

Training in Critical and Emergency Contexts using Virtual and Augmented Reality: A Systematic Review

Castañeda Huaytalla, Gabriel Ángel¹, Siancas Sánchez, Bryans Abraham²,
Ibáñez Estrella, José Luis³, Rueda Ñopo, Melisa Isabel⁴

¹Gabriel Ángel' Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u19202440@utp.edu.pe

²Bryans Abraham' Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u21232482@utp.edu.pe

³José Luis' Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c31477@utp.edu.pe

⁴Melisa Isabel' Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c18750@utp.edu.pe

Abstract– This study investigated the effectiveness, challenges, and implementation opportunities of Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) technologies in training individuals exposed to emergencies in critical contexts; to this end, a Systematic Literature Review (SLR) was conducted using the PICOC framework and the PRISMA 2020 protocol, searching Scopus, IEEE Xplore, and Web of Science for articles published between January 2020 and April 2025. A total of 665 records were initially retrieved, from which 60 studies were selected after duplicate removal and PICOC-based screening, with references managed in Mendeley and bibliometric analysis performed using the Bibliometrix package in RStudio. Results showed that VR consistently enhances technical skills, knowledge retention, and error reduction compared to traditional methods; in addition, AR optimizes precision in fine motor tasks via real-time contextual overlay, while Extended/Mixed Reality (XR/MR) solutions emerge as promising hybrid alternatives for collaborative decision-making and cognitive load reduction, albeit constrained by technical complexity and a lack of long-term validation; furthermore, significant methodological heterogeneity and the exclusion of users with disabilities were identified. In conclusion, VR and AR deliver clear benefits for emergency training and XR/MR holds potential for collaborative scenarios, prompting recommendations to standardize evaluation protocols with comparable metrics, promote longitudinal studies to assess learning persistence, and design inclusive interfaces that incorporate advanced haptics and physiological monitoring.

Keywords-- Virtual Reality, Augmented Reality, emergency training, critical contexts, Systematic Review

Capacitación en contextos críticos y de emergencias mediante realidad virtual y aumentada: Revisión sistemática

Resumen— En este estudio se exploró la efectividad, los desafíos y las oportunidades de implementación de tecnologías de Realidad Virtual (RV) y Realidad Aumentada (RA) en la capacitación de personas expuestas a emergencias en contextos críticos; para ello, se realizó una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) bajo el marco PICOC y el protocolo PRISMA 2020, consultando Scopus, IEEE Xplore y Web of Science para artículos publicados entre enero 2020 y abril 2025. Se recuperaron inicialmente 665 registros, de los cuales, tras eliminar duplicados y aplicar cribado y criterios de elegibilidad basados en PICOC, se seleccionaron 60 estudios cuyos datos se gestionaron con Mendeley y se analizaron bibliométricamente con Bibliometrix en RStudio. Los hallazgos revelaron que la RV mejora de forma consistente las habilidades técnicas, la retención del conocimiento y la reducción de errores frente a métodos tradicionales; asimismo, la RA optimiza la precisión en tareas motoras finas mediante superposición contextual en tiempo real, mientras que las soluciones de Realidad Extendida/Mixta (XR/MR) emergen como alternativas híbridas prometedoras para la toma de decisiones colaborativas y la disminución de la carga cognitiva, aunque su complejidad técnica y falta de validación longitudinal limitan su adopción; además, se detectó una elevada heterogeneidad metodológica y la omisión de poblaciones con discapacidad en muchos estudios. En conclusión, la RV y la RA ofrecen beneficios claros para la formación en emergencias y la XR/MR muestra potencial en escenarios colaborativos, por lo que se recomienda estandarizar protocolos de evaluación con métricas comparables, fomentar estudios longitudinales que midan la persistencia del aprendizaje y diseñar interfaces inclusivas que integren hápticos avanzados y seguimiento fisiológico. Palabras clave— Realidad Virtual, Realidad Aumentada, capacitación en emergencias, contextos críticos, Revisión Sistemática

