



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERIA EN MECATRÓNICA**

**TEMA:**

**“SISTEMA DE REHABILITACIÓN PARA PERSONAS CON DEFICIENCIA DEL CONTROL MOTOR DE MIEMBRO SUPERIOR EN UN ENTORNO DE REALIDAD AUMENTADA”**

**AUTOR:** Luis Fernando Sánchez Taco

**TUTOR:** MSc. Ing. Iván Iglesias Navarro

**IBARRA**

**2022**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE  
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN  
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	1725832396		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	SÁNCHEZ TACO LUIS FERNANDO		
<b>DIRECCIÓN:</b>	ASCAZUBI – CAYAMBE		
<b>EMAIL:</b>	lfsanchez@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	02 2784 226	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	099 032 3249

<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
<b>TÍTULO:</b>	SISTEMA DE REHABILITACIÓN PARA PERSONAS CON DEFICIENCIA DEL CONTROL MOTOR DE MIEMBRO SUPERIOR EN UN ENTORNO DE REALIDAD AUMENTADA
<b>AUTOR:</b>	SÁNCHEZ TACO LUIS FERNANDO
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	11/03/2022
<b>SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO</b>	
<b>PROGRAMA:</b>	<b>PREGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mecatrónica
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	MSc. Iván Iglesias Navarro

## 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 11 días del mes de marzo de 2022

**EL AUTOR:**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luis Fernando Sánchez Taco', is written over a horizontal dotted line.

Luis Fernando Sánchez Taco  
C.I. 1725832396



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CERTIFICACIÓN**

En calidad de director del trabajo de grado “**SISTEMA DE REHABILITACIÓN PARA PERSONAS CON DEFICIENCIA DEL CONTROL MOTOR DE MIEMBRO SUPERIOR EN UN ENTORNO DE REALIDAD AUMENTADA**”, presentado por el egresado LUIS FERNANDO SÁNCHEZ TACO, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 11 de marzo de 2022

**IVAN  
IGLESIAS  
NAVARRO**

Firmado digitalmente  
por IVAN IGLESIAS  
NAVARRO  
Motivo: Apruebo este  
documento  
Fecha: 2022-03-11  
08:54:05:00

.....  
MSc. Iván Iglesias Navarro

DIRECTOR DE TESIS

## **AGRADECIMIENTO**

Finalizar la Universidad fue un reto muy grande que debo agradecer a mis padres por permitirme lograr un paso gigante en mi vida profesional, su apoyo incondicional, sus consejos, sus reclamos y enojos fueron mi fortaleza para no decaer y continuar hasta el final. Mis hermanos que siempre pusieron su granito de arena y la confianza en mí fueron fundamentales para llegar a este momento.

A mi director MSc. Iván Iglesias quien me ayudo, colaboro y brindo sus conocimientos tomándose el tiempo de sus actividades para terminar con el proyecto.

Agradecer a la MSc. Paulina Garrido que fue parte fundamental para el desarrollo de este proyecto brindando apoyo y colaboración incondicional en todo momento.

Mis compañeros que hice en mi vida universitaria y se convirtieron en una segunda familia, todos ellos serán parte importante de aquí en adelante, momentos inolvidables dentro y fuera de las aulas con “La People” jamás se los olvidara y espero encontrarnos en el camino con todas las metas que siempre teníamos para nuestro futuro.

Un sincero y especial agradecimiento a la MSc. Gabriela Verdezoto que fue mi primera directora que con su carácter fuerte y su vasto conocimiento logro iniciar con el proyecto y guiarme por el camino correcto.

*Fernando Sánchez*

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a mis padres que confiaban en que llegaría a ser un profesional, mis hermanos sin duda esperando el día de lograr este paso gigante.

Pero parte de este logro es de mi novia Eve que desde el primer día que ingrese a la Universidad no hizo más que apoyarme, estar junto a mí en las buenas y malas sabiendo sacarme adelante con su cariño y amor. Nunca faltaron unas palabras de aliento y apoyo; gracias por estar desde el primer día hasta hoy que termino esa meta que tanto deseamos.

*Fer y Eve*

## RESUMEN

En el presente trabajo se implementó una interfaz de videojuegos en un entorno de realidad aumentada para el correcto entrenamiento funcional de miembros superiores motivando al paciente en su recuperación a través de movimientos coordinados con objetos reales fusionados con objetos virtuales.

La intención del trabajo es la rehabilitación de los movimientos flexión y extensión del hombro y del codo. Además, de abducción y aducción del hombro que para el estudio son los que mayor influencia tienen en un entrenamiento.

La realidad aumentada es una mezcla de objetos reales con objetos virtuales unidos en escenarios virtuales, estos son creados mediante la plataforma de *Unity 3D* y el software de *Vuforia* que permite desarrollar aplicaciones de realidad aumentada en diferentes dispositivos.

Las escenas, los objetos virtuales y los movimientos se desarrollaron en *Unity* con la programación en *Visual Studio* en un lenguaje *C#*. Los objetos virtuales se generan por medio de marcadores que son elementos físicos interpretados por una cámara para ser renderizados y convertidos en los objetos virtuales dentro de los escenarios virtuales de los videojuegos.

Se desarrollaron varios escenarios virtuales con diferentes niveles de dificultad permitiendo relacionarse con los movimientos a rehabilitar. Gracias a esto los pacientes cambian la forma tradicional de rehabilitación aumentando su motivación, mejorando el aprendizaje y control de los movimientos y así el fisioterapeuta cumple con un correcto entrenamiento.

## ABSTRACT

In the present work, a video game interface was implemented in an augmented reality environment for the correct functional training of upper extremities motivating the patient in his recovery through coordinated movements with real objects fused with virtual objects.

The intention of the work is the rehabilitation of flexion and extension movements of the shoulder and elbow. As well as abduction and adduction of the shoulder, which for the study are the most influential in training.

Augmented reality is a mixture of real objects with virtual objects joined in virtual stages, these are created using the *Unity 3D* platform and *Vuforia* software that allow the development of augmented reality applications in different devices.

The scenes, virtual objects and movements were developed in *Unity* with programming in *Visual Studio* in a C# language. The virtual objects are generated through markers that are physical elements interpreted by a camera to be rendered and converted into virtual objects inside the virtual stages of video games.

Several virtual stages were developed with different levels of difficulty allowing to relate to the movements to be rehabilitated. Thanks to this, patients change the traditional way of rehabilitation increasing their motivation, improving learning and control of movements and thus the physiotherapist fulfills a correct training



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	1
<b>OBJETIVOS</b> .....	2
Objetivo General .....	2
Objetivos Específicos.....	2
<b>ALCANCE</b> .....	2
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	2
<b>1 CAPÍTULO: MARCO TEÓRICO</b> .....	4
<b>1.1 Antecedentes</b> .....	4
<b>1.2 Anatomía y biomecánica del miembro superior</b> .....	6
<b>1.2.1 Sistema muscular</b> .....	7
<b>1.2.1.1 Músculos del hombro</b> .....	7
<b>1.2.1.2 Músculos del brazo</b> .....	8
<b>1.2.1.3 Músculos del antebrazo</b> .....	9
<b>1.2.1.4 Músculos de la mano</b> .....	11
<b>1.3 Rehabilitación física</b> .....	12
<b>1.4 Análisis cinemático del miembro superior</b> .....	12
<b>1.4.1 Tecnologías cinemáticas de captación de movimiento</b> .....	12
<b>1.5 Neuroplasticidad</b> .....	13
<b>1.6 Aprendizaje motor en la rehabilitación</b> .....	13
<b>1.6.1 Control Motor</b> .....	14
<b>1.7 Entrenamiento funcional</b> .....	14
<b>1.8 Biofeedback</b> .....	14
<b>1.9 Realidad aumentada</b> .....	15
<b>1.9.1 Elementos de la realidad aumentada</b> .....	15
<b>1.9.2 Tipos de realidad aumentada</b> .....	16
<b>1.9.2.1 Realidad aumentada geolocalizada</b> .....	16
<b>1.9.2.2 Realidad aumentada con marcadores</b> .....	17
<b>1.9.3 Proceso de la realidad aumentada</b> .....	17

1.10	Rehabilitación con realidad aumentada.....	17
2	<b>CAPÍTULO: METODOLOGÍA</b> .....	19
2.1	<b>Técnicas de realidad aumentada en el proceso de rehabilitación de miembro superior</b> .....	19
2.1.1	<b>Características de la realidad aumentada basado en marcadores</b> .....	23
2.2	<b>Software de realidad aumentada</b> .....	24
2.2.1	<b>Características de Unity</b> .....	27
2.3	<b>Dispositivos implementados en la realidad aumentada</b> .....	27
2.4	<b>Ejercicios para el entrenamiento y control motor</b> .....	30
2.4.1	<b>Características de los ejercicios</b> .....	30
2.5	<b>Diseño de entornos de realidad aumentada</b> .....	31
2.5.1	<b>Desarrollo del Videojuego</b> .....	32
2.5.1.1	<b>Características del videojuego</b> .....	33
2.6	<b>Diseño de los escenarios para los entornos de realidad aumentada</b> .....	33
Vuforia	.....	34
Script	.....	37
3	<b>CAPÍTULO: RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	39
3.1	<b>Escenas de los videojuegos</b> .....	39
3.1.1	<b>Desarrollo del videojuego “Entrenamiento”</b> .....	39
3.1.2	<b>Desarrollo del videojuego “Escenario 1”</b> .....	43
3.1.3	<b>Desarrollo del videojuego “Escenario 2”</b> .....	44
3.1.4	<b>Desarrollo del videojuego “Escenario 3”</b> .....	45
3.2	<b>Diseño de una interfaz para el fisioterapeuta</b> .....	46
3.3	<b>Pruebas de los entornos de realidad aumentada</b> .....	48
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	50
	<b>Conclusiones</b> .....	50
	<b>Recomendaciones</b> .....	51
	<b>Bibliografía</b> .....	52
	<b>ANEXOS</b> .....	56
	<b>Anexo A:</b> Diagrama de flujo del videojuego “Entrenamiento” .....	56
	<b>Anexo B:</b> Diagrama de flujo del videojuego “Escenario 1” .....	56
	<b>Anexo C:</b> Diagrama de flujo del videojuego “Escenario 2” .....	57
	<b>Anexo D:</b> Diagrama de flujo del videojuego “Escenario 3” .....	57
	<b>Anexo E:</b> Manual de usuario para el Fisioterapeuta .....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Tecnologías para captar el movimiento del miembro superior [20].....	12
Tabla 2.	Matriz de comparación de técnicas de realidad aumentada para la rehabilitación	19
Tabla 3.	Matriz de criterios y valoración.....	22
Tabla 4.	Evaluación de las técnicas de realidad aumentada .....	22
Tabla 5.	Matriz de comparación para softwares de realidad aumentada.....	25
Tabla 6.	Matriz de criterios y valoración.....	26
Tabla 7.	Matriz de evaluación de los softwares para realidad aumentada.....	26
Tabla 8.	Matriz de comparación de dispositivos para realidad aumentada .....	28
Tabla 9.	Matriz de criterios y valoración.....	29
Tabla 10.	Matriz de evaluación de dispositivos de realidad aumentada.....	29
Tabla 11.	Movimientos del brazo en la articulación glenohumeral (hombro).....	30
Tabla 12.	Movimientos del brazo en la articulación del codo .....	30

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Vista del miembro superior [16].....	6
Figura 2.	a) Movimientos del hombro b) Movimientos de la muñeca c) Movimientos del codo [16] .....	7
Figura 3.	Clasificación de los músculos del hombro .....	8
Figura 4.	Músculos del hombro a) vista posterior superficial b) vista posterior profunda [17] .....	8
Figura 5.	Clasificación de los músculos del brazo.....	9
Figura 6.	Vista de los músculos del brazo [17].....	9
Figura 7.	Clasificación de los músculos del antebrazo .....	10
Figura 8.	Vista de los músculos del antebrazo [17] .....	10
Figura 9.	Clasificación de los músculos de la mano .....	11
Figura 10.	Vista de los músculos de la mano [17] .....	11
Figura 11.	Elementos de la realidad aumentada.....	16
Figura 12.	Aplicación de la realidad aumentada en la rehabilitación física.....	18
Figura 13.	Técnica de realidad aumentada con marcadores [28] .....	24
Figura 14.	Motor gráfico Unity .....	27
Figura 15.	Interfaz del software Unity .....	31
Figura 16.	Plataforma de desarrollo Vuforia.....	34
Figura 17.	Marcadores físicos (Imagen Target) .....	35
Figura 18.	Licencia creada en Vuforia .....	35
Figura 19.	Image Target creada en Vuforia .....	36
Figura 20.	Importar los elementos de Vuforia a Unity.....	36
Figura 21.	Script del Image Target.....	37
Figura 22.	Scripts en Unity y Visual Studio.....	38
Figura 23.	Partes principales en la escena .....	39
Figura 24.	Creación del objeto virtual que se genera con el Target real.....	40
Figura 25.	Creación de los objetos virtuales a destruir .....	41
Figura 26.	Botón para cambio de escena.....	41
Figura 27.	Resultado final del diseño del videojuego "Entrenamiento" .....	42
Figura 28.	Videojuego "Entrenamiento". Movimientos flexión - extensión del codo .....	43
Figura 29.	Videojuego "Escenario 1". Movimientos flexión – extensión del hombro y codo .....	44

Figura 30.	Videojuego “Escenario 2”. Movimientos flexión - extensión del hombro y codo .....	45
Figura 31.	Videojuego "Escenario 3". Movimiento flexión – extensión del codo.....	46
Figura 32.	Ventana de inicio de la aplicación .....	47
Figura 33.	Ventana principal para ingreso a los videojuegos de realidad aumentada.....	48
Figura 34.	Paciente usando la aplicación .....	49
Figura 35.	Flexión del codo con la manipulación del marcador .....	49

# INTRODUCCIÓN

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Ecuador existen 466.236 personas con algún tipo de discapacidad registrado en 2019, de esta cifra, 217.347 (46,62%) son de carácter físico [28] pero un 15% de ellas son lesiones de miembro superior causados por diversos motivos como actividades lúdicas, accidentes de tránsito o deportivos, hasta enfermedades como la osteoporosis [29].

En el campo de la fisioterapia se pueden realizar dos tipos de rehabilitación; activa y pasiva. La rehabilitación activa comprende una serie de movimientos físicos, posturas o actividades planificadas realizadas por el mismo paciente con sus propias fuerzas [30]. Por otra parte, en la rehabilitación pasiva el paciente tiene menor participación debido a que el movimiento es realizado con la ayuda de un profesional de fisioterapia o algún dispositivo [30].

Actualmente para la rehabilitación de lesiones de miembro superior se implementan nuevas técnicas. Una de ellas es el uso de exoesqueletos para transmitir potencia mecánica a la persona y generar movimientos [31]. Entre las nuevas técnicas para la rehabilitación también se puede manejar las características de las señales EMG que se propagan a lo largo de los músculos que permiten interactuar con juegos virtuales [32]. La técnica conocida como tecnología de acceso (realidad aumentada), genera movimientos por la interacción con sensores o dispositivos de entrada (botones, cámaras, teclado) [33].

Los sistemas de realidad aumentada combinan elementos digitales con la realidad en una realidad mixta, desarrollando nuevas experiencias interactivas entre el usuario y un mundo tanto virtual como real. Estos sistemas prestan servicios de salud y rehabilitación a distancia y son capaces de medir el tiempo de realización de las tareas y la velocidad del movimiento de la mano, capturando los movimientos de los pacientes mientras mueven un objeto tangible [34]. La rehabilitación con realidad aumentada permite al fisioterapeuta realizar tratamientos estimulantes para el paciente porque le permite decidir si el proceso de ejercicios es en el día o en la noche, en un ambiente u otro y así facilitar el auto entrenamiento y aprendizaje del paciente puesto que no espera que los sucesos tengan lugar en la vida real, sino reproducir un ambiente que el desee [35].

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Implementar un sistema de rehabilitación para personas con deficiencia del control motor de miembro superior en un entorno de realidad aumentada.

### **Objetivos Específicos**

- Seleccionar la técnica y los dispositivos de interacción de realidad aumentada que incidan positivamente en la rehabilitación del paciente.
- Desarrollar entornos virtuales que incorporen ejercicios para el entrenamiento funcional del miembro superior.
- Crear una interfaz para la personalización y adaptación de la terapia de rehabilitación a las necesidades de cada paciente.

## **ALCANCE**

En el trabajo de grado se determinará la técnica, los dispositivos de realidad aumentada y el software de desarrollo que brinde las mejores características para la implementación del sistema de rehabilitación para personas con deficiencia del control motor de miembro superior que permita recuperar la movilidad del brazo mediante un entrenamiento funcional. Se desarrollará entornos virtuales con ejercicios enfocados a realizar una tarea. Se diseñará una interfaz para el fisioterapeuta que le permita observar el tiempo y los movimientos de las rutinas de rehabilitación sujetas a las necesidades del paciente. Se realizarán las pruebas de usabilidad de las interfaces en base a criterios de eficacia, eficiencia y satisfacción del usuario.

## **JUSTIFICACIÓN**

Se desarrolló previamente una interfaz dinámica para entrenador mioeléctrico para personas con amputación transradial para aportar con trabajos realizados en el grupo de investigación de sistemas inteligentes (GISI) de la Universidad Técnica del Norte. La interfaz dinámica para el paciente utilizó las características de las señales EMG de los músculos que intervienen en los movimientos de flexión y extensión del miembro superior, el entrenamiento está basado en juegos interactivos humano-máquina.

El uso de la realidad virtual ayuda a que los ejercicios de rehabilitación sean más interactivos y lograr que la persona cree un plan motor en su cabeza, es decir, una programación de cómo va a mover su brazo usando elementos y dinámicas propias de los juegos generados en entornos o escenarios virtuales en el cual se observa los movimientos de los objetos sin tenerlos en la mano y gracias a la creatividad en el diseño de la aplicación [36].

Las ventajas tienen que ver con la relación costo-eficiencia y mayor efectividad de la rehabilitación porque desarrollarían habilidades cognitivas en el proceso. Cambiar la forma tradicional de las terapias y así motivar al paciente a realizar las sesiones de rehabilitación de miembro superior, permitiendo mejorar la forma de asistencia del fisioterapeuta [37].

La tecnología como herramienta en la rehabilitación de miembro superior está logrando un impacto social en el campo de la salud y bienestar de las personas mediante el desarrollo de softwares y/o aplicaciones en el área de la terapia física permitiendo poner al servicio de la salud las herramientas de la ingeniería para así mejorar la calidad de trabajo de un profesional en fisioterapia [38].



# 1 CAPÍTULO: MARCO TEÓRICO

El avance y uso de las nuevas tecnologías de la información, comunicación y la automatización permite el desarrollo de nuevos procesos y productos que mejoren el trabajo de las personas en el área en la cual se enfocan. La realidad aumentada no es un término nuevo de hecho ya son varios años que ofrece diversas posibilidades en el desarrollo de aplicaciones en diferentes áreas de estudio. Utilizar la realidad aumentada en la rehabilitación física permitiría incentivar el entrenamiento funcional motor de las personas.

## 1.1 Antecedentes

La realidad aumentada (RA) es la relación entre el entorno físico del mundo real y el entorno virtual integrado en tiempo real y se le considera como realidad mixta porque presenta objetos reales y virtuales registradas en tres dimensiones o 3D en conjunto en una única pantalla [11]. El término de realidad aumentada fue interpretado por el investigador Tom Caudell mientras desarrollaba nuevos procesos de fabricación en *Boeing* por el año 1992 [11], pero años atrás ya hubieron inventos que relacionaban a la realidad aumentada.

En 1957 se construyó un prototipo llamado Sensorama en el cual se proyectaba imágenes en 3D acompañado de sonidos, vibraciones y aire que eran sentidos por los usuarios. En 2010 Adidas vendió zapatillas de realidad aumentada donde los propietarios enseñaban la lengüeta a una cámara y podían observar imágenes en 3D. Hoy en día lo más importante que se ha presentado de RA son gafas con esta tecnología en la que se puede visualizar varias aplicaciones a la vez en el campo visual creando un entorno virtual alrededor del usuario.

