

La realidad virtual como herramienta en el proceso de aprendizaje del cerebro

Virtual reality as a tool in the brain learning process

Jonathan Raúl Julio Becerra, Ing¹ <https://orcid.org/0000-0003-2248-7393>, Mariana Elena Peñaloza, Dra² <https://orcid.org/0000-0002-3863-0580>, Johel E. Rodríguez, MgSc^{3*} <https://orcid.org/0000-0002-8353-2736>, Gerardo Chacón, Dr⁴ <https://orcid.org/0000-0003-3615-5787>, José Andrés Martínez Molina, MD⁵ <https://orcid.org/0000-0003-3670-335X>, Hugo Valentín Saquipay Ortega, MD⁶ <https://orcid.org/0000-0002-3980-1484>, Duban Hernando Castañeda Morales, MD⁷ <https://orcid.org/0000-0001-8175-8718>, Xavier Mateo Pesantez Placencia, MD⁸ <https://orcid.org/0000-0001-8732-3985>, Juan Salazar, MD⁹ <https://orcid.org/0000-0003-4211-528X>, Roberto Añez, MD⁹ <https://orcid.org/0000-0001-6363-2767>, Valmore Bermúdez, MD, MgSc, PHD^{9,10} <https://orcid.org/0000-0003-1880-8887>

¹Universidad Simón Bolívar. Adscrito al grupo de investigación INGEBIOCARIIBE. Cúcuta, Colombia.

²Universidad Simón Bolívar. Departamento de Ciencias Básicas, Sociales y Humanas. Cúcuta, Colombia.

³Universidad Simón Bolívar. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería en Sistemas. Cúcuta, Colombia.

⁴Doctor en innovaciones educativas. Ingeniero de Sistemas, Facultad de Ingenierías, Cúcuta, Colombia

⁵Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social. Hospital IESS Latacunga. Provincia de Cotopaxi. República del Ecuador.

⁶Clínica y Maternidad. Albán Valarezo. Provincia de Azuay. República del Ecuador.

⁷Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social. Hospital IESS Ambato. Provincia de Tungurahua. República del Ecuador.

⁸Ministerio de Salud Pública Centro de Salud Checa. Provincia del Azuay. República del Ecuador.

⁹Centro de Investigación Endocrino Metabólicas "Dr. Félix Gómez". Facultad de Medicina. Universidad del Zulia. Venezuela.

¹⁰Universidad Simón Bolívar, Facultad de Ciencias de la Salud, Cúcuta, Colombia.

*Autor de correspondencia: Johel E Rodríguez, Ingeniero en Sistemas. Universidad Simón Bolívar Sede Cúcuta, Avenida 4 con Calle 14, Bloque G, Barrio La Playa, Cúcuta, Norte de Santander, Colombia. Teléfono: 311-4837421 e-mail: jrodriguez116@unisimonbolivar.edu.co

- Artículo de investigación derivado del proyecto titulado: Desarrollo de sistemas de navegación computacionales para la Cartografía de estructuras anatómicas presentes en el contexto de imágenes neuro cerebrales.

Resumen

En este artículo se presenta el estudio del cerebro y otras aplicaciones clínicas mediante las herramientas de navegación de la realidad virtual (RV), la capacidad de captar la interacción real por medio de imágenes en 3D, proyectadas a través de un neuronavegador, entendiéndose por neuronavegación a la producción de imágenes por medio de un programa que sirva como herramienta diagnóstica o terapéutica en neurocirugía u otras áreas médico-quirúrgicas, basándose en un sistema informático que permite visualizar y dar seguimiento mediante un ordenador de la posición y la orientación de las estructuras cerebrales. De esta forma, se pueden desarrollar procesos para el aprendizaje significativos, permitiendo así el abordaje anatómico en modelos de tercera dimensión del cerebro humano. Por lo tanto, la neuronavegación con ayuda de sistemas de realidad virtual como lo son las gafas VR, Leap Motion, dispositivos de control gestual capaces de capturar con gran precisión los dedos en forma virtual e instantánea y las técnicas que permitan una identificación más precisa hacen que el aprendizaje mejore y se logre mitigar ostensiblemente el tiempo destinado al estudio para el desempeño y conocimientos de las partes que conforman el cerebro humano y sus órganos adyacentes.

Palabras clave: Realidad virtual, Neuronavegador, Neuro Cerebral, Leap Motion.

Abstract

This article presents the study of the brain and other clinical applications through virtual reality navigation tools. These include the ability to capture real interaction through 3D images, projected by a neuronavigator. It can also be a tool in neurosurgery that is based on a computer system that allows to visualize and to follow through a computer the position and the orientation of the cerebral hemispheres. This could be a way to develop processes for learning in individuals, thus allowing the anatomical approach in models of third dimension of the human brain. Therefore, neuronavigation, with the help of virtual reality systems such as virtual reality headset and Leap Motion, gestural control device capable of capturing with precision the fingers in a virtual and instant way and the techniques that allow for more precise identification make learning better. This could help to ostensibly mitigate the time devoted to study for the performance and knowledge of the parts that form the human brain and its adjacent organs.

Keywords: Virtual reality, Neuronavigator, Neuro-Cerebral, Leap Motion.

Las nuevas tecnologías de la información y la comunicación (TIC) han contribuido dentro de la formación académica, en los distintos ámbitos educativos, un desarrollo de conocimiento significativo y un aporte de herramientas didácticas que permiten que los estudiantes accedan de una manera más directa a la información inmediata, puesto que estos avances dinamizan la enseñanza y el aprendizaje. En lo novedoso del mundo virtual y tecnológico encontramos la realidad virtual (RV), ésta se ha descrito como: “una forma humana de visualizar, manipular e interactuar con ordenadores y datos complejos” (Aukstakalnis & Blatner, 1993). A partir de este concepto se observa que es un medio de interacción humana y tecnológica que permite romper barreras imaginarias y asemejarlas a la realidad.

También es de relevancia destacar el concepto del francés Claude Cadoz que se refiere al término de RV como “representaciones integrales” (Cadoz, 1995), esto nos muestra las dificultades que presenta definir y comprender en pocas palabras una técnica que es un método científico y tecnológico actual. Asimismo, otros la consideran una herramienta que permite el estudio de ámbitos concretos en la nueva tecnología y la temática principal sobre la medicina avanzada. Vázquez propuso que “La práctica de la medicina tiene actualmente algunos aspectos diferenciadores en relación a etapas anteriores” (Vázquez-Mata, 2008), esto deriva que de una u otra forma el aprendizaje significativo en los estudiantes es la tecnología moderna.

Es de gran relevancia destacar que la RV en la aplicación de la medicina, por ejemplo en cirugía reconstructiva, oncológica, esquelética o en una presentación de un caso; se considera una de las promesas de la era informática que es suscitada desde la investigación (investigación asistida por computadora) creando un modelo 3D de un caso clínico real, imprimirlo en 3D y navegar (Ritacco et al., 2011). En este sentido, la RV supone un avance y está teniendo nuevas aplicaciones en todas las ramas pero es necesario evaluar el impacto que acarrea la aplicación sobre el individuo o usuario final, con el fin de saber qué causas y efectos tiene esta tecnología sobre los usuarios, cuando se manipula de manera intensiva abusando de dicha tecnología y sobre todo en las aplicaciones actuales que cada vez son más virtuales o tridimensionales. La RV se ha convertido en mucho más que entretenimiento durante el tiempo libre. Cada día se desarrollan nuevos usos que tienen como objetivo incluir procesos de rehabilitación y enseñanza. Asimismo, se está considerando su utilidad en sistemas de entrenamiento para la adquisición de habilidades, como una forma de tratamiento médico, entre otros.

