limitaciones motoras resultantes [263]. Estas condiciones podrían permitir a los individuos con ictus incorporar la mano de goma a su cuerpo más fácilmente, superponiéndola a su extremidad afectada, y promoviendo así una reconfiguración de su esquema corporal.

Aunque las bases neuronales de este mecanismo aún permanecen desconocidas, estudios recientes han evidenciado el rol de la corteza premotora de ambos hemisferios en la corporación [264–267], incluso tras un ictus [261]. Interesantemente, se han observado diversos mecanismos sensoriomotores que son reclutados de forma similar durante la ilusión del RHI y ejercicios de imaginaria motora [268], evidenciando redes cerebrales superpuestas [269], entre las que se incluye el córtex premotor [268,270]. La intersección entre estas redes y las activadas durante una ejecución motora [271] podrían explicar cómo una ruptura en dicha red podría tener consecuencias en las funciones motoras, lo que a su vez podría afectar al esquema corporal y a la corporización. En el presente estudio, los infartos cerebrales en los participantes con ictus isquémico podrían haber dañado gravemente esta red cerebral, promoviendo alteraciones plásticas en su esquema corporal.

Los resultados del estudio sugirieron que la propiedad del cuerpo puede ser un mecanismo con un gran predominio de la entrada visual sobre la propiocepción, dado que, a pesar de que algunos participantes tenían problemas con la detección de estímulos táctiles en su mano afectada, los cuestionarios mostraron que la sensación de propiedad que sintieron sobre la mano de goma fue similar a la obtenida por otros participantes con mayores puntuaciones en la escala *Nottingham Sensory Assessment*. Este efecto podría explicar la generación de propiedad en ausencia de estimulación táctil [195] y cómo la simple observación de un cuerpo en un espejo pudo llegar a facilitar la sensación de propiedad en un individuo con somatoparafrenia

[272]. Se ha demostrado que la influencia visual puede promover la activación de las áreas motoras corticales incluso con una incongruencia en el movimiento real [273], a pesar de que esta incongruencia interrumpa la ejecución motora [274]. Estos efectos son consistentes con los resultados previos obtenidos con sujetos negligentes. La reconfiguración del esquema corporal a través de la atención podría desplazar la representación egocéntrica del espacio hacia la izquierda, reduciendo así la negligencia [262].

A pesar de que el experimento de RHI permite investigar la sensación de propiedad en ausencia de movimiento y de información eferente, los participantes con ictus reportaron agencia sobre la mano de goma, con mucho mayor intensidad a la reportada por los usuarios sanos. Desafortunadamente, la lesión cerebral, junto con las posibles secuelas motoras derivadas de éste, podrían estar afectando a los resultados. Serían necesarios estudios de neuroimagen que confirmaran la existencia de lesiones en el córtex premotor y áreas circundantes para poder confirmar el papel del córtex premotor, no solo en los movimientos proximales, sino también en el esquema corporal [275,276]. De hecho, según diversos estudios, ambos constructos, propiedad y agencia, podrían ser tratados como experiencias cualitativamente diferentes [277], pero esta relación, que todavía se encuentra en debate [92], podría estar relacionada con las alteraciones del esquema corporal.

El córtex premotor, que se ha evidenciado como una de las áreas cerebrales involucradas en el RHI, también se encuentra involucrado en la planificación y ejecución de los movimientos. Éste se proyecta hacia la corteza motora primaria y hacia la médula espinal, recibiendo información somatosensorial y visual. Además, se ha verificado que la corteza premotora participa en la orientación del cuerpo y en la preparación de los músculos posturales para futuros movimientos [95]. Conjuntamente, se ha demostrado que la corteza premotora de los monos se activa en presencia de una luz que indica la dirección de un movimiento próximo, desactivándose después de que aparezca dicha señal [278]. Además, se ha sugerido que la corteza premotora ventral de los macacos, recientemente denominada zona polisensorial [275], contiene una representación somatotópica de los brazos, las manos, la cara y la boca, que incluso responde cuando se produce un estímulo visual colocado en la región del espacio cerca del campo receptivo táctil [279]. Esto puede implicar que la corteza premotora podría codificar una representación, no solo de

algunas partes del cuerpo, sino también del espacio peripersonal, pudiendo relacionar el cuerpo con el mundo que le rodea, permitiéndole así responder de forma rápida a posibles amenazas externas [276]. Según esto, es posible especular que la propiedad suscitada por el experimento del RHI podría haber promovido una reconfiguración del esquema corporal y consecuentemente del espacio peripersonal. La implicación de la corteza premotora en este mecanismo, evidenciada por estudios previos, también podría haber tenido un efecto inhibitor desconocido que disminuyera la actividad muscular en individuos con ictus, los cuales presentaban una actividad muscular anormalmente incrementada, mientras que tendría un efecto nulo en los participantes sanos. Curiosamente se ha reportado que las lesiones de la corteza premotora causan hipertonicidad [280]. Estudios de neuroimagen deberían confirmar la relación entre las áreas dañadas y el tono muscular. Si esta afirmación fuera cierta, aunque los efectos detectados en el estudio fueran temporales y clínicamente irrelevantes, podrían proporcionar más información sobre los trastornos que afectan a las neuronas motoras como la distonía espástica. Aunque las implicaciones clínicas de estos descubrimientos deberían ser exploradas en futuros estudios, dado que los mecanismos subyacentes al RHI han sido vinculados a los de la terapia de espejo e imagería motora [281], y se ha sugerido que los cambios dinámicos en la percepción de la propiedad por parte del RHI son característicos, si las hipótesis presentadas son correctas, los efectos del RHI se podrían utilizar para predecir la efectividad de estos tratamientos en individuos con ictus.

Por otro lado, el aumento de la EDA en ambas manos durante el experimento está respaldado por hallazgos previos en la mano no estimulada en diferentes poblaciones. Se reportaron resultados similares en sujetos sanos [92,93], en amputados de miembros superiores [139] y en sujetos con síndrome de dolor regional complejo [142]. Sin embargo, no hay investigaciones previas sobre los efectos del experimento en la mano estimulada. Esta falta de evidencia posiblemente esté motivada por limitaciones en la instrumentación utilizada para medir la EDA. Los dispositivos tradicionales, como el que se usó en este estudio para explorar la mano no estimulada, generalmente cuentan con dos sensores que deben de ser colocados en los dedos, los cuales no pueden ser alterados durante la medición, impidiendo así el acariciado del pincel por esta zona. En este estudio, el uso del brazaletes inalámbrico Q-Sensor permitió cuantificar la respuesta en la mano estimulada, evidenciando un aumento menos relevante de la EDA en este lado durante el experimento, significativamente

menor en los participantes con ictus en comparación con el grupo sano. No obstante, aunque este efecto podría atribuirse a los efectos del experimento, también podría haber sido motivado por una desregulación sudomotora derivada de la lesión cerebral, cosa que se ha reportado previamente tras una enfermedad cerebrovascular, particularmente después de un ictus isquémico, tanto en estadios agudos y crónicos [282–284]. Otros estudios han publicado que el ictus podría suprimir la actividad del sistema nervioso simpático [282], lo cual podría provocar respuestas asimétricas en las glándulas sudoríparas después de una lesión cerebral focal [285]. Independientemente de la causa, el aumento en ambas manos excedió el umbral de relevancia propuesto [93], lo que apoya el hecho de que el RHI podría provocar mecanismos neurocognitivos que desencadenan variaciones en la EDA de ambas manos, tanto en sujetos sanos como con ictus. Nuevamente, se especula que la participación de la corteza premotora en el RHI podría haber provocado estas variaciones en la EDA. La estrecha conexión entre las fibras piramidales (corticoespinales) para la transmisión del impulso al músculo esquelético y las fibras sudomotoras (corticopontinas) podría explicar este efecto. Todavía no se conoce si el aumento de la EDA podría ser causado por una reconfiguración del esquema corporal (con la consiguiente participación de la corteza premotora) o por la amenaza sobre un brazo que tiene aspecto humano [141].

La temperatura de la piel ha sido una de las diferentes medidas fisiológicas utilizadas tradicionalmente para cuantificar la sensación de propiedad durante el experimento del RHI. Para ello los investigadores han hecho uso de termómetros infrarrojos que analizaban la temperatura de la piel durante diferentes momentos del experimento. A diferencia del aumento en la temperatura de la piel revelado en el presente estudio, los primeros investigadores que examinaron esta medida postularon que la ilusión evocaba una disminución específica de temperatura en la extremidad no estimulada, que además se correlacionaba con la fuerza de la ilusión [281]. Otro estudio sugirió que la relación entre la temperatura y la propiedad corporal podría ser causal, y mostró que un enfriamiento de la mano real del participante aumentaba la intensidad de la ilusión, mientras un calentamiento extremo de la misma la disminuía [145]. Sin embargo, otro estudio que investigó el efecto del RHI convencional no logró discernir entre la condición síncrona y asíncrona, la cual, supuestamente, no debería promover la ilusión, utilizando la temperatura corporal [144]. Además, un estudio que involucró a individuos con esquizofrenia mostró

resultados todavía menos consistentes. En este estudio, solo cuando se estimuló la mano derecha, se detectó un calentamiento significativo de la mano no estimulada y el enfriamiento de la mano estimulada [146]. Otro estudio, en este caso utilizando un robot para realizar el acariciado del RHI, no halló ninguna evidencia que demostrará que existía un enfriamiento de las manos durante el experimento, aunque sí encontró una leve diferencia, no significativa, entre las condiciones síncrona y asíncrona cuando se realizó el acariciado de forma manual [113]. Estos resultados fueron similares en una serie de experimentos que evaluaron la velocidad de acariciado, el lado de la estimulación y el material, los cuales concluyeron que la temperatura de la piel podría ser una variable poco robusta para los estudios de RHI [148].

Como en el caso de la sEMG y la EDA, la participación de la corteza premotora en el RHI podría haber promovido las variaciones en la temperatura de la piel detectadas en este estudio. La estimulación eléctrica (e incluso la eliminación) de áreas corticales premotoras han demostrado influenciar a las glándulas sudoríparas, tanto excitándolas como inhibiéndolas [286], lo que podría explicar los diferentes resultados de los estudios preliminares [113]. Además, la regulación de la temperatura también podría ser el resultado de cambios en la activación y el impulso atencional [146], los cuales podrían ser factores clave para promover la propiedad corporal. Estos factores podrían causar efectos contradictorios que podrían enmascararse entre sí. Estos efectos, junto con las posibles condiciones de temperatura no estabilizada en los estudios previos, podrían haber llevado a una interpretación engañosa de los resultados, los cuales deberían abordarse cuidadosamente en los estudios futuros.

Aunque las medidas fisiológicas mostraron respuestas diferentes en ambos grupos, estas medidas no lograron mostrar validez convergente con casi ninguno de los subcomponentes de la corporización. Aunque las únicas correlaciones significativas, las cuales se encontraron entre la propiedad y la localización, fueron débiles, podrían evidenciar algunos efectos. En primer lugar, la correlación encontrada entre la propiedad y la EDA en la mano estimulada (estadísticamente significativa) y no estimulada (casi estadísticamente significativa) podrían evidenciar una relación entre estas variables, lo que va en línea con trabajos previos [93]. Los resultados mostraron una interacción inversa en ambos brazos: el aumento de propiedad fue asociado con un decrecimiento de la EDA en la mano estimulada y con

un crecimiento en la mano no estimulada. En segundo lugar, la sEMG estuvo asociada con la propiedad, de manera que el incremento de la ilusión se relacionó con el decrecimiento (o relajación) de la actividad muscular. Finalmente, una correlación (aunque débil) fue detectada entre la localización y la EDA de la mano no estimulada, lo que podría indicar que la reorganización del esquema corporal reflejado en la localización estaría influenciando la actividad sudomotora, de la misma forma que la propiedad [93,139–141]. Desafortunadamente, al tratarse del primer estudio que investigó la relación entre los diferentes constructos de la corporización y estas variables fisiológicas, la comparación con artículos previos no fue posible.

En cualquier caso, los resultados y todos los informes contradictorios de los estudios previos que han explorado los correlatos fisiológicos del RHI sugieren que no es posible asumir una relación lineal entre las respuestas subjetivas de la corporización y las respuestas fisiológicas obtenidas durante la experimentación. Esta relación podría ser demasiado compleja para ser calculada mediante una correlación y, además, podría verse afectada por diferentes factores que podrían variar entre estudios.