En el año 2017 en la Universidad Central del Ecuador se realizó la siguiente tesis: *“desarrollo de una aplicación con realidad aumentada para aprender las características y el comportamiento de las especies emblemáticas del Ecuador orientado a niños de educación inicial”* [12].

El proyecto desarrolló una aplicación móvil con realidad aumentada en cual explica las características principales de 5 especies de animales del Ecuador que son estudiados por niños de 4 a 5 años. Los bocetos de los animales son hechos a mano y lápiz al inicio para luego ser modelado, texturizado y animado en tres dimensiones a través del software *Blender*. Con la

imagen 3D pasa a ser codificado en la plataforma de juegos *Unity* y con el paquete de *Vuforia* genera la realidad aumentada. Para generar el *SDK* del juego se guarda las escenas diseñadas en *Unity* y se guarda el package en el sistema operativo (Android/iOS) del móvil a utilizar en la aplicación del juego. Los elementos se generan en el dispositivo móvil y son visualizadas en la pantalla generado los animales creados y los sonidos característicos de los mismos [12].

En el año 2015 en la Universidad de Cuenca se realizó la tesis: “***realidad aumentada en dispositivos móviles Android aplicada a la geolocalización de equipamientos de agua potable de EMAPAL-EP***” [13].

Construir un prototipo de software para dispositivos móviles para localizar los accesorios que integran la red de distribución de agua potable y alcantarillado de Azogues. La RA también tiene aplicaciones de geolocalización y aquí la utilizaron para generar mapas de ubicación en tiempo real de las redes de agua potable y alcantarillado para localizar los puntos donde estaban los diferentes accesorios de la red como válvulas, tanques, etc., al encontrar un marcador ya identificado en el dispositivo móvil genera una imagen aumentada dando la ubicación exacta del objeto buscado. El software utilizado fue *Wikitude* que permite generar información de la ubicación y encontrar otro lugar basadas en las imágenes tomadas por la cámara [13].

En la Universidad Técnica del Norte en el año 2016 se realizó la tesis: “***construcción de una aplicación de componentes electrónicos básicos utilizando la realidad aumentada para las niñas, niños y jóvenes de la zona 1 del Ecuador***” [14].

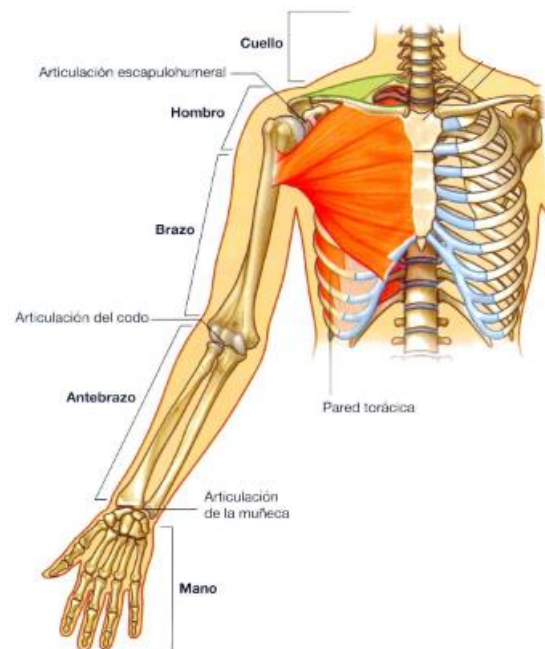
Realizar una aplicación de realidad aumentada en el software *AR-media* en el cual permita visualizar componentes electrónicos básicos y sus respectivas características. Se construyo un cubo de papel que tiene en cada cara impreso un marcador o imagen que al ser expuesto delante de la cámara muestra un modelo 3D, en este caso un componente electrónico; los modelos 3D son figuras que se desarrolló en el software de diseño y modelado *Cinema 4D*. Finalmente el modelo 3D se coloca en el *plugin AR-media* y luego se lo reproduce con *AR-media player* generando el modelo 3D y la información básica de cada componente que está asociada a cada una de las caras del cubo de papel que tienen un marcador que al momento de ser puesto en frente de la webcam producen las imágenes aumentadas en la pantalla de la pc o monitor [14].

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE en el año 2013 se realizó una aplicación con realidad aumentada y marcadores. Se enfocaron en el área de la educación para introducir objetos virtuales al mundo físico, en el software *FLARManager* se crea la aplicación de RA y

con la librería *FLARToolkit* se hace la captura de la imagen y transformar a escala de grises para ser reconocida como marcador y ser almacena. La aplicación se usó en niños/as de una escuela basándose en el sistema solar planeta y cada marcador captado por la cámara web generaba un modelo 3D de los diferentes planetas, con los cuales los niños podrían interactuar, mostrando mayor interés y retentiva de los conocimientos impartidos [15].

## 1.2 Anatomía y biomecánica del miembro superior

Las partes principales que componen el miembro superior son el hombro, el brazo, antebrazo y mano, figura 1; que son las localizaciones más importantes para una rehabilitación. [16].



*Figura 1. Vista del miembro superior [16]*

La función que diferencia a la extremidad superior es la movilidad de la mano, que se sitúa en distintas posiciones en el espacio que es alcanzado por los movimientos de las articulaciones. Gracias a la articulación escapulo humeral el brazo realiza los movimientos de **flexión, extensión, abducción, circunducción y rotación medial y lateral**. En el codo se puede flexionar y extender el antebrazo además de poder realizar los movimientos denominados **pronación y supinación**. Finalmente con la muñeca se pueden generar los movimientos de **abducción, aducción, flexión, extensión y circunducción** de la mano [16], los movimientos mencionados se pueden observar en la figura 2.

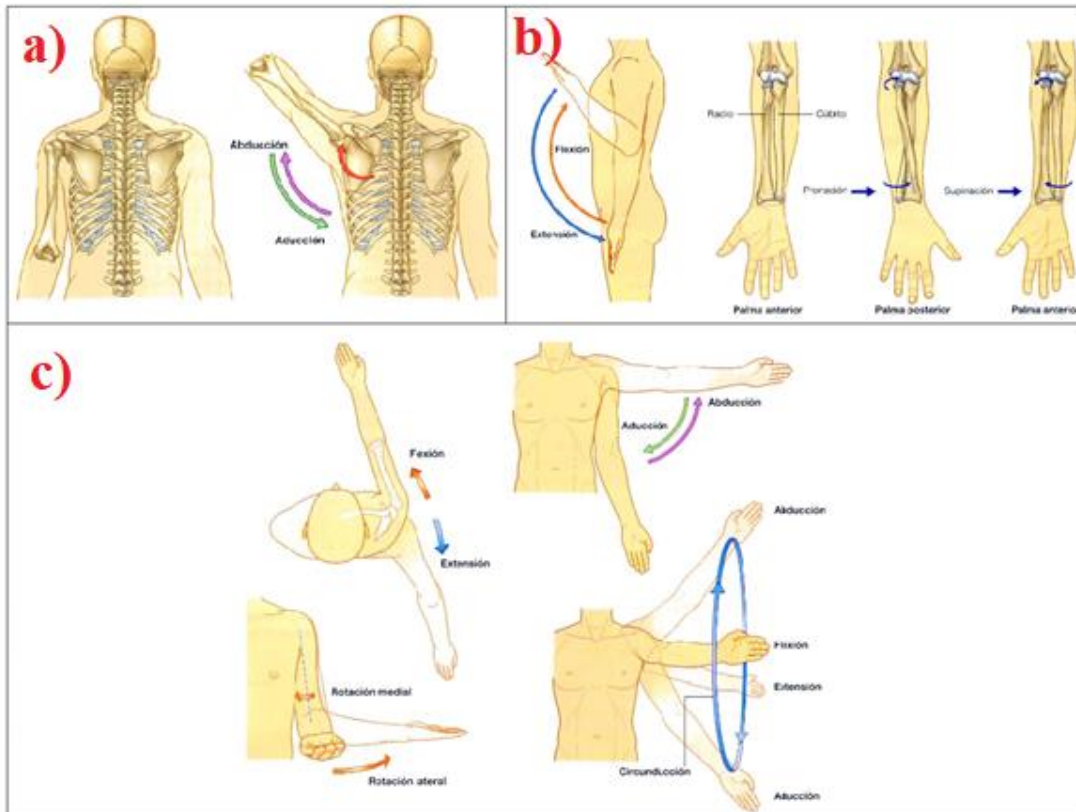


Figura 2. a) Movimientos del hombro b) Movimientos de la muñeca c) Movimientos del codo [16]

## 1.2.1 Sistema muscular

Los músculos de la extremidad superior son los que permiten la movilidad del brazo y del antebrazo. Algunos actúan sobre las articulaciones del hombro y otros generan movimientos de extensión – flexión o realizan movimientos delicados con la mano como el de dibujar y escribir.

### 1.2.1.1 Músculos del hombro

El conjunto de músculos como se observa en la figura 4 forma el entorno característico del hombro y permite realizar las funciones (movimientos) y mantener diferentes posiciones con respecto al tronco.

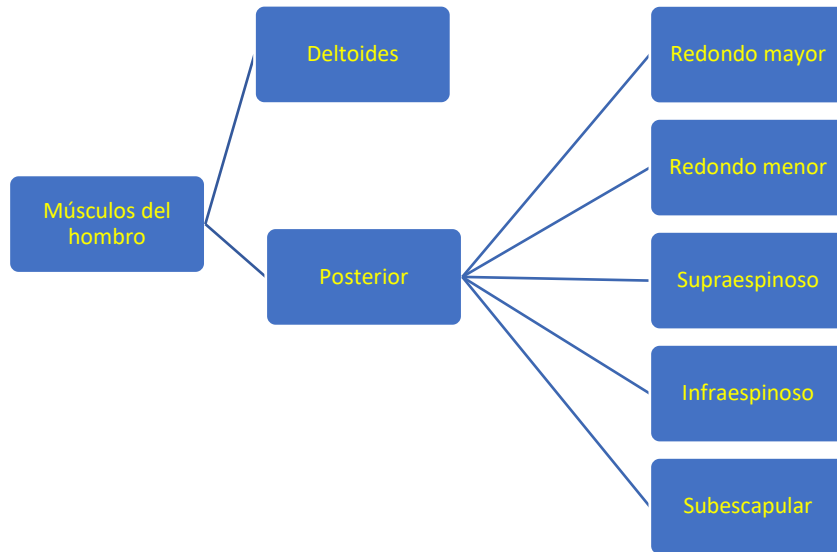


Figura 3. Clasificación de los músculos del hombro

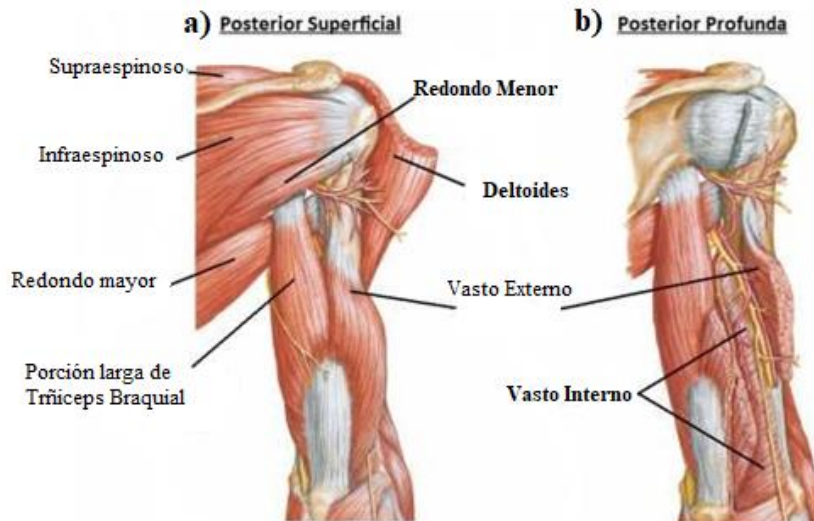


Figura 4. Músculos del hombro a) vista posterior superficial b) vista posterior profunda [17]

### 1.2.1.2 Músculos del brazo

Los músculos del brazo permiten la flexión del hombro y la extensión del codo, conservan la forma simple de la musculatura del miembro como se observa en la figura 6. Principalmente actúan en la articulación del codo generando movimientos en el eje frontal del brazo y se inserta con los huesos del antebrazo.

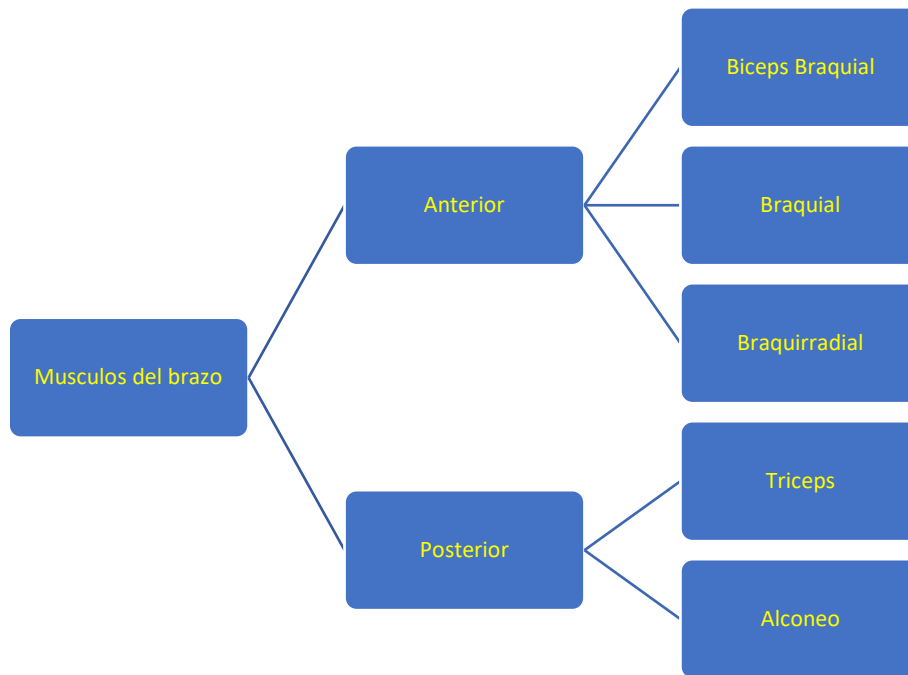


Figura 5. Clasificación de los músculos del brazo

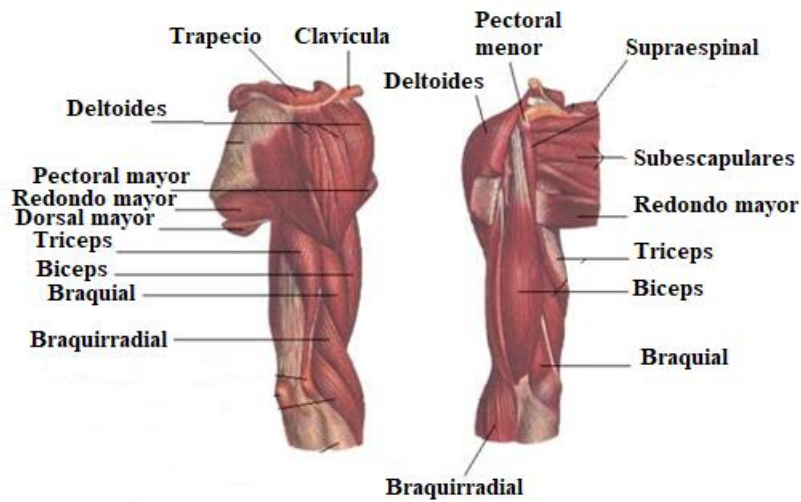


Figura 6. Vista de los músculos del brazo [17]

### 1.2.1.3 Músculos del antebrazo

La limitación del antebrazo esta dado por las articulaciones del codo y de la muñeca, ver figura 8; gracias a los músculos que lo conforman realiza los movimientos de pronación y supinación.

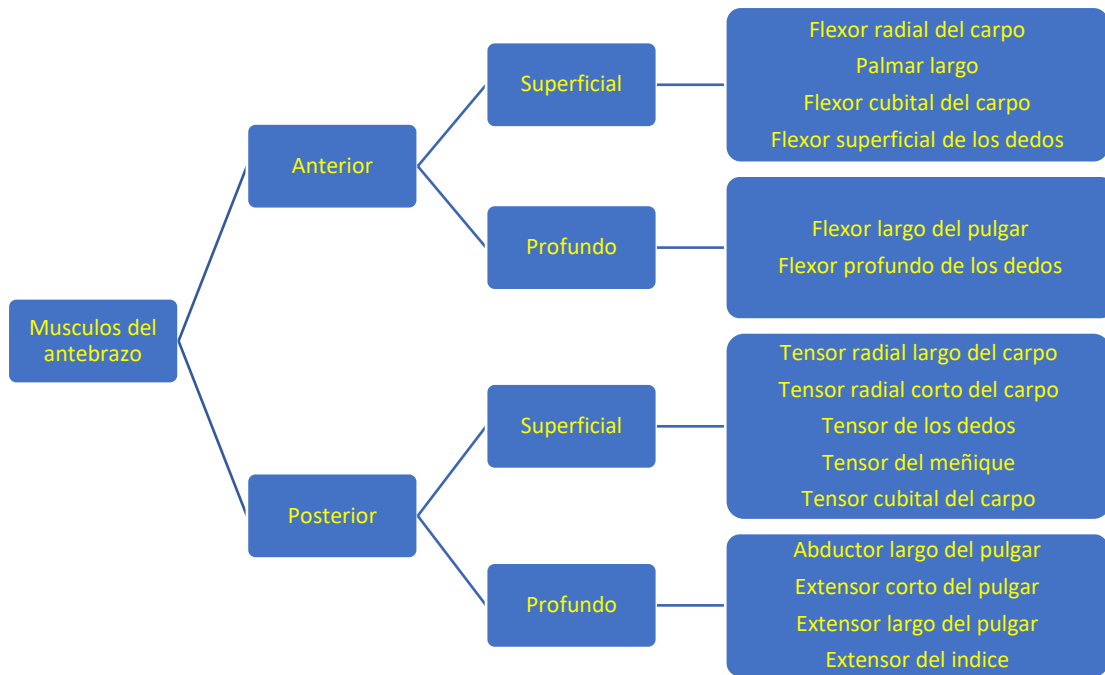


Figura 7. Clasificación de los músculos del antebrazo

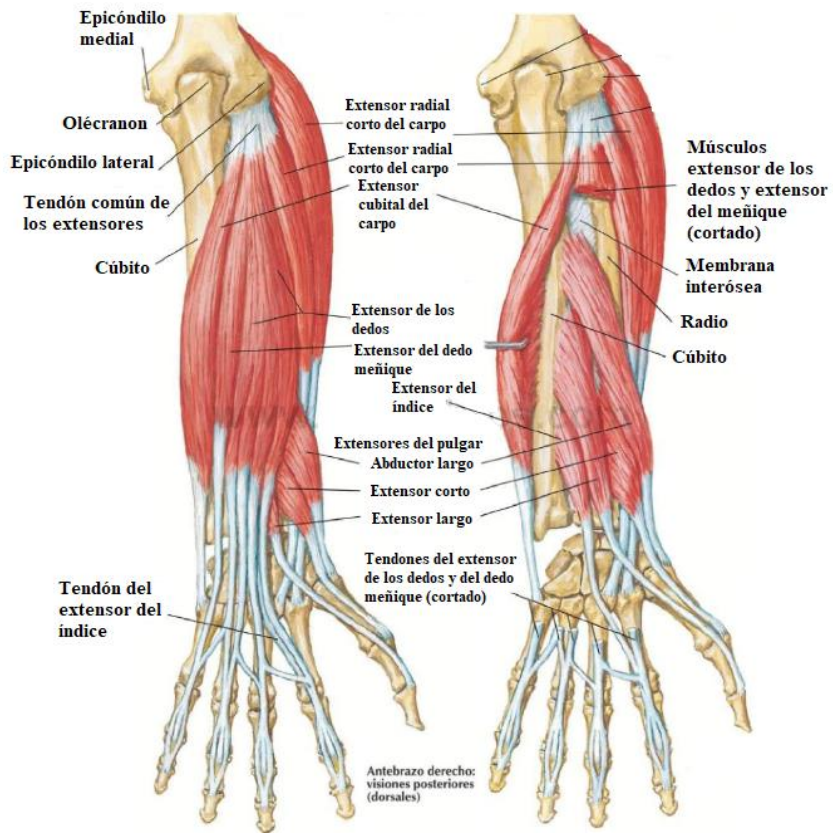


Figura 8. Vista de los músculos del antebrazo [17]

### 1.2.1.4 Músculos de la mano

La mano es una parte fundamental del miembro superior y del cuerpo humano porque permite la manipulación y agarre físico del medio con la ayuda de los músculos como se observa en la figura 10.