Son numerosas las ventajas que proporcionan estos entornos virtuales para el aprendizaje en un buen desempeño en sus áreas de estudio, tanto como en actividades motoras (psicomotricidad), como en el tratamiento psicológico, hasta incluso del uso de videojuegos de RV en diferentes áreas de la salud. La primera aplicación de la RV fue basada en Psicología Clínica, centrándose en el tratamiento de la acro-

fobia. Rothbaum en el año de 1995 publicó el primer estudio en el que un paciente se exponía en un escenario virtual a diferentes alturas exponiéndose a un escenario virtual que reproducía situaciones acrofóbicas (Rothbaum et al., 1995). Este uso como tal de esta herramienta es lograr la mitigación aplicada a distintas situaciones que se presenten.

Además del uso de la RV como complemento al tratamiento de la acrofobia, se han publicado otros trabajos de investigación donde se destaca su uso en el tratamiento cognitivo de los trastornos de ansiedad mediante exposición a diversos escenarios de RV (Anderson, Jacobs, & Rothbaum, 2004). De igual forma, se ha utilizado para la distracción y reducción del dolor postoperatorio en pacientes adultos, por lo que la aplicación de esta tecnología de RV pasa a ser parte fundamental para los procedimientos clínicos (Cabas Hoyos, Cárdenas López, Gutiérrez Maldonado, Ruiz Esquivel, & Torres Villalobos, 2015).

La RV supone un cambio con respecto a otras tecnologías, Pérez-Martínez expone que “la segunda revolución tecnológica la ha propiciado la Realidad Virtual, la percepción en 3D de entornos simulados que permiten trasladar al usuario a mundos de ensueño y le posibilitan viajar a través del tiempo al pasado y al futuro” (Pérez Martínez, 2011), ya que permite una inmersión total en una simulación de la realidad donde el usuario puede interactuar con el mundo virtual, de una forma similar a como interactúa con el mundo real.

Considerando el importante tema de las imágenes médicas cerebrales, surge la iniciativa de desarrollar un mapa en computadora que refleje la conformación anatómica de todos los componentes. La contribución de este sistema que actualmente ayudará de forma complementaria en el aprendizaje del cerebro, mediante la inclusión de sistemas de RV en procedimientos quirúrgicos, simulando de forma más significativa para la neuronavegación durante la cirugía y el aprendizaje de las partes que conforman el cerebro humano en 3D para un modelo preoperatorio que facilite la intervención quirúrgica de aquellos pacientes que lo ameritaran. La tendencia será mayor para incorporar fundamentos de innovación que permitan generar neuronavegadores más eficientes y económicos, basados en realidad virtual, para cartografiar la estructura anatómica del cerebro humano.

La realidad virtual en el avance tecnológico médico

Cuando se habla de RV como definición, han surgido diferentes teorías para el concepto propuestas por autores pioneros de la realidad virtual. Este término fue popularizado a finales de la década de 1980 por Jaron Lanier, uno de los principales investigadores del campo. Por su parte, en el año de 1989, Fisher se refería a este campo como “entornos virtuales” o “virtual environments” (Fisher, 1989), Burdea y Coiffet establecían que “La realidad virtual se clasifica de acuerdo al grado de inmersión que genera en el usuario, el término inmersión es el acto voluntario de obviar los distintos estímulos que hace percibir la experiencia presentada como no real” (Burdea & Coiffet, 1993). Del conjunto de definiciones es como aparece el término actual de RV, su definición exacta es difícil de alcanzar ya que hay múltiples propuestas según

la finalidad de cada investigador. Para nuestro proyecto, una definición apropiada puede ser: espacio real modificado para la interacción usuario y ordenador.

Por otra parte, Márquez y colaboradores se refirieron a la RV como “la interfaz hombre-computadora altamente interactivo que facilita el control de escenas en tercera dimensión por un computador ya que sus componentes tienen el detalle suficiente para provocar una respuesta visual”, teniendo la capacidad de simular situaciones y escenas reales de diferentes áreas, ya sea en la educación, la ingeniería, la salud, etc (Márquez-Vázquez, Martínez-Castilla, & Rolón-Lacarrière, 2011).

En el año de 1965, Sutherland afirmó que “un display conectado a un computador digital nos da la oportunidad de ganar familiaridad en conceptos no realizables en el mundo físico. Es un espejo que nos lleva hacia un país de maravillas matemáticas” (Sutherland, 1968). La RV puede ser de dos tipos: inmersiva, en el que se interactúa en ambientes tridimensionales (3D) creados por un ordenador, el cual se opera a través de gafas RV, guantes u otros dispositivos que capturan la rotación y posición (movimientos) de diferentes partes del cuerpo humano; y la no inmersiva, la cual se vale de medios en el cual se interactúa en tiempo real en espacios y ambientes que en realidad no son necesarios el uso de los dispositivos complementarios al ordenador.

Dado a la inmersión e interacción que actualmente ofrece la tecnología, se han mitigado diferentes trastornos psicológicos, según Díaz y Flores “la RV ofrece nuevas oportunidades para el desarrollo de herramientas innovadoras en la evaluación y rehabilitación neuropsicológica, mediante el desarrollo de escenarios que sería muy difícil, o incluso imposible, conseguir mediante métodos neuropsicológicos convencionales” (Díaz Pérez & Flórez Lozano, 2018), esta herramienta a su vez es una ventaja ya que mejora la sensibilidad, la seguridad, aumenta la confianza, evaluando casos como los trastornos neurológicos y cognitivos como la demencia.

Por consiguiente, la RV multiusuario es otra definición que se debe considerar como un medio de comunicación capaz de permitir la participación de movimientos corporales en un mismo espacio compartido y generado por un ordenador proporcionando retroalimentación multisensorial. Dentro de esta definición existen características fundamentales como lo es la posibilidad de tiempo real, el cual permite elegir la orientación en el escenario o hacia dónde se dirige su observación; otra de ellas es la inmersión completa por el interior del mismo, perdiendo el contacto con la realidad exterior al percibir únicamente sentimientos y estímulos del mundo virtual y, por último, la que se va a llevar a cabo es la interacción con los elementos que lo conforman, permitiendo llevar a la interacción con el mundo virtual a través de diversos dispositivos, como los son leap motion, guantes, gafas RV, entre otros.

Estos conceptos abarcan habilidades individuales simples, que pueden ser tanto específicas como transversales, y que posteriormente tendrán que combinarse con habilidades complejas y actividades de equipo. El entrenamiento se inicia con simulación de habilidades que corresponden a la interacción con el cerebro humano. Estos equipos permiten, por

un lado, interactuar para conocer y entender la estructura de dicho órgano, y por otro, el más importante, practicar distintas destrezas, posibilitando al usuario modificar elementos a través de sus sentidos.