Las limitaciones de este estudio deben considerarse al analizar los resultados. En primer lugar, el tamaño de la muestra (41 participantes) se puede considerar pequeño, aunque es similar o mayor que la de estudios similares [108,287]. En segundo lugar, todos los participantes con ictus estaban asistiendo a un programa de neurorrehabilitación, lo que podría haber afectado a los resultados. En tercer lugar, no se registró la deriva propioceptiva, pues el deterioro motor de los participantes con ictus, incluso en el brazo menos afectado, impidió que esta medida se registrara. En cuarto lugar, no se pudo registrar la temperatura de la piel en la mano no estimulada, lo que no permitió la comparación de las variaciones de temperatura en ambas manos. En quinto lugar, de manera similar, al utilizar diferentes dispositivos para registrar la EDA fue imposible realizar una comparación directa entre extremidades. Finalmente, no se realizaron mediciones volumétricas basadas en imágenes de resonancia magnética del área premotora, lo que impidió correlacionar las áreas cerebrales con los hallazgos fisiológicos, neuropatológicos y neuropsicológicos del estudio. Sin embargo, la homogeneidad de la muestra en cuanto a características demográficas y clínicas, la evaluación de las condiciones motoras, sensoriales y cognitivas previas de los participantes, el examen de los diferentes subcomponentes

Capítulo 3

de la corporización y la exploración de diferentes variables fisiológicas y sus interacciones, respaldan la validez de los resultados obtenidos.

3.4. Presencia y corporización en individuos sanos y con ictus.

3.4.1. Hipótesis y objetivos

La hipótesis principal del estudio y del presente trabajo fue que la sensación de presencia y corporización en un entorno de RV se mantienen tras un ictus y se ven igualmente modulados por la perspectiva y la inmersión que en usuarios sanos.

Por ello objetivo de este estudio fue determinar y comparar la presencia y la corporización percibida en un entorno de RV bajo diferentes condiciones de inmersión y representación espacial, en sujetos sanos e individuos con ictus²⁴.

3.4.2. Participantes

Una muestra de conveniencia representativa de sujetos sanos e individuos con ictus fue reclutada del personal y pacientes del Servicio de Neurorrehabilitación del Hospital Vithas Valencia al Mar.

Se incluyeron individuos sanos, de edad y sexo emparejados a los participantes con ictus, y sin problemas motores, cognitivos o psicológicos conocidos fue reclutada de la plantilla de trabajadores y familiares del mismo centro. Los individuos con ictus incluidos en el estudio tenían capacidad de comprender e interactuar con el sistema de RV, tal y como describen los criterios de inclusión y exclusión (Tabla 14).

Cuarenta y seis usuarios sanos (25 hombres y 21 mujeres) con una edad media de 50.8 ± 10.9 años participaron en el estudio. Por otro lado, 32 individuos con ictus (18 hombres y 14 mujeres), con una edad media de $48,8 \pm 11,8$ años, cumplieron con los criterios de participación y aceptaron participar en el estudio. Estos usuarios presentaban tanto ictus isquémicos ($n=20$) como hemorrágicos ($n=12$). La etiología

²⁴ Los resultados de este estudio se encuentran publicados en el siguiente trabajo: Borrego, A., Latorre J., Alcañiz M., Llores R Embodiment and presence in virtual reality after stroke. A comparative study with healthy subjects. *Frontiers in Neurology*, 2019. 10:1061.

isquémica incluyó seis infartos totales y 14 parciales de la circulación anterior. Las lesiones se localizaron en el lóbulo derecho ($n=20$) y en el izquierdo ($n=12$), contando con una cronicidad de 276 ± 90 días. Con respecto a su condición cognitiva, los sujetos obtuvieron una puntuación media en el *Mississippi Aphasia Screening Test* de $47,5\pm 1,6$ sobre 50 y una puntuación media en el *Mini-Mental State Examination* de $26,4\pm 2$ sobre 36. Respecto a la condición motora, los sujetos obtuvieron una puntuación media en la *Berg balance scale* de $51\pm 2,9$ sobre 56. Ambos grupos fueron comparables a niveles de edad y de género.

El protocolo experimental fue aprobado por el Comité Ético de Investigación Clínica del Hospital Vithas Valencia al Mar. Todos los participantes dieron su consentimiento por escrito antes de participar en el estudio.

Tabla 14. Criterios de inclusión y exclusión del estudio de presencia y corporización.

<i>Criterios de inclusión</i>	<i>Criterios de exclusión</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Ausencia de déficits cognitivos severos (<i>Mini-Mental State Examination</i> > 23). • Posibilidad de seguir instrucciones (<i>Mississippi Aphasia Screening Test</i> > 44). 	<ul style="list-style-type: none"> • Riesgo de caídas (<i>Berg Balance Scale</i> < 45). • Discapacidad visual o auditiva que no permite la interacción con el sistema de RV. • Negligencia unilateral espacial

3.4.3. Materiales

Se utilizó el mismo EV utilizado en el estudio de presencia e inmersión en individuos sanos, descrito en el subapartado 3.1.3, y los mismos dispositivos de estimulación audiovisual y registro corporal caracterizados en los estudios 2.1.4 y 2.2.3, respectivamente. Para investigar dos de las configuraciones de RV más utilizadas, el EV fue representado desde un punto de vista egocéntrico (perspectiva en primera persona) y mostrado a través de un HMD Oculus Rift (Figura 45a), o desde un punto de vista aloecéntrico (perspectiva en tercera persona) y mostrado en una pantalla LED de 60" colocada en la pared a una altura aproximada de 175 cm sobre el suelo (Figura

45b). Los movimientos de los participantes fueron registrados mediante una Kinect v2 y transmitidos al avatar en el EV. En la perspectiva en tercera persona, se utilizaron todas las articulaciones. En la perspectiva de primera persona, en cambio, la rotación y aceleración de la cabeza fueron proporcionadas por el HMD.

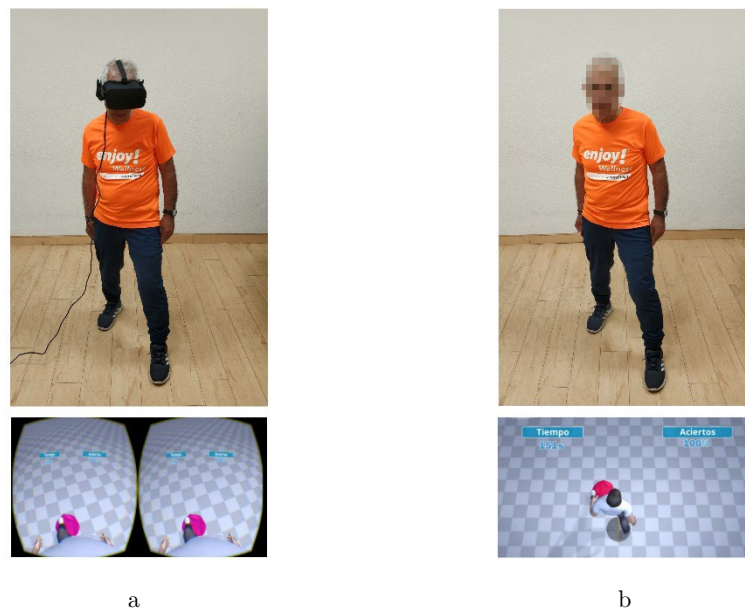


Figura 45. Captura de un participante con ictus realizando la tarea del estudio de presencia y corporización *a)* en primera persona y *b)* en tercera persona. En ambas condiciones, el participante está pisando una esfera localizada en el suelo cerca de su pie izquierdo.

3.4.4. Procedimiento

El procedimiento del estudio fue similar al llevado a cabo en el estudio de presencia e inmersión descrito en el subapartado 3.1.4. Para este experimento, sin embargo, se investigaron las dos condiciones de inmersión y perspectiva descritas anteriormente. Para ello, todos los participantes interactuaron con el EV mostrado en primera persona mediante el HMD y en tercera persona con la pantalla durante 10 minutos, en ambos casos.

3.4.4.1 Medidas

Tras cada condición, los participantes evaluaron el sentido percibido de presencia y corporización mediante dos cuestionarios específicos, una versión del ERHQ [79] adaptada a la experiencia de RV y el SUS [34], descritos en la subsección 1.2.3.1 y 1.3.3.1, respectivamente. La adaptación del ERHQ se llevó a cabo cambiando los enunciados referidos a la mano de plástico por referencias al avatar, así como el valor de sus puntuaciones para adecuarlas al cuestionario SUS. Las puntuaciones de ambos cuestionarios variaron entre 1 (muy en desacuerdo) y 7 (muy de acuerdo).

3.4.5. Análisis de los datos

3.4.5.1 Análisis estadístico

Los subcomponentes de la corporización fueron definidos de acuerdo a la descripción original del cuestionario como la media de las puntuaciones de los primeros cinco ítems del cuestionario (propiedad), la media de los ítems del seis al ocho (localización) y de los últimos dos (agencia) [79]. Se consideró que las puntuaciones medias superiores a 4 denotaron un reflejo significativo de la intensidad de la experiencia [79].

Se comprobó la normalidad de las medidas utilizando test Shapiro-Wilk. Para determinar las diferencias entre la condición neurológica de los participantes y la condición de visualización y perspectiva se realizaron pruebas ANOVA mixtas con la condición neurológica de los participantes (sanos vs ictus) como factor entre-

sujetos y la perspectiva-dispositivo de visualización (primera persona con HMD vs tercera persona con pantalla) como factor intra-sujetos.

Todos los análisis estadísticos se realizaron mediante el *software* SPSS Statistics, versión 22 para Windows.

3.4.6. Resultados

Las puntuaciones para la presencia y la corporización experimentadas, así como las diferencias estadísticas entre ellas pueden observarse en la Figura 46.

Se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre los sujetos sanos, tanto en la condición de primera como de tercera persona, para la sensación de propiedad ($5,41 \pm 0,88$ vs $4,36 \pm 1,39$; $F(1,76)=20,473$, $p < 0,001$, $\eta^2_p=0,212$), localización ($5,43 \pm 0,84$ vs $4,74 \pm 1,47$; $F(1,76)=8,553$, $p=0,005$, $\eta^2_p=0,101$) y presencia ($5,49 \pm 0,81$ vs $4,03 \pm 1,24$; $F(1,76)=50,973$, $p < 0,001$, $\eta^2_p=0,401$) (Tabla 15). Los valores más altos de estas variables fueron detectados consistentemente para la perspectiva en primera persona. No obstante, ambas condiciones de visualización indujeron con éxito tanto la sensación de propiedad y la localización sobre el avatar virtual como la presencia en el EV, como demuestras el hecho de que todos los valores a estos constructos superaron el umbral de relevancia. Aun así, cabe destacar que los valores para la sensación de presencia durante la condición de tercera persona fueron los menores. No se detectaron diferencias entre condiciones para la agencia ($5,98 \pm 0,75$ vs $6,04 \pm 0,82$), que mostró los valores más altos de todos los subcomponentes de la corporización.

Tabla 15. Resultados de presencia y corporización en los usuarios sanos.

	<i>Primera persona</i>	<i>Tercera persona</i>	<i>Significación</i>
Propiedad	5,41±0,88	4,36±1,39	p<0,001**
Localización	5,43±0,84	4,74±1,47	p=0,005**
Agencia	5,98±0,75	6,04±0,82	p=0,845
Presencia	5,49±0,81	4,03±1,24	p<0,001**

Capítulo 3

De manera similar a los participantes sanos, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las perspectivas de primera y tercera persona en el grupo de ictus para la propiedad ($4,61 \pm 2,02$ vs $3,95 \pm 1,92$; $F(1,76)=5,753$, $p < 0,019$, $\eta^2_p=0,070$), la localización ($5,10 \pm 1,53$ vs $4,13 \pm 2,15$; $F(1,76)=11,910$, $p=0,001$, $\eta^2_p=0,135$) y la presencia ($4,45 \pm 1,80$ vs $3,83 \pm 1,61$; $F(1,76)=6,357$, $p=0,014$, $\eta^2_p=0,077$) (Tabla 16). Mientras que esas variables fueron calificadas con altas puntuaciones para la condición de primera persona, la perspectiva de tercera persona apenas fue capaz de inducir localización sobre el avatar virtual en esta población. Además, las puntuaciones de propiedad y presencia no llegaron a alcanzar, aunque por poco, el umbral de significación. Como en el grupo de los usuarios sanos, la agencia no mostró diferencias significativas entre las condiciones ($5,59 \pm 1,41$ vs $5,25 \pm 1,58$) obteniendo, análogamente, los valores más altos de todos los subcomponentes de la corporización.