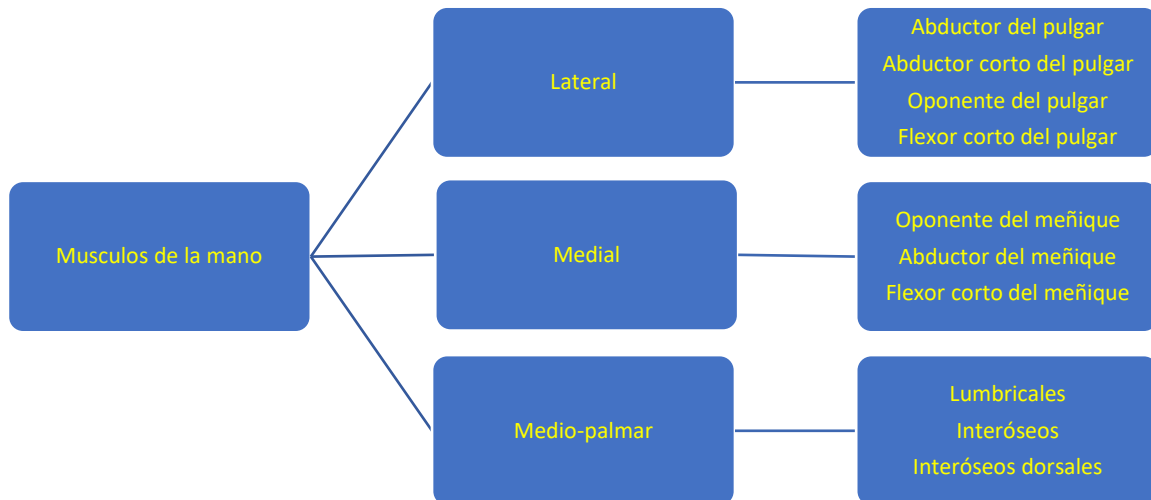


Figura 9. Clasificación de los músculos de la mano

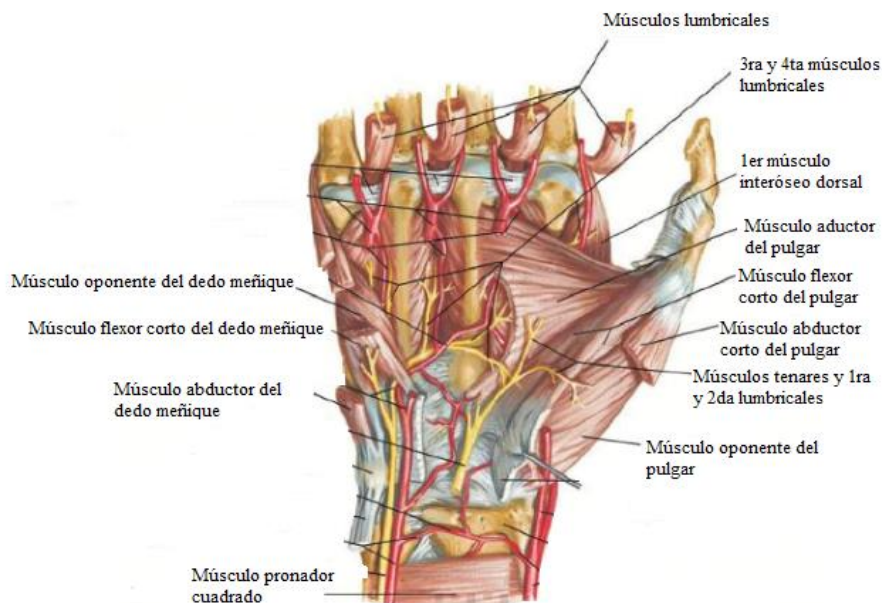


Figura 10. Vista de los músculos de la mano [17]



### 1.3 Rehabilitación física

Es común oír acerca de problemas musculares en las personas causadas por diferentes alteraciones y para disminuir los efectos se realiza un proceso de rehabilitación tan pronto sufrida la lesión. La rehabilitación es una disciplina que permite recuperar una función perdida o disminuida de las capacidades motrices por medio de un conjunto de procesos para volver a realizar actividades rutinarias o autónomas [18].

Las formas de rehabilitación pueden ser físicas, cognitivas, sensoriales, prácticas y muchas veces de formas virtuales, es decir experimentadas en un ambiente tecnológico; todas estas con el fin de estimular las funciones mentales necesarias para recuperar los movimientos motrices [18].

### 1.4 Análisis cinemático del miembro superior

Los estudios, registros y velocidades de los movimientos implicados en realizar una tarea por parte del miembro superior permiten identificar el comportamiento biomecánico entre un movimiento normal y otro que tenga una afección y o lesión de una persona. El objetivo de realizar un análisis cinemático es lograr evaluar los problemas generados por la afección para generar un tratamiento de rehabilitación adecuado [19].

#### 1.4.1 Tecnologías cinemáticas de captación de movimiento

Para capturar el movimiento del miembro superior, transformarlo a un modelo digital y realizar el análisis respectivo de sus características hay diversas técnicas en el mercado, a continuación, se observa un resumen de algunas tecnologías incorporadas para el estudio de movimiento sujetas principalmente a las ciencias biomédicas y biomecánicas [19].

*Tabla 1. Tecnologías para captar el movimiento del miembro superior [20]*

TECNOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
<b>Sensores inerciales</b>	Medir posición, orientación y velocidad angular. Está compuesto por 3 sensores:	Sistema para conocer la posición o desplazamiento de pacientes o articulaciones

	acelerómetros, giroscopios y magnetómetros.	
<b>Sensores electromagnéticos</b>	Calcular la posición y la orientación del receptor con respecto al emisor basado en la variación de un campo magnético y un campo eléctrico.	Determinar la posición y orientación de un objeto
<b>Ultrasonido</b>	Emite secuencialmente un sonido al emisor y mide el tiempo que la señal tarda en llegar	Determinar la posición de cada emisor en función de coordenadas
<b>Goniometría</b>	Medir ángulos articulares de giro alrededor de un eje	Detectar los movimientos de las articulaciones humanas para obtener el ángulo de desplazamiento de dichas articulaciones
<b>Fotogrametría</b>	Obtener información espacial a partir imágenes planas o de un análisis de movimiento basado en videos	Captar imágenes con la ayuda de cámaras para luego digitalizar y ser analizadas

## 1.5 Neuroplasticidad

El aprendizaje en la infancia se basa en la modificación del sistema nervioso para formar conexiones nerviosas, estimulación sensorial y el desarrollo que son posibles gracias a la neuroplasticidad. El sistema nervioso es un sistema dinámico que modifica los componentes biológicos, bioquímicos y fisiológicos. Generar cambios en la actividad neuronal gracias a estímulos sean estos eléctricos, químicos o con dispositivos que son utilizados en la neurorrehabilitación [21].

## 1.6 Aprendizaje motor en la rehabilitación

El aprendizaje motor es un proceso que consiste en la anticipación, planeación, ejecución y retroalimentación del movimiento de alguna parte del cuerpo humano. También se puede decir que son los procesos asociados a la experiencia y práctica que generan los cambios en la forma de realizar los trabajos. Se habla de reaprendizaje motor a la rehabilitación porque se logran nuevas habilidades o se aplican a las habilidades antes aprendidas [22].

Definitivamente la inclusión de nuevas tecnologías como la realidad virtual, realidad aumentada, tecnología, robótica, etc., en el aprendizaje motor de pacientes con discapacidad o deficiencia en el control motor del miembro superior admite tener interés en el proceso de rehabilitación porque ayuda a un interesante cambio relativo en la capacidad de movimiento.

### **1.6.1 Control Motor**

El miembro superior o simplemente el brazo de los humanos genera movimientos naturales causados por los músculos y articulaciones, provocados por información sensorial de los sentidos que son enviadas al cerebro para saber cómo se va a controlar dichos movimientos, la secuencia de estos y los alcances que va a realizar el brazo, a todo esto, se lo denomina control motor.

### **1.7 Entrenamiento funcional**

Realizar ejercicio para cumplir con las necesidades y tareas que el individuo desea es importante, por lo cual es necesario un correcto entrenamiento practico, útil y adecuado siempre que estén destinados a funciones determinadas.

Para tener una buena rehabilitación es necesario un entrenamiento funcional donde incluye ejercicios y movimientos que permiten al individuo realizar actividades funcionales con el cuerpo, logrando así un entrenamiento activo y ventajoso para los músculos mejorando la repetibilidad, la fuerza y la precisión de los movimientos para así reducir lesiones [23].

### **1.8 Biofeedback**

La retroalimentación neuro-funcional o Biofeedback permite corregir los movimientos y conseguir un acoplamiento y coordinación entre los músculos, el cerebro y los sentidos. Dentro de la neurorrehabilitación el uso de cualquier elemento para ser visible, reconocible y comprensible al cerebro permite una retroalimentación fisiológica que realice el cuerpo y por ende facilitará el control motor logrando una excelente opción terapéutica para el mejoramiento de los movimientos motrices.

El Biofeedback tiene una gran importancia en la recuperación de personas con deficiencia en el control motor o pacientes neurológicos permitiendo un mejor proceso de rehabilitación y tiempo porque el paciente se involucra en la actividad [20].

## **1.9 Realidad aumentada**

La realidad aumentada no es un término nuevo, de hecho, ya son varios años que se utiliza como herramienta para diferentes aplicaciones y procesos tecnológicos que permiten cumplir objetivos que antes eran complicados o tomaban mucho tiempo, ya que al insertar un ambiente de realidad aumentada permite a las personas relacionarse al mismo tiempo en un entorno real y virtual logrando un enfoque mixto de trabajo.

Mejorar la estimulación visual y táctil del usuario en la rehabilitación es algo complicado, pero al interactuar al individuo en un entorno aumentado da mayor motivación para continuar con la serie sesiones de entrenamiento que al finalizar cada una permite analizar la actividad muscular, las trayectorias realizadas y los errores de seguimiento. Este sistema de RA hace posible combinar escenarios reales con objetos virtuales con el cual los usuarios ejercen sobre la mano fuerzas para simular el contacto con los objetos virtuales [24].

El rápido avance tecnológico del mundo permite que la ciencia y tecnología se combinen para generar nuevos procesos que sean mejores, más rápidos y baratos de introducirlos en algún ambiente de trabajo, es de ahí que surge el nombre realidad aumentada.

La realidad aumentada permite navegar tanto el mundo real como en el mundo virtual creando una realidad mixta y potenciando la forma de trabajar a distancia, se ha demostrado también que gracias a la realidad aumentada se puede medir el tiempo de realizar las actividades o la velocidad del movimiento del brazo. Desarrollar nuevas experiencias es el objetivo de la RA para interactuar con elementos digitales entre la persona y el mundo físico y virtual [25].

### **1.9.1 Elementos de la realidad aumentada**

Hoy en día es fácil encontrarse con dispositivos tecnológicos avanzados en cualquier lugar y eso lo aprovechó la fisioterapia o rehabilitación, ya que existen múltiples formas de aplicar

la realidad aumentada en función de la forma de rehabilitación. Para entender de forma resumida la funcionalidad de la RA hay que tomar en cuenta 4 elementos que intervienen, ver figura 11:

- a. CAMARA: es un dispositivo que captura la imagen del mundo real, puede ser una cámara de un ordenador, un dispositivo móvil o las conocidas cámaras web.
- b. PANTALLA: o también monitor es el dispositivo en el cual podemos observar y mostrar los elementos físicos sobrepuestos con los elementos virtuales.
- c. SOFTWARE: es el programa informático encargado de procesar la información y transformarla.
- d. ACTIVADOR: conocido como disparador o trigger es un elemento real que el software interpreta para generar la información correspondiente. Estos pueden ser los códigos QR, una imagen, un objeto, un marcador, etc.

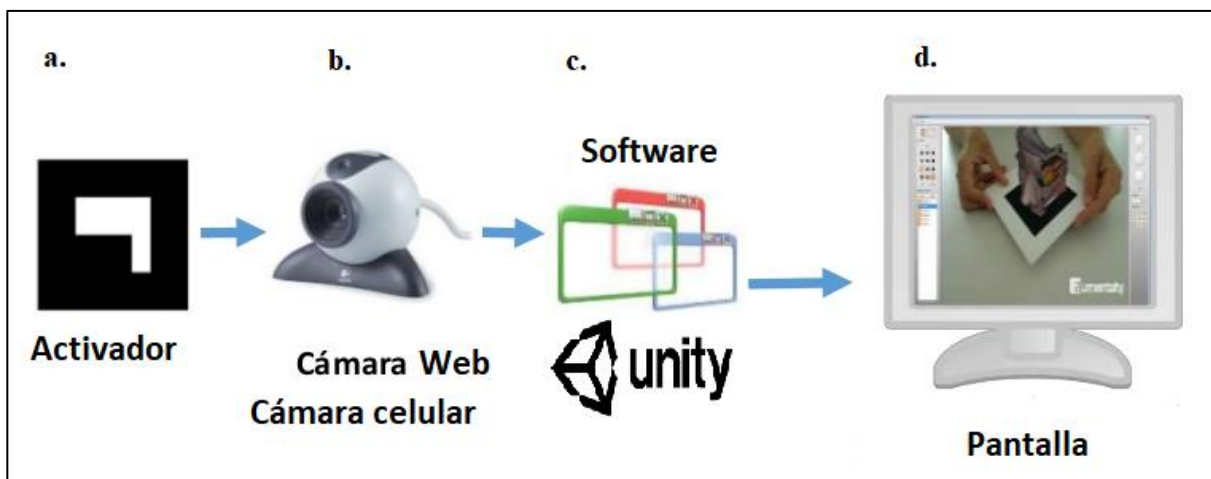


Figura 11. Elementos de la realidad aumentada

## 1.9.2 Tipos de realidad aumentada

La realidad aumentada tiene diferentes maneras de ser implementada por lo cual se puede hacer una tipología de acuerdo con los elementos utilizados, las técnicas o para el área en el cual se va a trabajar, a continuación, una breve clasificación [26].

### 1.9.2.1 Realidad aumentada geolocalizada

La geolocalización identifica la posición de un dispositivo en tiempo real permite ubicarlos por medio de coordenadas, esto gracias a los activadores que cumplen la función de sensores;

la cámara del dispositivo captura la imagen y lo procesa en el software apropiado para el posicionamiento [27].

Para mencionar algunos activadores utilizados en la geolocalización están el GPS, brújula o acelerómetro.

### **1.9.2.2 Realidad aumentada con marcadores**

Un marcador es un elemento físico que cumple la función de activador y son imágenes en dos dimensiones que permiten agregar objetos virtuales al mundo real. Estos marcadores son colocados frente a la cámara para ser interpretados por el software y generar objetos, figuras o videos virtuales (digitales) que son visualizados en la pantalla o monitor [28].

### **1.9.3 Proceso de la realidad aumentada**

La realidad aumentada es un proceso realmente sencillo de entender y este compuesto por los elementos antes mencionados. Primero se debe tener un dispositivo con un software que tenga la aplicación instalada que genere la realidad aumentada para previamente activarlo. Segundo, enfocar la cámara del dispositivo en los objetos o entorno físico sobre la cual se desea obtener la información para ser capturada. Tercero, luego de la transformación de la información mediante la aplicación instalada, en la pantalla o monitor del dispositivo se mostrará los objetos o la información digital que se relacione con la imagen capturada para generar los objetos digitales o en este caso objetos tridimensionales (digitales) [29].

## **1.10 Rehabilitación con realidad aumentada**

Se habla de ingeniería de rehabilitación si se aplica la ciencia y la tecnología para el diseño de dispositivos o sistemas para mejorar, rehabilitar o reemplazar alguna parte del cuerpo humano que tenga deficiencia o discapacidad y esto impida que el individuo pueda realizar sus actividades diarias con normalidad [30].

La realidad aumentada es una herramienta tecnológica importante para la rehabilitación ya que mejora la recuperación, aumenta la motivación del paciente y así mejorar el proceso con ejercicios funcionales o lo que se conoce como entrenamiento funcional. La repetitividad de los movimientos permite recuperar con facilidad las deficiencias motoras del paciente, de ahí

surge la idea de los fisioterapeutas en utilizar la realidad aumentada para prescribir los ejercicios y que el paciente se implique e incentive con la rehabilitación.

En la figura 12 se observa cómo se aplica la rehabilitación utilizando los elementos de realidad aumentada antes mencionados para generar un entrenamiento agradable para el paciente, saliendo de lo tradicional.

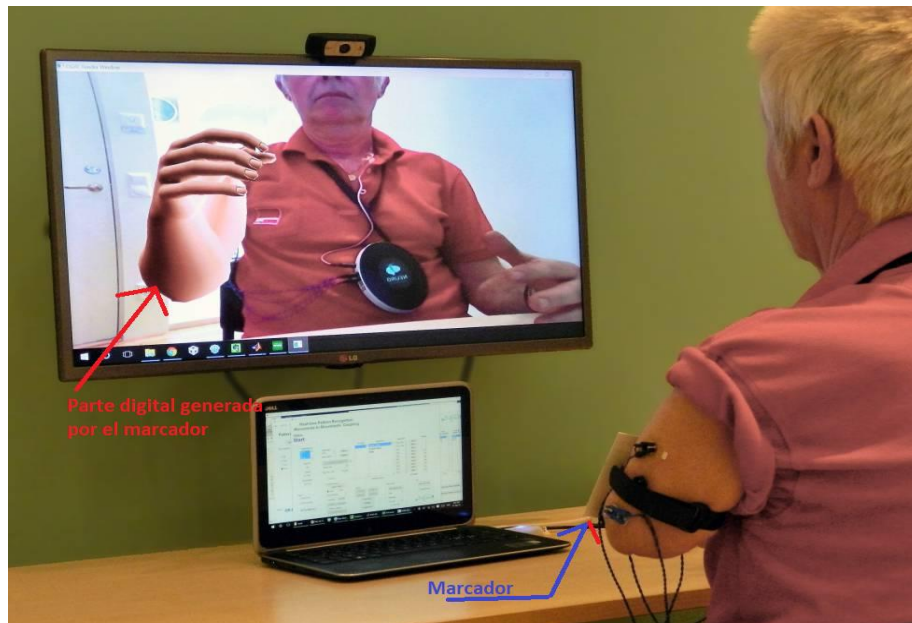


Figura 12. Aplicación de la realidad aumentada en la rehabilitación física

En el siguiente capítulo vamos a implementar una serie de ejercicios de rehabilitación física con realidad aumentada basándonos en cuadros de comparación de todos los elementos necesarios para generar la aplicación. Se van a escoger los dispositivos, la técnica y el software para desarrollar la aplicación de realidad aumentada para luego implementarla al campo de la fisioterapia.

## 2 CAPÍTULO: METODOLOGÍA

Este capítulo se enfoca en el diseño, desarrollo e implementación de la aplicación de realidad aumentada para la rehabilitación de miembros superiores, para lo cual se analizará en una matriz de comparación la técnica, el software y los dispositivos y luego seleccionar la más adecuada para crear la interfaz de rehabilitación.