Las características fundamentales están fuertemente relacionadas entre sí en tiempo real e interactividad, omitiendo interfaces típicas que usan sólo el teclado y el mouse, dado a que es insuficiente para generar inmersión porque en la RV el entorno en 3D es importante una interacción natural. Por lo tanto, una eficiente RV requiere dispositivos apropiados para interactuar. El primer método a considerar es la posición del espectador para calcular el volumen de visión a través del dispositivo tecnológico, el segundo método de interacción es la navegación en el mundo utilizando movimientos de rotación y una cámara virtual. Finalmente, es importante la manipulación específica del objeto 3D, como la escala, rotaciones y posiciones. Los dispositivos de RV muestran un mundo virtual donde se utiliza un método para navegar en primera y tercera persona. Además, es posible el uso de un dispositivo tecnológico como lo es el Kinect, que permite navegar por el ambiente en seis direcciones diferentes teniendo la ventaja de proporcionar total libertad de movimiento al espectador: (a) posibilita al espectador girar su cuerpo a su izquierda, derecha, arriba o abajo o en cualquier dirección, el entorno virtual se convertirá en un ángulo opuesto, (b) los movimientos en el mundo virtual se hacen de acuerdo con giros corporales, cuando el espectador mueve su visión a la izquierda, derecha, arriba, abajo, adelante o atrás; por consiguiente, se efectuará dicho movimiento en un entorno virtual.

Con respecto al sonido 3D, es similar a los gráficos en 3D, usan las posiciones de las fuentes de sonido, además de la orientación y posición del oyente para crear un efecto real. Las rotaciones percibidas por el oyente se llaman elevación al ángulo a lo largo del plano vertical y el ángulo acimut es el ángulo a lo largo del plano horizontal. Con estas rotaciones el usuario es capaz de ver un mundo virtual en su totalidad y percibir el sonido de las nuevas posiciones.

Neuronavegador

Definiendo la neuronavegación según Basauri y Concha, se basa en la adquisición de imágenes ópticas o magnéticas de estructuras vitales, cuya aplicación es de gran importancia para los procedimientos quirúrgicos (Basauri & Concha, 2000). Aunque existen dispositivos de neuronavegación basados en una variedad de técnicas de digitalización, todas tienen una metodología de operación muy similar siendo una de ellas la construcción de un espacio de imagen utilizando una secuencia volumétrica de imágenes médicas, generando la reconstrucción virtual del paciente.

Por otra parte, según Espinosa, y colaboradores en el año 2003 hacen referencia a que “se basa en un procedimiento computarizado que permite determinar en imágenes reformateadas que aparecen en un monitor, la localización de un puntero u otro instrumento en el espacio”, de tal forma que gracias a esta herramienta es posible definir la relación de la lesión con estructuras y proyectarlas a la superficie, beneficiando al paciente puesto que también se puede visualizar

en tiempo real la introducción o movimiento de un instrumento quirúrgico (Espinosa et al., 2003).

La ideología científica del cerebro humano y el sistema nervioso

El cerebro está formado por dos hemisferios cerebrales, el diencefalo, el tronco encefálico y el cerebelo, su ubicación le permite protección del exterior por medio de distintas barreras, las cuales incluyen a las meninges y la estructura ósea que conforma al cráneo. La corteza cerebral representa más del 80% de la masa cerebral y contiene alrededor de 100.000 millones de neuronas y 10 veces más células gliales (Herculano-Houzel, 2009). El cerebro comanda las relaciones sociales y modula los procesos biológicos, llevando a cabo todo tipo de funciones y permitiendo el desarrollo del pensamiento, la intuición y la imaginación gracias a las neuronas. Éstas son células que llevan la información junto con las células gliales de soporte y desde el sistema a los diversos órganos transmitiéndolos a través de impulsos nerviosos. Las diferentes regiones del cerebro se dividen por surcos o cisuras que delimitan a este órgano en distintos lóbulos. Estos son: lóbulo frontal, encargado de decidir la conducta motora apropiada; el parietal, que cuenta con dos funciones principales somatosensación y la integración sensoriomotora, conocida también como “corteza de asociación”. Por su capacidad de sintetizar e integrar información relacionada a distintos sentidos, para así poder determinar cuál será el comportamiento, el temporal es el procesamiento auditivo de importantes estructuras de la memoria (hipocampo) y del sistema emotivo inconsciente límbico y, por último, el occipital es el que se encarga básicamente de la visión, aunque ésta trasciende a los lóbulos parietales y temporales.

Según Geffner, “el cerebro es el órgano que nos hace pensar, sentir, desear y actuar. Es el asiento de múltiples y diferentes acciones tanto conscientes como no conscientes, que nos permite responder a un mundo en continuo cambio” (Geffner, 2014), y según Velásquez y colaboradores “el cerebro humano es un órgano biológico y social que se encarga de todas las funciones y procesos relacionados con el pensamiento, la intuición, la imaginación, la lúdica, la acción, la escritura, la emoción, la conciencia e infinidad de procesos” (Velásquez, Remolina de Cleves, & Calle Márquez, 2009), logrando así que se comprenda como la capacidad que ostenta para efectuar un cambio de respuesta a diferentes ambientes, modificando la conexión entre neuronas. Dichas definiciones y funcionamiento serán abarcados en el desarrollo del proyecto para el conocimiento del mismo.

El cerebro también, según Sáez “... es un órgano al que le gusta procesar patrones, entender cosas que se repiten siempre de la misma forma, es la manera como se enfrenta al mundo que lo rodea” (Saez, 2014), es decir, se puede sintetizar en fórmulas y explica que el cerebro, tras recibir un estímulo codifica la información, la procesa y toma una decisión al respecto, siendo ésta tomada por el aprendizaje adquirido durante el tiempo almacenada en lóbulo temporal.

¿Cómo el ser humano aprende?, según Velásquez y colaboradores “lo que el cerebro humano hace mejor es aprender,

es modificado por el aprendizaje debido a que éste con cada estimulación y experiencia se realambra; utilizarlo de forma no habitual estimula la formación de conexiones neuronales” (Velásquez et al., 2009), estimulando el cerebro al cambio por medio de lo desconocido, provocando así que las redes neuronales por razones ambientales estimulen a la investigación favoreciendo el aprendizaje.

Según García-Molina y colaboradores, “el desarrollo de las funciones ejecutivas implica el desarrollo de una serie de capacidades cognitivas que han de permitir al niño mantener información, manipularla y actuar en función de ésta; autorregular su conducta, logrando actuar de forma reflexiva y no impulsiva” (García Molina, Enseñat Cantallops, Tirapu Ustárroz, & Roig Rovira, 2009), por ende, la capacidad del cerebro humano consta de la multiplicidad al interpretar lenguajes que puede suscitarse a la aparición de significados que conllevan a la diferenciación entre lo metafórico, exacto y científico. Por un lado, detrás de cada interpretación en palabras, éstas pueden esconder una gran cantidad de significados que corresponden a uno solo que describe lo que realmente percibe y siente el ser humano. Esto permite un mejor desempeño en el aprendizaje y gracias al constante avance tecnológico existen interfaces y softwares que permiten controlar el cerebro humano.