La comparación entre grupos evidenció diferencias estadísticamente significativas únicamente en la presencia ($5,49 \pm 0,81$ vs $4,45 \pm 1,80$; $F(1,76)=6,952$, $p=0,010$, $\eta^2_p=0,084$) en la condición de primera persona. Las puntuaciones en la presencia y la corporización para el grupo sano fueron consistentemente más altas que las del grupo con ictus para todas las medidas y bajo ambas condiciones.

Tabla 16. Resultados de presencia y corporización en los usuarios con ictus.

	<i>Primera persona</i>	<i>Tercera persona</i>	<i>Significación</i>
Propiedad	4,61±2,02	3,95±1,92	p<0,019*
Localización	5,10±1,53	4,13±2,15	p=0,001**
Agencia	5,59±1,41	5,25±1,58	p=0,735
Presencia	4,45±1,80	3,83±1,61	p=0,014*

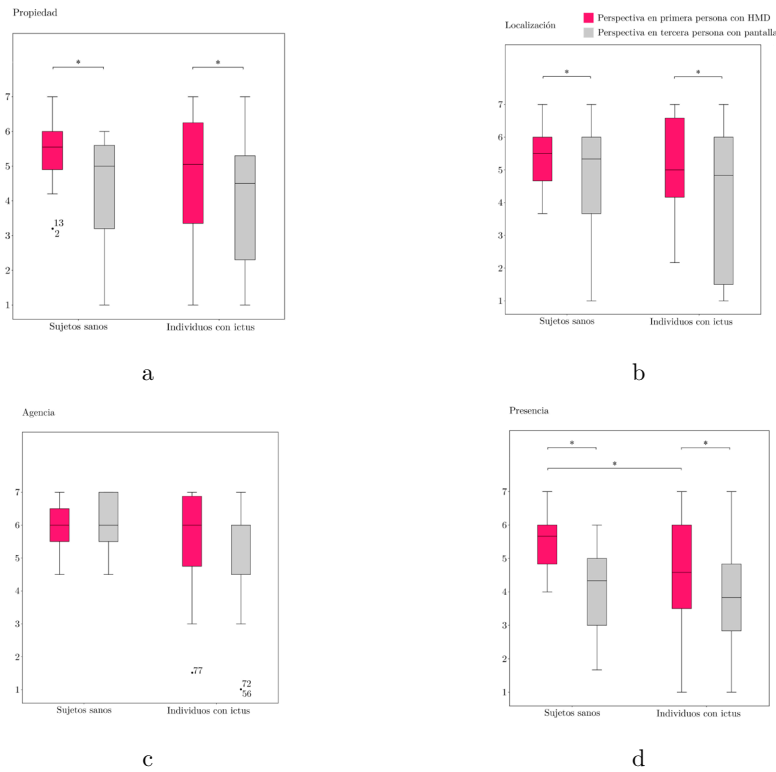


Figura 46. Resultado de a) propiedad, b) localización, c) agencia y d) presencia experimentada por los sujetos sanos y los individuos con ictus en ambas condiciones en el experimento de presencia y corporización.

3.4.7. Discusión

El estudio investigó y comparó la presencia y la corporización experimentada por una muestra de sujetos sanos e individuos con ictus durante la exposición a una tarea interactiva de RV desde diferentes perspectivas y bajo diferentes condiciones de inmersión. Los resultados mostraron que la condición que utilizaba una perspectiva en primera persona con el HMD promovió una mayor propiedad y localización sobre el avatar virtual, así como una mayor presencia en el EV, en ambas poblaciones. La agencia, sin embargo, permaneció elevada y casi invariable entre las distintas condiciones. Los participantes con ictus reportaron consistentemente experiencias

menos vívidas que los participantes sanos, aunque dichas diferencias sólo fueron estadísticamente significativas para la presencia bajo la condición de primera persona.

La mayor sensación de propiedad y localización en la condición de primera persona y las altas puntuaciones alcanzadas para la agencia en ambas condiciones se encuentran en línea con resultados previos obtenidos en sujetos sanos [88,126,197,288], y evidencian la distinta naturaleza de las diferentes sensaciones. Un estudio previo mostró resultados contradictorios a los obtenidos en este estudio, reportando invariabilidad en las sensaciones percibidas de propiedad y agencia frente al cambio de perspectiva [289]. Los resultados de dicho estudio podrían explicarse debido a la falta de sensibilidad de la herramienta de medición utilizada para cuantificar la corporización, la cual consistió en un solo ítem para evaluar cada subcomponente. De manera similar a los efectos de la perspectiva en la propiedad y la localización en el presente estudio, los altos niveles de presencia reportados por los sujetos sanos durante la condición de primera persona se encuentran respaldados por estudios previos [198–200]. Interesantemente, el único experimento previo que analizó conjuntamente la presencia y la corporización no reportó cambios en la presencia percibida frente a un cambio de perspectiva e inmersión invariable [197]. Esto podría indicar que las variaciones en la presencia percibida en cada condición podrían deberse a la diferencia en la inmersión utilizada en el estudio, más que al cambio de la perspectiva. Desafortunadamente, como ambos conceptos fueron modificados conjuntamente en cada condición del estudio, no es posible identificar el factor responsable de la variación de la presencia. A pesar de las diferencias en la presencia y en la corporización entre ambas condiciones, sus altas puntuaciones podrían indicar que los sujetos sanos son capaces de encarnar con éxito avatares virtuales y estar presentes en un mundo virtual, independientemente de la perspectiva y de la tecnología utilizada.

Si bien las diferencias no alcanzaron la significación estadística, las puntuaciones más bajas para la propiedad y la localización en los individuos con ictus en primera persona podrían evidenciar cierta dificultad de estos participantes de experimentar el cuerpo virtual como propio y encontrarse ubicados en él. Aunque no existen estudios previos que hayan analizado la corporización en una muestra de individuos con ictus en un EV, experimentos anteriores que utilizaron ilusiones

corporales mostraron resultados contradictorios para este tipo de sujetos, reportando tanto valores mayores [290], como menores [261], de la propiedad frente a una muestra de usuarios sanos. Las posibles secuelas cognitivas derivadas de un ictus, como es la disminución de la capacidad de pensamiento abstracto [291], podrían haber alterado la capacidad de corporización sobre los avatares virtuales, que, aunque replicaron los movimientos de los participantes, seguían siendo avatares neutrales sin ningún parecido con ellos. Además, las limitaciones de la tecnología de seguimiento corporal [226] y la movilidad de los avatares podrían haber provocado que algunos patrones motores patológicos de los individuos con ictus no fueran exactamente reproducidos por sus avatares, lo que también podría haber reducido la identificación del avatar como su propio cuerpo y la sensación de encontrarse ubicados en él. Esto podría explicar por qué los participantes con ictus reportaron ser capaces de mover el avatar, pero no sentirse tan localizados sobre ellos, ni sentirse presentes en el EV. Es importante destacar, sin embargo, que el umbral significativo de todos los subcomponentes de la corporización fue superado en media por ambos grupos para todas las condiciones, a excepción de la propiedad en tercera persona en los individuos con ictus, la cual se quedó muy cercana a superarlo. Las diferencias estadísticas en la presencia percibida por ambos grupos fueron análogas a las diferencias en propiedad y localización, siendo reportadas con menor intensidad en el grupo con ictus. En línea con lo anterior, la condición cognitiva de los individuos con ictus podría haber complicado su interpretación del EV como algo real, lo que, en consecuencia, podría haber disminuido su sensación de existir en él. Sin embargo, las puntuaciones en presencia de este grupo, superiores al umbral, respaldan la vivacidad de la experiencia.

Los resultados obtenidos en este estudio no pudieron ser comparados a los niveles de obtenidos en el estudio previo, en el cual se analizaba la corporización durante el experimento del RHI, debido a las grandes diferencias entre ambos. Primero, el cambio de paradigma real a virtual podría estar afectando a la corporización observada por estos usuarios. Segundo, la propiedad sobre un miembro de goma no tendría por qué ser similar a la corporización observada sobre un avatar virtual completo, debido posiblemente a algunas secuelas cognitivas presentes en los usuarios con ictus. Tercero, la adición de movimiento al experimento en este último estudio hace que ambas experiencias no sean comparables, ya que el RHI permite promover una sensación de propiedad del brazo de goma en ausencia de movimiento.

Capítulo 3

Por último, el uso de un dispositivo “invasivo” para los usuarios con ictus, como fueron las gafas de realidad virtual, podrían haber distraído a estos participantes disminuyendo así su focalización en el experimento.

En resumen, las puntuaciones más altas de propiedad, localización y presencia fueron proporcionadas por el grupo de individuos sanos, independientemente de la condición, y para la perspectiva de primera persona con HMD independientemente del grupo. La agencia, por el contrario, obtuvo valores muy altos para ambas condiciones en los dos grupos. Los resultados análogos en ambos grupos podrían demostrar que la presencia y la corporización fueron experimentadas de forma similar en ambas poblaciones. Esto sugiere que los mecanismos básicos que modulan estos fenómenos podrían preservarse después de un ictus y podrían respaldar la efectividad de las intervenciones de RV en esta población.

Capítulo 4.

Conclusiones

4.1. Objetivo principal

Los resultados mostrados en este trabajo han demostrado que la sensación de presencia y corporización percibida en un entorno de RV están moduladas por las condiciones de inmersión y representación espacial de forma similar en individuos sanos y con ictus.

En concreto, los individuos sanos reportaron los niveles más altos de propiedad, localización y presencia, con independencia de las condiciones de inmersión y representación espacial. Tanto los individuos sanos como con ictus reportaron la mayor intensidad de estas sensaciones durante la experiencia con la perspectiva en primera persona con HMD. Los valores de agencia, en cambio, fueron muy altos para ambas condiciones en todos los participantes. Aún con las variaciones observadas, sólo se hallaron diferencias significativas entre individuos sanos y con ictus en la presencia percibida en la condición de la primera persona. Estas diferencias podrían deberse a posibles secuelas cognitivas derivadas de la lesión cerebral, las cuales podrían haber interferido en las interpretaciones del EV como algo real, incluido el avatar, y, en consecuencia, podrían haber disminuido la sensación de estar en el entorno y poseer una representación virtual de su cuerpo.

4.2. Objetivos secundarios

Los resultados del presente trabajo han demostrado que los dispositivos de estimulación audiovisual de última generación proporcionan un área de trabajo, precisión y *jitter* tales que los convierten en una alternativa factible no solo para aplicaciones de salud basadas en RV, sino también para la navegación y la exploración de entornos virtuales de tamaño real, sin efectos adversos. Asimismo, el registro corporal proporcionado por las distintas versiones del sistema Kinect también ha demostrado poseer la validez adecuada para su uso como medio de interacción en aplicaciones de RV, como las comentadas anteriormente.

Adicionalmente, los resultados presentados apuntan a que la presencia percibida por individuos sanos en un entorno de RV es modulada, cuando los demás factores permanecen invariables, por cambios en la inmersión, mostrando mayor intensidad cuando el EV es visualizado mediante un HMD, que cuando es visualizado en una pantalla de televisión, lo cual supone un cambio de paradigma frente a lo reportado por algunos estudios con dispositivos previos.

En el presente trabajo también se han aportado evidencias que sustentan que los mecanismos de la corporización están presentes y persisten con la edad con una intensidad comparable, pero con varianza creciente. Los hallazgos presentados no muestran diferencias en la percepción de la sensación de propiedad ni en las respuestas fisiológicas promovidas, descritas por la temperatura de la piel y la EDA.

Finalmente, los resultados presentados en este trabajo parecen evidenciar una mayor facilidad para sentir propiedad corporal y agencia en individuos con ictus que en individuos sanos. Posibles alteraciones en dicho esquema corporal y un mayor predominio patológico de la entrada visual sobre la propiocepción tras la lesión cerebral podrían facilitar estos mecanismos. Las diferencias entre individuos sanos y con ictus no sólo se evidenciaron en las percepciones subjetivas sino también en las respuestas fisiológicas. Las personas con ictus mostraron un aumento menor de la EDA y de la temperatura de la piel, y una actividad sEMG reducida en la extremidad estimulada. Estos resultados podrían evidenciar cierta plasticidad del esquema corporal promovida por la lesión cerebral.

Anexos

Anexo I. Cuestionario Embodiment of Rubber Hand Questionnaire

Cuestionario utilizado para los estudios de corporización con RHI.