### 2.1 Técnicas de realidad aumentada en el proceso de rehabilitación de miembro superior

El uso de técnicas de realidad aumentada en actividades de rehabilitación para aumentar la motivación, mejorar el entrenamiento, activar el aprendizaje y evaluar a las personas con deficiencia ha sido uno de los sectores con más crecimiento en los últimos años. A diferencia de la realidad virtual, la realidad aumentada permite al paciente tener una percepción de elementos virtuales dentro del mismo mundo real, generando una escena aumentada en la cual se puede interactuar en tiempo real con dichos elementos virtuales agregados [31].

Los programas informáticos han revolucionado la ciencia y tecnología para ayudar a la estimulación cognitiva y evaluación de pacientes, en la tabla 2 se va a describir algunas de las técnicas de realidad aumentada más utilizadas en el área de rehabilitación.

Tabla 2. Matriz de comparación de técnicas de realidad aumentada para la rehabilitación

Técnica de realidad aumentada	Costo	Descripción	Usabilidad	Dispositivos
<b>Obtener señales EMG y sus respectivos espectros</b>	Medio	Marcadores captados por cámara web y el entorno visualizado en un computador, tocar los objetos virtuales con el sensor háptico.	Fácil para el paciente, con datos para el terapeuta	Cámara de video Sensor háptico Lentes Oculus Rift
<b>Rastrear la posición del marcador, procesar y reaccionar al cambio. Controlar posición y orientación de la cámara. Videojuego</b>	Bajo	Cámara del teléfono móvil capta el marcador para ubicar y posicionara el objeto virtual.	Fácil para el paciente, sin datos para el terapeuta	Teléfono móvil



<b>Adquisición de habilidades de comunicación. Movimientos controlados por estabilidad del móvil. Videojuego</b>	Alto	Por medio de una aplicación a través de la cámara del móvil se observa objetos virtuales creados por la aplicación para ser recogidos con la mano.	Fácil para el paciente, sin datos para el terapeuta	Teléfono móvil
<b>Captura y tratamiento de videos e imágenes.</b>	Bajo	Con la cámara Kinect observar el entorno virtual donde captas imágenes u objetos para generar movimientos para tocarlos.	Fácil para el paciente, sin datos para el terapeuta	PC Kinect Monitor LCD
<b>Detección de piel y un método de detección de rostros. Detección de bordes de imágenes (Canny)</b>	Medio	Marcadores fiduciales son dibujos predeterminados en un entorno físico para extraer coordenadas tridimensionales.	Fácil para el paciente, con datos para el terapeuta	Cámara web Proyector LCD Pantalla de proyección Trípode Computadora
<b>Reconocimiento de los patrones de imágenes. Visión por computadora</b>	Bajo	Mediante un video en tiempo real obtenido por una cámara se identifican los marcadores y se proyectan los modelos virtuales.	Fácil para el paciente, con datos para el terapeuta	Marcadores Cámara
<b>Monitoreo y registro de los movimientos y trayectorias que se generan</b>	Alto	Con el uso de lentes de realidad virtual se observa objetos virtuales generados en un monitor o computador.	Fácil para el paciente, con datos para el terapeuta	Lentes de AR Meta 1
<b>Detección de marcadores por visión por computadora e interactuar de forma táctil con los objetos virtuales</b>	Medio	Con la ayuda de un robot háptico y lentes de realidad aumentada se generan objetos virtuales que pueden ser recogidos por medio del movimiento del robot háptico y así generar trayectorias del miembro superior.	Fácil para el paciente, con datos para el terapeuta	Marcadores Cámara Lentes Robot háptico
<b>Interfaz para generar objetos virtuales para moverlos con los brazos y monitorear las señales EMG de los músculos en tiempo real</b>	Medio	Una cámara web identifica unos marcadores en 2D que son procesados mediante un software el cuál crea objetos en función de los marcadores. Los movimientos del miembro superior son captados mediante electrodos conectados a los músculos.	Fácil para el paciente, con datos para el terapeuta	PC con cámara web Marcador Electrodos

<b>Monitoreo de los músculos basados en señales EMG</b>	Medio	El marcador se adjuntó al pulgar del sujeto para rastrear e interactuar con objetos virtuales. Cuando comienza el ejercicio de rehabilitación, se le pidió al sujeto que seleccionara el marcador de color que llevaba en el pulgar. Luego, el sistema rastreó la posición actual del brazo e interactuó con objetos virtuales hasta el final del ejercicio, los movimientos son interpretados por señales EMG.	Fácil para el paciente, con datos para el terapeuta	Electrodos Cámara web PC
<b>Interfaz audiovisual virtual que involucran movimientos de muñeca, codo y hombro. Mide el rango, la velocidad y la suavidad de los movimientos</b>	Bajo	El sujeto se sienta frente a una mesa que sirve como plataforma para proyectar objetos virtuales sobre él. Los movimientos de la mano del sujeto son seguidos por una cámara, mientras él mira sobre la mesa e interactúa con los objetos virtuales superpuestos sobre ella.	Fácil para el paciente, con datos para el terapeuta	PC Cámara web Proyector
<b>Generar objetos virtuales en base a marcadores. Realizar movimientos y sonidos con los marcadores</b>	Bajo	El paciente observa objetos virtuales en un monitor que se crean en función de unos marcadores para que el paciente genera movimientos con los objetos y además escuche sonido de acuerdo con el objeto tomado.	Fácil para el paciente, con datos para el terapeuta	PC Cámara web Trípode Altavoz

Varias son las técnicas realidad aumentada que se puede aplicar en la rehabilitación de miembros superiores en este caso para la selección de la técnica a implementar en el sistema de rehabilitación se usó el método de criterios ponderados que permite la evaluación de las alternativas descritas y obtener una opción aceptable.

El análisis comparativo de los criterios prioritarios dentro del sistema de rehabilitación, ver tabla 3, permite una correcta selección de la técnica.

Tabla 3. Matriz de criterios y valoración

CRITERIO	PONDERACION
<b>Eficiencia</b>	Alta (3) - Medio (2) - Baja (1)
<b>Implementación</b>	Alta (3) - Medio (2) - Baja (1)
<b>Fiabilidad a cambios</b>	Alta (3) - Medio (2) - Baja (1)
<b>Interfaz</b>	Alta (3) - Medio (2) - Baja (1)
<b>Costos</b>	Baja (3) - Media (2) - Alta (1)

Todas las alternativas de las técnicas se evalúan según la valoración de los criterios, ver tabla 4, para indicar cual es la solución más aceptable.

Tabla 4. Evaluación de las técnicas de realidad aumentada

Técnica \ Criterio	Eficiencia	Implementación	Fiabilidad a cambios	Interfaz	Costos	
<b>Interfaz Háptica (Robot)</b>	3	2	2	2	3	<b>12</b>
<b>Rastreo de la posición y detección de marcadores</b>	3	2	3	3	3	<b>14</b>
<b>Sistema de comunicación sin marcadores</b>	3	2	3	3	2	<b>13</b>
<b>Realidad virtual para capturar imágenes</b>	3	2	3	3	1	<b>12</b>
<b>Detección de rostro y borde de imágenes</b>	2	1	3	3	1	<b>10</b>
<b>Visión por computadora para reconocer patrones de imágenes</b>	3	1	3	3	1	<b>11</b>

<b>Monitoreo y registro de los movimientos</b>	3	2	3	3	1	12
<b>Señales EMG</b>	3	3	3	2	1	12

Luego del análisis de los criterios de evaluación se considera utilizar la técnica de **realidad aumentada con detección de marcadores** que es la más aceptable comparado con otras técnicas implementadas.

### 2.1.1 Características de la realidad aumentada basado en marcadores

- Visión de objetos virtuales en el mundo real en tiempo real [31].
- Uso de marcadores o simples imágenes en 2D con dibujos sencillos y asimétricos, ver figura 13 [31].
- Bajo costo de implementación del sistema.
- Elimina la necesidad de adaptación informática de pacientes.
- Rehabilitación cognitiva, motora y motivacional para usuarios.
- Activa las funciones cognitivas como la concentración, memoria, atención, capacidad espacial.
- Los usuarios pueden trabajar desde casa, de forma virtual ya que no necesita de dispositivos especiales para cumplir con sus sesiones de entrenamiento.
- Fiable a cualquier cambio en su desarrollo para ser adaptable al usuario.

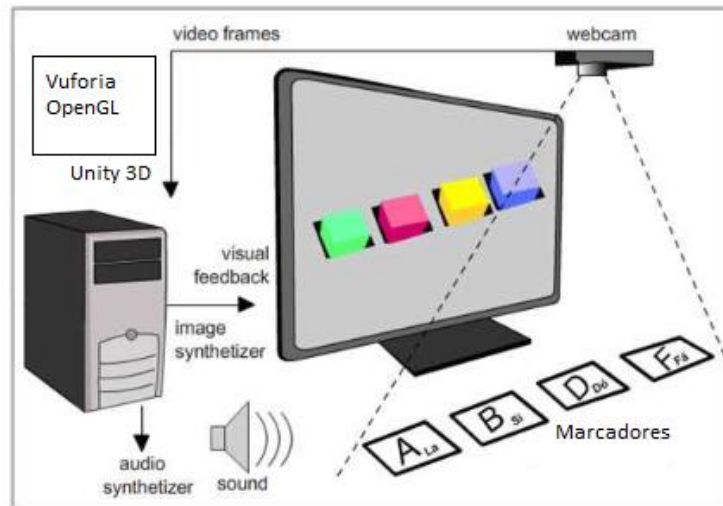


Figura 13. Técnica de realidad aumentada con marcadores [28]

## 2.2 Software de realidad aumentada

El software es uno de los elementos más importantes para el desarrollo de la aplicación, su complejidad permite implementar sistemas de realidad aumentada en diferentes áreas, entre esas: la rehabilitación. La mayor parte de estos sistemas se generan en un computador (hardware) y por tanto se debe tomar en cuenta las características que puede brindar el software escogido como la estabilidad, multiplataforma, accesibilidad al código, costo, experiencia del programador y un entorno amigable [32].

Un software multiplataforma permite desarrollar aplicaciones para dispositivos móviles, tabletas y para sistemas operativos como Windows, Linux, iOS, Mac y Android. Debido al complicado procesamiento de imágenes, es necesario considerar librerías libres o licencias gratuitas para un mejor desarrollo de la aplicación [32].

En la tabla 5 se encuentra la comparación entre diferentes softwares que se pueden utilizar para aplicaciones de realidad aumentada.

Tabla 5. Matriz de comparación para softwares de realidad aumentada

Software	Dispositivo	Requisitos	SO	Licencia	Cámara
<b>VUFORIA</b>	Móvil, iPad, iPhone	Requiere iOS 4.0 en adelante. Wifi + 3G Acelerómetro Android 6.0	Android	libre	Frontal de 2 megapíxeles y trasera de 8
<b>ARToolkit</b>	PC - Móvil	RAM 4 GB procesador i3 SO x64 Acelerómetro GPS	Windows, Linux, Mac, Android e iOS	libre	
<b>Metaio</b>	Pc, Móvil	RAM 1 GB Acelerómetro GPS	Android, iOS, Windows Pc, Unity	Libre con restricciones	
<b>Unity</b>	PC - Móvil	Acelerómetro, GPS, Windows 8, 10 x32 bit Tarjeta de video para DX10 Android 6.0	Microsoft windows, Mac OS, Linux		
<b>Wikitude</b>	Móvil	Android 6.0 y más, Acelerómetro, cámara incorporada, brújula, GPS	Android, iOS, BlackBerry	prueba	
<b>LayAR</b>	Móvil	Android 6.0 y más, Acelerómetro, cámara incorporada, brújula, GPS	iOS, Android, BlackBerry	comercial	
<b>CryENGINE</b>	PC, Play station, Xbox	Windows 7, Windows 8.1 (64-bit) Intel Dual-Core 2GHz o AMD Dual-Core 2GHz 4 GB de RAM NVIDIA GeForce 400 series o AMD Radeon HD 6000 series 8 GB de espacio disponible	Windows	gratis	
<b>Source ENGINE</b>	PC	Windows 7, Windows 8.1 (64-bit) Intel Dual-Core 2GHz o AMD Dual-Core 2GHz 4 GB de RAM NVIDIA GeForce 400 series o AMD Radeon HD 6000 series 8 GB de espacio disponible	Microsoft Windows (32 y 64 bits), Mac OS X, GNU/Linux	gratis	

<b>Unreal ENGINE</b>	PC, Móvil	Windows 7, Windows 8.1 (64-bit) Intel Dual-Core 2GHz o AMD Dual-Core 2GHz 4 GB de RAM NVIDIA GeForce 400 series o AMD Radeon HD 6000 series 8 GB de espacio disponible	Microsoft Windows, macOS, Linux, SteamOS, HTML5, Android	gratis	
----------------------	-----------	---	--	--------	--

El desarrollo de video juegos para ser aplicados al área de rehabilitación es una opción recomendada en los últimos años gracias a su versatilidad en la realidad aumentada, por ese motivo existe en el mercado varios motores gráficos para desarrollo de video juegos, como se analizó en la tabla 5.

A continuación, la tabla 6 se indican los criterios considerados para seleccionar el software más aceptable.

*Tabla 6. Matriz de criterios y valoración*

<b>CRITERIO</b>	<b>PONDERACION</b>
<b>Licencia</b>	Libre (1) – Pagada (0)
<b>Lenguaje</b>	C+, C++, C# (1) – Otro (0)
<b>Multiplataforma</b>	Si (1) - No (0)
<b>Animación y audio</b>	Bueno (1) - Regular (0)
<b>Interfaz de usuario</b>	Bueno (1) - Regular (0)

Con la valoración de los criterios se pasa a la evaluación de cada uno de los softwares antes mencionados, ver tabla 7, para tomar la opción más aceptable.

*Tabla 7. Matriz de evaluación de los softwares para realidad aumentada*

<b>Técnica</b> \ <b>Criterio</b>	<b>Licencia</b>	<b>Lenguaje</b>	<b>Multi-plataforma</b>	<b>Animación y audio</b>	<b>Interfaz de usuario</b>	
<b>ARToolkit</b>	1	1	1	1	0	<b>4</b>
<b>Metaio</b>	1	1	1	0	0	<b>3</b>
<b>Unity</b>	1	1	1	1	1	<b>5</b>
<b>Wikitude</b>	1	1	0	1	0	<b>3</b>
<b>LayAR</b>	0	1	1	1	0	<b>3</b>
<b>CryENGINE</b>	1	1	0	1	1	<b>4</b>

Source Engine	0	0	1	1	1	3
Unreal Engine	1	1	1	1	1	5

Una vez realizado el análisis del software de acuerdo con los criterios más relevantes, se decide trabajar en el motor gráfico Unity, figura 14.

### 2.2.1 Características de Unity

- Motor gráfico multiplataforma (Mac, Linux, Windows, iOS, Android) [27].
- Lenguaje de programación C# [27].
- Uso en aplicaciones de ingeniería y medicina [27].
- Amplia tienda Assets (imágenes 2D/3D, animaciones, escenarios) [27].
- Variedad de lenguajes de programación (scripts) [27].
- Alta exigencia de rendimiento del ordenador [27].
- Renderización en tiempo real [27].
- Variedad de elementos para interfaz gráfica [27].
- Aplicación personalizada a través de secuencias de comandos [27].
- Permite desarrollar juegos 2D y 3D [27].

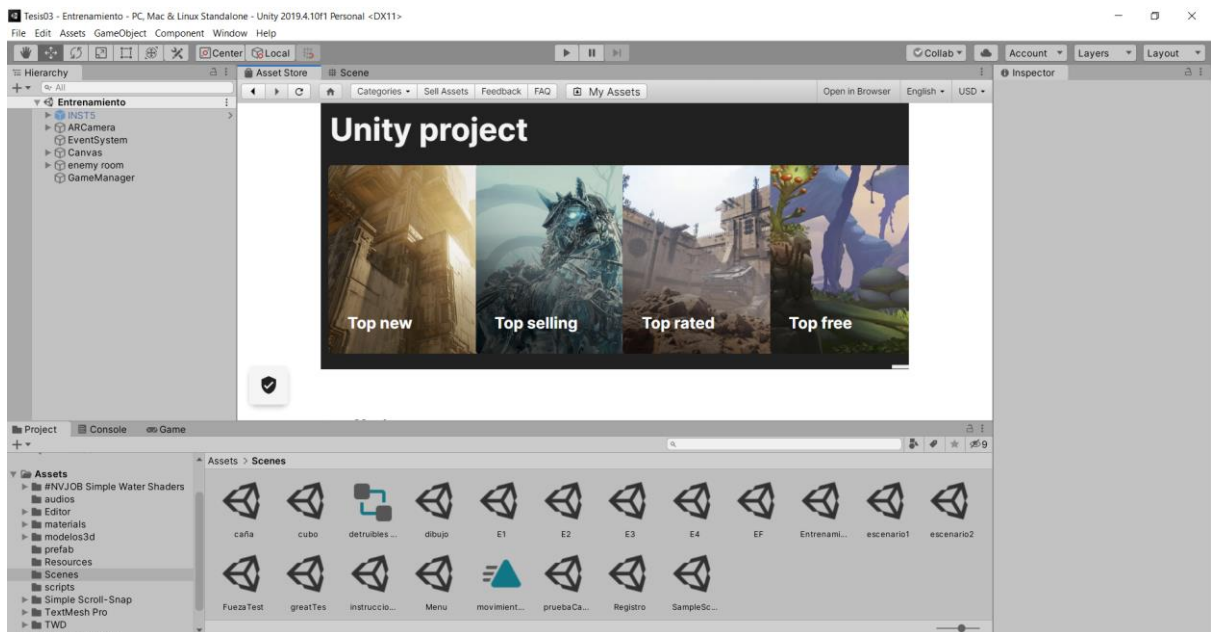


Figura 14. Motor gráfico Unity

## 2.3 Dispositivos implementados en la realidad aumentada



Los instrumentos o dispositivos necesarios para implementar en el sistema de realidad aumentada varían de acuerdo con la técnica y software que se utilicen en el desarrollo de dicho sistema. Los dispositivos permiten que la aplicación sea más fácil, intuitivo, natural, factible y seguro para el usuario.

En la tabla 8, se ve una matriz de comparación de los dispositivos que más se utilizan en el campo de la realidad aumentada de acuerdo con la forma de implementarse y a los costos que representa utilizarlos.

*Tabla 8. Matriz de comparación de dispositivos para realidad aumentada*

<b>Dispositivos</b>	<b>Función</b>	<b>Costo</b>
<b>Marcadores</b>	Imágenes 2D generalmente en blanco y negro. Sirven como objetos reales para ser captadas por una cámara y luego crear un objeto virtual según el marcador renderizado.	Cartulinas impresas 10 ctvs. c/u
<b>Lentes Oculus Rift</b>	Permite visualizar entornos virtuales a través de sus lentes.	Desde \$40 hasta \$300
<b>Háptico</b>	Proporcionan realimentación de fuerza al interactuar con entornos virtuales.	\$150
<b>Kit Electrodo EMG</b>	Transmisión de señales de los nervios hacia los músculos para traducir estas señales en gráficos, sonidos o valores numéricos que después interpreta un especialista.	\$5
<b>Kinect</b>	Capaz de capturar el esqueleto humano, reconocerlo y posicionarlo en el plano y reproducirlo en una pantalla.	\$150
<b>Cámara web</b>	Capta imágenes o movimientos.	\$20 - \$80
<b>Sistema Wii</b>	Dispositivo de mano con el que se puede apuntar, además de poder detectar movimientos en un plano tridimensional.	\$120
<b>Cámara web Genius WideCam F100</b>	Trabaja con el plug-in de ARToolkit para Unity3D	\$100

<b>Computador</b>	Para implementar los entornos de realidad aumentada. Como principal característica debe tener una RAM de 4 gb, buena tarjeta de video y espacio en el disco.	Desde Core i3 \$500
<b>Móvil</b>	Cámara de 8 megapíxeles. Últimas versiones de SO. Preferencias tablets, iphone.	\$400
<b>Vr Box Lentes Realidad Virtual</b>	Lentes para observar entornos virtuales de baja de resolución.	\$20

Para determinar el o los dispositivos a utilizar en el desarrollo del sistema de rehabilitación, se va a realizar el análisis con los criterios más importantes en la tabla 9.