Según Vélez y colaboradores “las interfaces cerebro computador (BCI), son un nuevo tipo de periféricos, que permiten controlar los equipos de cómputo u otro tipo de equipos electrónicos, utilizando como señal de entrada la actividad eléctrica del cerebro” (Vélez Ángel, Gomez, & Garcia Arana, 2016). Por ende, por medio de las interfaces se logra desarrollar aplicaciones en los nuevos campos de la tecnología en el sector de la salud, apoyando en tratamientos, componentes pedagógicos, contribuyendo en dicho proyecto con el desarrollo socioeconómico regional llevando a cabo una interfaz que sea de fácil uso y de forma didáctica.

En el desarrollo cognitivo de la primera infancia, influye la formación correcta del cerebro en la etapa prenatal y la manera como la madre puede ayudar de una forma distinta en la creación del cerebro de su hijo, con una buena “alimentación, hacer ejercicio, el estado de ánimo, etc.” (Bodero, 2017). En la creación de un cerebro sano y bien estructurado, influye un buen trato desde su inicio hasta la formación exacta. Teniendo el conocimiento anteriormente expuesto, se puede proyectar a la elaboración tecnológica a una RV y lograr formar y estructurar todas sus partes desde el inicio hasta el final del cerebro con una vista de realidad aumentada para así alcanzar la similitud de cómo está formado este órgano.

Sin embargo, Díaz-Estrella plantea que “no hace falta abrir la cabeza de una persona para estimular su corteza cerebral y aislarla del mundo real. En su lugar podríamos poner las sondas en las entradas naturales de los canales sensoriomotores” (Díaz Estrella, 2011), por esa razón, la realidad virtual se ha actualizado y mejorado en el transcurso de los años, no es necesario abrir la bóveda craneana para poder conectarlo con lo virtual, sino que con los avances de la tecnología se puede vincular el cerebro a ser estimulado por imágenes

que se proyectan, para alcanzar una vista real con ayuda de gafas de realidad y así desconectarlo del mundo real a un espacio de interacción virtual. Por tal motivo, se logra la unión de varios sentidos a la vez y ayuda en la concentración de lo que está elaborando en el mundo de RV.

Por otra parte, se busca valorar las características intrínsecas y extrínsecas (relación con las estructuras cerebrales normales) de los procesos llevados a cabo por el sistema nervioso central, esto puede llevar a decidir con la Resonancia Magnética funcional (RMf) cuál sería el procedimiento más conveniente a realizar en el caso de que se esté evaluando la realización de un proceso quirúrgico (Morales et al., 2007). Con la RV se quiere alcanzar una visión igual o mejor que una resonancia magnética, logrando la creación del cerebro con sus estructuras para lograr una vista completa de 360° que sirva para un apoyo o ayuda en neurocirugía. De este modo, dar a conocer que con la RV se puede alcanzar un análisis completo del cerebro y sus funciones.

En efecto, con referencia a las neuronas según Arango-Dávila y Pimienta mencionan que “la mayoría de neuronas del cerebro no son sensitivas ni motoras, son interneuronas que se encuentran intercaladas entre el polo sensitivo y el polo motor, de tal manera que esta extensa red interneuronal representa el 99,98%” (Arango-Dávila & Pimienta, 2004), es de gran relevancia analizar los comportamientos neuronales y emocionales por los cuales atraviesa el cerebro humano, con ello se puede derivar que el cerebro humano es una compleja y misteriosa maquinaria biológica, es tan relevante que se podría llamar el cerebro electrónico de mayor capacidad de almacenamiento del mundo.

También según Velásquez y colaboradores “el aprendizaje se considera como un aspecto de la plasticidad neuronal, puesto que es la modificación de la conducta de la persona a partir de experiencias previas; ello indica que el cerebro aprende y debido a su plasticidad se modifica” (Velásquez et al., 2009), se considera que el cerebro adopta capacidades de interpretación, por ende, se desea alcanzar una proyección completa de sus funciones y estructura con la RV alcanzando los límites estándares para una proyección lo más veraz y natural posible, que alcance el análisis anatómico y neuronal del cerebro visualizado con la realidad.

El cerebro lo utilizamos para diversos objetivos de las rutinas diarias de la vida, entre ellas para especular, inducir, analizar y millones de diversas acciones mentales físicas y emocionales de la vida del ser humano, es de gran importancia decir que el cerebro es la herramienta principal para la evolución de la vida humana, participando en el desarrollo intelectual, la interpretación de los estímulos procedentes de los sentidos y en la capacidad de movimiento de las extremidades.

Sin embargo, es de destacar que ningún ser humano viviría plenamente sin el funcionamiento correcto del cerebro. Por ello cada día la ciencia, los científicos, filósofos, artistas y demás avanzan para buscar diversas estrategias de estudios y aprendizajes significativos a través de diversos implementos tecnológicos, científicos y medicinales. En esto reside la gran importancia de la neurona, que es la célula nerviosa más

evolucionada que posee el hombre con un funcionamiento bastante complejo. Es la encargada de la comunicación cerebral, transmite señales y codifica, lo cual hace de forma bioquímica y bioeléctrica. Sin embargo, pese a ser una célula muy especializada, ha perdido la capacidad de multiplicarse o dividirse, al ser la maquinaria más valiosa que podrá obtener el ser humano, es necesario su cuidado; por ello el uso avanzado de la tecnología ha permitido la interacción intensiva en casos especiales de la medicina para la mitigación de dichos aspectos, es necesario el uso de tecnología avanzada. Según Vázquez-Mata “la tecnología moderna permite conjugar equipos de robótica, realidad virtual o simplemente recurriendo a actores, y escenarios que remedan la realidad, consiguiendo reproducir situaciones de manera muy real” (Vázquez-Mata, 2008).

Aunque los seres humanos son capaces de ver con profundidad de manera natural, algunos científicos han trabajado en la simulación artificial de esta percepción desde el siglo XIX. Charles Wheatstone construyó el primer estereoscopio en 1838, siendo considerado uno de los pioneros en la estereoscopia. Con ello, defiere que el simulado artificial aproxima de manera momentánea imágenes internas del cerebro, pasando de lo real a lo virtual, permitiendo un acercamiento de la ciencia especializada en los expertos de la salud y demás, convirtiendo esta herramienta en un método de enseñanza y aprendizaje educativo en el campo de la salud.

Otro de los aspectos a tener en cuenta es lo que indican Varela-Hernández “cada vez se diagnostican más enfermos con metástasis cerebrales. Aunque prácticamente cualquier variedad dentro de las neoplasias malignas en el ser humano tiene la probabilidad de diseminarse al encéfalo” (Varela Hernández, Qazzaz, & Atencio, 2010). Con la realidad virtual se desea elaborar una proyección del cerebro que pueda alcanzar a identificar y detectar a tiempo algunas enfermedades o aclarar ideas con una vista más real y estructurada del cerebro, alcanzando a superar las imágenes cerebrales que no se alcanzan a visualizar lo suficiente. Con la realidad virtual se logra una proyección más veraz y eficaz para detectar con mejor panorámica.

Por consiguiente, teniendo en cuenta que actualmente las herramientas tecnológicas realizan diagnósticos de enfermedades como el trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH) mediante la cartografía cerebral, según Mercado, Medina y García “la tecnología aplicada a las neurociencias ha permitido una mayor precisión tanto en la exploración funcional del cerebro como en la confirmación y elaboración de diagnósticos diferenciales para trastornos como el TDAH” (Mercado Val, Medina Gómez, & Garcia Alonso, 2015).