1. Parecía como si estuviera mirando directamente a mi mano, en lugar de en una mano de plástico:

-3	-2	-1	0	1	2	3	
(Muy en desacuerdo)					(Muy de acuerdo)		

2. Parecía que la mano de plástico empezaba a ser similar a mi mano real:

-3	-2	-1	0	1	2	3	
(Muy en desacuerdo)					(Muy de acuerdo)		

3. Parecía que la mano de plástico me pertenecía:

-3	-2	-1	0	1	2	3	
(Muy en desacuerdo)					(Muy de acuerdo)		

4. Parecía que la mano de plástico era mi brazo:

-3	-2	-1	0	1	2	3	
(Muy en desacuerdo)					(Muy de acuerdo)		

5. Parecía que la mano de plástico era parte de mi cuerpo:

-3	-2	-1	0	1	2	3	
(Muy en desacuerdo)					(Muy de acuerdo)		

6. Parecía que mi mano estaba en el lugar donde estaba la mano de plástico:

-3	-2	-1	0	1	2	3	
(Muy en desacuerdo)					(Muy de acuerdo)		

Cuestionario utilizado para los estudios de corporización en RV

1. Parecía como si estuviera mirando directamente a ms piernas, en lugar de a unas piernas virtuales:

1	2	3	4	5	6	7
(Muy en desacuerdo)						(Muy de acuerdo)

2. Parecía que las piernas virtuales fueran similares a mis piernas reales:

1	2	3	4	5	6	7
(Muy en desacuerdo)						(Muy de acuerdo)

3. Parecía que las piernas virtuales me pertenecían:

1	2	3	4	5	6	7
(Muy en desacuerdo)						(Muy de acuerdo)

4. Parecía que las piernas virtuales era mis piernas:

1	2	3	4	5	6	7
(Muy en desacuerdo)						(Muy de acuerdo)

5. Parecía que las piernas virtuales eran parte de mi cuerpo:

1	2	3	4	5	6	7
(Muy en desacuerdo)						(Muy de acuerdo)

6. Parecía que mis piernas estaban en el lugar donde estaban las piernas virtuales:

1	2	3	4	5	6	7
(Muy en desacuerdo)						(Muy de acuerdo)

7. Parecía que las piernas virtuales estaban en el lugar de mis piernas:

1	2	3	4	5	6	7
(Muy en desacuerdo)						(Muy de acuerdo)

8. Parecía que la sensación de tocar el suelo con mis pies estaba causada por el contacto de las piernas virtuales con el suelo virtual:

1	2	3	4	5	6	7
(Muy en desacuerdo)					(Muy de acuerdo)	

9. Parecía que podía mover las piernas virtuales cuando quería:

1	2	3	4	5	6	7
(Muy en desacuerdo)					(Muy de acuerdo)	

10. Parecía que tenía el control de las piernas de plástico:

1	2	3	4	5	6	7
(Muy en desacuerdo)					(Muy de acuerdo)	

Anexo II. Cuestionario Slater-Usoh- Steed

1. Por favor valora en qué medida tuviste la sensación de “estar allí”, en el entorno mostrado, en la siguiente escala de 1 a 7:

Tuve la sensación de “estar allí”, en el entorno mostrado:

1	2	3	4	5	6	7
(Nada)						(Totalmente)

2. ¿Ha habido momentos durante la experiencia, en los que el entorno mostrado, constituyó para ti la “realidad” y casi te olvidaste del mundo real? Por favor responde en la siguiente escala de 1 a 7:

Hubo veces durante la experiencia en que el entorno mostrado constituyó para mí la realidad...

1	2	3	4	5	6	7
(En ningún momento)						(La mayor parte del tiempo)

3. Cuando piensas ahora en esta experiencia, ¿piensas en el entorno más como una imagen que viste, o más como algún lugar que has visitado? Por favor responde en la siguiente escala de 1 a 7:

El entorno mostrado me parece más como...

1	2	3	4	5	6	7
(Una imagen que he visto)						(Un lugar en el que he estado)

Bibliografía

Bibliografía

- [1] Coates G. Program from Invisible Site—a virtual sho. *a Multimed. Perform. Work Present. by Georg. Coates Perform. Work.*, San Francisco: 1992.
- [2] Greenbaum P. The lawnmower man. 1992.
- [3] Blake J, Gurocak HB. Haptic glove with MR brakes for virtual reality. *IEEE/ASME Trans Mechatronics* 2009.
- [4] Fitzgerald D, Foody J, Kelly D, Ward T, Markham C, McDonald J, et al. Development of a wearable motion capture suit and virtual reality biofeedback system for the instruction and analysis of sports rehabilitation exercises. *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. - Proc.*, 2007.
- [5] Cao Z, Simon T, Wei SE, Sheikh Y. Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields. *Proc. - 30th IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition, CVPR 2017*, 2017.
- [6] Latorre J, Llorens R, Borrego A, Alcañiz M, Colomer C, Noe E. A low-cost KinectTM for Windows[®]v2-based gait analysis system. *Int. Conf. Virtual Rehabil. ICVR*, vol. 2017- June, 2017.
- [7] Bermúdez i Badia S, Fluet GG, Llorens R, Deutsch JE. Virtual reality for sensorimotor rehabilitation post stroke: Design principles and evidence. *Neurorehabilitation Technol. Second Ed.*, 2016.
- [8] Lloréns R, Alcañiz M, Navarro MD, Ferri J, Noé E. Self-awareness rehabilitation through a multi-touch virtual game board after acquired brain injury. *2013 Int. Conf. Virtual Rehabil. ICVR 2013*, 2013.
- [9] Lloréns R, Gil-Gómez JA, Alcañiz M, Colomer C, Noé E. Improvement in balance using a virtual reality-based stepping exercise: A randomized controlled trial involving individuals with chronic stroke. *Clin Rehabil* 2015.
- [10] Laver KE, Lange B, George S, Deutsch JE, Saposnik G, Crotty M. Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database Syst Rev* 2017.
- [11] Steuer J. Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *J Commun* 1992;42:73–93.
- [12] Draper J V., Kaber DB, Usher JM. Telepresence. *Hum Factors J Hum Factors Ergon Soc* 2007.
- [13] Schuemie MJ, van der Straaten P, Krijn M, van der Mast CA. Research on presence in virtual reality: a survey. *Cyberpsychol Behav* 2001.
- [14] Lombard M, Ditton T. At the Heart of It All: The Concept of Presence. *J*

Comput Commun 2006.

- [15] Research TIS for P. The concept of presence, explication statement 2000.
- [16] Sheridan TB. Musings on Telepresence and Virtual Presence. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 2015.
- [17] Heeter C. Being There: The Subjective Experience of Presence . *Presence Teleoperators Virtual Environ* 2015.
- [18] Kalawsky R. The validity of presence as a reliable human performance metric in immersive environments. *3rd Int Work Presence* 2000.
- [19] Slater M, Wilbur S. A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 1997.
- [20] Betbeder L. Near-field 3D Audio Explained 2017.
- [21] Malcolm GL, Groen IIA, Baker CI. Making Sense of Real-World Scenes. *Trends Cogn Sci* 2016;20:843–56.
- [22] Sereno MI, Dale AM, Reppas JB, Kwong KK, Belliveau JW, Brady TJ, et al. Borders of multiple visual areas in humans revealed by functional magnetic resonance imaging. *Science (80-)* 1995;268:889–93.
- [23] Cruz-Neira C, Sandin DJ, DeFanti TA, Kenyon R V., Hart JC. The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. *Commun ACM* 2002.
- [24] Juan MC, Pérez D. Comparison of the Levels of Presence and Anxiety in an Acrophobic Environment Viewed via HMD or CAVE. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 2009;18:232–48.
- [25] Merel T. Virtual, Augmented and Mixed Reality are the 4th Wave of Digital Technology. *Digi-Capital* 2016.
- [26] Deb S, Carruth DW, Sween R, Strawderman L, Garrison TM. Efficacy of virtual reality in pedestrian safety research. *Appl Ergon* 2017.
- [27] Jean dit Gautier E, Bot-Robin V, Libessart A, Doucède G, Cosson M, Rubod C. Design of a Serious Game for Handling Obstetrical Emergencies. *JMIR Serious Games* 2016.
- [28] Nunnerley J, Gupta S, Snell D, King M. Training wheelchair navigation in immersive virtual environments for patients with spinal cord injury–end-user input to design an effective system. *Disabil Rehabil Assist Technol* 2017.
- [29] Cameirão MS, Badia SBI, Oller ED, Verschure PFMJ. Neurorehabilitation using the virtual reality based Rehabilitation Gaming System: Methodology, design, psychometrics, usability and validation. *J Neuroeng Rehabil* 2010.

- [30] Fong KNK, Chow KY Y, Chan BCH, Lam KCK, Lee JCK, Li THY, et al. Usability of a virtual reality environment simulating an automated teller machine for assessing and training persons with acquired brain injury. *J Neuroeng Rehabil* 2010.
- [31] Llorens R, Noé E, Ferri J, Alcañiz M. Videogame-based group therapy to improve self-awareness and social skills after traumatic brain injury. *J Neuroeng Rehabil* 2015.
- [32] Navarro MD, Lloréns R, Noé E, Ferri J, Alcañiz M. Validation of a low-cost virtual reality system for training street-crossing. A comparative study in healthy, neglected and non-neglected stroke individuals. *Neuropsychol Rehabil* 2013.
- [33] Levin MF, Weiss PL, Keshner EA. Emergence of Virtual Reality as a Tool for Upper Limb Rehabilitation: Incorporation of Motor Control and Motor Learning Principles. *Phys Ther* 2015.
- [34] Usoh M, Catena E, Arman S, Slater M. Using presence questionnaires in reality. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 2000.
- [35] Nichols S, Haldane C, Wilson JR. Measurement of presence and its consequences in virtual environments. *Int J Hum Comput Stud* 2000.
- [36] Meehan M, Insko B, Whitton M, Brooks FP. Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *Proc. 29th Annu. Conf. Comput. Graph. Interact. Tech. - SIGGRAPH '02*, 2002.
- [37] Bouchard S, Robillard G, St-Jacques J, Dumoulin S, Patry MJ, Renaud P. Reliability and validity of a single-item measure of presence in VR, 2005.
- [38] Brown S, Ladeira I, Winterbottom C, Blake E. The Effects of Mediation in a Storytelling Virtual Environment, 2011.
- [39] Witmer BG, Singer MJ. Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 1998.
- [40] Rand D, Katz N, Weiss PL. Evaluation of virtual shopping in the VMALL: Comparison of post-stroke participants to healthy control groups. *Disabil Rehabil* 2007.
- [41] Schloerb DW. A Quantitative Measure of Telepresence. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 2015.
- [42] Sanchez-Vives M V., Slater M. From presence to consciousness through virtual reality. *Nat Rev Neurosci* 2005.
- [43] Slater M, Usoh M, Chrysanthou Y. The Influence of Dynamic Shadows on

- Presence in Immersive Virtual Environments, 2011.
- [44] Parasuraman R, Rizzo M. Neuroergonomics: The brain at work. 2009.
 - [45] Klem GH, Lueders HO, Jasper HH, Elger C. The ten-twenty electrode system of the International Federation. 1999.
 - [46] Guideline 5: Guidelines for standard electrode position nomenclature. *J Clin Neurophysiol* 2006.
 - [47] Oostenveld R, Praamstra P. The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements. *Clin Neurophysiol* 2001.
 - [48] Glover GH. Overview of functional magnetic resonance imaging. *Neurosurg Clin N Am* 2011.
 - [49] Wager TD, Hernandez L, Jonides J, Lindquist M. Elements of Functional Neuroimaging. *Handb. Psychophysiol.*, 2009.
 - [50] Freeman J, Avons SE, Meddis R, Pearson DE, Ijsselstein W. Using behavioral realism to estimate presence: A study of the utility of postural responses to motion stimuli. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 2000.
 - [51] Axelsson A-S, Abelin Å, Heldal I, Schroeder R, Wideström J. Cubes in the Cube: A Comparison of a Puzzle-Solving Task in a Virtual and a Real Environment. *CyberPsychology Behav* 2002.
 - [52] Cruz-Neira C, Leigh J, Papka M, Barnes C, Cohen SM, Das S, et al. Scientists in wonderland: A report on visualization applications in the CAVE virtual reality environment. *Proc 1993 IEEE Res Prop Virtual Real Symp* 1993:59–66.
 - [53] Kim K, Rosenthal MZ, Zielinski DJ, Brady R. Effects of virtual environment platforms on emotional responses. *Comput Methods Programs Biomed* 2014.
 - [54] Krijn M, Emmelkamp PMG, Biemond R, de Wilde de Ligny C, Schuemie MJ, van der Mast CAPG. Treatment of acrophobia in virtual reality: the role of immersion and presence. *Behav Res Ther* 2004.
 - [55] Mania K, Chalmers A. The Effects of Levels of Immersion on Memory and Presence in Virtual Environments: A Reality Centered Approach. *CyberPsychology Behav* 2001;4:247–64.
 - [56] Borrego A, Latorre J, Llorens R, Alcañiz M, Noé E, Lee K, et al. Feasibility of a walking virtual reality system for rehabilitation: objective and subjective parameters. *J Neuroeng Rehabil* 2016;13:68.
 - [57] Lin JJ-W, Duh HBL, Parker DE, Abi-Rached H, Furness TA. Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual

environment, 2003.