*Tabla 9. Matriz de criterios y valoración*

<b>CRITERIO</b>	<b>PONDERACION</b>
<b>Costo</b>	Bajo (1) - Alto (0)
<b>Implementación</b>	Alta (1) - Baja (0)
<b>Disponibilidad</b>	Alta (1) - Baja (0)

Una vez ponderado los criterios, se puede evaluar los diferentes dispositivos, ver tabla 10, utilizados en aplicaciones de realidad aumentada.

*Tabla 10. Matriz de evaluación de dispositivos de realidad aumentada*

<b>Dispositivos \ Criterio</b>	<b>Optimización de recursos</b>	<b>Implementación</b>	<b>Disponibilidad en el mercado</b>	
<b>Marcadores</b>	1	1	1	<b>3</b>
<b>Lentes Oculus Rift</b>	0	1	0	<b>1</b>
<b>Háptico</b>	0	1	0	<b>1</b>
<b>Electrodos EMG</b>	1	1	1	<b>3</b>
<b>Kinect</b>	0	1	1	<b>2</b>
<b>Cámara web</b>	1	1	1	<b>3</b>
<b>Sistema Wii</b>	0	1	1	<b>2</b>
<b>Cámara web Genius WideCam F100</b>	1	1	1	<b>3</b>
<b>Computador</b>	1	1	1	<b>3</b>
<b>Móvil</b>	1	1	1	<b>3</b>

Con la evaluación de los dispositivos se realiza un análisis para escoger los más aceptables, para este caso se va a trabajar con marcadores, cámara web, computador y un dispositivo móvil.

## 2.4 Ejercicios para el entrenamiento y control motor

El entrenamiento se basa en la deficiencia en el control del miembro superior, por lo cual los movimientos se enfocan en la articulación del hombro, ver tabla 11, y en la articulación del codo, ver tabla 12. La selección de estos movimientos es por la importancia de tener un buen control en estas articulaciones para que la rehabilitación ayude al miembro superior.

*Tabla 11. Movimientos del brazo en la articulación glenohumeral (hombro)*

Movimiento	Músculo actuador
Flexión	Bíceps
Extensión	Tríceps

*Tabla 12. Movimientos del brazo en la articulación del codo*

Movimiento	Músculo actuador
Flexión	Deltoides fibras anteriores
Extensión	Deltoides fibras posteriores

### 2.4.1 Características de los ejercicios

Se deben considerar las actividades que el profesional en rehabilitación utiliza para guiar el proceso de rehabilitación tomando en cuenta las necesidades del paciente en cuatro aspectos: físico, psicológico, social y económico [33]. La rutina de ejercicios fortalece los músculos para mejorar los movimientos, el control y la fuerza del brazo; para eso se toma en cuenta las siguientes características para realizar los ejercicios de rehabilitación [34]:

- Mover los músculos principales del brazo, de ser posible todo.
- Recuperar la flexibilidad
- Repetitividad en los ejercicios
- Mejorar la interacción y motivación de los ejercicios
- Mejorar la fuerza de los músculos
- Progresión en los ejercicios
- Pesos libres y livianos
- La flexión y extensión de los músculos del brazo

## 2.5 Diseño de entornos de realidad aumentada

Para realizar los ejercicios de rehabilitación considerados antes y satisfacer sus características se desarrollaron videojuegos de realidad aumentada en la plataforma Unity para cumplir con el principal objetivo de la aplicación, la de mejorar el control motor del miembro superior.

La interfaz de Unity es muy amigable para el desarrollador y está compuesta de varias ventanas con pestañas que pueden agruparse al gusto del usuario para tener facilidad al momento del desarrollo. En la figura 15 se puede observar las ventanas más comunes de Unity, como la ventana de jerarquía, la ventana del inspector, la ventana del proyecto, la vista de escena y la barra de herramientas.

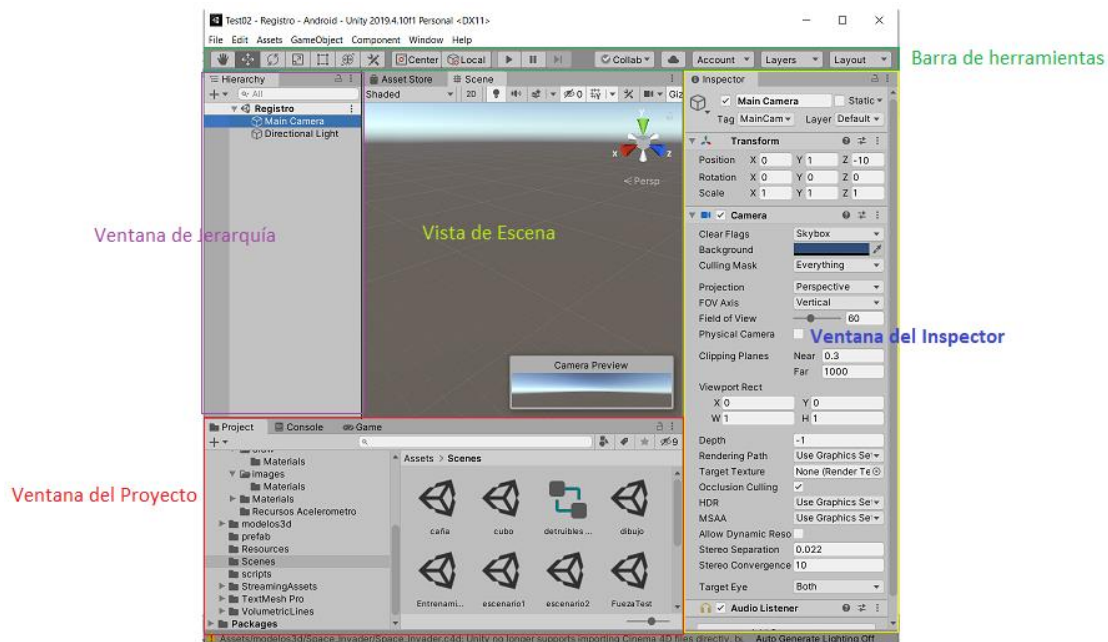


Figura 15. Interfaz del software Unity

Unity es una plataforma para desarrollar aplicaciones 3D en tiempo real, además de contar con el proceso de renderizado y por eso es utilizado para realizar pequeños juegos móviles para web, hasta incluso juegos de gran nivel implementando realidad aumentada y virtual. La flexibilidad del motor de juegos crea tareas simples en 2D hasta complejos juegos en 3D, también, permite la creación rápida de entornos virtuales simulados [35].

- **Ventana del proyecto**

En este espacio están los *assets* del proyecto, que son las escenas, *prefabs*, imágenes, modelos 3D, recursos, materiales y *scripts* utilizados. Los elementos mencionados pueden estar guardados en carpetas para tener orden en el desarrollo.

- **Ventana de jerarquía**

Contiene a los *GameObjects* de la escena que se haya seleccionado en la ventana del proyecto, aquí igualmente se estructura el orden de los *GameObjects* para conocer su jerarquía, es decir, si es padre o hijo, que no es otra cosa que un objeto hereda los movimientos y rotación del otro para una evitar más códigos de programación.

- **Ventana del Inspector**

En este espacio se puede observar y editar las propiedades de cada *GameObject* que se haya seleccionado. Los objetos, *scripts* o escenas tienen diferentes parámetros, por tanto, el diseño de la ventana del inspector va a cambiar.

- **Vista de escena**

Aquí se puede visualizar, seleccionar, navegar y posicionar los entornos, el jugador, la cámara y en general los *GameObjects*. En esta ventana se muestran las escenas que se están desarrollando en una perspectiva 2D o 3D.

- **Barra de herramientas**

Permite acceder a las herramientas más relevantes para trabajar, como mover objetos, dimensionarlos y rotarlos dentro de la escena. Aquí se puede reproducir, pausar y detener la escena desarrollada.

### **2.5.1 Desarrollo del Videojuego**

Se puede definir a un videojuego como un conjunto de contenidos digitales plasmados en una sola aplicación que se ven reflejadas en una pantalla o dispositivo, que intenta generar una interacción del usuario con el sistema del juego. Los componentes básicos que se consideran para el desarrollo del juego son:

- **Programa principal:** incluye la escena del juego, instrucciones y reglas del juego.

- **Motor de renderizado:** muestra los elementos de la interfaz estáticos y aquellos en movimiento. Permite observar el juego y probarlo en tiempo real.
- **Gestor de sonidos:** reproduce y modifica los archivos de audio del sistema.
- **Motor de físicas:** cumple la función de simular las colisiones entre elementos dentro del videojuego.

### 2.5.1.1 Características del videojuego

El objetivo es desarrollar videojuegos (escenarios) para la rehabilitación de pacientes con deficiencia en el control motor del brazo, para lo cual se consideró varios aspectos:

- Juegos interactivos que llamen la atención del usuario.
- Objetos virtuales que sean llamativos al visualizar en la pantalla.
- Los sonidos generados en los videojuegos deben estar acorde a la manipulación de los objetos.
- Los objetos virtuales (aumentados) generados por los objetos reales deben permitir al paciente involucrarse con el videojuego.
- Los videojuegos no tendrán una misión específica o un tiempo límite para terminarlo, para que el paciente no tenga presión al interactuar con la interfaz.
- Al terminar con el objetivo de cada videojuego tendrán un mensaje de ganador que ayude a motivar al paciente a continuar con el entrenamiento.
- Cada videojuego se basará en los tipos de movimientos que se quiere rehabilitar.
- Al cumplir la misión que tenga en cada videojuego, él fisioterapeuta tendrá la libertad de escoger si desea reiniciar o a su vez salir y continuar con la rehabilitación según su criterio profesional.
- Como se definió una rutina de ejercicios para la rehabilitación, se realizarán varios videojuegos que tendrán un escenario individual.
- Se desarrollará cuatro escenarios para que el paciente tenga mayor motivación en la rehabilitación.
- La aplicación se la puede utilizar en la Pc o un teléfono móvil.

## 2.6 Diseño de los escenarios para los entornos de realidad aumentada

Luego de la introducción al editor de Unity y los elementos que componen su interfaz, la introducción rápida de las características de los videojuegos se pasa al desarrollo de los

escenarios considerando el entrenamiento funcional del miembro superior y las sugerencias del fisioterapeuta.

Todos los escenarios van a tener un juego de realidad aumentada y para poder hacer estas aplicaciones necesitamos de un *SDK* que permita mezclar imágenes del mundo real con objetos virtuales para ser visualizados en la pantalla de la Pc o del móvil y por lo tanto vamos a utilizar “Vuforia”.

## Vuforia

Vuforia Engine es una plataforma para el desarrollo de realidad aumentada, ver figura 16; se puede utilizar en móviles, Pc, tabletas o gafas de RA. Es un kit de desarrollo de software (SDK) que se agrega fácilmente a cualquier proyecto dentro de Unity, los programadores utilizan estas funciones avanzadas para aplicaciones de visión por computadora que permite reconocer imágenes (*targets*) e interactuar con el mundo real. Finalmente, cuando importemos y configuramos Vuforia a los proyectos de Unity podremos crear entornos de realidad aumentada [36].

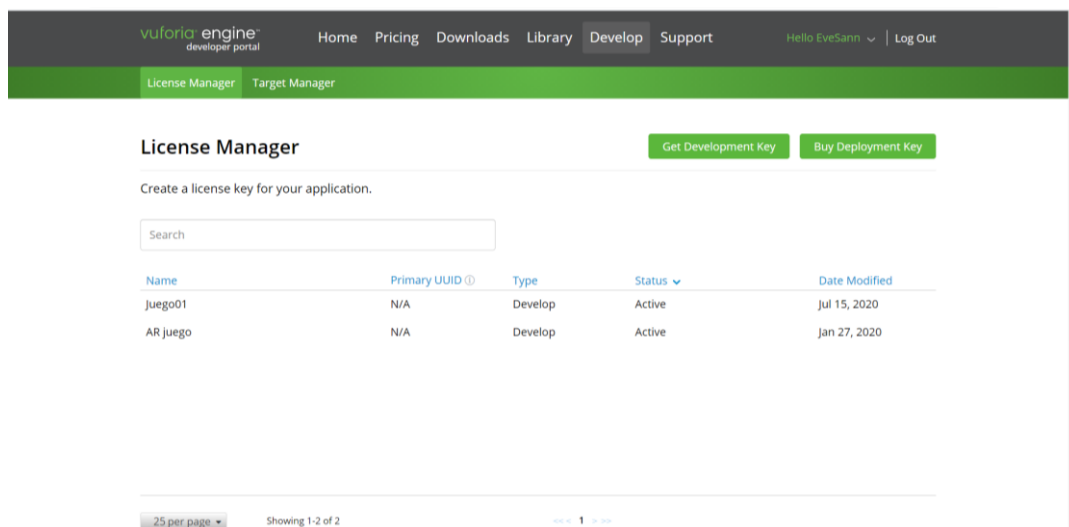


Figura 16. Plataforma de desarrollo Vuforia

Para iniciar se registra una cuenta en la plataforma de Vuforia Engine para crear una “*License Key*”, ver figura 18; que permite incorporar una cámara de realidad aumentada (*ARCamera*) en los proyectos de Unity. También, se debe generar un “*Target Manager*”, ver figura 19; que se

utilizará como “Marcador” y este permitirá que la cámara reconozca y renderice generando los objetos 3D en el proyecto de Unity.

En la figura 17 se observan las imágenes escogidas como *targets* porque tienen varios bordes y formas para que sean más fácilmente reconocidas por la cámara y renderizarlas.

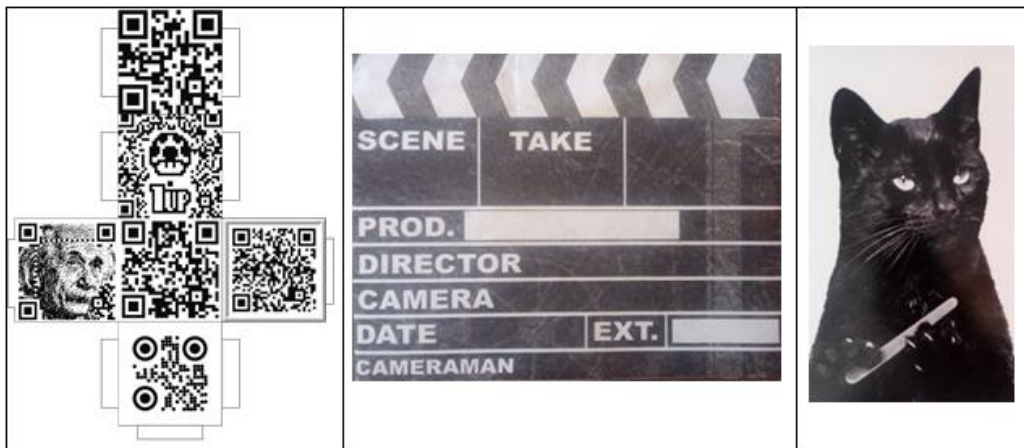


Figura 17. Marcadores físicos (Imagen Target)

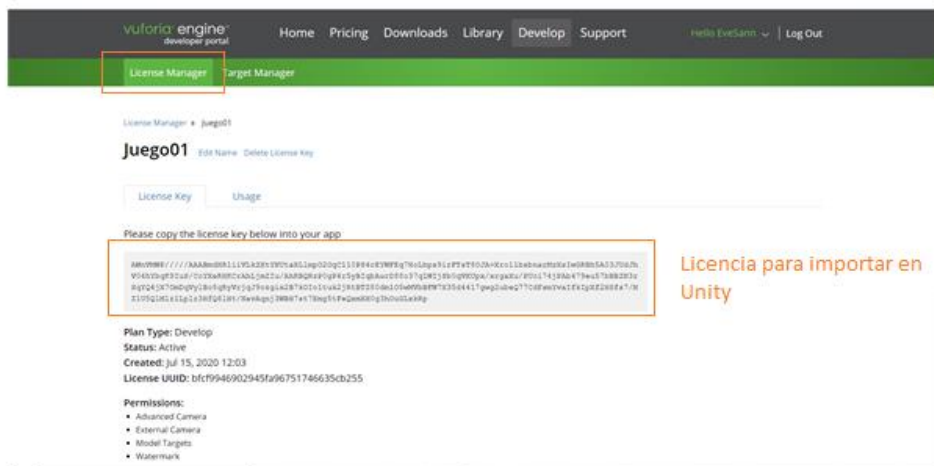


Figura 18. Licencia creada en Vuforia



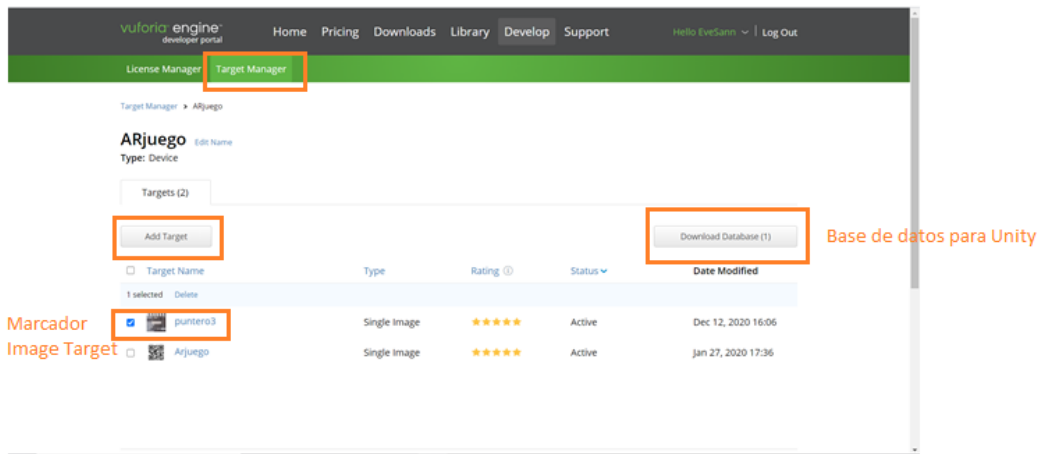


Figura 19. Image Target creada en Vuforia

Para continuar se exporta el *Database*, la *License Key* y el *SDK* de Vuforia al editor de Unity para crear las escenas de realidad aumentada, ver figura 19.

Para generar una escena de realidad aumentada se utiliza la *ARCamera*, que tiene la función de crear los objetos tridimensionales a partir del reconocimiento de los *Targets*, estos elementos se pueden encontrar en la ventana de Jerarquía de Unity, como se observa en la figura 20.

