

# Plataforma para la rehabilitación de hombro en realidad virtual con medición de los rangos de movilidad<sup>1</sup>

## Virtual reality shoulder rehabilitation platform with range-of-motion measurements

J. P. Arango, D. M. Martínez y O. A. Vivas

Recibido: marzo 04 de 2025 – Aceptado: septiembre 29 de 2026

**Resumen**—Este documento presenta la implementación de una plataforma de realidad virtual desarrollada para capturar los rangos de movilidad del hombro. Utilizando Unity 3D y compatible con el casco Oculus Quest 2, la aplicación incluye cuatro ejercicios de movimiento, siendo el principal ejercicio diseñado para medir el rango de movilidad inicial del hombro y proporcionar una evaluación precisa del estado del usuario. Además, ofrece diversas actividades de entrenamiento orientadas a mejorar dicho rango. La plataforma fue evaluada mediante pruebas con voluntarios seleccionados en colaboración con profesionales en fisioterapia. Los resultados obtenidos destacan el potencial de esta herramienta como apoyo efectivo en procesos de fortalecimiento del miembro superior.

**Palabras clave**—Realidad virtual, rehabilitación de hombro, rango de movimiento, Oculus Quest 2, sistemas de rehabilitación.

**Abstract**—This paper presents the implementation of a virtual reality platform designed to capture shoulder mobility ranges. Developed using Unity 3D and compatible with the Oculus Quest 2 headset, the application includes four movement exercises, with the primary exercise aimed at measuring the initial shoulder mobility range and providing an assessment of the user's initial condition. Additionally, it offers various training activities intended to improve this initial range. The platform was tested

with volunteers selected in collaboration with physiotherapy professionals. The results highlight the potential of this tool as an effective support in upper limb strengthening processes.

**Keywords**—Virtual reality, shoulder rehabilitation, range of motion, Oculus Quest 2, rehabilitation systems.

### I. INTRODUCCIÓN

LAS tendinopatías del hombro son un problema común en países desarrollados, especialmente las lesiones en el manguito de los rotadores. Estas lesiones tienen una incidencia del 65 % al 70 % en la población adulta que consulta al médico por dolor en el hombro [1]. Generalmente, las lesiones en el manguito rotador afectan la movilidad de los miembros superiores, causando dolor al levantar o girar el brazo hacia atrás, limitando las actividades diarias. El tratamiento principal de recuperación implica la movilización activa y pasiva para fortalecer las estructuras afectadas [2], [3].

La realidad virtual se ha utilizado en rehabilitación para simular entornos reales y motivar al paciente durante la terapia. La tecnología de sensores permite una interacción natural con los entornos virtuales a menor costo y con mayor control para el profesional [4], [5]. En la rehabilitación con tecnologías como la realidad virtual, se requiere la presencia y atención del fisioterapeuta para verificar la ejecución adecuada de los movimientos [6] y estimar visualmente los ángulos generados entre las articulaciones. Estos ángulos se toman como referencia para determinar el grado de limitación que genera la lesión en cada paciente y se miden mediante la goniometría, generalmente utilizando un instrumento llamado goniómetro [7]. En los últimos años, el interés por desarrollar plataformas inmersivas para la rehabilitación del hombro ha aumentado considerablemente gracias a la disponibilidad de dispositivos comerciales como Oculus Quest 2. Trabajos recientes, como [8], demostraron que una aplicación inmersiva diseñada para pacientes con reparación del manguito rotador puede reproducir movimientos con errores bajos respecto a un sistema estéreo fotogramétrico evidenciando el potencial de

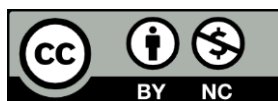
<sup>1</sup>Producto derivado del proyecto de investigación “Plataforma para la rehabilitación de hombro en realidad virtual con medición de los rangos de movilidad”, apoyado por la Universidad del Cauca.

J. P. Arango, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, email: [juanpador@unicauca.edu.co](mailto:juanpador@unicauca.edu.co).

D. M. Martínez, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, email: [dmmartinez216@unicauca.edu.co](mailto:dmmartinez216@unicauca.edu.co).

O. A. Vivas, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, email: [avivas@unicauca.edu.co](mailto:avivas@unicauca.edu.co).

**Como citar este artículo:** Arango, J. P., Martínez, D. M., y Vivas, O. A. Plataforma para la rehabilitación de hombro en realidad virtual con medición de los rangos de movilidad, Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 20, no. 40, pp. 17-25, julio-diciembre 2026.  
DOI: <https://doi.org/10.31908/19098367.3201>.



Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

estas herramientas para apoyar la evaluación clínica. De forma complementaria, [9] reportó una alta aceptación por parte de fisioterapeutas especialistas, quienes destacaron la facilidad de uso y el potencial del sistema como apoyo a la rehabilitación, aunque señalaron que la supervisión profesional continúa siendo necesaria durante las sesiones.