- [58] Kim T, Biocca F. Telepresence via Television: Two Dimensions of Telepresence May Have Different Connections to Memory and Persuasion.[1]. *J Comput Commun* 2010.
- [59] Hendrix C, Barfield W. Presence within virtual environments as a function of visual display parameters. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 1996.
- [60] Schwind V, Knierim P, Haas N, Henze N. Using Presence Questionnaires in Virtual Reality. *Proc. 2019 CHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - CHI '19*, 2019.
- [61] Slater M. Measuring presence: A response to the Witmer and Singer presence questionnaire. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 1999;8:1–13.
- [62] Ellis SR. Presence of mind: A reaction to Thomas Sheridan's "further musings on the psychophysics of presence." *Presence Teleoperators Virtual Environ* 1996.
- [63] Basdogan C, Ho C-H, Srinivasan MA, Slater M. An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. *ACM Trans Comput Interact* 2002.
- [64] Slater M, Linakis V, Usoh M, Kooper R. Immersion, presence, and performance in virtual environments: an experiment with tri-dimensional chess. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 1996.
- [65] Schlögl A, Slater M, Pfurtscheller G. Presence research and EEG. *Proc 5th Int Work Presence* 2002.
- [66] Baumgartner T, Valko L, Esslen M, Jäncke L. Neural Correlate of Spatial Presence in an Arousing and Noninteractive Virtual Reality: An EEG and Psychophysiology Study. *CyberPsychology Behav* 2006.
- [67] Hoffman HG, Richards T, Coda B, Richards A, Sharar SR. The Illusion of Presence in Immersive Virtual Reality during an fMRI Brain Scan. *CyberPsychology Behav* 2003.
- [68] Baumgartner T. Feeling present in arousing virtual reality worlds: prefrontal brain regions differentially orchestrate presence experience in adults and children. *Front Hum Neurosci* 2008.
- [69] Wilson M. Six views of embodied cognition. *Psychon Bull Rev* 2002.
- [70] Borghi AM, Cimatti F. Embodied cognition and beyond: acting and sensing the body. *Neuropsychologia* 2010.
- [71] Miłkowski M. Explaining the computational mind. 2013.

- [72] Williams LE, Bargh JA. Experiencing physical warmth promotes interpersonal warmth. *Science* (80-) 2008.
- [73] Strack F, Martin LL, Stepper S. Inhibiting and Facilitating Conditions of the Human Smile: A Nonobtrusive Test of the Facial Feedback Hypothesis. *J Pers Soc Psychol* 1988.
- [74] Won AS, Haans A, Ijsselsteijn WA, Bailenson JN, Serino A, Alsmith A, et al. The Concept of Body Ownership and Its Relation to Multisensory Integration. *Exp Brain Res* 2014.
- [75] Arzy S, Overney LS, Landis T, Blanke O. Neural mechanisms of embodiment: asomatognosia due to premotor cortex damage. *Arch Neurol* 2006;63:1022–5.
- [76] Legrand D. The bodily self: The sensori-motor roots of pre-reflective self-consciousness. *Phenomenol. Cogn. Sci.*, vol. 5, 2006, p. 89–118.
- [77] Berlucchi G, Aglioti S. The body in the brain: Neural bases of corporeal awareness. *Trends Neurosci* 1997;20:560–4.
- [78] De Vignemont F. Embodiment, ownership and disownership. *Conscious Cogn* 2011.
- [79] Longo MR, Schüür F, Kammers MPM, Tsakiris M, Haggard P. What is embodiment? A psychometric approach. *Cognition* 2008.
- [80] Gallagher S. Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science. *Trends Cogn Sci* 2000.
- [81] Tsakiris M, Haggard P. The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 2005;31:80–91.
- [82] David N, Newen A, Vogeley K. The “sense of agency” and its underlying cognitive and neural mechanisms. *Conscious Cogn* 2008.
- [83] Franck N, Farrer C, Georgieff N, Marie-Cardine M, Daléry J, D’Amato T, et al. Defective recognition of one’s own actions in patients with schizophrenia. *Am J Psychiatry* 2001.
- [84] Lenggenhager B, Mouthon M, Blanke O. Spatial aspects of bodily self-consciousness. *Conscious Cogn* 2009.
- [85] Lenggenhager B, Smith ST, Blanke O. Functional and neural mechanisms of embodiment: Importance of the vestibular system and the temporal parietal junction. *Rev Neurosci* 2006.
- [86] Blanke O, Metzinger T. Full-body illusions and minimal phenomenal selfhood. *Trends Cogn Sci* 2009.

- [87] Ehrsson HH. The experimental induction of out-of-body experiences. *Science* (80-) 2007.
- [88] Slater M, Spanlang B, Sanchez-Vives M V., Blanke O. First person experience of body transfer in virtual reality. *PLoS One* 2010.
- [89] Blanke O, Landis T, Spinelli L, Seeck M. Out-of-body experience and autoscapy of neurological origin. *Brain* 2004.
- [90] Tsakiris M, Longo MR, Haggard P. Having a body versus moving your body: Neural signatures of agency and body-ownership. *Neuropsychologia* 2010;48:2740–9.
- [91] Kalckert A, Ehrsson HH. The moving rubber hand illusion revisited: Comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership. *Conscious Cogn* 2014;26:117–32.
- [92] Ma K, Hommel B. The role of agency for perceived ownership in the virtual hand illusion. *Conscious Cogn* 2015.
- [93] Armel KC, Ramachandran VS. Projecting sensations to external objects: Evidence from skin conductance response. *Proc R Soc B Biol Sci* 2003.
- [94] Petkova VI, Ehrsson HH. When right feels left: Referral of touch and ownership between the hands. *PLoS One* 2009.
- [95] Rosenbaum DA. Physiological Foundations. *Hum. Mot. Control*, 2011.
- [96] Ding C, Palmer CJ, Hohwy J, Youssef GJ, Paton B, Tsuchiya N, et al. Parkinson’s disease alters multisensory perception: Insights from the Rubber Hand Illusion. *Neuropsychologia* 2017.
- [97] Schmalzl L, Kalckert A, Ragnö C, Ehrsson HH. Neural correlates of the rubber hand illusion in amputees: A report of two cases. *Neurocase* 2014.
- [98] Cerella J. Age-related decline in extrafoveal letter perception. *Journals Gerontol* 1985.
- [99] Spear PD. Neural bases of visual deficits during aging. *Vision Res* 1993.
- [100] Bullock-Saxton JE, Wong WJ, Hogan N. The influence of age on weight-bearing joint reposition sense of the knee. *Exp Brain Res* 2001.
- [101] Alain C, Ogawa KH, Woods DL. Aging and the segregation of auditory stimulus sequences. *Journals Gerontol - Ser B Psychol Sci Soc Sci* 1996.
- [102] SKINNER HB, BARRACK RL, COOK SD. Age-related Decline in Proprioception. *Clin Orthop Relat Res* 2006.
- [103] Reuter EM, Behrens M, Zschorlich VR. Age-related differences in corticomotor facilitation indicate dedifferentiation in motor planning. *Exp*

Gerontol 2015.

- [104] Siman-Tov T, Bosak N, Sprecher E, Paz R, Eran A, Aharon-Peretz J, et al. Early age-related functional connectivity decline in high-order cognitive networks. *Front Aging Neurosci* 2017.
- [105] Kilteni K, Maselli A, Kording KP, Slater M. Over my fake body: body ownership illusions for studying the multisensory basis of own-body perception. *Front Hum Neurosci* 2015.
- [106] Lenggenhager B, Tadi T, Metzinger T, Blanke O. Video ergo sum: Manipulating bodily self-consciousness. *Science (80-)* 2007.
- [107] Botvinick M, Cohen J. Rubber hands “feel” touch that eyes see. *Nature* 1998.
- [108] Lloyd DM, Gillis V, Lewis E, Farrell MJ, Morrison I. Pleasant touch moderates the subjective but not objective aspects of body perception. *Front Behav Neurosci* 2013.
- [109] Kalckert A, Ehrsson HH. Moving a Rubber Hand that Feels Like Your Own: A Dissociation of Ownership and Agency. *Front Hum Neurosci* 2012;6.
- [110] Petkova VI, Ehrsson HH. If I were you: Perceptual illusion of body swapping. *PLoS One* 2008;3.
- [111] Boynton PM, Greenhalgh T. Selecting, designing, and developing your questionnaire. *BMJ* 2004.
- [112] Asai T. Agency elicits body-ownership: proprioceptive drift toward a synchronously acting external proxy. *Exp Brain Res* 2016.
- [113] Rohde M, Wold A, Karnath HO, Ernst MO. The human touch: Skin temperature during the rubber hand illusion in manual and automated stroking procedures. *PLoS One* 2013.
- [114] Boucsein W, Fowles DC, Grimnes S, Ben-Shakhar G, Roth WT, Dawson ME, et al. Publication recommendations for electrodermal measurements. *Psychophysiology* 2012;49:1017–34.
- [115] Boucsein W. Electrodermal activity. *Electrodermal Act* 1992;3:3–67.
- [116] Kruk B, Pekkarinen H, Harri M, Manninen K, Hanninen O. Thermoregulatory responses to exercise at low ambient temperature performed after precooling or preheating procedures. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1990.
- [117] Sanitarias F para la F e I. La termorregulación n.d.
- [118] Goodwin GM, McCloskey DI, Matthews PBC. Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: Contribution by muscle spindles to perception?

- Science (80-)* 1972.
- [119] De Vignemont F, Ehrsson HH, Haggard P. Bodily illusions modulate tactile perception. *Curr Biol* 2005.
 - [120] Ehrsson HH, Kito T, Sadato N, Passingham RE, Naito E. Neural substrate of body size: Illusory feeling of shrinking of the waist. *PLoS Biol* 2005.
 - [121] Lackner JR. Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation. *Brain* 1988.
 - [122] Hirstein W, Iversen P, Ramachandran VS. Autonomic responses of autistic children to people and objects. *Proc R Soc B Biol Sci* 2001;268:1883–8.
 - [123] Beckerle P, Christ O, Wojtusich J, Schuy J, Wolff K, Rinderknecht S, et al. Design and control of a robot for the assessment of psychological factors in prosthetic development. *Conf. Proc. - IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, 2012.
 - [124] Ehrsson HH, Spence C, Passingham RE. That’s my hand! Activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb. *Science (80-)* 2004.
 - [125] Ehrsson HH. Touching a Rubber Hand: Feeling of Body Ownership Is Associated with Activity in Multisensory Brain Areas. *J Neurosci* 2005.
 - [126] Maselli A, Slater M. The building blocks of the full body ownership illusion. *Front Hum Neurosci* 2013.
 - [127] Peck TC, Seinfeld S, Aglioti SM, Slater M. Putting yourself in the skin of a black avatar reduces implicit racial bias. *Conscious Cogn* 2013.
 - [128] Maselli A, Slater M. Sliding perspectives: dissociating ownership from self-location during full body illusions in virtual reality. *Front Hum Neurosci* 2014.
 - [129] Cowie D, Makin TR, Bremner AJ. Children’s Responses to the Rubber-Hand Illusion Reveal Dissociable Pathways in Body Representation. *Psychol Sci* 2013.
 - [130] Bremner AJ, Hill EL, Pratt M, Rigato S, Spence C. Bodily Illusions in Young Children: Developmental Change in Visual and Proprioceptive Contributions to Perceived Hand Position. *PLoS One* 2013.
 - [131] Dummer T, Picot-Annand A, Neal T, Moore C. Movement and the rubber hand illusion. *Perception* 2009.
 - [132] Graham KT, Martin-Iverson MT, Holmes NP, Waters FA. The projected hand illusion: component structure in a community sample and association with demographics, cognition, and psychotic-like experiences. *Attention*,

Perception, Psychophys 2014.