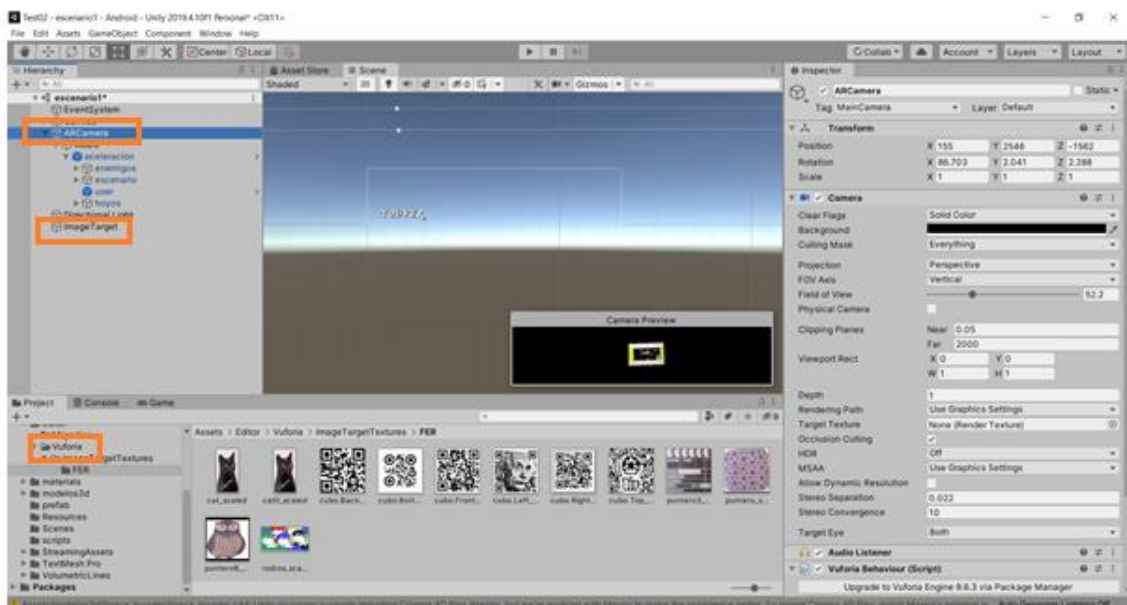


Figura 20. Importar los elementos de Vuforia a Unity

Por último, se debe modificar el Script del *Image Target* que viene por defecto y se encuentra en la ventana del Inspector para seleccionar la imagen y la base de datos va a estar adjunto al *Target*, figura 21.

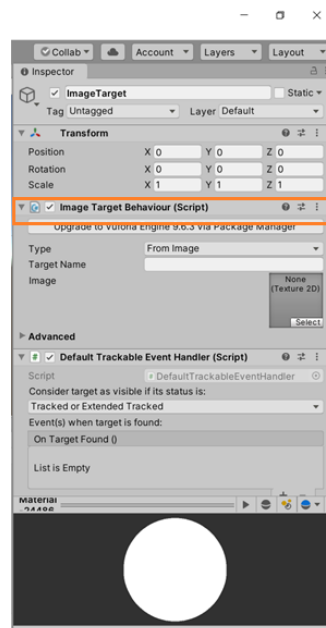


Figura 21. Script del Image Target

## Script

Un script es una hoja o fichero de texto en el cual se puede escribir las ordenes o procesos que debe realizar algún objeto, se utiliza un lenguaje de programación que Unity soporta y que se ejecute según las configuraciones insertadas. Para este proyecto utilizamos el lenguaje de programación *C#* enfocado en el entorno de desarrollo *Visual Studio*, figura 22.

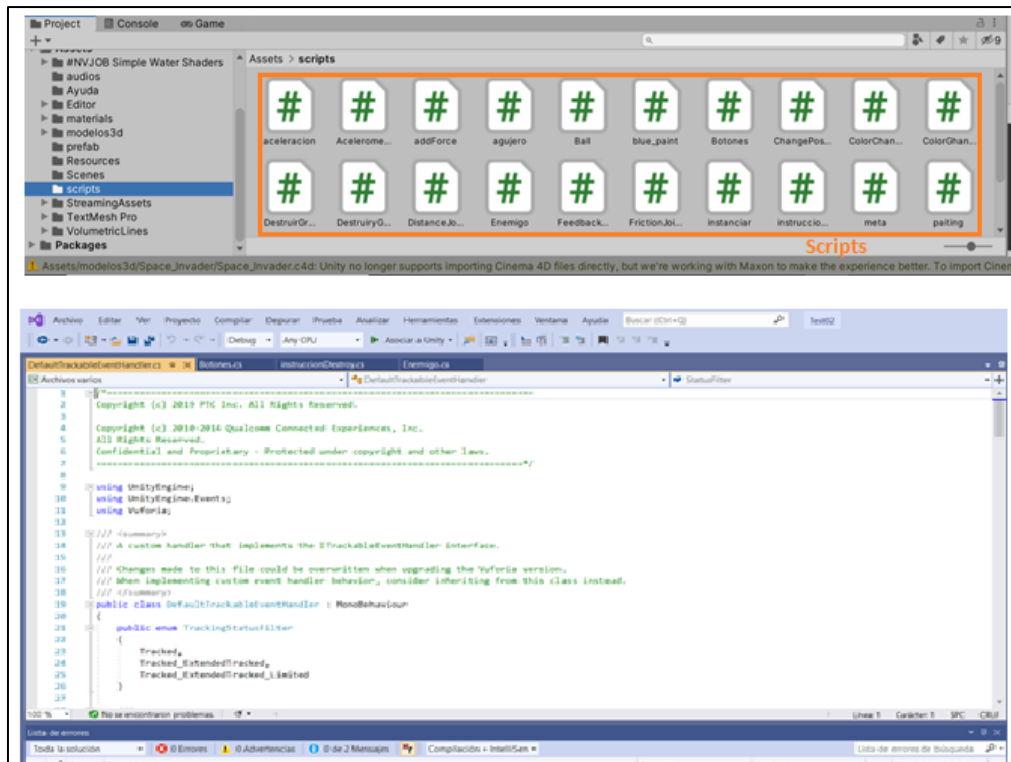


Figura 22. Scripts en Unity y Visual Studio

Una vez finalizado la instalación del SDK de Vuforia y sus respectivas configuraciones dentro del editor de Unity, al igual que la modificación de sus scripts se comienza con la creación de los entornos o escenarios en la plataforma de Unity.

Todos los videojuegos tienen la misma construcción o forma de desarrollo, es decir, los comandos, *prefabs*, escenas, *packages* y *scripts* se relacionan entre los diferentes videojuegos que se van a diseñar, por lo cual, se va a explicar el procedimiento de desarrollo de uno de ellos.

### 3 CAPÍTULO: RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se va a describir el desarrollo de la aplicación, la construcción de los diferentes escenarios del videojuego y los diferentes *prefabs* que completan la interfaz de la aplicación.

#### 3.1 Escenas de los videojuegos

Todas las escenas constan de algunos objetos y botones comunes que son parte del videojuego. Además, de ser necesarias porque complementan las escenas para iniciar, cerrar, regresar o reiniciar. En la figura 23; se muestra las partes generales o principales que tienen todas las escenas.

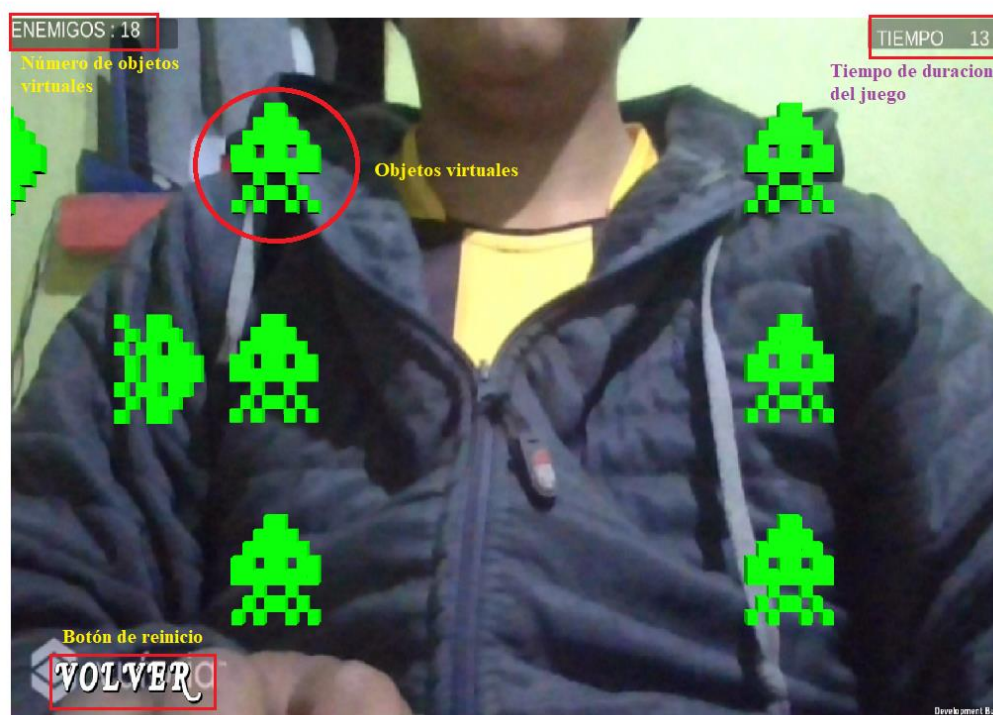


Figura 23. Partes principales en la escena

##### 3.1.1 Desarrollo del videojuego “Entrenamiento”

En este videojuego, ver figura 24; se pretende trabajar con las articulaciones del codo para rehabilitar el brazo con los movimientos de flexión y extensión empleando el uso de un marcador “*Target*” real, no existe tiempo limitado o número de repeticiones, aunque hay un

tiempo de duración del juego para verificar cuanto tarda en finalizar con el juego mencionado. Se trata de un entrenamiento para personas con deficiencia en el miembro superior y que tratan de recuperar sus movimientos sin presión al momento de realizarlos.

Como el proyecto trata de la realidad aumentada, no es necesario crear un ambiente, lo primero es crear el objeto virtual que va a aparecer en el escenario al momento que la cámara capte la imagen o *Target* físico que el paciente tenga en la mano. Una vez generado el objeto virtual, bastará con que el paciente mueva el *Target* (siempre y cuando no salga del rango de visibilidad de la cámara) para que el objeto virtual se mueva al mismo tiempo en el escenario, esto se observa a través de la pantalla o monitor del dispositivo utilizado para la aplicación.

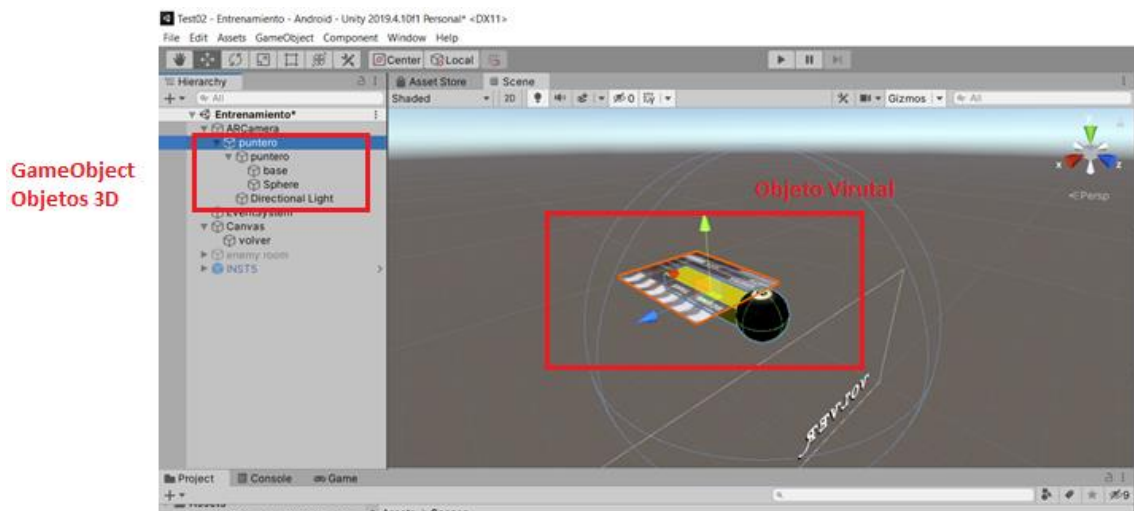


Figura 24. Creación del objeto virtual que se genera con el *Target* real

Ahora, se crean los objetos virtuales que van a aparecer automáticamente en el videojuego, figura 25; a estos objetos se los puede destruir al momento que sean tocados por el objeto virtual generado con el *Target*, se realizaran los movimientos del *Target* por parte de los pacientes generando la flexión y extensión del codo.

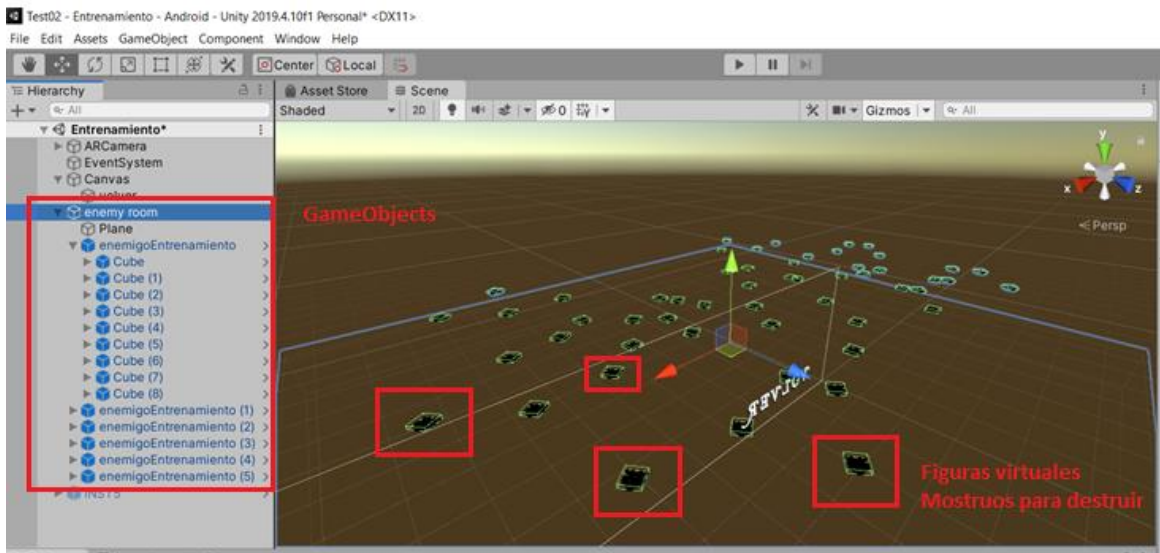


Figura 25. Creación de los objetos virtuales a destruir

Para salir del juego o regresar al menú principal se agrega un botón a la escena para realizar el cambio de escenas, ver figura 26.

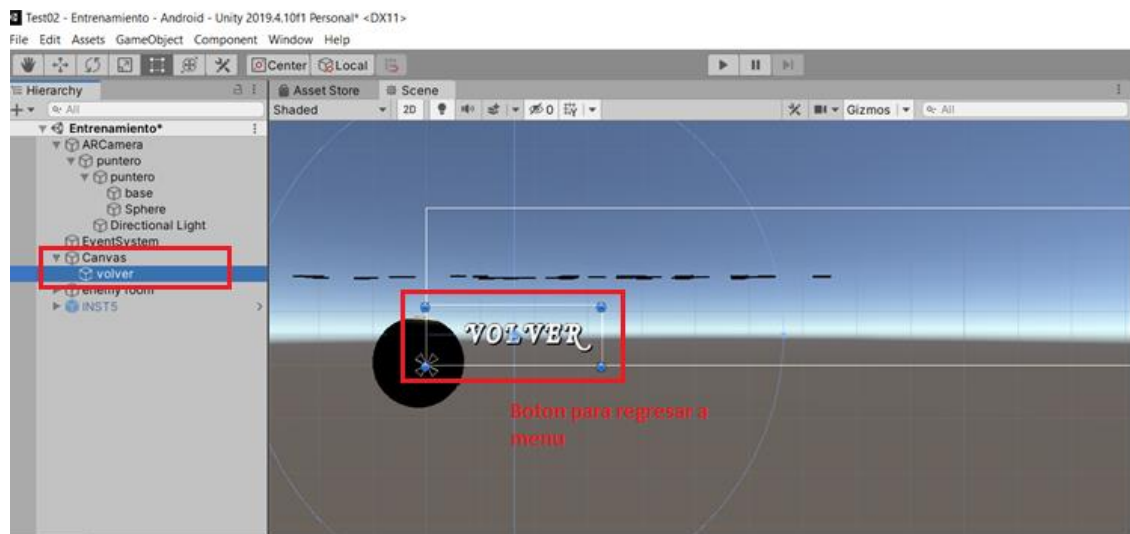


Figura 26. Botón para cambio de escena

En el juego “entrenamiento” se creó un objeto virtual principal que tiene una base rectangular de color amarillo con una punta esférica de color negro, también están objetos virtuales 3D pequeños en forma de monstruos. Se tiene que tocar con el objeto virtual principal (generado por el *Target*) a los pequeños monstruos que aparecen en la escena para ser destruidos al momento del contacto, figura 27.

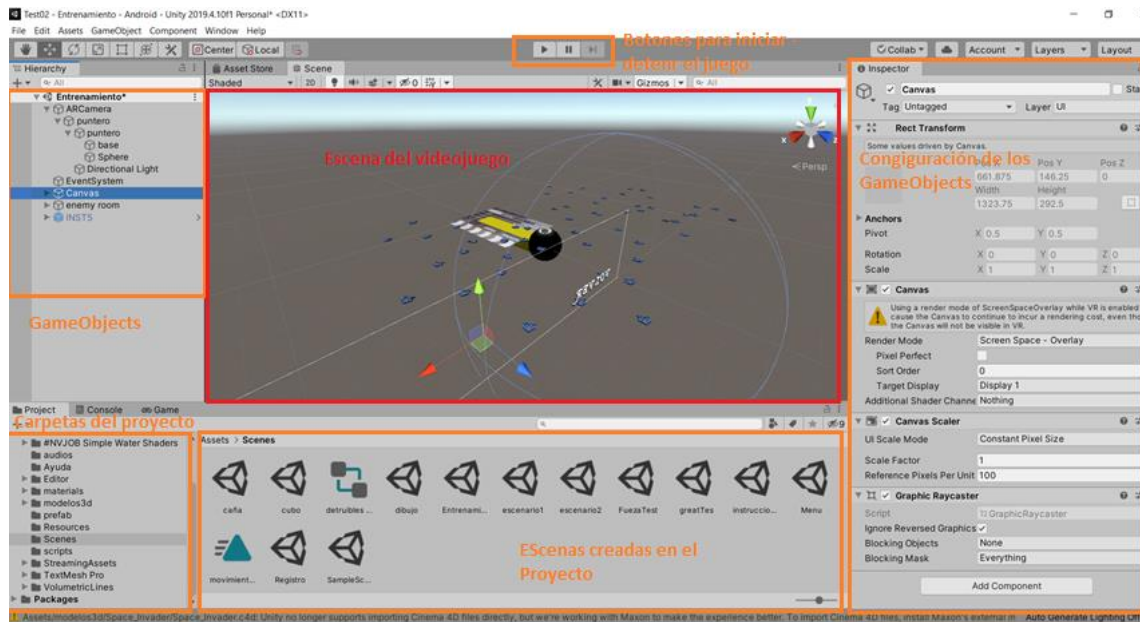


Figura 27. Resultado final del diseño del videojuego "Entrenamiento"

Los movimientos del *Target* realizados por el paciente a lo largo de la escena que se observa en la pantalla del dispositivo permiten la flexión y extensión del codo para tocar los objetivos y eliminar a todos los objetos enemigos de la escena para finalizar con el videojuego, figura 28.

El fisioterapeuta podrá verificar si los movimientos del paciente están acorde al entrenamiento funcional indicado, el profesional podrá pedir repetir el videojuego para observar la coordinación de los movimientos y verificar el tiempo que tarda el paciente en finalizar con el videojuego.