Con lo expuesto anteriormente, es posible identificar dos problemas en la rehabilitación con tecnologías como la realidad virtual: la necesidad de la presencia del profesional para estimar visualmente los ángulos de las articulaciones y la falta de un método preciso para medirlos en un entorno virtual. Estos métodos ya han sido evaluados en distintas ocasiones con diferentes estrategias y dispositivos digitales. En [10] se desarrolló una aplicación basada en la captura de fotografías registrando las estimaciones del rango de movimiento visual de cada sujeto y un segundo análisis basado en un inclinómetro, lo que generó ciertas limitaciones en cuanto a la experiencia, configuración de los dispositivos y captura de fotografías. Por otro lado, en [11] se utilizó una aplicación remota para evaluar el rango de movimiento utilizando la aplicación de extensión de transportador del navegador Chrome como un medio de telesalud. En [12] se desarrolló en realidad virtual un exergame para el casco Oculus Rift basado en los movimientos de flexión y extensión en búsqueda de mejorar la amplitud del movimiento con actividades del mundo común como destruir bloques con un martillo, cortar el pasto o lanzar tejos. Posteriormente, propuestas como [12] ampliaron este concepto mediante metodologías de diseño iterativo centradas en el usuario, integrando ejercicios funcionales del hombro y codo dentro de escenarios inmersivos con resultados positivos en términos de usabilidad y motivación. De manera similar, [13] evidenció que la incorporación de retroalimentación visual y refuerzo positivo dentro de un entorno inmersivo favorece la recuperación motora del miembro superior y mejora el aprendizaje motor durante la rehabilitación. En una línea complementaria, [14] demostró la viabilidad de combinar realidad mixta, robótica y telerehabilitación para el tratamiento del miembro superior, aunque ello requiere infraestructura adicional y dispositivos especializados. Asimismo, revisiones recientes [15] destacan que la incorporación de inteligencia artificial permite personalizar los ejercicios, mejorar la adherencia del paciente y facilitar el seguimiento objetivo del proceso terapéutico, mientras que la revisión [16] resalta que los videojuegos serios constituyen una estrategia prometedora para incrementar la participación del usuario, aunque todavía existen diferencias importantes en los criterios utilizados para diseñar y evaluar este tipo de plataformas. Finalmente, una revisión sistemática reciente sobre rehabilitación digital y realidad virtual para lesiones del manguito rotador [15] concluye que estas tecnologías representan una alternativa prometedora frente a la terapia convencional, aunque aún se requieren estudios que integren evaluación objetiva del rango de movimiento y entrenamiento funcional dentro de una misma plataforma. De igual manera, se han realizado revisiones [17] sobre cómo la realidad virtual puede inducir alivio del dolor y mejoras en el funcionamiento

del miembro afectado con resultados positivos.

Este documento presenta la creación de una plataforma en realidad virtual que mide los ángulos de apertura y evalúa los rangos de movilidad del hombro, con el objetivo de asistir en los procesos de rehabilitación del manguito rotador utilizando un entorno virtual como medio de captura de datos. A diferencia de gran parte de los desarrollos reportados recientemente, la propuesta integra en un mismo sistema la evaluación objetiva del rango de movilidad, el entrenamiento mediante ejercicios inmersivos y el registro automático de la información obtenida utilizando únicamente los sensores incorporados en Oculus Quest 2, sin requerir cámaras externas, sistemas ópticos o dispositivos adicionales de captura de movimiento. La plataforma fue utilizada por varios usuarios durante dos semanas, evidenciándose una mejora en los rangos de movilidad y en la percepción del dolor según su nivel de afectación, lo que respalda su potencial como herramienta de apoyo para los procesos de rehabilitación del hombro.

## II. METODOLOGÍA

### A. Descripción de la aplicación.

Para el desarrollo de la aplicación, es fundamental considerar las definiciones y conceptos utilizados en un proceso de rehabilitación, que pretende ayudar a las personas con discapacidad o con alguna afectación temporal a lograr independencia física y capacidades funcionales óptimas. Este proceso, definido y continuo, utiliza una variedad de procedimientos que varían según la localización de la afectación [18], [19].

En esta investigación se utilizó el hardware Oculus Quest 2 (Fig. 1), para lograr la inmersión del usuario dentro del mundo virtual y como medio de interacción con el entorno y los procedimientos de entrenamiento y recuperación diseñados. Se tomó como referencia espacial la posición de la mano del usuario en el mundo real mediante los controles del casco Oculus, que detectan la posición de las extremidades y posicionan ambas manos en el entorno virtual a través de las cuatro cámaras situadas en la parte frontal del visor.



Fig 1. Oculus Quest 2.

A continuación, se presenta la arquitectura general del sistema (Fig. 2), su flujo de información desde la interacción del usuario y el procesamiento de los datos durante cada sesión.

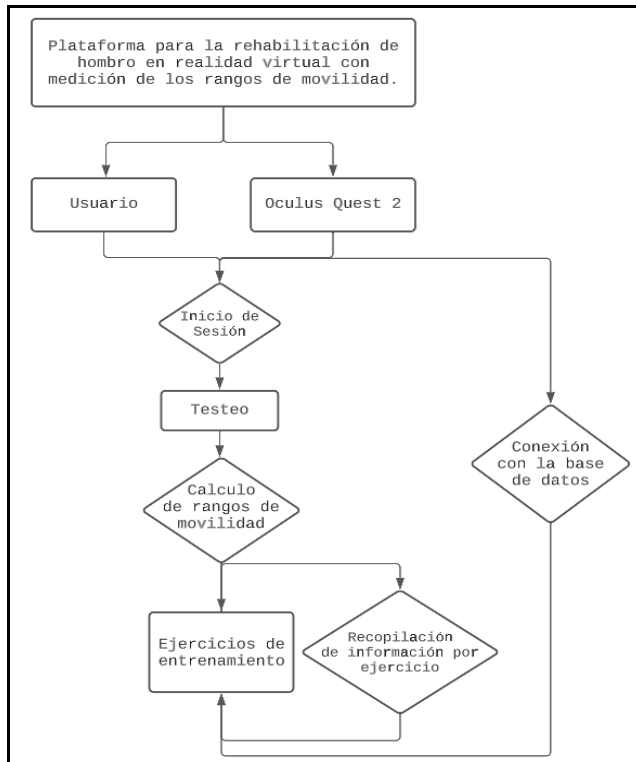


Fig 2. Arquitectura general del sistema.

El desarrollo del entorno virtual se basa en los movimientos del miembro superior a través de planos anatómicos básicos definidos, lo que permite desplazamientos en las direcciones horizontal, vertical y diagonal, esenciales para la interacción del usuario con los objetos y actividades dispuestos en el entorno [3]. Se diseñaron diferentes actividades en la habitación virtual de la plataforma, permitiendo conocer el progreso del usuario a través de una actividad de testeo y actividades de entrenamiento para la mejora y fortalecimiento del miembro superior, las cuales se explicarán más adelante.