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos diez años, las tecnologías de Realidad Virtual (RV) y Realidad Aumentada (RA) han cobrado creciente relevancia en la formación para entornos críticos y de emergencias se proyecta que el mercado global de capacitación en seguridad mediante RV alcance los USD 2.31 mil millones para 2033 (CAGR 15.5 %) [1]; en la industria minera, la RV simula condiciones adversas de manera segura y eficiente, optimizando la seguridad operativa y la formación de los trabajadores [2], y en espacios confinados industriales estas plataformas han demostrado una mayor transferencia de conocimientos y reducción de errores según el modelo de Kirkpatrick [3]; asimismo, la RV ha mejorado la comunicación de riesgos en desastres naturales con aceptación ligada a la experiencia previa en videojuegos y la usabilidad percibida [4], mientras que la RA en primera persona incrementa la percepción de vulnerabilidad y fomenta intenciones proactivas y, en tercera persona, refuerza la conciencia situacional [5]; en capacitación sanitaria, los entrenamientos de RCP basados en RV/RA igualan la calidad de las compresiones y el desempeño global de la formación presencial [6], en entornos bélicos la combinación de ambas tecnologías refuerza la confianza y resiliencia de equipos prehospitales de reserva [7], y para estudiantes de enfermería en medicina de desastres estas herramientas potencian habilidades prácticas y conocimiento

teórico [8]; adicionalmente, la RV ha superado a métodos convencionales en sectores como construcción, aviación y minería [9], la integración de BIM 4D con RV ha incrementado la identificación de errores en secuencias constructivas [10], y en educación física universitaria las “aulas deportivas” basadas en RV han aumentado la participación estudiantil sin alterar significativamente el rendimiento físico directo [11]. No obstante, la literatura presenta vacíos que limitan la adopción óptima de RV y RA en contextos críticos: falta de formalización de sistemas de emergencia y omisión de usuarios con discapacidad en simulaciones de evacuación [12][13]; ausencia de estudios longitudinales sobre el impacto real a largo plazo [14]; escasa atención a la recuperación post-incidente y la incorporación de lecciones aprendidas [15]; desafíos en las interfaces de usuario y carencia de plataformas estandarizadas en entrenamientos médicos de emergencia [16][18]; desconocimiento de cómo varían los resultados de XR en triage según niveles de inmersión y experiencia subjetiva [17]; heterogeneidad metodológica que impide la comparación directa de resultados [9][18]; y falta de evidencia sobre la transferencia de la reducción de carga cognitiva bajo estrés y variables de accesibilidad y usabilidad [4][21][23]. Motivados por estos vacíos, esta Revisión Sistemática de Literatura (RSL) consolidará la información dispersa sobre RV y RA en contextos críticos minería, salud, construcción y gestión de desastres [2][15], e incluirá ejemplos de colaboración internacional, como el uso de RV/RA en anatomía y emergencias durante la pandemia entre Stanford y la Universidad Masinde Muliro [19], para identificar patrones comunes y oportunidades de transferencia tecnológica que sirvan de base al diseño de plataformas estandarizadas y soluciones replicables [20][22]. El objetivo de esta RSL es explorar la efectividad, los desafíos y las oportunidades de implementación de RV y RA en la capacitación para contextos críticos y de emergencias, y el documento se organiza así: sección 2 detalla la metodología de búsqueda, selección y análisis; sección 3 presenta los resultados por sector; sección 4 discute hallazgos, brechas y retos; y sección 5 ofrece conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones y desarrollo de plataformas estandarizadas.

II. METODOLOGÍA

Esta investigación adoptó el enfoque de una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) con el objetivo de identificar, evaluar y sintetizar evidencia científica sobre la efectividad de tecnologías inmersivas frente a métodos tradicionales en la capacitación de personas expuestas a emergencias en contextos críticos. Se empleó el marco PICOC (Población, Intervención, Comparación, Resultado, Contexto), el cual facilitó la

formulación estructurada de la pregunta de investigación y la definición de términos clave [24]. Asimismo, se aplicó el protocolo PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantizar transparencia, trazabilidad y reproducibilidad en cada fase del proceso de selección (identificación, cribado, elegibilidad e inclusión) [25]. La búsqueda incluyó artículos publicados entre enero de 2020 y diciembre de 2025, limitándose a estudios en acceso abierto, y que cumplieran con los criterios preestablecidos. Tras el proceso de filtrado y evaluación, se incluyeron 60 estudios en el análisis final.

A. Estrategia PICOC y formulación de la pregunta

La estrategia de búsqueda constituye un procedimiento sistemático que permite identificar estudios relevantes en una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL); para el desarrollo de esta investigación se adoptó el marco PICOC (Población, Intervención, Comparación, Outcome, Contexto) como herramienta estructurante, siguiendo las recomendaciones metodológicas establecidas en la literatura científica para garantizar claridad, pertinencia y exhaustividad [24].