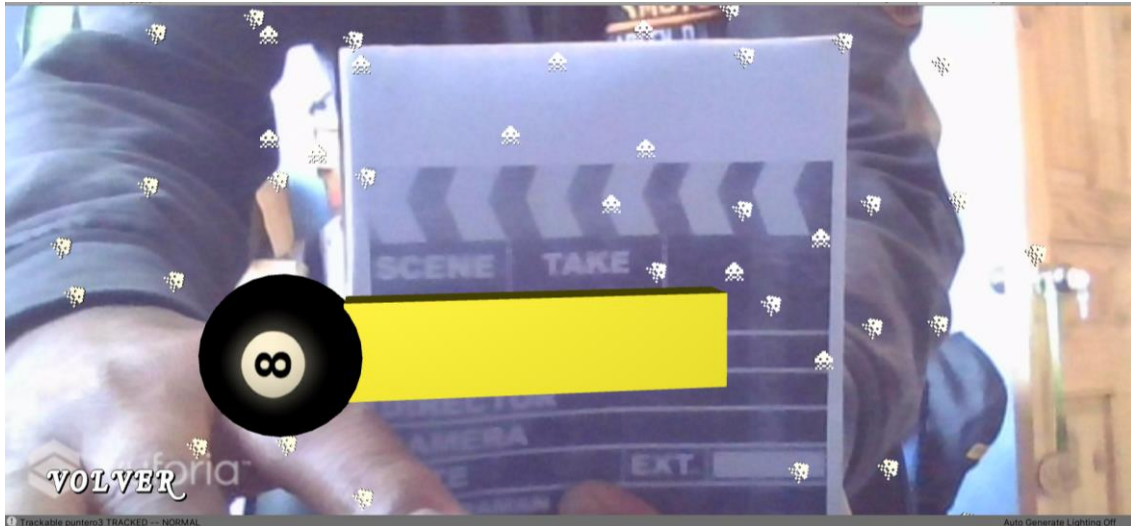


Figura 28. Videojuego "Entrenamiento". Movimientos flexión - extensión del codo

### 3.1.2 Desarrollo del videojuego "Escenario 1"

Este videojuego, ver figura 29; se diseñó con el objetivo de entrenar al mismo tiempo los dos miembros superiores y fortalecerlos, los movimientos realizados son la rotación medial y rotación lateral en el hombro y la flexión y extensión del codo.

En el escenario aparece un conjunto de elementos haciendo la función de obstáculos, en el centro aparece una esfera de color azul (objeto principal) el cual debe llegar al cuadro de "Meta". Los movimientos de la esfera azul se los realiza con el *Target* físico que genera un timón de barco el cual indica las direcciones a realizar para cumplir el objetivo de llevar la esfera azul al cuadro de meta esquivando los obstáculos.



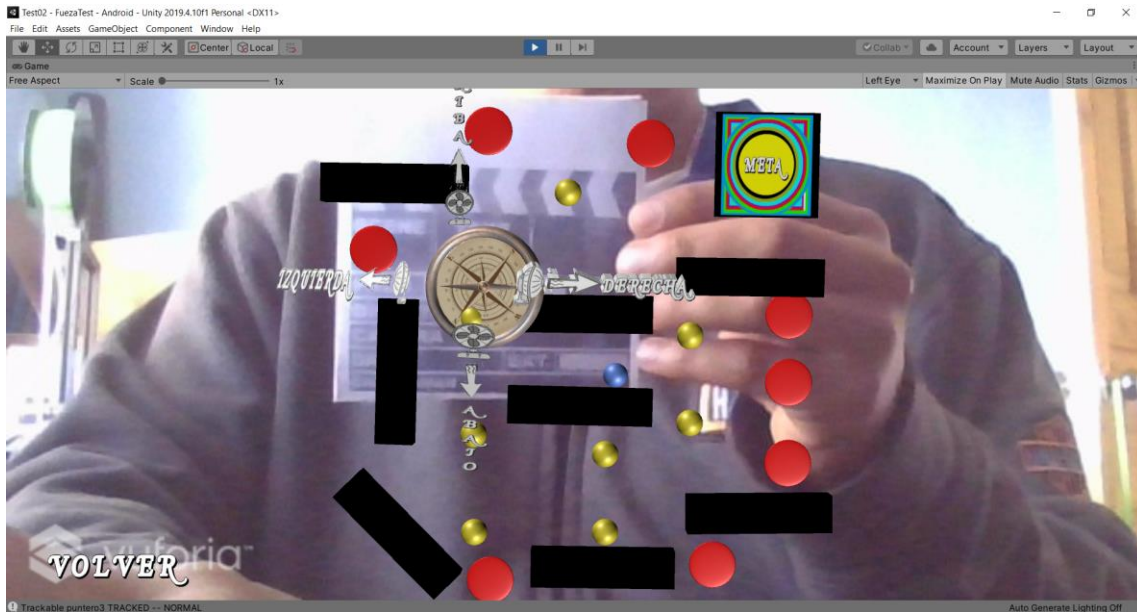


Figura 29. Videojuego "Escenario 1". Movimientos flexión – extensión del hombro y codo

### 3.1.3 Desarrollo del videojuego “Escenario 2”

El videojuego, ver figura 30; permite el trabajo de la articulación del codo y del hombro para entrenar al brazo derecho o izquierdo según la deficiencia del paciente, los movimientos que se quieren activar son la flexión y extensión en ambas articulaciones. El paciente va a tomar un marcador o *Target* físico y enfocarlo en la cámara del dispositivo para generar un objeto virtual que para este escenario es una espada de luz. El objetivo del juego es mover la espada de derecha a izquierda y viceversa, de arriba hacia abajo y viceversa y de adentro hacia afuera para tocar los otros elementos virtuales (monstruos extraterrestres) que aparecen en el escenario, una vez que hay contacto de la espada de luz y los monstruos se eliminan o desaparecen.

El juego trata de mejorar los movimientos del brazo a través del entrenamiento funcional del hombro y el codo.

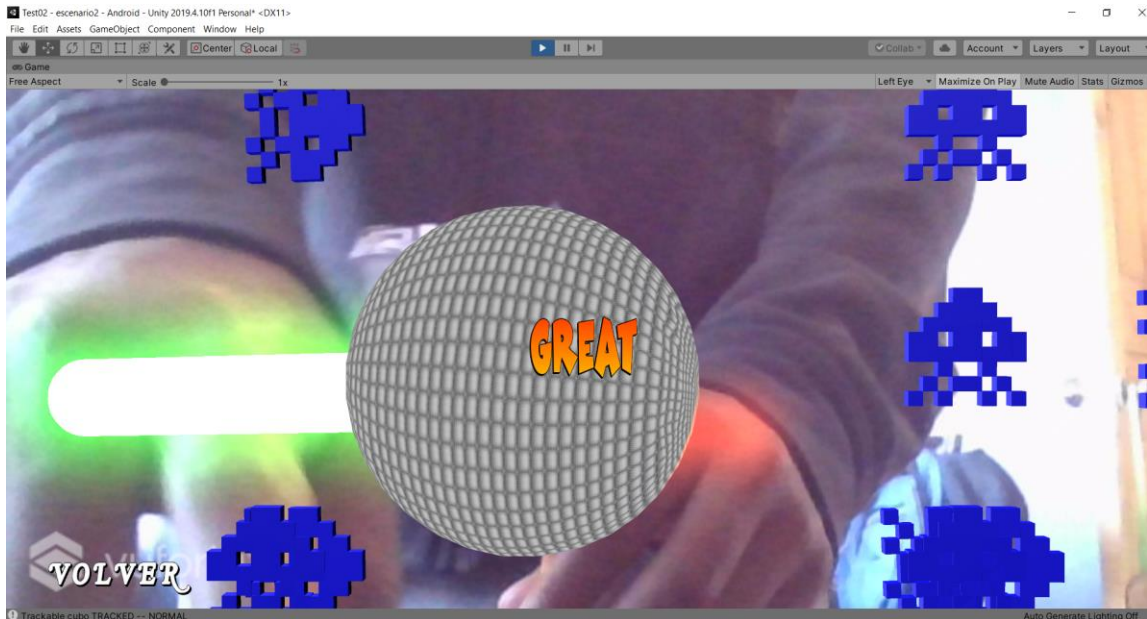


Figura 30. Videojuego “Escenario 2”. Movimientos flexión - extensión del hombro y codo

### 3.1.4 Desarrollo del videojuego “Escenario 3”

Para el diseño de este videojuego, ver figura 31; se utilizó un *MultiTarget* es decir utilizamos dos *Targets* en la misma escena para generar los objetos virtuales. Con el primer *Target* aparece una pequeña piscina con peces y con el segundo *Target* aparece una caña de pescar, el *Target* que genera la piscina se mantendrá inmóvil y en una posición adecuada para que la cámara no pierda de vista, el objetivo del juego es atrapar a los peces que está en la piscina con la punta de la caña de pescar. Los movimientos logrados en este videojuego son de flexión y extensión del codo para continuar con el entrenamiento del miembro superior.

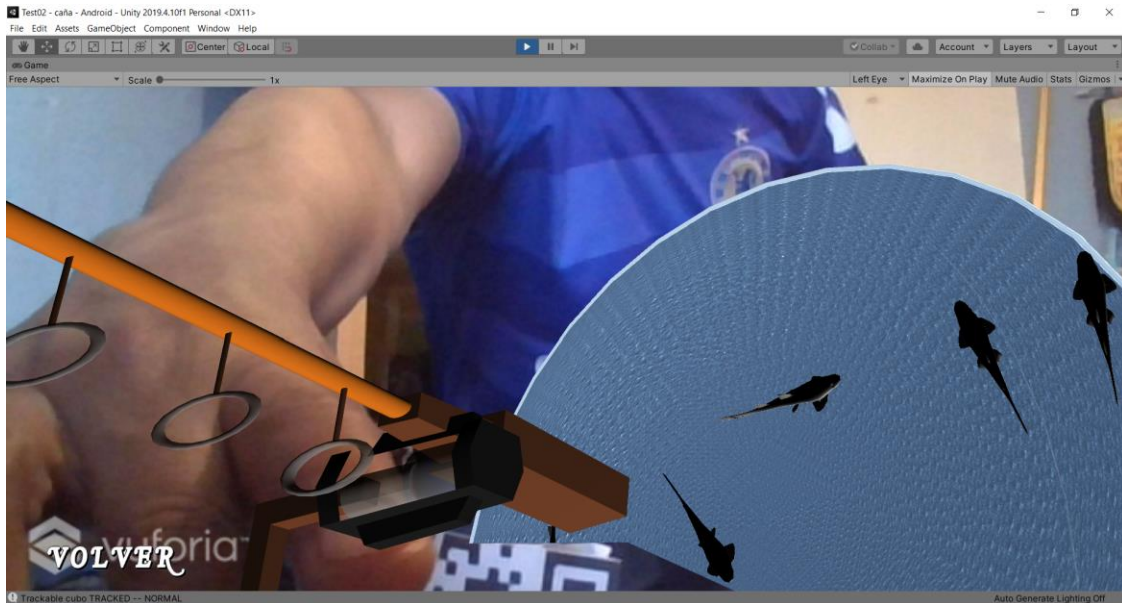


Figura 31. Videojuego "Escenario 3". Movimiento flexión – extensión del codo

Los códigos de programación para cada videojuego se encuentran en una carpeta de *Scripts*, ver figura 22; dentro del proyecto del software Unity.

Una vez terminado de diseñar las escenas (videojuegos) de realidad aumentada, el siguiente paso es unir las cuatro escenas en un solo proyecto para los cual se diseñará un menú principal para que el fisioterapeuta seleccione el entrenamiento indicado para el paciente.

### 3.2 Diseño de una interfaz para el fisioterapeuta

El profesional de fisioterapia requiere tener un menú principal con el cual interactuar para generar datos del entrenamiento, visualizar los juegos y navegar dentro de la aplicación de los entornos de realidad aumentada; para eso, es necesario la creación de una Interfaz humano-máquina que permita manipular los diferentes escenarios de juegos fácilmente.

En la primera interfaz (escena) contiene la información del proyecto, las imágenes representativas de la Universidad, la carrera y también está el botón de inicio del video juego, ver figura 32; así se iniciará la rehabilitación.



Figura 32. Ventana de inicio de la aplicación

Continuamos con el desarrollo de la interfaz creando la siguiente escena del Menú principal en el cual se observa los cuatro escenarios (videojuegos) desarrollados para la rehabilitación, “Entrenamiento, Escenario 1, Escenario 2 y Escenario 3”, ver figura 33; al presionar en cualquiera de los escenarios permite ingresar al videojuego de realidad aumentada que contiene su respectiva modalidad de rehabilitación, como se indicó en el apartado 3.1.

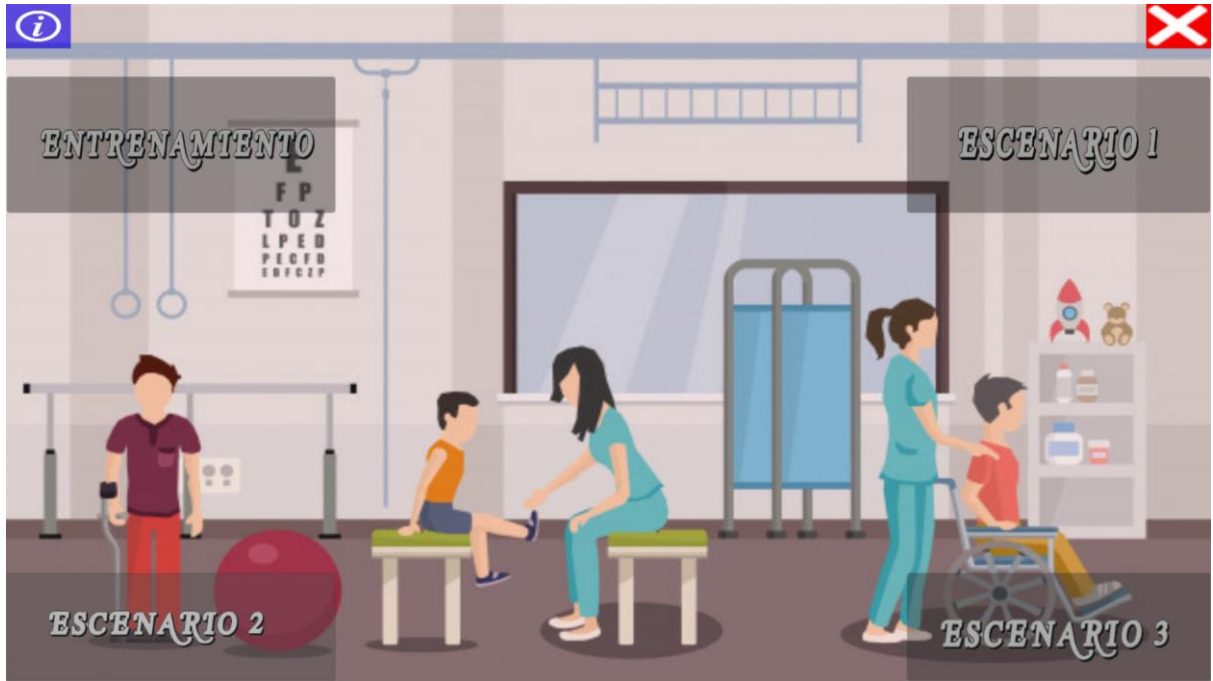


Figura 33. Ventana principal para ingreso a los videojuegos de realidad aumentada

### 3.3 Pruebas de los entornos de realidad aumentada

Concluido el desarrollo de las interfaces de los videojuegos y del fisioterapeuta se hace las pruebas con los pacientes del Centro de Rehabilitación Imbabura bajo la supervisión de la Msc. Paulina Garrido. La paciente que realizo pruebas de la interfaz requiere un entrenamiento funcional de las extremidades superiores para mejorar la capacidad neural por medio del movimiento motriz, ver figura 34; con la ayuda de los *targets* físicos la paciente manipula el videojuego de realidad aumentada reflejada en el monitor del computador que se utilizó para este caso.



**Monitor:** se observa la imagen de realidad aumentada





**Target:** elemento físico manipulado por el paciente

*Figura 34. Paciente usando la aplicación*

El empleo de esta técnica de rehabilitación para el movimiento motriz no solo permite la flexión o extensión de los miembros superiores ya que permite la coordinación del cerebro y la respuesta de los miembros superiores lo que permite ejercer una neurorrehabilitación, concepto expuesto en el capítulo 1.



*Figura 35. Flexión del codo con la manipulación del marcador*

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- El proyecto creado en la plataforma Unity permitió enlazar el mundo virtual con el mundo físico para que el paciente tenga una nueva forma de realizar su rehabilitación, debido al papel importante de los proyectos con realidad aumentada en el entrenamiento funcional de miembros superiores.

- En la actualidad el uso de la tecnología de Unity permite desarrollar escenas con elementos aumentados evidenciando la mejora de la rehabilitación física tradicional siendo reemplazada por videojuegos de realidad aumentada en la que los pacientes sean motivados para realizar un proceso correcto y continuo en su respectiva rehabilitación.

- Gracias a la aplicación de *Vuforia* en este trabajo permitió desarrollar videojuegos para motivar a los pacientes, la parte interesante de las escenas es crear objetos virtuales a través de tarjetas o *Targets* que el terapeuta puede imprimir en diferentes formas, tamaños para que la cámara los interprete y convierta en objetos dentro del videojuego.

- La aplicación fue utilizado por niños de 6 a 10 años con problemas neuronales y deficiencia en los movimientos de los miembros superiores para aprovechar las nuevas posibilidades que tiene el uso de la tecnología en la rehabilitación motriz para estos casos. La interfaz de la aplicación es de fácil manipulación para el terapeuta evitando costos adicionales para su entrenamiento por parte del profesional.

- Los videojuegos son aplicables para la rehabilitación por el aumento en la motivación y participación en el entrenamiento funcional del miembro superior de los pacientes voluntarios. Además, la implementación del sistema es muy económico porque solo se necesita de cámaras web y monitor para la visualización y pueden ser reproducidas desde un celular, computador o TV Smart.

- El desarrollo del videojuego permitió el uso de herramientas de realidad aumentada, los softwares de programación y la utilización de tecnologías informáticas para lograr adelantos dentro de la fisioterapia tradicional, aprovechar la tecnología virtual y unirla con los elementos físicos hace que este tipo de aplicaciones sean más frecuentes en el área de rehabilitación.

## **Recomendaciones**

- Los videojuegos mostraron ser una manera motivacional para rehabilitar los miembros superiores para eso se debe desarrollar escenas virtuales no complejas para pacientes sin alguna discapacidad neuronal.

- Para mejorar el entrenamiento sería recomendable tener un contabilizador de objetos virtuales eliminados y agregar un tiempo para finalizar el videojuego aplicado para pacientes con poco déficit de movimiento motriz.

- El proyecto de realidad aumentada aplicada en la rehabilitación se debe mejorar la interfaz del fisioterapeuta para que tenga más información del progreso de la rehabilitación generando una base de datos donde pueda guardar información del paciente y de la rehabilitación.

- Para futuras aplicaciones desarrolladas en Unity se debe considerar los escenarios 2D y 3D, los elementos virtuales y objetos que se pueden comprar en la plataforma para mejorar la calidad de los videojuegos.

- Se recomienda desarrollar más escenas de videojuegos con diferentes niveles de dificultad para motivar a los pacientes.

- Ayudar al profesional en fisioterapia a mejorar la forma de rehabilitación incluyendo objetos físicos y virtuales de acuerdo con el tipo de movimientos que requiera el paciente para el entrenamiento funcional correcto.