### B. Entorno de la plataforma.

Se utilizó Unity 3D, un motor gráfico multiplataforma ampliamente utilizado en videojuegos y diversas aplicaciones que requieren realismo [20]. Dado que Unity 3D permite la integración con el hardware Oculus Quest II mediante plugins, es posible la interacción del usuario con las interfaces y objetos del entorno virtual, además de permitir la escalabilidad a otras plataformas de la misma empresa desarrolladora.

Debido a que los dispositivos de rehabilitación no siempre son fáciles e intuitivos de usar y que el interés y la efectividad de la rehabilitación dependen de la interfaz y la jugabilidad de la aplicación [21], se creó un entorno visualmente amigable. Este entorno, con colores claros y actividades no convencionales (Fig. 3), pretende disminuir la deserción de los usuarios durante su proceso de rehabilitación, mediante la división y asignación de espacios específicos para la realización de las actividades programadas.

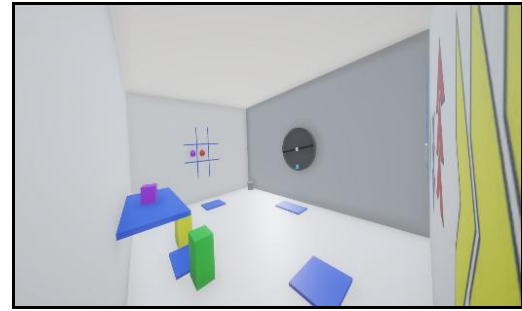


Fig 3. Entorno virtual diseñado.

### C. Ejercicios diseñados

En la plataforma existen dos tipos de ejercicios: los de entrenamiento, que buscan mejorar la movilidad del hombro a lo largo de las repeticiones, y el ejercicio evaluativo, que permite determinar la evolución del usuario en cada sesión. Se desarrollaron tres ejercicios de entrenamiento, más el ejercicio de evaluación, dentro de la aplicación virtual, cada uno con un panel de interacción para iniciar el ejercicio y una breve explicación de su funcionamiento. El test y los ejercicios son:

#### 1) Testeo y calibración.

Ejercicio principal enfocado en la medición de los rangos de movilidad del usuario. Se toma como referencia la altura del hombro, obtenida al movilizar varias esferas de colores en el mundo virtual hasta la ubicación de los hombros en el mundo real. El objetivo es desplazar cuatro objetos en dirección vertical y horizontal (Fig. 4) para calcular el ángulo generado entre los objetos y el hombro (Fig. 5).



Fig 4. Perspectiva del usuario movilizando objetos.

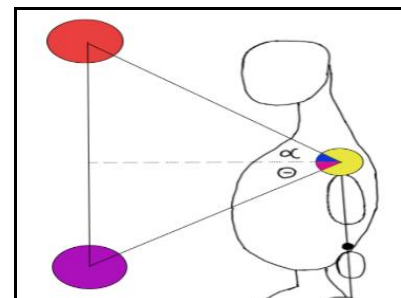


Fig 5. Esquema de medición vertical.

#### 2) Ejercicio mesa.

Enfocado en movimientos combinados de flexión y aducción horizontal, el objetivo es tomar objetos ubicados sobre una mesa y arrastrarlos hacia la parte lateral del usuario (Fig. 6).

### 3) Ejercicio matriz.

Enfocado en movimientos combinados como la flexión y extensión, el objetivo es tomar objetos de color rojo y generar una colisión con objetos de color violeta que aparecen en lugares aleatorios en dirección horizontal o vertical de una matriz 3x3 ubicada sobre la pared (Fig. 7).

### 4) Ejercicio reloj.

Enfocado en movimientos combinados en dirección diagonal, el objetivo es girar una manecilla de reloj para colisionar con objetivos que aparecen en ubicaciones aleatorias dentro de su eje (Fig. 8).

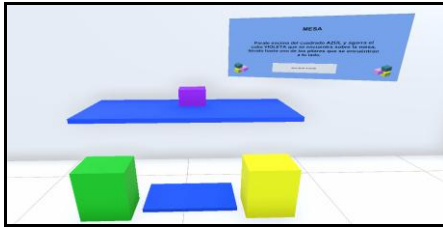


Fig 6. Ejercicio Mesa.



Fig 7. Ejercicio Matriz.

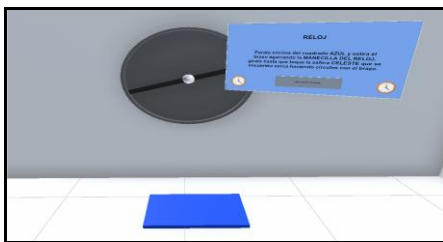


Fig 8. Ejercicio Reloj.

### D. Medición del rango de movilidad.

En la plataforma se realizan tres mediciones: tiempo de interacción con la plataforma, número de aciertos en cada ejercicio y rangos de movilidad del hombro afectado. La medición principal se realiza en el ejercicio "Testeo" utilizando identidades trigonométricas (Ec. (1) y Ec. (2)). Esta variable permite calcular el ángulo generado por la ubicación de los objetos en el plano virtual. Los datos obtenidos por cada usuario se almacenan en la nube después de cada sesión, permitiendo su posterior análisis a medida que avanzan las sesiones de entrenamiento.

$$\tan(\theta) = \frac{\text{catetoopuesto}}{\text{catetoadyacente}} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\text{catetoopuesto}}{\text{catetoadyacente}}\right) \quad (2)$$

## III.RESULTADOS

### A. Diseño del experimento.

Con el apoyo del Departamento de Fisioterapia de la Universidad del Cauca, Colombia, se diseñó un instrumento evaluador que permite identificar entre varios usuarios aquellos con algún tipo de afectación en el miembro superior para ser utilizados como muestra en este estudio de caso. Este instrumento evaluador incluye mediciones de los rangos de movilidad del hombro utilizando un goniómetro (Fig. 9), medición de fuerza y pruebas de provocación. Estas últimas son pruebas manuales para detectar dolor o incomodidad en el usuario y se consideran el factor de inclusión de un usuario en el estudio. Existen seis pruebas de provocación, y al menos dos deben resultar positivas para considerar al individuo como un candidato potencial para el experimento.