- [133] Tajadura-Jiménez A, Longo MR, Coleman R, Tsakiris M. The person in the mirror: Using the enfacement illusion to investigate the experiential structure of self-identification. *Conscious Cogn* 2012.
- [134] Cebolla A, Herrero R, Ventura S, Miragall M, Bellosta-Batalla M, Llorens R, et al. Putting Oneself in the Body of Others: A Pilot Study on the Efficacy of an Embodied Virtual Reality System to Generate Self-Compassion. *Front Psychol* 2019.
- [135] Blanke O, Mohr C. Out-of-body experience, heautoscopy, and autoscopic hallucination of neurological origin: Implications for neurocognitive mechanisms of corporeal awareness and self-consciousness. *Brain Res Rev* 2005.
- [136] Blanke O. Multisensory brain mechanisms of bodily self-consciousness. *Nat Rev Neurosci* 2012.
- [137] Rohde M, Luca M, Ernst MO. The rubber hand illusion: Feeling of ownership and proprioceptive drift Do not go hand in hand. *PLoS One* 2011.
- [138] Dawson ME, Schell AM, Filion DL. The electrodermal system. *Handb. Psychophysiology, Fourth Ed.*, 2016.
- [139] Ehrsson HH, Rosén B, Stockselius A, Ragnö C, Köhler P, Lundborg G. Upper limb amputees can be induced to experience a rubber hand as their own. *Brain* 2008.
- [140] D'Alonzo M, Cipriani C. Vibrotactile Sensory Substitution Elicits Feeling of Ownership of an Alien Hand. *PLoS One* 2012.
- [141] Ma K, Hommel B. The virtual-hand illusion: Effects of impact and threat on perceived ownership and affective resonance. *Front Psychol* 2013.
- [142] Reinersmann A, Landwehrt J, Krumova EK, Peterburs J, Ocklenburg S, Güntürkün O, et al. The rubber hand illusion in complex regional pain syndrome: Preserved ability to integrate a rubber hand indicates intact multisensory integration. *Pain* 2013.
- [143] Moseley GL, Olthof N, Venema A, Don S, Wijers M, Gallace A, et al. Psychologically induced cooling of a specific body part caused by the illusory ownership of an artificial counterpart. *Proc Natl Acad Sci* 2008.
- [144] Hohwy J, Paton B. Explaining away the body: Experiences of supernaturally caused touch and touch on non-hand objects within the rubber hand illusion. *PLoS One* 2010.

- [145] Kammers MPM, Rose K, Haggard P. Feeling numb: Temperature, but not thermal pain, modulates feeling of body ownership. *Neuropsychologia* 2011.
- [146] Thakkar KN, Nichols HS, McIntosh LG, Park S. Disturbances in body ownership in schizophrenia: Evidence from the rubber hand illusion and case study of a spontaneous out-of-body experience. *PLoS One* 2011.
- [147] Llobera J, Sanchez-Vives M V., Slater M. The relationship between virtual body ownership and temperature sensitivity. *J R Soc Interface* 2013.
- [148] Van Stralen HE, van Zandvoort MJE, Hoppenbrouwers SS, Vissers LMG, Kappelle LJ, Dijkerman HC. Affective touch modulates the rubber hand illusion. *Cognition* 2014.
- [149] Slater M, Perez-Marcos D, Ehrsson HH, Sanchez-Vives M V. Towards a digital body: The virtual arm illusion. *Front Hum Neurosci* 2008.
- [150] Riemer M, Bublatzky F, Trojan J, Alpers GW. Defensive activation during the rubber hand illusion: Ownership versus proprioceptive drift. *Biol Psychol* 2015.
- [151] Sato Y, Kawase T, Takano K, Spence C, Kansaku K. Body ownership and agency altered by an electromyographically controlled robotic arm. *R Soc Open Sci* 2018.
- [152] Tsakiris M, Hesse MD, Boy C, Haggard P, Fink GR. Neural signatures of body ownership: A sensory network for bodily self-consciousness. *Cereb Cortex* 2007.
- [153] World Health Organization. WHO - The top 10 causes of death. *24 Maggio* 2018.
- [154] Murray CJL, Vos T, Lozano R, Naghavi M, Flaxman AD, Michaud C, et al. Disability-adjusted life years (DALYs) for 291 diseases and injuries in 21 regions, 1990-2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet* 2012.
- [155] Wolfe CDA. Incidence of stroke in Europe at the beginning of the 21st century. *Stroke* 2009.
- [156] Feigin VL, Lawes CM, Bennett DA, Barker-Collo SL, Parag V. Worldwide stroke incidence and early case fatality reported in 56 population-based studies: a systematic review. *Lancet Neurol* 2009.
- [157] Nichols M, Townsend N, Scarborough P, Rayner M. Cardiovascular disease in Europe: Epidemiological update. *J Clin Oncol* 2014.
- [158] Boix R, del Barrio JL, Saz P, Reñe R, Manubens JM, Lobo A, et al. Stroke

- prevalence among the Spanish elderly: An analysis based on screening surveys. *BMC Neurol* 2006.
- [159] Vos T, Allen C, Arora M, Barber RM, Brown A, Carter A, et al. Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 310 diseases and injuries, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *Lancet* 2016.
- [160] Watkins CL, Leathley MJ, Gregson JM, Moore AP, Smith TL, Sharma AK. Prevalence of spasticity post stroke. *Clin Rehabil* 2002.
- [161] Sommerfeld DK, Eek EUB, Svensson AK, Holmqvist LW, Von Arbin MH. Spasticity after Stroke: Its Occurrence and Association with Motor Impairments and Activity Limitations. *Stroke* 2004.
- [162] Lundström E, Terént A, Borg J. Prevalence of disabling spasticity 1 year after first-ever stroke. *Eur J Neurol* 2008.
- [163] Grasby PM, Frith CD, Friston KJ, Bench C, Frackowiak RSJ, Dolan RJ. Functional mapping of brain areas implicated in auditory - Verbal memory function. *Brain* 1993.
- [164] Hampson M, Driesen NR, Skudlarski P, Gore JC, Constable RT. Brain Connectivity Related to Working Memory Performance. *J Neurosci* 2006.
- [165] Chemerinski E, Levine S. Neuropsychiatric disorders following vascular brain injury. *Mt Sinai J Med* 2006.
- [166] Kauhanen ML, Korpelainen JT, Hiltunen P, Brusin E, Mononen H, Määttä R, et al. Poststroke depression correlates with cognitive impairment and neurological deficits. *Stroke* 1999.
- [167] Barker-Collo SL. Depression and anxiety 3 months post stroke: Prevalence and correlates. *Arch Clin Neuropsychol* 2007.
- [168] Hackett ML, Anderson CS. Predictors of depression after stroke: A systematic review of observational studies. *Stroke* 2005.
- [169] Hadidi N, Treat-Jacobson DJ, Lindquist R. Poststroke depression and functional outcome: A critical review of literature. *Hear Lung J Acute Crit Care* 2009.
- [170] Parikh RM, Robinson RG, Lipsey JR, Starkstein SE, Fedoroff JP, Price TR. The Impact of Poststroke Depression on Recovery in Activities of Daily Living Over a 2-Year Follow-Up. *Arch Neurol* 1990.
- [171] Carod-Artal J, Egido JA, González JL, Seijas EV. Quality of life among stroke survivors evaluated 1 year after stroke: Experience of a stroke unit.

- Stroke* 2000.
- [172] Carney RM, Freedland KE. Psychological Distress as a Risk Factor for Stroke-Related Mortality. *Stroke* 2018.
 - [173] Castillo CS, Starkstkin. SE, Fedoroff JP, Price. TR, Robinson RG. Generalized anxiety disorder after stroke. *J Nerv Ment Dis* 1993.
 - [174] Lane D, Carroll D, Ring C, Beevers DG, Lip GYH. Mortality and quality of life 12 months after myocardial infarction: Effects of depression and anxiety. *Psychosom Med* 2001.
 - [175] Hanger HC. Emotionalism after stroke. *Lancet* 1993.
 - [176] Rizzo A “Skip”, Kim GJ. A SWOT Analysis of the Field of Virtual Reality Rehabilitation and Therapy. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 2005;14:119–46.
 - [177] Josman N, Hof E, Klinger E, Marie RM, Goldenberg K, Weiss PL, et al. Performance within a virtual supermarket and its relationship to executive functions in post-stroke patients, 2008.
 - [178] Raspelli S, Pallavicini F, Carelli L, Morganti F, Cipresso P, Pedroli E, et al. Validating the Neuro VR-based virtual version of the multiple errands test: Preliminary results. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 2012.
 - [179] Yip BCB, Man DWK. Virtual reality-based prospective memory training program for people with acquired brain injury. *NeuroRehabilitation* 2013.
 - [180] Sorita A, Ahmed A, Starr SR, Thompson KM, Reed DA, Prokop L, et al. Off-hour presentation and outcomes in patients with acute myocardial infarction: Systematic Review and meta-analysis. *BMJ* 2014.
 - [181] Abdel Salam RA HG. Simultaneous Determination of Clarithromycin, Tinidazole and Omeprazole in Helicure Tablets Using Reflectance Near-Infrared Spectroscopy with the Aid of Chemometry. *Pharm Anal Acta* 2015.
 - [182] Rand D, Weiss PL, Katz N. Training multitasking in a virtual supermarket: A novel intervention after stroke. *Am. J. Occup. Ther.*, 2009.
 - [183] Jacoby M, Averbuch S, Sacher Y, Katz N, Weiss PL, Kizony R. Effectiveness of executive functions training within a virtual supermarket for adults with traumatic Brain Injury: A pilot study. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2013.
 - [184] Katz N, Ring H, Naveh Y, Kizony R, Feintuch U, Weiss PL. Interactive virtual environment training for safe street crossing of right hemisphere stroke patients with Unilateral Spatial Neglect. *Disabil Rehabil* 2005.

- [185] Akinwuntan AE, De Weerd W, Feys H, Pauwels J, Baten G, Arno P, et al. Effect of simulator training on driving after stroke: A randomized controlled trial. *Neurology* 2005.
- [186] Klinger E, Kadri A, Sorita E, Le Guiet JL, Coignard P, Fuchs P, et al. AGATHE: A tool for personalized rehabilitation of cognitive functions based on simulated activities of daily living. *IRBM* 2013.
- [187] Jovanovski D, Zakzanis K, Campbell Z, Erb S, Nussbaum D. Development of a novel, ecologically oriented virtual reality measure of executive function: The multitasking in the city test. *Appl Neuropsychol* 2012.
- [188] Gamito P, Oliveira J, Santos N, Pacheco J, Morais D, Saraiva T, et al. Virtual exercises to promote cognitive recovery in stroke patients: The comparison between head mounted displays versus screen exposure methods. *Int J Disabil Hum Dev* 2014.
- [189] Faria AL, Andrade A, Soares L, I Badia SB. Benefits of virtual reality based cognitive rehabilitation through simulated activities of daily living: a randomized controlled trial with stroke patients. *J Neuroeng Rehabil* 2016.
- [190] Gamito P, Oliveira J, Coelho C, Morais D, Lopes P, Pacheco J, et al. Cognitive training on stroke patients via virtual reality-based serious games. *Disabil Rehabil* 2017.
- [191] Lohse KR, Hilderman CGE, Cheung KL, Tatla S, Van der Loos HFM. Virtual reality therapy for adults post-stroke: a systematic review and meta-analysis exploring virtual environments and commercial games in therapy. *PLoS One* 2014.
- [192] Fung J, Malouin F, McFadyen BJ, Comeau F, Lamontagne A, Chapdelaine S, et al. Locomotor rehabilitation in a complex virtual environment, 2005.
- [193] Bolognini N, Russo C, Edwards DJ. The sensory side of post-stroke motor rehabilitation. *Restor Neurol Neurosci* 2016.
- [194] Evans C, Edwards MG, Taylor LJ, Ietswaart M, Jarry C, Gall D Le, et al. Shared Cortical Anatomy for Motor Awareness and Motor Control. *Cortex* 2013.
- [195] van Stralen HE, van Zandvoort MJE, Kappelle LJ, Dijkerman HC. The Rubber Hand Illusion in a patient with hand disownership. *Perception* 2013.
- [196] Burin D, Livelli A, Garbarini F, Fossataro C, Folegatti A, Gindri P, et al. Are movements necessary for the sense of body ownership? evidence from the rubber hand illusion in pure hemiplegic patients. *PLoS One* 2015.