## Bibliografía

- [1] Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades, “Tabla 1. Número de Leyes ecuatorianas con enfoque de inclusión Leyes con enfoque de inclusión y no discriminación; y otra normativa relacionada tales como son los Acuerdos Ministeriales y Resoluciones para el respeto y ejercicio de los derechos de las per,” <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/08/Resumen-estadístico-de-discapacidad.pdf>, p. 18, 2019.
- [2] C. A. Bravo, “ESTUDIO PROSPECTIVO Y ALEATORIZADO SOBRE EL MOVILIZACIÓN PRECOZ VERSUS MOVILIZACIÓN TARDÍA AUTOR Carlos Alfonso Bravo,” 2019.
- [3] Jurado-Perez *et al.*, “Revista de Tecnología e Innovación,” pp. 612–623, 2015.
- [4] L. J. Barrios, J. Minguillón, F. J. Perales, R. Ron-Angevin, J. Solé-Casals, and M. A. Mañanas, “State of the Art in Neurotechnologies for Assistance and Rehabilitation in Spain: Support Technologies, Technology Transfer and Clinical Application,” *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 14, no. 4, pp. 355–361, 2017, doi: 10.1016/j.riai.2017.06.004.
- [5] M. P. Velarde, E. Perugachi, D. Romero, A. D. Sappa, and B. X. Vintimilla, “Análisis del movimiento de las extremidades superiores aplicado a la rehabilitación física de una persona usando técnicas de visión artificial,” *Rev. Tecnológica - ESPOL*, vol. 28, no. 1, pp. 1–7, 2015.
- [6] J. Luis and A. Osca, “PARA LA REALIZACIÓN Y SEGUIMIENTO DE EJERCICIOS DE FISIOTERAPIA EN CASA,” 2019.
- [7] T. Hidalgo, “Construyendo el Software del Futuro Serie Editorial,” vol. I, p. 135, 2014.
- [8] C. A. Valencia Hernández, A. Restrepo Martínez, and N. D. Muñoz Ceballos, “Caracterización de marcadores de realidad aumentada para su uso en robótica,” *Rev. Politécnica*, vol. 13, no. 25, pp. 87–102, 2017, doi: 10.33571/rpolitec.v13n25a7.
- [9] M. Cárdenas Martínez, M. Torres Parejo, and N. Mendoza Laiz, “Valoración del uso de las nuevas tecnologías en personas con esclerosis múltiple,” *Rev. Española Discapac.*, vol. 6, no. 2, pp. 149–171, 2018, doi: 10.5569/2340-5104.06.02.08.
- [10] J. Ejarque, “Grado en Ingeniería Biomédica REALIDAD AUMENTADA Y VIRTUAL EN ENTORNOS HOSPITALARIOS Memoria y Anexos,” 2017.

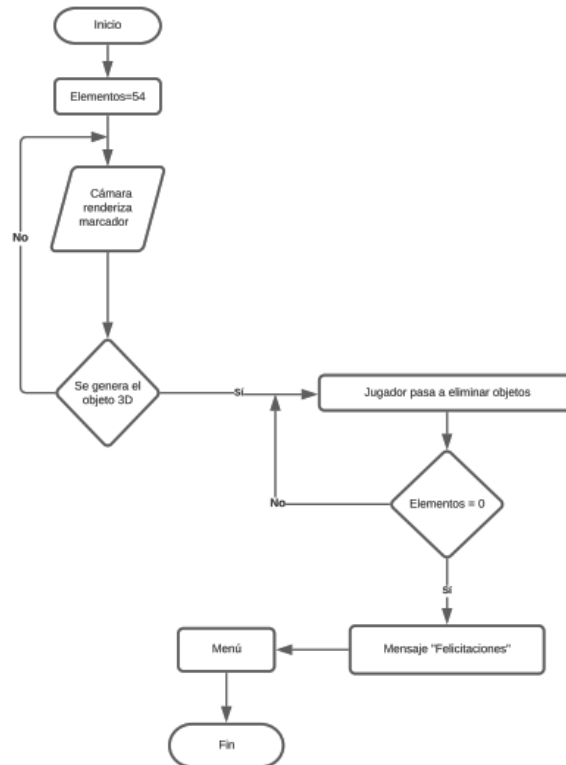
- [11] C. González Morcillo, D. Vallejo Fernandez, J. Castro Sánchez, and J. Albusac Jiménez, “Realidad aumentada Un Enfoque Práctico con ARToolKit y Blender,” in *Introducción*, España, 2012, pp. 1–6.
- [12] C. Vega Villegas, “Desarrollo de una aplicación con realidad aumentada para aprender las características y el comportamiento de las especies emblemáticas del ecuador orientado a niños de educación inicial,” UCE, 2017.
- [13] A. Quevedo Sacoto, “Realidad aumentada en dispositivos móviles ‘android’ aplicada a la geolocalización de equipamientos de agua potable de emapal - ep,” UC, 2015.
- [14] L. Salazar Muñoz, “Construcción de una aplicación de componentes electrónicos básicos utilizando la realidad aumentada para las niñas, niños y jóvenes de la zona 1 del ecuador,” UTN, 2016.
- [15] J. Rivadeneira, P. Bernal, and R. Lara, “Desarrollo de una aplicación de Realidad Aumentada, para educación y tele-educación,” pp. 1–6, 2013.
- [16] A. Mitchell, R. Drake, and V. Wayne, *Gray Anatomía Para Estudiantes*, 2nd ed. Madrid: Elsevier, 2005.
- [17] F. Netter, *Atlas de Anatomía Humana*, vol. 6. España: Elsevier Inc, 2015.
- [18] D. Guzmán and J. Lodoño, “Upper limb rehabilitation with virtual environments,” *Rev. Mex. Ing. biomédica*, vol. 37, no. 3, pp. 271–285, 2016, doi: 10.1007/978-3-030-25965-5\_24.
- [19] L. L. Gómez Echeverry, A. M. Jaramillo Henao, M. A. Ruiz Molina, S. M. Velásquez Restrepo, C. A. Páramo Velásquez, and G. J. Silva Bolívar, “Sistemas de captura y análisis de movimiento cinemático humano: una revisión sistemática,” *Prospectiva*, vol. 16, no. 2, pp. 24–34, 2018, doi: 10.15665/rp.v16i2.1587.
- [20] R. Cano de la Cuerda and S. Collado Vásquez, *Neurorrehabilitación \_ Métodos específicos de valoración y tratamiento*. Madrid: Medica Panamericana, 2012.
- [21] E. A. Bayona, J. B. Prieto, and F. E. León-Sarmiento, “Neuroplasticidad, neuromodulación y neurorrehabilitación: Tres conceptos distintos y un solo fin verdadero,” *Salud Uninorte*, vol. 27, no. 1, pp. 95–107, 2011.
- [22] M. Alejandra, P. Montáñez, E. De, and U. De Pamplona, “Aprendizaje motor en los procesos de rehabilitación con nuevas tecnologías . Motor learning in rehabilitation processes with new technologies .,” vol. 6, no. 3, pp. 45–50, 2019.
- [23] J. Alfonso Mantilla and J. Martínez Santa, “Circuitos funcionales en rehabilitación,” *Mov. Científico*, vol. 9, no. 2, pp. 61–69, 2015, doi: 10.33881/2011-7191.
- [24] A. M. T. Hernández, B. E. A. Amaro, V. I. R. Vera, M. O. M. Gutiérrez, and I. B.

- Gutiérrez, “Cuantificación del Avance en Terapia de Rehabilitación de Miembros Superiores Mediante el Uso de una Interfaz Háptica y Realidad Aumentada,” *Memorias del Congr. Nac. Ing. Biomédica*, vol. 2, pp. 297–300, 2017.
- [25] I. de la H. Villacé, “Realidad Aumentada, una revolución educativa,” *Edmetic*, vol. 6, no. 1, pp. 9–22, 2012, [Online]. Available: <https://www.uco.es/ucopress/ojs/index.php/edmetic/article/view/5762/5439>.
- [26] B. S. Alegría, *Realidad aumentada en Educación*. Madrid: GATE, 2017.
- [27] J. Fombona Cadavieco and E. Vázquez-Cano, “Posibilidades de utilización de la geolocalización y realidad aumentada en el ámbito educativo,” *Educ. XXI*, vol. 20, no. 2, pp. 319–342, 2017, doi: 10.5944/educXX1.10852.
- [28] A. Dionísio, I. Ficheman, R. de Deus, A. N. Klein, and S. J. Nakazune, “Augmented Reality in Ocupacional Therapy,” in *2013 8th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 2013, pp. 1–6.
- [29] C. R. Bello, “La realidad aumentada: lo que debemos conocer,” *Tecnol. Investig. y Acad.*, vol. 5, no. 2, pp. 257–261, 2017.
- [30] P. A. Niño S. and Ó. F. Avilés S., “Mecatronica aplicada a la ingenieria de rehabilitacion.,” *Rev. Colomb.*, vol. 7, no. 7, pp. 83–96, 2007.
- [31] J. A. Leyva Regalon, I. Mayol Cespedes, Y. Soler Pellicer, and P. Gomez Avila, “Serious Games Based on Tangible Augmented Reality Interaction Techniques for Cognitive Rehabilitation,” *3C Tic*, vol. 7, no. 3, pp. 59–78, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.17993/3ctic.2018.61.58-79/>.
- [32] C. Valencia, A. Restrepo, and N. Muñoz, “Caracterización de marcadores de realidad aumentada para su uso en robótica,” *Politécnica*, vol. 13, no. 25, pp. 87–102, 2017.
- [33] C. P. Gutiérrez, F. Pinchao, Lady Rodríguez, and R. Espinosa, “Tecnología lúdica para la rehabilitación de miembro superior en jóvenes,” *Visión Electrónica*, vol. 12, no. 2, pp. 215–225, 2018.
- [34] J. Bimbela, M. Suárez, J. A. Aburto, and L. M. Gómez, “Entrenamiento de resistencia muscular en jóvenes universitarios ¿ método de oclusión vascular o tradicional ?,” *Ciencias la Act. Física*, vol. 19, no. 2, 2018.
- [35] A. Juliani *et al.*, “Unity : A General Platform for Intelligent Agents,” *arXiv:1809.02627*, pp. 1–28, 2018.
- [36] F. Purnomo, P. Santosa, R. Hartanto, E. Pratisto, and A. Purbayu, “Implementation of Augmented Reality Technology in Sangiran Museum with Vuforia,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 333, no. 1, 2018.

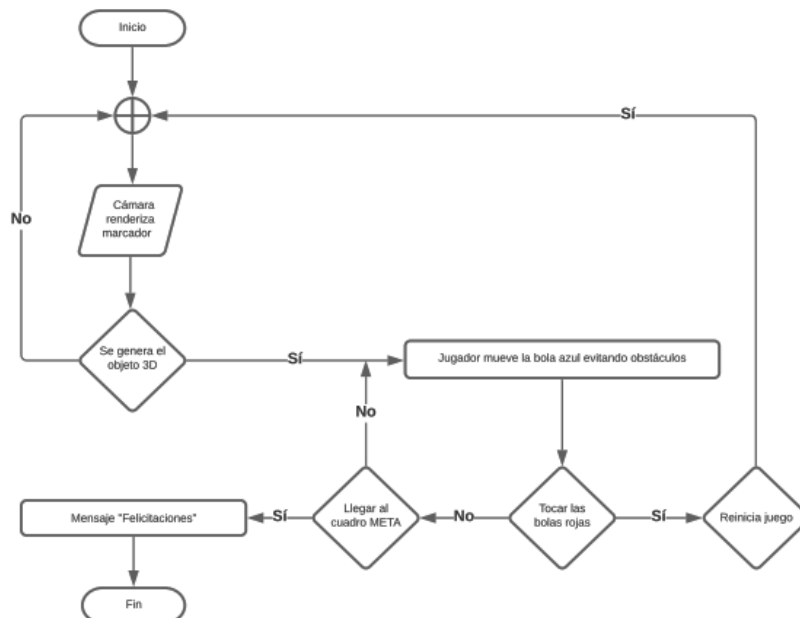
- [37] M. Cárdenas Martínez, M. Torres Parejo, and N. Mendoza Laiz, “Valoración del uso de las nuevas tecnologías en personas con esclerosis múltiple,” *Rev. Española Discapac.*, vol. 6, no. 2, pp. 149–171, 2018.
- [38] J. Ejarque, “Grado en Ingeniería Biomédica REALIDAD AUMENTADA Y VIRTUAL EN ENTORNOS HOSPITALARIOS Memoria y Anexos,” 2017.

## ANEXOS

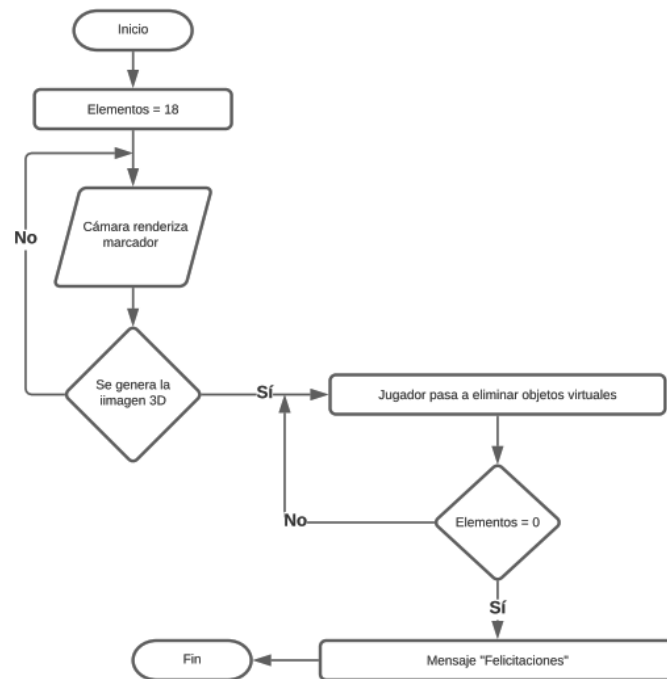
*Anexo A: Diagrama de flujo del videojuego “Entrenamiento”*



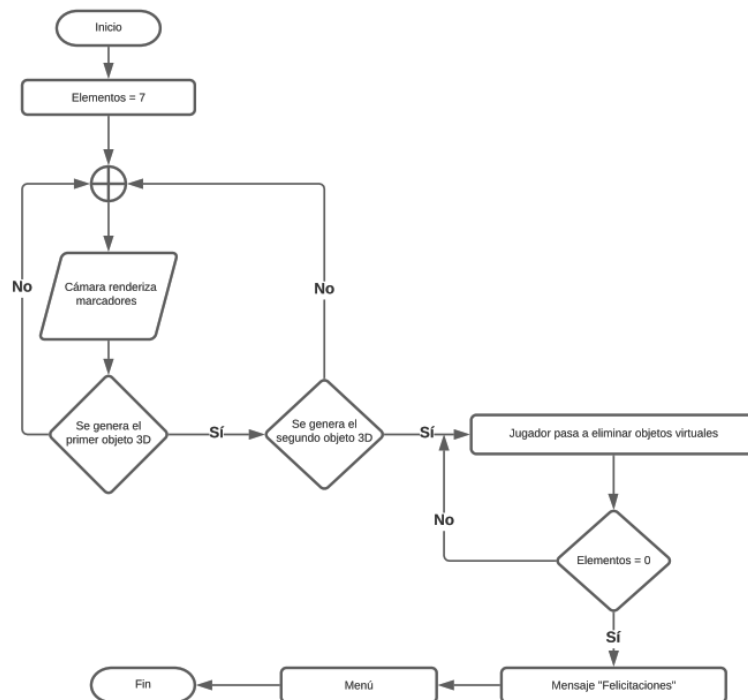
*Anexo B: Diagrama de flujo del videojuego “Escenario 1”*



*Anexo C: Diagrama de flujo del videojuego “Escenario 2”*

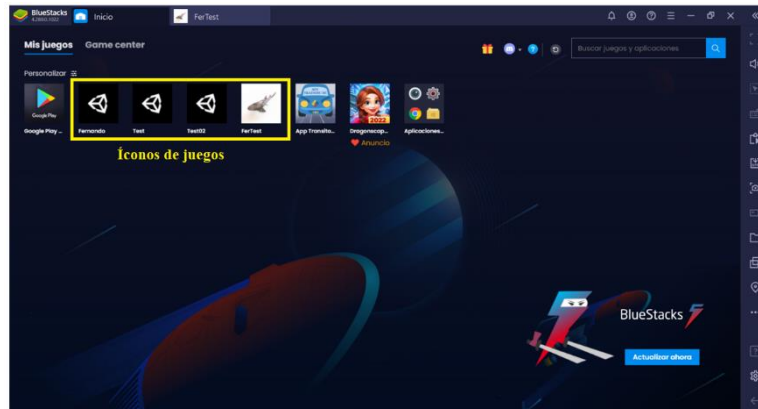


*Anexo D: Diagrama de flujo del videojuego “Escenario 3”*

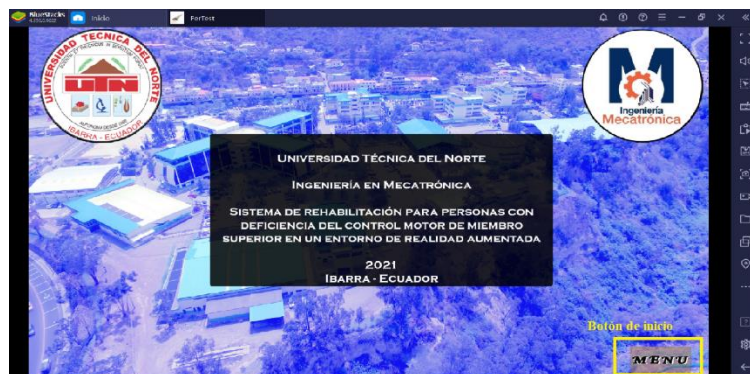


## Anexo E: Manual de usuario para el Fisioterapeuta

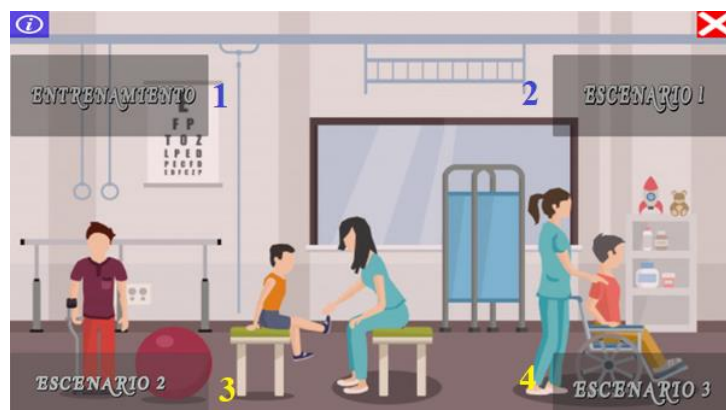
1. Para acceder al juego se debe abrir un emulador del sistema operativo móvil Android para Windows, en este caso se utiliza la aplicación BlueStacks (libre elección); aquí se puede instalar el juego.



2. Abrir el icono de la aplicación para pasar a la primera pantalla en la que se encuentra el tema del proyecto y el botón MENÚ, al presionarlo pasamos a la siguiente pantalla.



3. A continuación, se encuentra la pantalla que contiene a los cuatro juegos de la aplicación. Se puede escoger cualquiera para seguir con el juego.



- Al escoger algún juego pasara a las siguientes escenas, ahí aparecerán los elementos virtuales creados en el juego a excepción del juego 4.

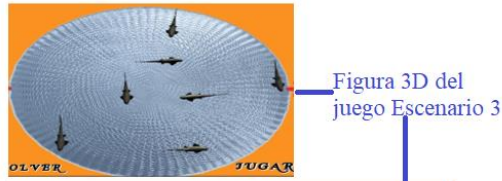
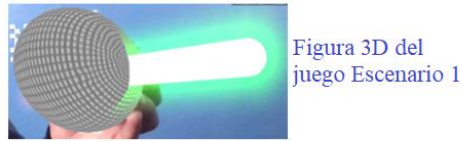


- Para comenzar a jugar debe enfocar los marcadores respectivos frente a la cámara para generar el objeto 3D dentro del juego.



- Aparecerán los objetos 3D de realidad aumentada renderizados por la cámara.





7. Con las imágenes 3D generadas en el video juego, pasamos a cumplir los objetivos de los juegos de realidad aumentada respectivamente.



Objetivos de cada juego:

1. Eliminar todos los objetos virtuales (monstruos) con la bolita negra de billar (objeto 3d) generado con el marcador.
2. Llevar la bolita azul manipulando el timón (objeto 3d) al cuadro de meta a través de los obstáculos, evitando los puntos rojos.

3. Eliminar todos los objetos virtuales (monstruos) con la espada de luz (objeto 3d) generado con el marcador.
4. Eliminar todos los peces de la piscina con la caña de pescar (objeto 3d).