En primer lugar, se formuló la pregunta principal de investigación a partir de la identificación de cada uno de los componentes del modelo PICOC, lo cual facilitó la delimitación conceptual y temática del estudio y aseguró que la revisión respondiera a un objetivo concreto y relevante para la comunidad científica y práctica:

Cuestionamiento: *¿Qué tan efectivas son las tecnologías inmersivas (realidad virtual, aumentada o mixta) en comparación con métodos tradicionales de formación, para capacitar a personas expuestas a emergencias en contextos críticos como salud, industria, minería, construcción, aviación o defensa en términos de mejora del aprendizaje, retención de conocimientos, toma de decisiones, conciencia situacional y reducción del tiempo de respuesta?*

En segundo lugar, a partir de esta pregunta central, se desarrollaron cinco subpreguntas de investigación (RQ1–RQ5). Estas permiten abordar aspectos más específicos relacionados con la población, las tecnologías utilizadas, los métodos comparativos, los resultados observados y los contextos de implementación. Además, estas subpreguntas sirvieron como guía para el proceso de cribado en la metodología PRISMA [25], facilitando una selección más precisa de los estudios en función de los criterios de inclusión y exclusión establecidos, siendo formuladas las siguientes:

RQ1: *¿Quiénes conforman la población objetivo (personal sanitario, militar, estudiantes, bomberos, rescatistas, trabajadores industriales o comunidades vulnerables)?*

RQ2: *¿Qué tecnologías inmersivas (VR, AR, MR) se implementan y con qué características?*

RQ3: *¿Qué métodos tradicionales se emplean como comparadores?*

RQ4: *¿Qué indicadores de efectividad se reportan y con qué resultados?*

RQ5: *¿En qué contextos se llevan a cabo las capacitaciones?*

En tercer lugar, se definieron los términos clave asociados a cada componente del modelo PICOC. Estos términos fueron empleados en la construcción de las ecuaciones de búsqueda

utilizadas en las distintas bases de datos académicas, tal como se presenta en la Tabla I.

TABLA I
COMPONENTES PICOC Y TÉRMINOS CLAVE

Componente	Descripción	Keyword
P (Población)	Sujetos expuestos a escenarios críticos	"healthcare professional*" OR "medical staff" OR "clinical personnel" OR student* OR trainee* OR worker* OR staff OR clinician* OR physician* OR "medical personnel" OR paramedic* OR firefighter* OR rescuer* OR "first responder*" OR "emergency responder*" OR military OR "prehospital team*" OR "emergency personnel"
I (Intervención)	Programas de capacitación aplicados mediante tecnologías inmersivas	"virtual reality" OR "augmented reality" OR "mixed reality" OR "extended reality" OR "immersive simulat*" OR "immersive technolog*" OR "serious game"
C (Comparación)	Métodos convencionales de capacitación utilizados en la formación.	"traditional training" OR "conventional method*" OR "classroom training" OR "mannequin training" OR "physical simulator*" OR "real world environment*" OR "standard training" OR "comparison with traditional" OR "comparative study"
O (Resultados esperados)	Indicadores de efectividad	skill* OR competenc* OR "decision making" OR performance OR effectiv* OR outcome* OR learn* OR knowledge OR "response time" OR retention OR "situational awareness" OR preparedness OR efficacy OR benefit* OR "accident prevention" OR safety OR "clinical competence" OR "patient triage" OR "perceived stress" OR "simulation sickness"
C (Contexto)	Entornos reales o simulados asociados a la atención de emergencias, desastres o escenarios de alto riesgo.	emergenc* OR disaster* OR safety OR evacuation OR prehospital OR "mass casualty" OR trauma OR "critical care" OR firefight* OR rescue OR hazard* OR accident* OR construction OR mining OR aviation OR military OR healthcare OR "built environment" OR industrial OR hospital OR "crisis management" OR "high-risk environment*" OR "disaster medicine"

B. Fuentes, periodo y ecuación de búsqueda

Se llevaron a cabo búsquedas avanzadas el 20 de abril de 2025 a las 11:34 a.m., en tres bases de datos científicas de alto impacto: Scopus, IEEE Xplore y Web of Science. La estrategia de búsqueda se construyó a partir de los términos clave definidos en la Tabla 1, los cuales fueron combinados mediante operadores booleanos (AND y OR) para maximizar la recuperación de estudios relevantes. Los resultados se limitaron a artículos científicos (DOCTYPE: "article") publicados en acceso abierto ("all") entre los años 2020 y 2025 (PUBYEAR > 2019 AND < 2026), y en etapa de publicación final (PUBSTAGE: "final").