Se utilizó una muestra de 25 individuos, de los cuales 10 dieron positivo en el instrumento evaluador; 4 de ellos presentaron afectación en ambos hombros, lo que resultó en un total de 14 sujetos de prueba positivos. Estos sujetos realizaron sesiones diarias con la plataforma de realidad virtual durante 10 días hábiles (Fig. 10). Al finalizar los 10 días, se realizó nuevamente la evaluación con el instrumento evaluador para verificar su progreso.



Fig 9. Evaluación goniometría.



Fig 10. Pruebas con usuarios.

### B. Análisis cuantitativo.

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos en la evaluación previa y posterior al uso de la plataforma, llamada PRMS (Plataforma de Rehabilitación de Miembro Superior), así como los datos obtenidos en las actividades de Testeo, Mesa, Matriz y Reloj por cada usuario. De los 14 usuarios que participaron en el desarrollo de las sesiones con la plataforma, 3 desertaron durante el proceso por falta de tiempo, enfocándose entonces el estudio en los 11 usuarios que completaron todas las sesiones. Los análisis se presentan de manera sencilla y ordenada para facilitar su

comprensión, mostrándose los promedios de los resultados de todos los usuarios en algunos casos y los resultados completos de uno o varios usuarios en otros casos.

Para el desarrollo del análisis cuantitativo, se presentarán diversos resultados con sus respectivas explicaciones y gráficos, dividiéndolos en cinco aspectos.

#### 1) Exactitud en la toma de datos.

El estudio realizó una comparativa entre los datos tomados manualmente por una estudiante de fisioterapia y los datos tomados por la plataforma diseñada, para determinar si la plataforma realiza la toma de datos de los usuarios correctamente. Se tomaron datos antes y después de las diez sesiones realizadas por los usuarios, con el fin de determinar su evolución en cada uno de los campos definidos por el instrumento evaluador. La comparativa se hizo con los datos del día 1 y del día 10 de las sesiones, que corresponden a la primera y a la última sesión, respectivamente. Los resultados de los 11 usuarios se presentan en la Tabla I, con los datos de la toma manual con el instrumento evaluador antes y después de las sesiones, así como de la toma de datos realizada por la plataforma antes y después de las sesiones en realidad virtual.

TABLA I

COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL INSTRUMENTO EVALUADOR Y POR LA PLATAFORMA DISEÑADA EN LOS 11 USUARIOS COMPLETADOS.

| Usuario | Tipo de movimiento realizado | Instrumento evaluador (Manual) |              | Aplicación (Realidad virtual) |              |
|---------|------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------|--------------|
|         |                              | Angulo Inicial                 | Angulo Final | Angulo Inicial                | Angulo Final |
| 1       | Flexión                      | 110°                           | 135°         | 110,0234°                     | 135,0463°    |
|         | Aduc. Horizontal             | 115°                           | 128°         | 115,8509°                     | 128,4188°    |
| 2       | Flexión                      | 120°                           | 155°         | 120,3471°                     | 154,2224°    |
|         | Aduc. Horizontal             | 100°                           | 115°         | 100,6301°                     | 116,0504°    |
| 3       | Flexión                      | 180°                           | 180°         | 154,0117°                     | 154,9542°    |
|         | Aduc. Horizontal             | 110°                           | 135°         | 110,2404°                     | 134,6972°    |
| 4       | Flexión                      | 180°                           | 190°         | 154,7871°                     | 154,9610°    |
|         | Aduc. Horizontal             | 110°                           | 110°         | 111,2312°                     | 115,6507°    |
| 5       | Flexión                      | 165°                           | 180°         | 154,0413°                     | 154,1667°    |
|         | Aduc. Horizontal             | 120°                           | 130°         | 121,1325°                     | 129,2627°    |
| 6       | Flexión                      | 160°                           | 180°         | 154,6813°                     | 154,1196°    |
|         | Aduc. Horizontal             | 120°                           | 135°         | 120,9160°                     | 126,5109°    |
| 7       | Flexión                      | 160°                           | 180°         | 154,6712°                     | 154,5266°    |
|         | Aduc. Horizontal             | 105°                           | 135°         | 105,8533°                     | 117,5024°    |
| 8       | Flexión                      | 165°                           | 180°         | 154,9818°                     | 154,1145°    |
|         | Aduc. Horizontal             | 100°                           | 105°         | 101,5388°                     | 110,6198°    |
| 9       | Flexión                      | 145°                           | 155°         | 145,1120°                     | 148,4466°    |
|         | Aduc. Horizontal             | 130°                           | 120°         | 130,6278°                     | 134,8777°    |
| 10      | Flexión                      | 150°                           | 155°         | 150,7686°                     | 154,8796°    |
|         | Aduc. Horizontal             | 130°                           | 115°         | 130,1390°                     | 133,2934°    |
| 11      | Flexión                      | 170°                           | 170°         | 154,3331°                     | 154,5797°    |
|         | Aduc. Horizontal             | 110°                           | 135°         | 110,9583°                     | 118,6453°    |

Se observa que la plataforma de rehabilitación es más precisa que la toma manual, arrojando una mayor cantidad de decimales. Sin embargo, tiene una limitación en la flexión del hombro a unos 155° grados, puesto que las cámaras del casco Oculus ya no son capaces de detectar la posición del mando (Fig. 11). Dichos datos excedidos se ajustaron entonces a ese límite para realizar el análisis de todos los movimientos realizados por el usuario.

Inicialmente se observaron errores en la recopilación de los

datos, especialmente en la aducción horizontal, debido a que las mediciones manuales y las de la plataforma se realizaron en días distintos. Esta discrepancia se debe a factores como las actividades cotidianas, estiramientos y calentamientos previos al uso de la plataforma, lo que influyó en el rendimiento de los usuarios. Estos factores se identificaron después del cuarto día de pruebas, por lo cual a partir de ese día se recomendó evitar tales actividades antes de las sesiones diarias.