Aplicaciones basadas en la realidad virtual

Para el desarrollo de los objetivos específicos planteados, algunos reportes que hacen referencia a la integración de la tecnología con la medicina como factor influyente para el desarrollo de la aplicación han sido realizados por Salcedo-Maldonado quien refiere que “en la actualidad alrededor del mundo se está difundiendo el uso de los sistemas de realidad virtual para realizar entrenamiento en cirugía endoscópica de

diferentes especialidades (ej. Cirugía general, vascular, ortopédica), tratamiento de trastornos mentales” (Salcedo Maldonado, 2011), o en la simulación quirúrgica en el campo de la Oftalmología. Según López y Argones “el primer prototipo de nuestro simulador permite la realización de algunos ejercicios de coordinación con una o ambas manos sobre el cristalino virtual, similares a los existentes en simuladores de factura internacional” (Hernández López & Fernández Argones, 2015), prototipo que por el cual ofrece al cirujano la posibilidad de adquirir habilidades en determinado tipo de cirugía, logrando como resultado el rápido aprendizaje en la actividad quirúrgica.

Rodríguez y colaboradores en el año 2010 lograron transpolar electroencefalogramas realizados en papel a un mapa 3D del cerebro, exponiendo que “el desarrollo de una herramienta de software que recibe como entrada la digitalización de un EEG en papel y genera el mapa 3D de actividad eléctrica cerebral” (Rodríguez Rojas, Facenda, & Eblen-Zajjur, 2011). El uso de esto permite una reducción considerable de la sistematización de la información obtenida por cartografía cerebral. De esta manera, se puede agilizar la interpretación de las imágenes. Es una forma de generar un cambio positivo con respecto a la interacción gráfica con quien utilice la herramienta, permitiendo una mejoría al estimar la interpolación.

Por su parte, la terapia de realidad virtual (TRV) es una terapia innovadora en el área de la salud, que se ha utilizado para estudiar en niños que han sido diagnosticados con mielomeningocele (MMC) o parálisis cerebral infantil (PCI), el efecto que pueda tener el uso de RV en su escolaridad (Márquez-Vázquez et al., 2011). Los estudios que se han elaborado con la terapia de RV han sido para el mejoramiento de la calidad de vida de las personas con su discapacidad sea cognitiva o motora. Se ha alcanzado un avance de alto nivel en la actualidad con la TRV, facilitándoles el aprendizaje escolar a los niños con una mayor diversión y concentración reportada durante este proceso.

Algunas situaciones clínicas donde se aplica la realidad virtual

Psicología/Psiquiatría

En la aplicación de la RV según Botella y colaboradores “la RV ofrece una alternativa prometedora a la exposición en imaginación. Por una parte, algunos pacientes tienen dificultad en imaginar, mientras que otros pueden resistirse o rechazar el recuerdo del acontecimiento traumático” (Botella, García-Palacios, Baños, & Quero, 2007), dicha alternativa controla con precisión la imaginación de eventos traumáticos, haciéndolo con poca implicación emocional, pero logrando a su vez la mitigación del trauma ocasionado.

Dolor

El dolor es una experiencia, según Miró y colaboradores “los factores físicos, aunque importantes, no son suficientes para explicar la experiencia de dolor. Así, una misma señal nociceptiva puede interpretarse o no como dolor en función de múltiples factores, entre ellos, el contexto, aquello que esté pensando” (Miró, Nieto, & Huguet, 2007), distraer al usuario

de lo que está sucediendo en el mundo “real”. Esto puede usarse como una alternativa a la anestesia durante intervenciones dolorosas.

Cirugía

La aplicación de RV en cirugía es de gran ayuda ya que permite una mejor perspectiva de la anatomía del paciente. Según Naranjo-Ornedo “el cirujano debe construir mentalmente la relación entre la imagen virtual que representa al paciente y el paciente real, problema que soluciona la RV.” (Naranjo Ornedo, 2009). Esta herramienta permite que, a través de un dispositivo, el cirujano pueda situarse en un ambiente físico por medio de la realidad aumentada.

Miedos y fobias

La RV podría ser una herramienta eficaz en el manejo de las fobias, como por ejemplo el miedo a volar, según Baños y colaboradores “la ansiedad que siente ante el hecho de tener que volar aparece principalmente cuando está dentro del avión (situaciones de despegue, vuelo y aterrizaje), presentando sólo una leve ansiedad anticipatoria (los días o momentos antes del vuelo)” (Baños Rivera, Botella Arbona, Perpiñá, & Quero Castellano, 2001), a partir de esa fobia se reconstruye la escena implantando gradualmente a un individuo al miedo en un entorno de control, logrando simulaciones que se pueden controlar con precisión para llevar a cabo su mitigación. Incluso se ha propuesto que la RV como ayuda complementaria al tratamiento de diversas enfermedades mentales en las que se intenten superar dificultades mediante el uso de la tecnología para crear nuevas realidades (Brito C. & Vicente P., 2018).

Trastornos del Espectro Autista

Los Trastornos del Espectro Autista (TEA) son alteraciones del neurodesarrollo caracterizados por dificultades para la interacción social, principalmente en la comunicación. La investigación y desarrollo se centran en hallar estrategias terapéuticas adecuadas para el individuo, valiendo todos los recursos (interfaces virtuales, realidad virtual, etc) (Guzmán, Putrino, Martínez, & Quiroz, 2017). Los TEA han aumentado en la actualidad, lográndose con la tecnología de RV un vínculo de comunicación y desarrollo cognitivo y motriz en estos pacientes, alcanzando los estándares de calidad en la educación con apoyo y ayuda de la realidad virtual para así lograr visualizarlo en un mundo real.

Fisioterapia

La RV es según Navarrete “una tecnología con cerca de 50 años de evolución, pero en las últimas dos décadas se han generado instancias para su desarrollo en el ámbito médico, en particular en lo referente a la rehabilitación motora y cognitiva” (Navarrete, 2010). Se ha logrado alcanzar en los últimos años la vinculación de la medicina como una alternativa a la realidad virtual, ejecutando un método para el aprendizaje, educación y ayuda en la reanimación física y cognitiva de las personas, alcanzando proyectar una forma de recuperación con métodos tecnológicos, uniendo la realidad virtual con lo real y se ha observado la aceptación de la sociedad al nuevo método de fisioterapia.

Otras herramientas que complementan la realidad virtual

Leap Motion

Es un dispositivo que funciona mediante tres cámaras infrarrojas, localizadas en un pequeño hardware, que permiten detectar las manos del usuario y obtener su posición relativa. De esta forma el usuario es capaz de interactuar con el ordenador simplemente moviendo las manos. Es un diminuto dispositivo de control gestual que es colocado frente a la pantalla de nuestro ordenador, captura con precisión los movimientos de nuestras manos, dedos e incluso cosas, permitiendo así la interacción de objetos encontrados en las escenas (García Agenjo, 2015). En el año 2016, Nainggolan y colaboradores propusieron un programa utilizando Leap Motion para el estudio de la anatomía humana con resultados prometedores como complemento en el proceso de aprendizaje en la medicina (Nainggolan, Siregar, & Fahmi, 2016).