- [197] Gorisse G, Christmann O, Amato EA, Richir S. First- and Third-Person Perspectives in Immersive Virtual Environments: Presence and Performance Analysis of Embodied Users. *Front Robot AI* 2017.
- [198] Anneliene AALFM, Stupar-Rutenfrans S, Bastiaens OSP, Van Gisbergen MMS. Observe or participate: The effect of point-of-view on presence and enjoyment in 360 degree movies for head mounted displays. *CEUR Workshop Proc.*, 2015.
- [199] Salamin P, Thalmann D, Vexo F. The benefits of third-person perspective in virtual and augmented reality?, 2007.
- [200] Salamin P, Tadi T, Blanke O, Vexo F, Thalmann D. Quantifying effects of exposure to the third and first-person perspectives in virtual-reality-based training. *IEEE Trans Learn Technol* 2010.
- [201] Heilig ML. Sensorama. *3,050,870*, 1962.
- [202] Sutherland IE. Sutherland - The Ultimate Display. *Proc. IFIPS Congr.*, 1965.
- [203] Kim A, Darakjian N, Finley JM. Walking in fully immersive virtual environments: an evaluation of potential adverse effects in older adults and individuals with Parkinson's disease. *J Neuroeng Rehabil* 2017.
- [204] Llorens R, Latorre J, Noé E, Keshner EA. Posturography using the Wii Balance Board™. A feasibility study with healthy adults and adults post-stroke. *Gait Posture* 2016;43:228–32.
- [205] McEwen D, Taillon-Hobson A, Bilodeau M, Sveistrup H, Finestone H. Virtual reality exercise improves mobility after stroke: An inpatient randomized controlled trial. *Stroke* 2014.
- [206] Rand D, Kizony R, Weiss PTL. The sony playStation II eye toy: Low-cost virtual reality for use in rehabilitation. *J Neurol Phys Ther* 2008.
- [207] Sin H, Lee G. Additional virtual reality training using Xbox kinect in stroke survivors with hemiplegia. *Am J Phys Med Rehabil* 2013.
- [208] Street TD, Lacey SJ, Langdon RR. Gaming Your Way to Health: A Systematic Review of Exergaming Programs to Increase Health and Exercise Behaviors in Adults. *Games Health J* 2017.
- [209] Lin J, Kelleher CL, Engsborg JR. Developing Home-Based Virtual Reality Therapy Interventions. *Games Health J* 2013.
- [210] Zhang L, Abreu BC, Masel B, Scheibel RS, Christiansen CH, Huddleston N, et al. Virtual reality in the assessment of selected cognitive function after brain injury. *Am J Phys Med Rehabil* 2001.

- [211] Klinger E, Cao X, Douguet AS, Fuchs P. Designing an ecological and adaptable virtual task in the context of executive functions. *Annu Rev CyberTherapy Telemed* 2009.
- [212] Sorita E, Joseph PA, N'kaoua B, Ruiz J, Simion A, Mazaux JM, et al. Performance analysis of adults with acquired brain injury making errands in a virtual supermarket. *Ann Phys Rehabil Med* 2014.
- [213] Okahashi S, Seki K, Nagano A, Luo Z, Kojima M, Futaki T. A virtual shopping test for realistic assessment of cognitive function. *J Neuroeng Rehabil* 2013.
- [214] Devos H, Akinwuntan AE, Nieuwboer A, Tant M, Truijen S, De Wit L, et al. Comparison of the effect of two driving retraining programs on on-road performance after stroke. *Neurorehabil Neural Repair* 2009.
- [215] Vasylevska K, Kaufmann H, Bolas M, Suma EA. Flexible spaces: Dynamic layout generation for infinite walking in virtual environments. *IEEE Symp. 3D User Interface 2013, 3DUI 2013 - Proc.*, 2013.
- [216] Razzaque S, Kohn Z, Whitton MC. Redirected Walking. *EUROGRAPHICS* 2001.
- [217] Nitzsche N, Hanebeck UD, Schmidt G. Motion compression for telepresent walking in large target environments. *Presence Teleoperators Virtual Environ* 2004.
- [218] Lloréns R, Noé E, Naranjo V, Borrego A, Latorre J, Alcañiz M. Tracking systems for virtual rehabilitation: Objective performance vs. subjective experience. a practical scenario. *Sensors (Switzerland)* 2015;15:6586–606.
- [219] Ciria LF, Muñoz MA, Gea J, Peña N, Miranda JGV, Montoya P, et al. Head movement measurement: An alternative method for posturography studies. *Gait Posture* 2017.
- [220] Zhou H, Hu H. Human motion tracking for rehabilitation-A survey. *Biomed Signal Process Control* 2008.
- [221] Shotton J, Fitzgibbon A, Cook M, Sharp T, Finocchio M, Moore R, et al. Real-time human pose recognition in parts from single depth images. *Stud Comput Intell* 2013.
- [222] Burdea GC, Coiffet P. *Virtual Reality Technology*. Wiley-IEEE Press; 2003.
- [223] *Textbook of Neural Repair and Rehabilitation*. 2014.
- [224] Clark RA, Bower KJ, Mentiplay BF, Paterson K, Pua YH. Concurrent validity of the Microsoft Kinect for assessment of spatiotemporal gait

- variables. *J Biomech* 2013;46:2722–5.
- [225] Geerse DJ, Coolen BH, Roerdink M. Kinematic validation of a multi-Kinect v2 instrumented 10-meter walkway for quantitative gait assessments. *PLoS One* 2015.
- [226] Latorre J, Llorens R, Colomer C, Alcañiz M. Reliability and comparison of Kinect-based methods for estimating spatiotemporal gait parameters of healthy and post-stroke individuals. *J Biomech* 2018.
- [227] Garcia J, Zalevsky Z. Range Mapping Using Speckle Decorrelation, 2007.
- [228] Khoshelham K, Elberink SO. Accuracy and resolution of kinect depth data for indoor mapping applications. *Sensors* 2012.
- [229] Hansard M, Lee S, Choi O, Horaud R. Time of Flight cameras : Principles, methods, and applications. *Springer* 2012.
- [230] Sarbolandi H, Lefloch D, Kolb A. Kinect range sensing: Structured-light versus Time-of-Flight Kinect. *Comput Vis Image Underst* 2015.
- [231] Lachat E, Macher H, Landes T, Grussenmeyer P. Assessment and calibration of a RGB-D camera (Kinect v2 Sensor) towards a potential use for close-range 3D modeling. *Remote Sens* 2015.
- [232] El-Laithy RA, Huang J, Yeh M. Study on the use of Microsoft Kinect for robotics applications. *Rec. - IEEE PLANS, Position Locat. Navig. Symp.*, 2012.
- [233] Kahlmann T, Remondino F, Ingensand H. Calibration for increased accuracy of the range imaging camera Swissranger. *Proc. ISPRS Comm. V Symp. 'Image Eng. Vis. Metrol.*, 2006.
- [234] Wang Q, Kurillo G, Ofli F, Bajcsy R. Evaluation of pose tracking accuracy in the first and second generations of microsoft Kinect. *Proc. - 2015 IEEE Int. Conf. Healthc. Informatics, ICHI 2015*, 2015.
- [235] Xu X, McGorry RW. The validity of the first and second generation Microsoft Kinect for identifying joint center locations during static postures. *Appl Ergon* 2015.
- [236] Clark RA, Pua YH, Oliveira CC, Bower KJ, Thilarajah S, McGaw R, et al. Reliability and concurrent validity of the Microsoft Xbox One Kinect for assessment of standing balance and postural control. *Gait Posture* 2015.
- [237] Springer S, Seligmann GY. Validity of the kinect for gait assessment: A focused review. *Sensors (Switzerland)* 2016.
- [238] Naeemabadi Mr, Dinesen B, Andersen OK, Najafi S, Hansen J. Evaluating

- Accuracy and Usability of Microsoft Kinect Sensors and Wearable Sensor for Tele Knee Rehabilitation after Knee Operation, 2018.
- [239] Brown BH, Smallwood RH, Barber DC, Lawford P V., Hose DR. Medical physics and biomedical engineering. 2017.
- [240] Lloréns R, Noé E, Colomer C, Alcañiz M. Effectiveness, usability, and cost-benefit of a virtual reality-based telerehabilitation program for balance recovery after stroke: A randomized controlled trial. *Arch Phys Med Rehabil* 2015.
- [241] Gabel M, Gilad-Bachrach R, Renshaw E, Schuster A. Full body gait analysis with Kinect. *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, 2012.
- [242] Tan D, Pua YH, Balakrishnan S, Scully A, Bower KJ, Prakash KM, et al. Automated analysis of gait and modified timed up and go using the Microsoft Kinect in people with Parkinson’s disease: associations with physical outcome measures. *Med Biol Eng Comput* 2019.
- [243] Lloréns R, Noé E, Naranjo V, Borrego A, Latorre J, Alcañiz M. Tracking systems for virtual rehabilitation: Objective performance vs. subjective experience. a practical scenario. *Sensors (Switzerland)* 2015.
- [244] Baños RM, Botella C, Alcañiz M, Liaño V, Guerrero B, Rey B. Immersion and emotion: their impact on the sense of presence. *Cyberpsychol Behav* 2004;7:734–41.
- [245] Riecke BE, Schulte-Pelkum J, Buelthoff HH. Perceiving simulated ego-motions in virtual reality: comparing large screen displays with HMDs. *Hum. Vis. Electron. Imaging X*, 2005.
- [246] Patrick E, Cosgrove D, Slavkovic A, Rode JA, Verratti T, Chiselko G. Using a large projection screen as an alternative to head-mounted displays for virtual environments, 2003.
- [247] Kim A, Chang M, Choi Y, Jeon S, Lee K. The Effect of Immersion on Emotional Responses to Film Viewing in a Virtual Environment. *2018 IEEE Conf. Virtual Real. 3D User Interfaces*, IEEE; 2018, p. 601–2.
- [248] Buttussi F, Chittaro L. Effects of Different Types of Virtual Reality Display on Presence and Learning in a Safety Training Scenario. *IEEE Trans Vis Comput Graph* 2018.
- [249] Aimola Davies AM, White RC. A sensational illusion: Vision-touch synaesthesia and the rubber hand paradigm. *Cortex* 2013.
- [250] Kammers MPM, de Vignemont F, Verhagen L, Dijkerman HC. The rubber

- hand illusion in action. *Neuropsychologia* 2009.
- [251] Holle H, McLatchie N, Maurer S, Ward J. Proprioceptive drift without illusions of ownership for rotated hands in the “rubber hand illusion” paradigm. *Cogn Neurosci* 2011.
- [252] Ferrer T, Ramos MJ, Pérez-Jiménez A, Pérez-Sales P, Alvarez E. Sympathetic sudomotor function and aging. *Muscle Nerve* 1995;18:395–401.
- [253] Giedd JN, Blumenthal J, Jeffries NO, Castellanos FX, Liu H, Zijdenbos A, et al. Brain development during childhood and adolescence: A longitudinal MRI study [2]. *Nat Neurosci* 1999.
- [254] Sisk CL, Foster DL. The neural basis of puberty and adolescence. *Nat Neurosci* 2004.
- [255] Costantini M, Haggard P. The rubber hand illusion: Sensitivity and reference frame for body ownership. *Conscious Cogn* 2007.
- [256] Haans A, IJsselsteijn WA, de Kort YAW. The effect of similarities in skin texture and hand shape on perceived ownership of a fake limb. *Body Image* 2008.
- [257] Tsakiris M, Haggard P. The rubber hand illusion revisited: Visuotactile integration and self-attribution. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 2005.
- [258] Kopp B, Kunkel A, Flor H, Platz T, Rose U, Mauritz KH, et al. The arm motor ability test: Reliability, validity, and sensitivity to change of an instrument for assessing disabilities in activities of daily living. *Arch Phys Med Rehabil* 1997.
- [259] Caplan B, Mendoza JE. Edinburgh Handedness Inventory. *Encycl. Clin. Neuropsychol.*, New York, NY: Springer New York; 2011, p. 928–928.
- [260] Mesin L, Merletti R, Rainoldi A. Surface EMG: The issue of electrode location. *J Electromyogr Kinesiol* 2009;19:719–26.
- [261] Zeller D, Gross C, Bartsch A, Johansen-Berg H, Classen J. Ventral Premotor Cortex May Be Required for Dynamic Changes in the Feeling of Limb Ownership: A Lesion Study. *J Neurosci* 2011.
- [262] Kitadono K, Humphreys GW. Short-term effects of the “rubber hand” illusion on aspects of visual neglect. *Neurocase* 2007.
- [263] Frederiks J. Disorders of the body schema. 1969.
- [264] Arzy S, Overney LS, Landis T, Blanke O. Neural mechanisms of embodiment: Asomatognosia due to premotor cortex damage. *Arch Neurol* 2006.
- [265] Bekrater-Bodmann R, Foell J, Diers M, Kamping S, Rance M, Kirsch P, et