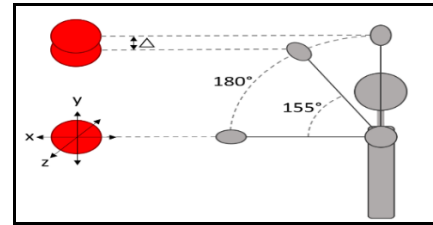


Fig 11. Representación del usuario en el ejercicio de testeo.

#### 2) Promedio de resultados y desempeño.

En esta sección se analizan los datos obtenidos por la plataforma en los tres ejercicios diarios: Mesa, Matriz y Reloj. Teniendo los resultados del promedio de desempeño por día de los tres ejercicios de cada uno de los usuarios, se generaron gráficos separando cada factor obtenido (puntuación, tiempo máximo de agarre, tiempo mínimo de agarre, y tiempo promedio de agarre), donde se agrupan los 11 usuarios, generándose una única gráfica promedio para cada factor (Figs. 12 - 15). En las gráficas se observa, con línea punteada, el cuarto día de las sesiones, a partir del cual se cambió el orden de los ejercicios, teniendo en cuenta las actividades previas realizadas por el usuario, como se explicó anteriormente. Las gráficas de tiempo máximo, mínimo y promedio indican el tiempo en segundos en que los usuarios realizaron cada movimiento con su brazo.

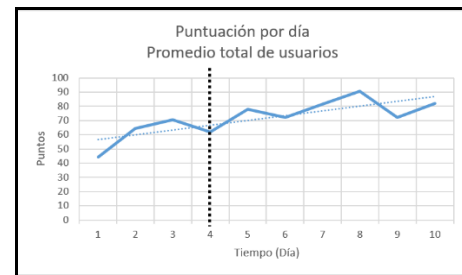


Fig 12. Promedio de puntuación por día de los 11 usuarios.

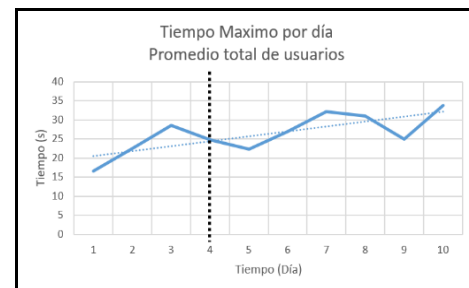


Fig 13. Promedio de tiempo máximo por día de los 11 usuarios.

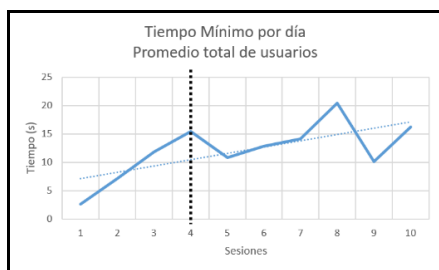


Fig 14. Promedio de tiempo mínimo por día de los 11 usuarios.

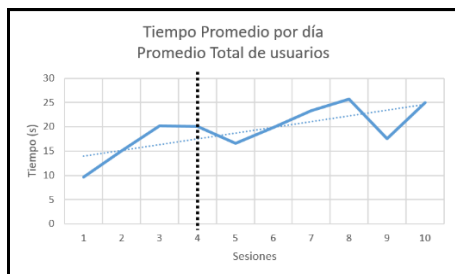


Fig 15. Promedio de tiempo por día de los 11 usuarios.

Se generó una línea de tendencia para cada uno de los usuarios y se observó una mejora en el desempeño en promedio en todos los factores medidos. También se observó un aumento en el tiempo máximo (Fig. 13) y mínimo de agarre (Fig. 14), lo que puede ser indicativo de una mejora en la fuerza y resistencia del miembro afectado. Sin embargo, se encontró que un cambio en el orden de los ejercicios en el cuarto día de las sesiones resultó en una reducción en el tiempo máximo, mínimo y promedio de agarre de todos los usuarios. Esto sugiere que el orden de los ejercicios es un factor importante a considerar para mejorar el desempeño en las sesiones posteriores.

### 3) Evolución de los usuarios.

Para determinar la evolución de los usuarios a lo largo del tiempo, se estableció una relación directa entre los datos obtenidos por la plataforma y los datos tomados manualmente. Se compararon los ángulos de flexión y aducción horizontal del hombro, registrados manualmente, con los ángulos superior y derecho o izquierdo obtenidos por la plataforma. Se generaron dos gráficas: una para la flexión (Fig. 16) y otra para la aducción horizontal (Fig. 17) del hombro. En estas gráficas, la curva “lineal ideal” representa la posible evolución lineal ideal, mientras que PRMS (Plataforma de Rehabilitación de Miembro Superior) muestra los datos obtenidos en el entorno virtual durante cada uno de los días de las sesiones desarrolladas por los usuarios.

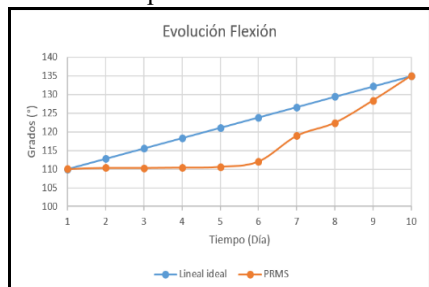


Fig 16. Comparativa de la evolución promedio en la flexión de hombro de los 11 usuarios.

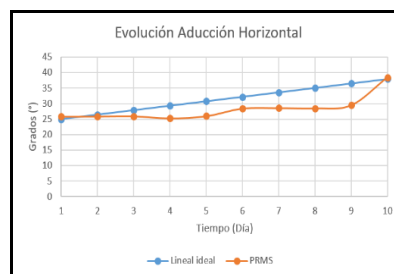


Fig 17. Comparativa de la evolución promedio en la aducción horizontal de hombro de los 11 usuarios.