Blender

Es un programa informático multiplataforma que puede usarse en las diferentes arquitecturas (Windows1, Mac OS X2, Linux3, Solaris4, FreeBSD5 e IRIX6) dedicado al modelado, animación y creación de gráficos tridimensionales e interactivos. Sus principales objetivos son la iluminación, el renderizado, la animación y la creación de gráficos tridimensionales. Strakos y colaboradores realizaron una reconstrucción en 3D de las vías aéreas humanas y el suelo orbital humano utilizando el programa Blender y se compararon los resultados con los proporcionados por plataformas informáticas de imagen médicas como 3D Slicer y Osirix (Strakos et al., 2016).

Realidad aumentada y neuronavegación en neurocirugía: Situación actual

El potencial revolucionario de la aplicación de la RV en medicina ha atraído intenso interés científico. Entre las distintas posibilidades, la implementación de la realidad aumentada en la neuronavegación es la que ha acumulado mayor cantidad de literatura académica publicada hasta la fecha. No obstante, es importante señalar que, a pesar de esta notoria tendencia, en la actualidad aún no se dispone de ensayos clínicos evaluando esta alternativa (Eckert, Volmerg, & Friedrich, 2019). El trabajo investigativo circundando el rol de la realidad aumentada y neuronavegación en el campo de la neurocirugía está compuesto fundamentalmente por reportes de casos y series de casos. Como demostrado en una revisión sistemática por Meola y cols., en general, la implementación de la realidad aumentada en neurocirugía parece ser una herramienta confiable y versátil en el abordaje quirúrgico mínimamente invasivo de numerosas enfermedades, incluyendo lesiones neoplásicas, neurovasculares, e hidrocefalia (Meola et al., 2017).

Se ha reportado un extenso catálogo de técnicas de neuroimagen que pueden utilizarse como base en los sistemas de neuronavegación, incluyendo la resonancia magnética preoperatoria y métodos de navegación neuroquímica, como la marcación con ácido 5-aminolevulínico y con fluoresceína de sodio. Existe aún un grado importante de heterogeneidad en relación a la seguridad y confiabilidad de cada alternativa. La exploración de esta variabilidad representa uno de

los principales objetivos de investigación en esta área, sin evidencia concluyente hasta la actualidad (Barba Belsuzarri, Anson Sangueniz, & Mattos Araujo, 2016). Resultados preliminares por Stadie y cols. sugieren que la neuronavegación con realidad aumentada ofrece resultados comparables con la neuroimagen por resonancia magnética intraoperatoria para la realización de craniotomía (Stadie et al., 2011).

La mayoría de los sistemas de realidad virtual utilizados para la neuronavegación involucran el uso de dispositivos tipo casco que se adaptan a la cabeza de los cirujanos. Aunque ofrecen una experiencia natural con alta inmersión, se han vinculado con patologías disergonómicas asociadas con su peso considerable, y la producción de calor (Vávra et al., 2017). Ante esta situación, se han propuesto numerosas alternativas innovadoras, como los dispositivos tipo casco "fantasma", que incluyen pantallas semitransparentes de mucho menor peso (Cutolo et al., 2017). También se han descrito sistemas de proyección de imágenes en superposición a la visualización del campo quirúrgico en los pacientes, a través de la implementación de proyectores de video (Tabrizi & Mahvash, 2015), computadoras tablet (Deng, Li, Wang, & Song, 2014), e incluso teléfonos inteligentes (Hou, Ma, Zhu, Chen, & Zhang, 2016). Estas opciones garantizan mayor ergonomía y menores costos asociados.

Debido a que se trata de una tecnología emergente, el uso de realidad aumentada en neurocirugía se ha vinculado con ciertas desventajas y limitaciones. En este sentido, se ha observado que la calidad de los resultados obtenidos en la aplicación de la neuronavegación con realidad aumentada dependen en gran proporción de la información de base obtenida a partir de estas técnicas, al igual que la capacidad de adaptación dinámica de los sistemas e imágenes a los cambios en el ambiente cerebral explorado (Gerard et al., 2017). Estos aspectos constituyen algunas de las limitaciones actuales de la neuronavegación, junto con problemas asociados a latencia en el sistema de realidad virtual, cuando ocurre retraso o discrepancia entre las acciones en el campo quirúrgico y las imágenes proyectadas (Tagaytayan, Kelemen, & Sik-Lanyi, 2018). La proyección de imágenes subóptimas con contraste insuficiente para la diferenciación efectiva de los tejidos observados también se ha reportado con frecuencia (Okamoto, Onda, Yanaga, Suzuki, & Hattori, 2015).

El uso de los dispositivos de realidad aumentada también implica dificultades particulares para los cirujanos. Durante los procedimientos con realidad aumentada, la cantidad de información que el cirujano debe manejar en cualquier momento dado es abundante, a menudo difícil de abordar y mostrar en pantalla en cualquier momento dado. Esto parece conllevar a la ocurrencia de errores por omisión o inatención (Hansen, Wieferrich, Ritter, Rieder, & Peitgen, 2010). Asimismo, además de los problemas ergonómicos previamente mencionados, en algunos individuos susceptibles se ha reportado la aparición de cuadros similares a la cinetosis con el uso de esos dispositivos, caracterizados por la presencia de náuseas, vómitos, mareos y cefalea (Vávra et al., 2017).

Naturalmente, la aplicación de la tecnología de neuronavegación se asocia con costos importantes. No obstante, se es-

pera que estos disminuyan progresivamente con el tiempo, a medida que se convierta en una técnica de uso más rutinario (Barba Belsuzarri et al., 2016). Por último, la aplicación de las diversas técnicas de RV en la práctica médica no está exenta de implicaciones legales y éticas. Este aspecto ha sido sujeto de debate especialmente en lo que respecta a la derivación de la información a terceras personas para el procesamiento informático de los datos y la construcción de los ambientes virtuales. Estos riesgos deberían ser atenuados a futuro con el mejoramiento de las tecnológicas de encriptación de datos (Wee Sim et al., 2016).

En efecto, la implementación de la RV para la neuronavegación en neurocirugía se encuentra en estadios muy tempranos de su historia, pero las expectativas son elevadas para el futuro. Las experiencias y conocimientos adquiridos en el área de neurocirugía ya se han comenzado a extrapolar a otras disciplinas quirúrgicas con éxito, especialmente en relación a lesiones neoplásicas (Lan et al., 2018; Solbiati et al., 2018). Su inserción en la práctica cotidiana demandará el entrenamiento sistemático de los neurocirujanos, al igual que un proceso de adaptación en el flujo del trabajo quirúrgico en este campo (Vávra et al., 2017). No obstante, se espera que los pasos agigantados del desarrollo de la biotecnología hagan de esto un proceso natural. El trabajo colaborativo integrado entre los cirujanos, el personal de investigación, y las industrias en biotecnología médica será esencial en este escenario.