A continuación, se presenta la ecuación general utilizada en las búsquedas, aplicada específicamente en la base de datos Scopus:

(TITLE-ABS-KEY ("healthcare professional*" OR "medical staff" OR "clinical personnel" OR student* OR trainee* OR worker* OR staff OR clinician* OR physician* OR "medical personnel" OR paramedic* OR firefighter* OR rescuer* OR "first responder*" OR "emergency responder*" OR military OR "prehospital team*" OR "emergency personnel"

) AND TITLE-ABS-KEY ("virtual reality" OR "augmented reality" OR "mixed reality" OR "extended reality" OR "immersive simulat*" OR "immersive technol*" OR "serious game*") AND TITLE-ABS-KEY ("traditional training" OR "conventional method*" OR "classroom training" OR "mannequin training" OR "physical simulator*" OR "real world environment*" OR "standard training" OR "comparison with traditional" OR "comparative study") AND TITLE-ABS-KEY (skill* OR competenc* OR "decision making" OR performance OR effectiv* OR outcome* OR learn* OR knowledge OR "response time" OR retention OR "situational awareness" OR preparedness OR efficacy OR benefit* OR "accident prevention" OR safety OR "clinical competence" OR "patient triage" OR "perceived stress" OR "simulation sickness") AND TITLE-ABS-KEY (emergenc* OR disaster* OR safety OR evacuation OR prehospital OR "mass casualty" OR trauma OR "critical care" OR firefight* OR rescue OR hazard* OR accident* OR construction OR mining OR aviation OR military OR healthcare OR "built environment" OR industrial OR hospital OR "crisis management" OR "high-risk environment*" OR "disaster medicine")) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar"))AND (LIMIT-TO(PUBSTAGE, "final"))AND (LIMIT-TO(OA, "all"))

C. Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios se definieron a partir del marco PICOC. Las Tablas 2 y 3 resumen respectivamente los criterios de inclusión (CI1–CI6) y exclusión (CE1–CE5) aplicados:

TABLA II
CRITERIOS DE INCLUSION

Ítem	Criterio
CI1	Publicaciones que incluyan personal expuesto o potencialmente expuesto a emergencias, como profesionales de la salud, estudiantes, militares, bomberos, rescatistas, trabajadores industriales
CI2	Publicaciones que usen tecnologías inmersivas como VR, AR, MR, XR, simulaciones interactivas para capacitación.
CI3	Publicaciones que comparen métodos tradicionales de formación mediante instrucción presencial, simulacros, clases, charlas.
CI4	Publicaciones que evalúen la efectividad del entrenamiento en adquisición de habilidades, toma de decisiones, conciencia situacional, percepción del riesgo, tiempo de respuesta, preparación y desempeño.
CI5	Publicaciones aplicadas a escenarios de desastres naturales, accidentes industriales, atención prehospitalaria, crisis clínicas, sectores como construcción, minería, fuerzas armadas y comunidades vulnerables.
CI6	Publicaciones publicadas entre 2020 y 2025, obtenidas mediante búsqueda estructurada con términos clave y operadores booleanos.

TABLA III
CRITERIOS DE EXCLUSION

Ítem	Criterio
CE1	Publicaciones anteriores a 2020.
CE2	Publicaciones sin acceso abierto (Open Access).
CE3	Publicaciones que no sean artículos originales o que correspondan a revisiones, editoriales u otros documentos sin resultados empíricos.
CE4	Temas no alineados con la pregunta de investigación como ausencia de tecnologías inmersivas; enfoques sociales, culturales, médicos, técnicos o administrativos no vinculados a la capacitación en emergencias.
CE5	Contenido impreciso, vago o fuera del alcance temático definido.