Al analizar las gráficas, se observa que al finalizar las sesiones se logra una similitud en los puntos finales, lo que sugiere que, con el tiempo, se alcanza un comportamiento satisfactorio. En general, se observa una mejora en los usuarios antes y después del uso de la plataforma, evidenciada por la pendiente ascendente, lo que indica un aumento progresivo en el rango de movilidad.

Para este análisis, se realizó una regresión lineal con el objetivo de determinar la correlación de Pearson entre las variables obtenidas durante el experimento. Si el valor de Pearson se encuentra entre -1 y 1, indica una correlación perfecta; entre -0.7 y 0.7, una correlación fuerte; entre -0.5 y 0.5, moderada; y valores menores a 0.5, una correlación débil. Sin embargo, esta evaluación por sí sola no es suficiente, por lo que se utilizó también la herramienta estadística JAMOVI para determinar el valor de *p-value* y evaluar esta correlación o dependencia. Si el valor de *p* es inferior al 5% (0.05), se podría aceptar la hipótesis de que las variables evaluadas tienen una correlación significativa entre ellas.

Al evaluar los resultados obtenidos en la evolución de los movimientos de flexión (Fig. 18), se encuentra un nivel de correlación fuerte entre el ángulo inicial y el ángulo final, aunque con los demás valores dicha correlación no es evidente.

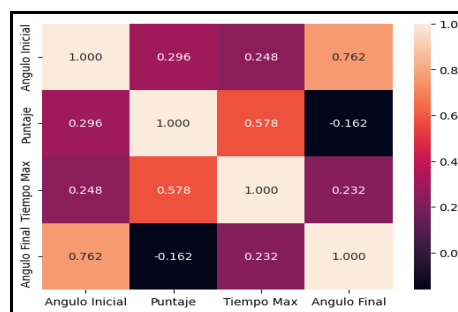


Fig 18. Correlación de Pearson para la evolución de la flexión.

Al analizar los valores de *p-value* para la evolución de la flexión de forma separada (Tabla II), se observa que estos indican una mejora significativa en este movimiento gracias a la plataforma. Tanto la evolución del ángulo capturado como el aumento del puntaje se encuentran por debajo de 0.05, lo que sugiere una correlación entre estas variables y la evolución en el movimiento del hombro del usuario.

TABLA II  
VALORES DE P-VALUE EN LA EVOLUCIÓN DE LA FLEXIÓN.

| Variable               | P-Value |
|------------------------|---------|
| Angulo Inicial Flexión | <0.001  |
| $\Delta$ Puntaje       | 0.011   |
| $\Delta$ Tiempo Máximo | 0.071   |

#### 4) Relación del desempeño respecto al dolor.

Se buscó determinar una posible relación entre el desempeño de los usuarios y la reducción del dolor, la cual se esperaba obtener al cabo de las diez sesiones. Para ello se generó una pendiente respecto al número de criterios de inclusión que dieron como resultado positivo al inicio de las pruebas, los cuales evaluaron el dolor inicial.

El desempeño de los usuarios se evaluó mediante la puntuación promedio obtenida en los tres ejercicios diarios (Fig. 19). Para combinar estos datos con los criterios de inclusión en una misma gráfica, se ajustaron las unidades de ambos conjuntos de datos, ya que inicialmente no eran comparables.

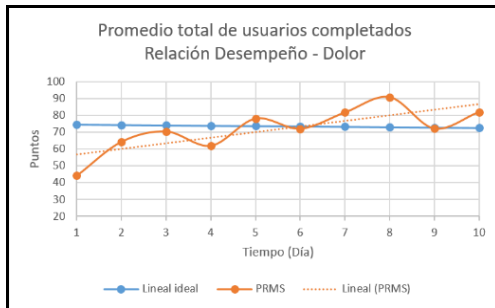


Fig 19. Promedio de la relación del desempeño por día y sensación de dolor de los 11 usuarios.

En general, se observó un aumento en el desempeño de los usuarios en los ejercicios, evidenciado en la tendencia lineal del gráfico PRMS que muestra los datos obtenidos por la plataforma durante las sesiones. No obstante, la línea ideal, que refleja la sensación del dolor según los criterios de inclusión, muestra una ligera disminución. Se analizó la posible correlación entre la evolución del dolor, evaluada con los criterios de inclusión, y las variables obtenidas, generándose una correlación de Pearson. Se hallaron correlaciones moderadas entre el tiempo de interacción, el puntaje y los criterios de inclusión antes y después del experimento (valores superiores a 0.5). Sin embargo, las correlaciones entre los criterios de inclusión antes y después del experimento con el puntaje y el tiempo de interacción resultaron ser débiles (Fig. 20).

Al realizar un análisis de *p-value* presentado en la Tabla III, se sugiere que la plataforma logra una evolución positiva desde el punto de partida del usuario en términos de los criterios de inclusión, sin embargo, no se puede establecer una influencia relevante del desempeño del puntaje y el tiempo máximo de agarre en esta mejora, ya que los valores de *p-value* superan 0.05.

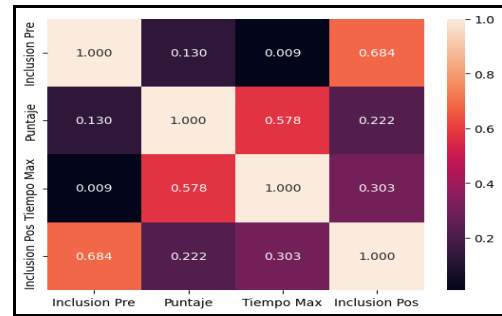


Fig 20. Correlación de Pearson de la evolución del dolor.