Conclusiones

Existen numerosas definiciones de RV, sin embargo, de manera general se puede decir que es la forma de visualizar, manipular e interactuar con ordenadores y datos complejos, cuya aplicabilidad clínica se ha incrementado en los últimos años. Estos entornos virtuales parecen proporcionar diversas ventajas en el proceso de aprendizaje, buen desempeño en sus áreas de estudio, tanto como en actividades motoras (psicomotricidad), como en el tratamiento psicológico, hasta incluso del uso de videojuegos de RV en diferentes áreas de la salud. Es de vital importancia la interacción y navegación de la RV, puesto que es una técnica moderna con grandes desafíos a corto y largo plazo. Por ende, la RV es una valiosa herramienta en el estudio del cerebro humano llevado a cabo a través de la neurocirugía, la asistencia de nuevas imágenes, las técnicas que permitan una identificación más precisa y la ubicación de objetivos que hacen que el aprendizaje mejore y se logre mitigar ostensiblemente el tiempo destinado al estudio para el desempeño y conocimientos de las partes que conforman el cerebro humano.

Referencias

1. Anderson, P., Jacobs, C., & Rothbaum, B. O. (2004). Computer-supported cognitive behavioral treatment of anxiety disorders. *Journal of Clinical Psychology*, 60(3), 253-267. <https://doi.org/10.1002/jclp.10262>

2. Arango-Dávila, C. A., & Pimienta J. H. (2004). El cerebro: de la estructura y la función a la psicopatología. Primera parte: Bloques funcionales. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, XXXIII(1), 102-125.
3. Aukstakalnis, S., & Blatner, D. (1993). *El Espejismo de silicio: arte y ciencia de la realidad virtual*. Barcelona: Página Uno.
4. Baños Rivera, R. M., Botella Arbona, C., Perpiñá, C., & Quero Castellano, S. (2001). Tratamiento mediante realidad virtual para la fobia a volar: un estudio de caso. *Clínica y Salud*, 12(3), 391-404.
5. Barba Belsuzarri, T. A., Anson Sanguis, R. M., & Mattos Araujo, J. F. (2016). Brain tumor surgery: supplemental intra-operative imaging techniques and future challenges. *Journal of Cancer Metastasis and Treatment*, 2, 70-79. <https://doi.org/10.4103/2394-4722.172249>
6. Basauri, L., & Concha, E. (2000). Neuronavegación I. Técnicas. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 11(4), 0.
7. Boderó, C. (2017). La neurociencia en la primera infancia. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 07(01), 6-10. <https://doi.org/10.18259/acs.2017002>
8. Botella, C., García-Palacios, A., Baños, R., & Quero, S. (2007). Realidad virtual y tratamientos psicológicos. Cuadernos de medicina psicosomática y psiquiatría de enlace, ISSN 1695-4238, No. 82, 2007 (Ejemplar dedicado a: Psicoterapia y Nuevas Tecnologías. Parte II), pags. 17-31,82,17-31.
9. Brito C., H., & Vicente P., B. (2018). Realidad virtual y sus aplicaciones en trastornos mentales: una revisión. *Revista Chilena de Neuro-Psiquiatría*, 56(2),127-135. <https://doi.org/10.4067/s0717-92272018000200127>
10. Burdea, G., & Coiffet, P. (1993). *La réalité virtuelle*. Paris: Hermès.
11. Cabas Hoyos, K., Cárdenas López, G., Gutiérrez Maldonado, J., Ruiz Esquivel, F., & Torres Villalobos, G. (2015). Uso clínico de la realidad virtual para la distracción y reducción del dolor postoperatorio en pacientes adultos. *Tesis Psicológica*, 10(2),38-50.
12. Cadoz, C. (1995). *Las Realidades virtuales: una exposición para comprender, un ensayo para reflexionar*. Madrid: Debate.
13. Cutolo, F., Meola, A., Carbone, M., Sinceri, S., Cagnazzo, F., Denaro, E., ... Ferrari, V. (2017). A new head-mounted display-based augmented reality system in neurosurgical oncology: a study on phantom. *Computer Assisted Surgery*, 22(1),39-53. <https://doi.org/10.1080/24699322.2017.1358400>
14. Deng, W., Li, F., Wang, M., & Song, Z. (2014). Easy-to-use augmented reality neuronavigation using a wireless tablet PC. *Stereotactic and Functional Neurosurgery*, 92(1),17-24. <https://doi.org/10.1159/000354816>
15. Díaz Estrella, A. (2011). Inmersión mental y realidad virtual. *Uciencia: revista de divulgación científica de la Universidad de Málaga*, 6 (Abril),30-33.
16. Díaz Pérez, E., & Flórez Lozano, J. A. (2018). Realidad virtual y demencia. *Revista de Neurología*, 66(10), 344-352.
17. Eckert, M., Volmerg, J. S., & Friedrich, C. M. (2019). Augmented Reality in Medicine: Systematic and Bibliographic Review. *JMIR MHealth and UHealth*, 7(4),e10967. <https://doi.org/10.2196/10967>
18. Espinosa, J., Ruiz, E., Cifuentes, H., Toscano, M., Patiño, J., Buitrago, C., & López, O. (2003). Experiencia en biopsia intracraneana. 19(2),8.
19. Fisher, S. (1989). *Virtual Environments, Personal Simulation & Telepresence. Virtual Reality: Theory, Practice and Promise*, S. Helsel and J.Roth, ed., Meckler Publishing, 1991. reprinted in *Ars Electron-*

ica: Facing the Future, T. Druckrey, ed., MIT Press, 1999.