D. Proceso de selección: protocolo PRISMA 2020

Como se muestra en la Fig.1, se implementó el protocolo PRISMA 2020, el cual establece 27 ítems destinados a garantizar la presentación transparente y rigurosa de revisiones sistemáticas de la literatura [2]. Este procedimiento se estructuró en cuatro fases: identificación, cribado, evaluación de elegibilidad e inclusión final. Todas las decisiones fueron registradas mediante un diagrama de flujo conforme al estándar PRISMA. En la fase de identificación, se recopilaron 665

artículos provenientes de Scopus, IEEE Xplore y Web of Science. Tras la eliminación de 44 registros duplicados, se obtuvieron 621 documentos únicos para su evaluación inicial. Durante el cribado, se analizaron títulos y resúmenes con base en los criterios de exclusión (CE1–CE5), lo que resultó en la exclusión de 486 estudios que no cumplían con los requisitos establecidos. Posteriormente, se buscaron para recuperación 135 informes a texto completo, de los cuales no se logró recuperar 31, quedando 104 informes para su evaluación detallada. De estos, se excluyeron 44 por no cumplir con los criterios PICOC: 30 por tratarse de contextos no críticos, 7 por no corresponder a intervenciones formativas y 7 por referirse a contextos irrelevantes. Finalmente, 60 estudios cumplieron con todos los criterios de elegibilidad y fueron incluidos en la revisión sistemática de la literatura (RSL).

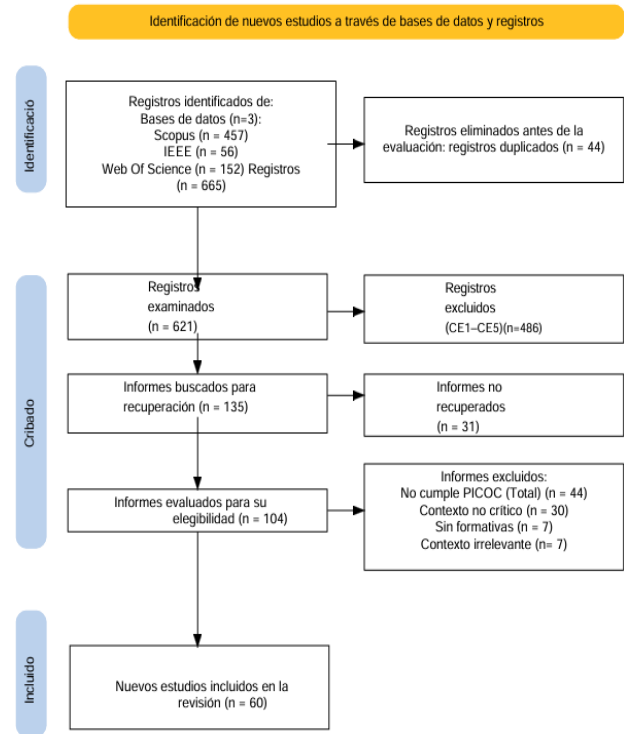


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA

III. RESULTADO

A. Estructuración de la información y análisis bibliométrico

Esta sección presenta los resultados obtenidos a partir del análisis de los 60 artículos científicos seleccionados mediante el protocolo PRISMA, los cuales abordan el uso de RA y RV en procesos de capacitación en contextos críticos y de emergencia. Para ello, las referencias fueron gestionadas y organizadas mediante la herramienta Mendeley, lo que permitió estructurar de forma ordenada la base documental. Posteriormente, con el propósito de caracterizar cuantitativamente la producción científica identificada, se llevó a cabo un análisis bibliométrico utilizando las librerías del paquete Bibliometrix en RStudio, a partir del cual se generaron los gráficos y tablas que sintetizan indicadores clave, tales como el impacto por citación, la evolución temporal de las

publicaciones y la distribución geográfica de la producción científica. A continuación, se presentan los resultados acompañados de los gráficos generados:

La Figura 2, muestra una distribución asimétrica de citas entre los 60 artículos analizados, con un promedio de 16.3 citas por publicación. El artículo con mayor número de citas corresponde a Jeelani et al. (2020) [30], con 112 citas, seguido por Xu y Zheng (2021) [39], con 81 citas, y Lerner et al. (2020) [31], con 77 citas. En contraste, diez artículos [63], [69], [70], [73], [78], [80], [81], [82], [83], [85] no registran ninguna cita hasta la fecha de corte, lo que refleja una concentración del impacto académico en un conjunto reducido de estudios

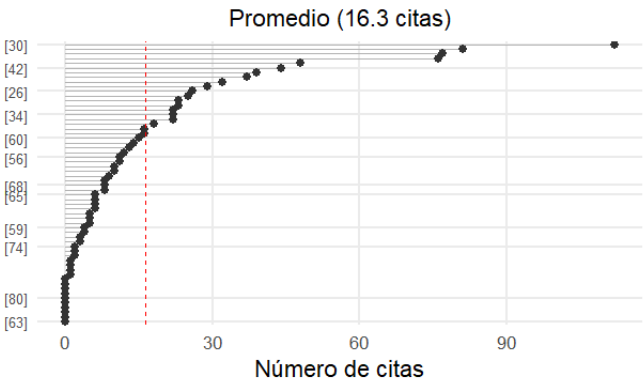


Fig. 2 Citaciones por artículo (n=60).