TABLA III  
VALORES DE P-VALUE PARA LA EVOLUCIÓN DE LA PERCEPCIÓN DEL DOLOR.

| Variable                      | P-Value |
|-------------------------------|---------|
| Criterio de inclusión Inicial | 0.030   |
| $\Delta$ Puntaje              | 0.855   |
| $\Delta$ Tiempo Máximo        | 0.320   |

#### C. Análisis cualitativo.

Al finalizar las diez sesiones, cada usuario completó una encuesta compuesta por tres secciones, con respuestas de selección múltiple basadas en la escala de Likert.

La primera sección evaluó el desempeño de la aplicación en términos de funcionalidad y diseño del entorno virtual. En general, los resultados fueron positivos, con una mayoría de respuestas calificando el funcionamiento, el diseño y la información de apoyo como excelentes o buenos.



Fig 21. Perspectivas de usuarios respecto a su evolución y dificultad de los

ejercicios en la plataforma.

La segunda sección se centró en la percepción del usuario respecto a la dificultad de los ejercicios y la mejora en su movilidad. Los resultados indicaron que la mayoría de los participantes percibieron una evolución positiva en su desempeño. Sin embargo, se identificó que el ejercicio más desafiante fue el relacionado con la rotación o con movimientos combinados, como el Reloj (Fig. 21).

#### IV. CONCLUSIONES

Este artículo presentó una plataforma diseñada para medir y mejorar los rangos de movilidad del hombro a través de ejercicios en un entorno de realidad virtual. Desarrollada en Unity 3D y compatible con el casco Oculus Quest 2, la herramienta permite una evaluación precisa del estado inicial del usuario sin la necesidad de dispositivos externos. Los resultados obtenidos durante las pruebas con voluntarios, seleccionados en colaboración con expertos en fisioterapia, indican que la plataforma es eficaz para capturar los rangos de movilidad y en proporcionar datos comparables con los métodos manuales tradicionales.

La herramienta no solo evalúa el rango de movilidad del hombro, sino que también ofrece actividades de entrenamiento que podrían contribuir a la mejora de dicho rango. Aunque la ausencia de dispositivos externos limitó la capacidad de la plataforma para capturar rangos máximos, con un tope de 155 grados de flexión del hombro, una limitación de hardware debida a la ubicación de los mandos que podría no ser captada por las cámaras del dispositivo, como se observa en [22], los usuarios experimentaron mejoras en sus movimientos. Esto sugiere la viabilidad de la plataforma como complemento en procesos de rehabilitación.

En resumen, este desarrollo demuestra que la implementación de una plataforma de realidad virtual para la rehabilitación del hombro es una herramienta posiblemente viable y efectiva. La evolución positiva observada en la mayoría de los usuarios participantes y el análisis de correlación realizado validan el uso de esta tecnología en el fortalecimiento de los miembros superiores. Además, la plataforma no solo mejoró los rangos de movilidad, sino que también impactó positivamente en la percepción del dolor y la experiencia general de los usuarios en su proceso de rehabilitación. Como trabajos futuros, se sugiere la ampliación de la plataforma con algoritmos que permitan la adaptación dinámica de la dificultad del ejercicio en función del rendimiento. Del mismo modo, incorporar tecnología de seguimiento de manos y dispositivos de realidad virtual de nueva generación en el proceso de captura de movimiento, con el fin de ofrecer datos de seguimiento más precisos y así desarrollar herramientas para la producción automática de informes clínicos y técnicas de análisis de datos para identificar tendencias de recuperación.