20. García Agenjo, I. (2015). Uso de Leap Motion en juegos didácticos para niños con necesidades educativas especiales (Trabajo para título de ingeniero informático, E.T.S. de Ingenieros Informáticos). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
21. García Molina, A., Enseñat Cantallops, A., Tirapu Ustárroz, J., & Roig Rovira, T. (2009). Maduración de la corteza prefrontal y desarrollo de las funciones ejecutivas durante los primeros cinco años de vida. *Revista de Neurología*, 48(08),435-440. <https://doi.org/10.33588/rn.4808.2008265>
22. Geffner, D. (2014). El cerebro: organización y función. Recuperado 8 de junio de 2019, de <https://www.ruam.unam.mx/portal/recursos/ficha/78723/el-cerebro-organizacion-y-funcion>
23. Gerard, I. J., Kersten-Oertel, M., Petrecca, K., Sirhan, D., Hall, J. A., & Collins, D. L. (2017). Brain shift in neuronavigation of brain tumors: A review. *Medical Image Analysis*, 35, 403-420. <https://doi.org/10.1016/j.media.2016.08.007>
24. Guzmán, G., Putrino, N., Martínez, F., & Quiroz, N. (2017). Nuevas tecnologías: Puentes de comunicación en el trastorno del espectro autista (TEA). *Terapia Psicológica*, 35(3), 247-258.
25. Hansen, C., Wieferich, J., Ritter, F., Rieder, C., & Peitgen, H.-O. (2010). Illustrative visualization of 3D planning models for augmented reality in liver surgery. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5(2),133-141. <https://doi.org/10.1007/s11548-009-0365-3>
26. Herculano-Houzel, S. (2009). The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3, 31. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.031.2009>
27. Hernández López, I., & Fernández Argones, L. (2015). Simulación quirúrgica mediante realidad virtual en Cuba. *Revista Cubana de Oftalmología*, 28(4),331-332.
28. Hou, Y., Ma, L., Zhu, R., Chen, X., & Zhang, J. (2016). A Low-Cost iPhone-Assisted Augmented Reality Solution for the Localization of Intracranial Lesions. *PLOS ONE*, 11(7),e0159185. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159185>
29. Lan, L., Xia, Y., Li, R., Liu, K., Mai, J., Medley, J. A., ... Cheng, J.-X. (2018). A fiber optoacoustic guide with augmented reality for precision breast-conserving surgery. *Light: Science & Applications*, 7(1), 2. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0006-0>
30. Márquez-Vázquez, R. E., Martínez-Castilla, Y., & Rolón-Lacarrière, O. G. (2011). Impacto del Programa de Terapia de Realidad Virtual sobre las evaluaciones escolares en pacientes con mielomeningocele y parálisis cerebral infantil. *Revista Mexicana de Neurociencia*, 12(1),16-26.
31. Meola, A., Cutolo, F., Carbone, M., Cagnazzo, F., Ferrari, M., & Ferrari, V. (2017). Augmented reality in neurosurgery: a systematic review. *Neurosurgical Review*, 40(4),537-548. <https://doi.org/10.1007/s10143-016-0732-9>
32. Mercado Val, E., Medina Gómez, B., & Garcia Alonso, I. (2015). Utilidad de la cartografía cerebral en el diagnóstico del Trastorno por déficit de atención con hiperactividad. *International Journal of Developmental and Educational Psychology*. *Revista INFAD de Psicología*, 2(1), 339-344. <https://doi.org/10.17060/ijodaep.2015.n1.v2.75>
33. Miró, J., Nieto, R., & Huguet, A. (2007). Realidad virtual y manejo del dolor. *C. Med. Psicosom*, 82,52-64.
34. Morales, C., Martínez, M., Shilton, J., Prosen, A., Vázquez, C., Goldemberg, N., & Bruno, C. (2007). Técnicas de resonancia magnética como herramientas esenciales para el abordaje de tumores del SNC. *Revista argentina de neurocirugía*, 21, 1-7.
35. Nainggolan, F. L., Siregar, B., & Fahmi, F. (2016). Anatomy learning system on human skeleton using Leap Motion Controller. 2016 3rd International Conference on Computer and Information Sciences (IC-COINS), 465-470. <https://doi.org/10.1109/ICCOINS.2016.7783260>
36. Naranjo Ornedo, V. (2009). La realidad virtual al servicio del bienestar social. Instituto Interuniversitario de Investigación en Bioingeniería y Tecnología Orientada al Ser Humano (I3BH). Universidad Politécnica de Valencia, 18.
37. Navarrete, J. M. (2010). La realidad virtual como arma terapéutica en rehabilitación. *Rehabilitación Integral*, 5(1),40-45.
38. Okamoto, T., Onda, S., Yanaga, K., Suzuki, N., & Hattori, A. (2015). Clinical application of navigation surgery using augmented reality in the abdominal field. *Surgery Today*, 45(4),397-406. <https://doi.org/10.1007/s00595-014-0946-9>
39. Pérez Martínez, F. J. (2011). Presente y Futuro de la Tecnología de la Realidad Virtual. *Creatividad y sociedad: revista de la Asociación para la Creatividad*, (16),3-39.
40. Ritacco, L., Milano, F., Aponte Tinao, L., Risk, M., Reyes, M., Weber, S., ... Gonzalez Bernaldo de Quirós, F. (2011). Realidad virtual: su aplicación en cirugía reconstructiva oncológica esquelética: presentación de un caso de osteosarcoma tibial. *Rev. Asoc. Argent. Ortop. Traumatol*, 76(1),82-87.
41. Rodríguez Rojas, J. E., Facenda, G., & Eblen-Zajjur, A. (2011). Cartografía cerebral 3D obtenida a partir de electroencefalogramas en papel. *Salus*, 15(1),8-13.
42. Rothbaum, B. O., Hodges, L. F., Kooper, R., Opdyke, D., Williford, J. S., & North, M. (1995). Effectiveness of computer-generated (virtual reality) graded exposure in the treatment of acrophobia. *The American Journal of Psychiatry*, 152(4),626-628. <https://doi.org/10.1176/ajp.152.4.626>
43. Saez, C. (2014, octubre 6). Neuroeducación, o cómo educar con cerebro. Recuperado 8 de junio de 2019, de Cristina Sáez website: <https://cristinasaez.wordpress.com/2014/10/06/neuroeducacion-0-como-educar-con-cerebro/>
44. Salcedo Maldonado, M. C. (2011). Realidad virtual para reeducación motora de niños con daño neurológico. (Trabajo para optar al título de Especialista en medicina física y rehabilitación, Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/11142/1/598081.2011.pdf>
45. Solbiati, M., Passera, K. M., Rotilio, A., Oliva, F., Marre, I., Goldberg, S. N., ... Solbiati, L. (2018). Augmented reality for interventional oncology: proof-of-concept study of a novel high-end guidance system platform. *European Radiology Experimental*, 2(1),18. <https://doi.org/10.1186/s41747-018-0054-5>
46. Stadie, A. T., Kockro, R. A., Serra, L., Fischer, G., Schwandt, E., Grunert, P., & Reisch, R. (2011). Neurosurgical craniotomy localization using a virtual reality planning system versus intraoperative image-guided navigation. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 6(5),565-572. <https://doi.org/10.1007/s11548-010-0529-1>
47. Strakos, P., Jaros, M., Karásek, T., Jarosová, M., Krpelík, D., Vasa-tová, A., ... Vavra, P. M. (2016). Medical image processing tools for Blender with HPC support.
48. Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I on - AFIPS '68 (Fall, Part I)*, 757. <https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>

49. Tabrizi, L. B., & Mahvash, M. (2015). Augmented reality–guided neurosurgery: accuracy and intraoperative application of an image projection technique. *Journal of Neurosurgery*, 123(1), 206-211. <https://doi.org/10.3171/2014.9.JNS141001>
50. Tagaytayan, R., Kelemen, A., & Sik-Lanyi, C. (2018). Augmented reality in neurosurgery. *Archives of Medical Science : AMS*, 14(3),572-578. <https://doi.org/10.5114/aoms.2016.58690>
51. Varela Hernández, A., Qazzaz, K., & Atencio, J. V. (2010). Observaciones a partir de un paciente con metástasis cerebral quística: presentación de un caso. *Archivo Médico de Camagüey*, 14(6),1-7.
52. Vávra, P., Roman, J., Zonča, P., Ihnát, P., Němec, M., Kumar, J., ... El-Gendi, A. (2017). Recent Development of Augmented Reality in Surgery: A Review. *Journal of Healthcare Engineering*, 2017, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2017/4574172>
53. Vázquez-Mata, G. (2008). Realidad virtual y simulación en el entrenamiento de los estudiantes de medicina. *Educación Médica*, 11, 29-31.
54. Velásquez, B. M., Remolina de Cleves, N., & Calle Márquez, M. G. (2009). El Cerebro Que Aprende. *Tabula Rasa*, 11, 329-347.
55. Vélez Ángel, P. A., Gomez, J. D., & Garcia Arana, H. (2016). Hardware para interfaz cerebro computador. *Scientia Et Technica*, 21(1),93-97.
56. Wee Sim, K., Baker, B., Amin, K., Chan, A., Patel, K., & Wong, J. (2016). Augmented and virtual reality in surgery—the digital surgical environment: applications, limitations and legal pitfalls. *Annals of Translational Medicine*, 4(23). <https://doi.org/10.21037/12851>