- al. The importance of synchrony and temporal order of visual and tactile input for illusory limb ownership experiences - An fMRI study applying virtual reality. *PLoS One* 2014.
- [266] Limanowski J, Blankenburg F. Network activity underlying the illusory self-attribution of a dummy arm. *Hum Brain Mapp* 2015.
- [267] Petkova VI, Björnsdotter M, Gentile G, Jonsson T, Li TQ, Ehrsson HH. From part- to whole-body ownership in the multisensory brain. *Curr Biol* 2011.
- [268] Ionta S, Sforza A, Funato M, Blanke O. Anatomically plausible illusory posture affects mental rotation of body parts. *Cogn Affect Behav Neurosci* 2013.
- [269] Evans N, Blanke O. Shared electrophysiology mechanisms of body ownership and motor imagery. *Neuroimage* 2013.
- [270] Gerardin E. Partially Overlapping Neural Networks for Real and Imagined Hand Movements. *Cereb Cortex* 2002.
- [271] Grèzes J, Armony JL, Rowe J, Passingham RE. Activations related to “mirror” and “canonical” neurones in the human brain: An fMRI study. *Neuroimage* 2003.
- [272] Jenkinson PM, Haggard P, Ferreira NC, Fotopoulou A. Body ownership and attention in the mirror: Insights from somatoparaphrenia and the rubber hand illusion. *Neuropsychologia* 2013.
- [273] Touzalin-Chretien P, Ehrler S, Dufour A. Dominance of vision over proprioception on motor programming: Evidence from ERP. *Cereb Cortex* 2010.
- [274] Wasaka T, Kakigi R. Conflict caused by visual feedback modulates activation in somatosensory areas during movement execution. *Neuroimage* 2012.
- [275] Graziano MSA, Cooke DF. Parieto-frontal interactions, personal space, and defensive behavior. *Neuropsychologia* 2006.
- [276] Graziano MSA, Taylor CSR, Moore T. Complex movements evoked by microstimulation of precentral cortex. *Neuron* 2002.
- [277] Tsakiris M. My body in the brain: A neurocognitive model of body-ownership. *Neuropsychologia* 2010;48:703–12.
- [278] Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, Fogassi L. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cogn Brain Res* 1996.
- [279] Rizzolatti G, Camarda R, Fogassi L, Gentilucci M, Luppino G, Matelli M.

- Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey. *Exp Brain Res* 2004.
- [280] Mukherjee A, Chakravarty A. Spasticity mechanisms - for the clinician. *Front Neurol* 2010.
- [281] Moseley GL, Gallace A, Spence C. Is mirror therapy all it is cracked up to be? Current evidence and future directions. *Pain* 2008.
- [282] Korpelainen JT, Tolonen U, Sotaniemi KA, Myllylä V V. Suppressed sympathetic skin response in brain infarction. *Stroke* 1993.
- [283] Meyer S, Strittmatter M, Fischer C, Georg T, Schmitz B. Lateralization in autonomic dysfunction in ischemic stroke involving the insular cortex. *Neuroreport* 2004.
- [284] Muslumanoğlu L, Akyuz G, Aki S, Karsidag S, Us O. Evaluation of autonomic nervous system functions in post-stroke patients. *Am J Phys Med Rehabil* 2002.
- [285] Linden D, Berlit P. Sympathetic skin responses (SSRs) in monofocal brain lesions: topographical aspects of central sympathetic pathways. *Acta Neurol Scand* 1995.
- [286] Boucsein W. *Electrodermal Activity*. vol. 53. Boston, MA: Springer US; 2012.
- [287] Salomon R, Lim M, Pfeiffer C, Gassert R, Blanke O. Full body illusion is associated with widespread skin temperature reduction. *Front Behav Neurosci* 2013.
- [288] Petkova VI, Khoshnevis M, Ehrsson HH. The perspective matters! Multisensory integration in egocentric reference frames determines full-body ownership. *Front Psychol* 2011;2.
- [289] Debarba HG, Molla E, Herbelin B, Boulic R. Characterizing embodied interaction in First and Third Person Perspective viewpoints. *2015 IEEE Symp. 3D User Interfaces, 3DUI 2015 - Proc.*, 2015.
- [290] Burin D, Livelli A, Garbarini F, Fossataro C, Folegatti A, Gindri P, et al. Are movements necessary for the sense of body ownership? evidence from the rubber hand illusion in pure hemiplegic patients. *PLoS One* 2015.
- [291] Teasell R, Salter K, Faltynek P, Cotoi A, Eskes G. Post-Stroke Cognitive Disorders. *Evidence-Based Rev. Stroke Rehabil.*, n.d.
- [292] Wagenmakers EJ, Beek T, Dijkhoff L, Gronau QF, Acosta A, Adams RB, et al. Registered Replication Report: Strack, Martin, & Stepper (1988). *Perspect Psychol Sci* 2016.

- [293] Stevens E, Emmett E, Wang Y, McKeivitt C, Wolfe C. The Burden of Stroke in Europe. London: 2018.
- [294] Clark RA, Mentiplay BF, Hough E, Pua YH. Three-dimensional cameras and skeleton pose tracking for physical function assessment: A review of uses, validity, current developments and Kinect alternatives. *Gait Posture* 2019.
- [295] Riemer M, Wolbers T, Kuehn E. Preserved multisensory body representations in advanced age. *Sci Rep* 2019.

Méritos

Artículos en revista

- Borrego, A., Latorre J., Alcañiz M., Llorens R. Embodiment and presence after stroke. A comparative study with healthy controls. *Frontiers in Neurology*, 10:1061.
- Antonia M., Borrego A., Latorre J., Colomer C., Alcañiz M., Sanchez M.J., Noe E., Llorens R. Combined Transcranial Direct Current Stimulation and Virtual Reality-Based Paradigm for Upper Limb Rehabilitation in Individuals with Restricted Movements. A Feasibility Study with a Chronic Stroke Survivor with Severe Hemiparesis. *Journal of Medical Systems*, 2018. 42 (5): 87
- Borrego A., Latorre J., Alcañiz M., Llorens R. Comparison of Oculus and HTC Vive – Feasibility of the tracking system for virtual reality-based rehabilitation. *Games for Health Journal*, 2018. 7 (2).
- Lloren, R., Naranjo, V.; Noé -Sebastián, E.; Parr, E.; Borrego, A.; Alcañiz, M. (2016) Subjective perceptions when using motion tracking systems. A comparison among healthy subjects, individuals post-stroke, and therapists. *Journal of Pain Management*, 2016. 3 (9), 291 - 299.
- Llorens R., Borrego A., Palomo P., Cebolla A., Noé E., Bermúdez i Badia S., Baños R. Body schema plasticity after stroke: Subjective and neurophysiological correlates of the rubber hand illusion. *Neuropsychologia*, 2017. 96:61-69.
- Palomo P., Borrego A., Cebolla A., Llorens R., Demarzo M., Baños R. Subjective, behavioral, and physiological responses to the rubber hand illusion do not vary with age in the adult phase. *Consciousness and Cognition*, 2017. S1053-8100 (16): 30416-0.
- Borrego A., Latorre J., Llorens R., Alcañiz M., Noé E. Feasibility of a walking virtual reality system for rehabilitation: objective and subjective parameters. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2016. 9;13(1):68.
- Borrego A., Llorens R., Noé E., Palomo P., Cebolla A., Baños R. Body schema plasticity after stroke. Insights from the Rubber Hand Illusion on spastic subjects. *Brain Injury*, 2016. 30(5–6):547.
- Llorens R., Noé E., Naranjo V., Borrego A., Latorre J., Alcañiz M. Tracking systems for virtual rehabilitation: Objective performance vs. subjective experience. A practical scenario. *Sensors*, 2015. 15: 6586-606.

Artículos en congreso internacional

- Latorre J., Mollà S., Salinas B., Borrego A., Alcañiz M., Colomer C., Llorens R. Multi-touch-based assessment of hand mobility, dexterity and function. Preliminary study of validity, reliability and sensitivity to upper limb impairment severity in individuals with stroke. *International Conference on Virtual Rehabilitation 2019 (ICVR 2019)*, 2019.
- Borrego A., Latorre J., Alcañiz M., Llorens R. Reliability of the Empatica E4 wristband to measure electrodermal activity to emotional stimuli. *International Conference on Virtual Rehabilitation 2019 (ICVR 2019)*, 2019.
- Borrego A., Llorens R., Gutierrez D., Masía B. Standardized experimental estimation of the maximum unnoticeable environmental displacement during eye blinks for redirect walking in virtual reality. *International Conference on Virtual Rehabilitation 2019 (ICVR 2019)*, 2019.
- Fuentes M.A., Borrego A., Alcañiz M., Ciscar R., López R., Colomer C., Noé E., Ferri J., Llorens R. Combined Effects of Transcranial Direct Current Stimulation and Virtual Reality Promotes Clinically Meaningful Improvements on Severely Impaired Upper Limb Function in Individuals with Chronic Stroke. *The 13th World Congress on Brain Injury (WCB)*, 2019.
- S. Fonseca-Baeza, A. Borrego, M. Miragall, M. Alcañiz, R. Llorens, R. Baños. Plausibility and weight classification of 3D avatars from egocentric and allocentric perspectives. A preliminary study in healthy women. *Proceedings of the 12nd International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies*, 2018. 205 – 208.
- Borrego, A.; Fonseca, S.; Miragall, M.; Sangrador, C.; Bolo, S.; Corno, G., Baños, R. Las ventajas de la realidad virtual para evaluar distorsiones en las experiencias corporales. *I Congreso Internacional Intersanitario*, 2018.
- Latorre J., Llorens R., Borrego A., Alcañiz M., Colomer C., Noé E. A low-cost Kinect™ for Windows® v2-based gait analysis system. A feasibility study with healthy subjects. *International Conference on Virtual Rehabilitation 2017 (ICVR 2017)*, 2017.
- Llorens R., Borrego A., Latorre J., Alcañiz M., Colomer C., Noé E. A combined transcranial direct current stimulation and virtual reality-based intervention on

upper limb function in chronic stroke survivors with severe hemiparesis. A feasibility study. *International Conference on Virtual Rehabilitation 2017 (ICVR 2017)*, 2017.

- Borrego A., Llorens R., Noé E., Palomo P., Cebolla A., Baños R. Body schema plasticity after stroke. Insights from the Rubber Hand Illusion on spastic subjects. *Eleventh World Congress on Brain Injury*, 2016. 30(5–6):547.
- Borrego A., Latorre J., Llorens R., Noé E., Alcañiz M. Influence of point of view and technology in presence and embodiment. *11th International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies*, 2016. pp. 93-100.
- Borrego A., Latorre J., Llorens R., Noé E., Keshner E.A. Low-cost, room-size, and highly immersive virtual reality system for virtual and mixed reality applications. *International Conference on Virtual Rehabilitation 2015 (ICVR 2015)*, 2015. pp. 273-7.
- Borrego A., Llorens R., Palomo P., Cebolla A., Baños R., Noé E., Bermúdez i Badia S. Effects of the rubber hand illusion experiment on stroke survivors. *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Neurorehabilitation*, 2015 (ICRAN2015), 2015. pp. 43-4.
- Llorens R., Borrego A, Parra E., Naranjo V., Noé E., Alcañiz M. Subjective perceptions when using motion tracking systems. A comparison among healthy subjects, individuals post-stroke, and therapists. *Proc. 10th Intl Conf. on Disability, Virtual Reality and Assoc. Technologies*, P M Sharkey, E Klinger (Eds), 2014. pp. 173-180.

Artículos en congreso nacional

- E. Noé, J. Latorre, C. Colomer, B. Moliner, J.M. Climent, C. Rodríguez, P. Ugart, A. Borrego, E. Crespo, R. Llorens, J. Ferri. Validez de un sistema de análisis instrumental de la marcha de bajo coste en sujetos hemiparéticos. *XXXV Reunión de la Sociedad Valencia de Neurología / Revista de Neurología*, 2018.
- Noé E., Llorens R., Fuentes M., Colomer C., Moliner B., Rodríguez C., Ugart P., Galán P., Borrego A., Fernandez E., Baldoví A., Hervás E., Collado B., Moreno P., Latorre J., Ferri J. Eficacia de un sistema multimodal cerrado basado en estimulación eléctrica transcraneal y realidad virtual para la rehabilitación del miembro superior en pacientes con ictus crónico y hemiparesia grave. *XXXIV Reunión de la Sociedad Valencia de Neurología / Revista de Neurología*, 2017.
- Colomer C., Sánchez-Leiva R., Borrego A., Llorens R., Climent J.M. Experimento Rubber Hand Illusion en pacientes sanos y hemiparéticos: la sensación de propiedad del cuerpo. *XXIV Congreso de la Sociedad Valenciana de Medicina Física y Rehabilitación*, 2015.