#### REFERENCIAS

- [1] H. V. Guerrero Guerrero, S. L. Pazmiño Alava, M. M. Zambrano Rivera, y R. E. Delgado Mendoza, «Hallazgos epidemiológicos, clínicos y ecográficos en pacientes con enfermedades del manguito rotador. Hospital Docente Saturnino Lora. Santiago de Cuba. 2018-2020.», *Dilemas Contemp. Educ. Política Valores*, ene. 2023, doi: 10.46377/dilemas.v2i10.3570.
- [2] S. Castellanos-Madrigal, E. Magdaleno-Navarro, V. Herrera-Rodríguez, M. D. García, y O. Torres-Bugarín, «Lesión del manguito rotador: diagnóstico, tratamiento y efecto de la facilitación neuromuscular propioceptiva», *El Resid.*, vol. 15, n.º 1, pp. 19-26, 2020, doi: 10.35366/94039.
- [3] M. Murie-Fernández, M. Carmona Iragui, V. Gnanakumar, M. Meyer, N. Foley, y R. Teasell, «Hombro doloroso hemipléjico en pacientes con ictus: causas y manejo», *Neurología*, vol. 27, n.º 4, pp. 234-244, may 2012, doi: 10.1016/j.nrl.2011.02.010.
- [4] A. V. L. De Araújo, J. F. D. O. Neiva, C. B. D. M. Monteiro, y F. H. Magalhães, «Efficacy of Virtual Reality Rehabilitation after Spinal Cord Injury: A Systematic Review», *BioMed Res. Int.*, vol. 2019, pp. 1-15, nov. 2019, doi: 10.1155/2019/7106951.
- [5] M. A. Just, P. J. Stapley, M. Ros, F. Naghdy, y D. Stirling, «A comparison of upper limb movement profiles when reaching to virtual and real targets using the Oculus Rift: implications for virtual-reality enhanced stroke rehabilitation», 2014, doi: 10.13140/2.1.1663.0560.
- [6] M. F. Pereira, C. Prahm, J. Kolbenschlag, E. Oliveira, y N. F. Rodrigues, «Application of AR and VR in hand rehabilitation: A systematic review», *J. Biomed. Inform.*, vol. 111, p. 103584, nov. 2020, doi: 10.1016/j.jbi.2020.103584.
- [7] C. TABOADELA, *Goniometría: una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales*, vol. 1, 1 vols. Asociart ART, 2007. [https://dspace.itsjapon.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/4470/1/GONIO METR%C3%82DA.pdf](https://dspace.itsjapon.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/4470/1/GONIO%20METR%C3%82DA.pdf)
- [8] A. Carnevale *et al.*, «Performance Evaluation of an Immersive Virtual Reality Application for Rehabilitation after Arthroscopic Rotator Cuff Repair», *Bioengineering*, vol. 10, n.º 11, p. 1305, nov. 2023, doi: 10.3390/bioengineering10111305.
- [9] U. G. Longo *et al.*, «Immersive virtual reality for shoulder rehabilitation: evaluation of a physical therapy program executed with oculus quest 2», *BMC Musculoskelet. Disord.*, vol. 24, n.º 1, p. 859, nov. 2023, doi: 10.1186/s12891-023-06861-5.
- [10] K. Mejia-Hernandez, A. Chang, N. Eardley-Harris, R. Jaarsma, T. K. Gill, y J. M. McLean, «Smartphone applications for the evaluation of pathologic shoulder range of motion and shoulder scores—a comparative study», *JSES Open Access*, vol. 2, n.º 1, pp. 109-114, mar. 2018, doi: 10.1016/j.jses.2017.10.001.
- [11] D. Sahu, D. Shah, M. Joshi, S. Shaikh, P. Gaikwad, y A. Shyam, «Validation of an on-screen application-based measurement of shoulder range of motion over telehealth medium», *J. Shoulder Elbow Surg.*, vol. 31, n.º 1, pp. 201-208, ene. 2022, doi: 10.1016/j.jse.2021.06.017.
- [12] J. F. Villada Castillo *et al.*, «Design of Virtual Reality Exergames for Upper Limb Stroke Rehabilitation Following Iterative Design Methods: Usability Study», *JMIR Serious Games*, vol. 12, p. e48900, ene. 2024, doi: 10.2196/48900.
- [13] S. Altukhaim, N. Sakabe, K. Nagaratnam, N. Mannava, T. Kondo, y Y. Hayashi, «Immersive virtual reality enhanced reinforcement induced physical therapy (EVEREST)», *Displays*, vol. 87, p. 102962, abr. 2025, doi: 10.1016/j.displa.2024.102962.
- [14] M. M. R. Khan, M. I. I. Zarif, A. Pillai, I. Wang, y M. H. Rahman, «Investigating a Telerehabilitation Platform Integrated With a Rehabilitation Robot Using Microsoft HoloLens 2 for Upper-Limb Therapy: Pilot Usability Study», *JMIR Rehabil. Assist. Technol.*, vol. 12, pp. e75907-e75907, oct. 2025, doi: 10.2196/75907.
- [15] A. M. AlHossan *et al.*, «Digital and virtual reality-based rehabilitation versus conventional therapy for rotator cuff tears and post-repair recovery: a systematic review and meta-analysis», *JSES Rev. Rep. Tech.*, vol. 6, n.º 1, p. 100584, feb. 2026, doi: 10.1016/j.xrrt.2025.09.003.
- [16] T. Rivière, T. Hulin, F. Sasangohar, y M. Zare, «Serious Games for Preventing Musculoskeletal Disorders in Occupational Settings: Scoping Review», *JMIR Serious Games*, vol. 13, p. e66913, oct. 2025, doi: 10.2196/66913.
- [17] L. Goudman *et al.*, «Virtual Reality Applications in Chronic Pain Management: Systematic Review and Meta-analysis», *JMIR Serious Games*, vol. 10, n.º 2, p. e34402, may 2022, doi: 10.2196/34402.

- [18] A. Caicedo Viveros, L. C. Díaz Villegas, y D. A. Oveira Pulido, «Deserción de pacientes en terapias de rehabilitación física, ocupacional y fonoaudiología de la IPS Unidad Fisioterapéutica de Occidente de la Ciudad de Popayán», Especialización, Universidad Católica de Manizales. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucm.edu.co/handle/10839/2280>
- [19] J. Reyes Zamora y H. M. Revelo Reyes, «Estudio del impacto del accidente cerebrovascular en la funcionalidad de pacientes atendidos en las áreas de rehabilitación física del Ministerio de Salud Pública de la ciudad de Ibarra», Universidad Técnica del Norte, Imbabura. Ecuador., 2018. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8446>
- [20] A. Hernández Páez, J. A. Domínguez Falcón, y A. A. Pi Cruz, «Arquitectura de software para el desarrollo de videojuegos sobre el motor de juego Unity 3D», *ID Tecnológico*, vol. 14, n.º 1, pp. 54-65, jun. 2018, doi: 10.33412/idt.v14.1.1803.
- [21] Y. Shi y Q. Peng, «A VR-based user interface for the upper limb rehabilitation», *Procedia CIRP*, vol. 78, pp. 115-120, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.311.
- [22] B. Dejaco, L. D. De Jong, H. Van Goor, J. B. Staal, N. Stolwijk, y J. Lewis, «The concurrent validity and reliability of virtual reality to measure shoulder flexion and scaption range of motion», *Physiotherapy*, vol. 120, pp. 95-102, sep. 2023, doi: 10.1016/j.physio.2023.06.005.



**Juan Pablo Arango Dorado.** Ingeniero en Automática Industrial, Universidad del Cauca, Colombia, 2023. Candidato a magíster en automática de la Universidad del Cauca. Sus áreas de interés incluyen el control avanzado, la automatización y la aplicación de tecnologías inmersivas en la rehabilitación.  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4263-2441>.



**David Mateo Martínez Rodríguez.** Ingeniero en Automática Industrial, Universidad del Cauca, Colombia, 2024. Sus áreas de interés incluyen el diseño de interfaces de usuario, auditoría de sistemas y la implementación de tecnologías de realidad virtual en procesos de rehabilitación.  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4053-0288>.



**Oscar Andrés Vivas Albán.** Ingeniero electrónico, Universidad del Cauca, Colombia, 1989. Magíster en Automática, Ecole Centrale de Nantes, Francia, 2001. Doctor en Robótica, Université de Montpellier II, Francia, 2004. Profesor titular de la Universidad del Cauca, Colombia. Sus áreas de interés son la robótica médica, la robótica quirúrgica y el control y modelado de robots.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5381-8234>.