La Figura 3, presenta la evolución anual de publicaciones sobre realidad virtual y aumentada aplicadas a la capacitación en contextos críticos y de emergencias, entre 2020 y 2025. En 2020 se registraron 10 artículos, cifra que descendió a 7 en 2021 y a 6 en 2022, marcando una tendencia decreciente inicial. A partir de 2023, con 12 publicaciones, se observa un repunte sostenido que alcanza su punto máximo en 2024 con 15 artículos. En 2025, la producción se encuentra aún en 10. Este patrón refleja un renovado interés en el tema en los últimos años, tras una caída temporal entre 2020 y 2022.

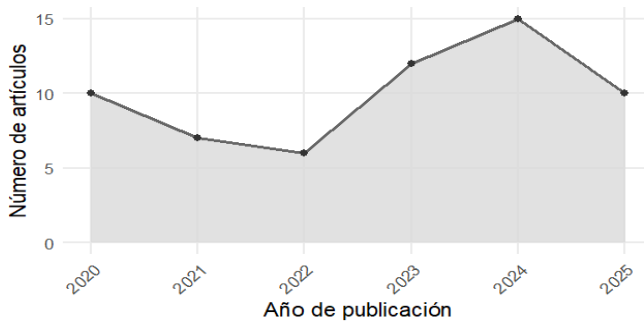


Fig. 3 Volumen anual de publicaciones (n=60).

La Figura 4 y la Tabla IV presentan la distribución geográfica de las publicaciones incluidas en esta revisión. Se evidencia una marcada concentración en América del Norte, Europa Occidental y Asia Oriental. Estados Unidos encabeza la producción científica con 11 artículos y 230 citas, seguido por Italia (7 artículos, 137 citas), China (6) y Australia (4, con 136 citas). La Tabla IV resume los países con mayor volumen e impacto, considerando el número de publicaciones, citas

acumuladas y fuerza relativa. En contraste, se observa una baja representación de regiones como América Latina, África Subsahariana y el Sudeste Asiático. Esta distribución pone de manifiesto desigualdades en la producción científica sobre RA y RV aplicadas a la capacitación en contextos críticos, posiblemente asociadas a diferencias en infraestructura tecnológica, inversión y prioridades académicas regionales. En total, los artículos analizados se distribuyen entre más de 25 países, aunque con una clara concentración en ciertos núcleos científicos.

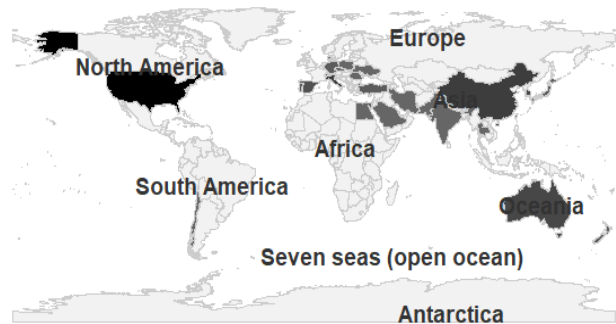


Fig. 4 Distribución geográfica de publicaciones (n=60).

TABLA IV
DISTRIBUCIÓN DE DOCUMENTOS POR PAÍS

País	Artículos	Citas	Fuerza
Estados Unidos	11	230	11
Italia	7	137	7
China	6	64	6
Australia	4	136	4
España	3	24	3
Corea del Sur	3	12	3
Nueva Zelanda	2	55	2
Alemania	2	80	2
Japón	2	14	2
Francia	2	22	2
Portugal	2	14	2

B. Síntesis de la información

A partir del análisis de los artículos incluidos en la RSL, se presenta una síntesis orientada a responder las subpreguntas planteadas en el esquema PICOC.

RQ1: ¿Quiénes conforman la población objetivo (personal sanitario, militar, estudiantes, bomberos, rescatistas, trabajadores industriales o comunidades vulnerables)?

En respuesta a la RQ1, la literatura revisada revela una clara sectorización en la población objetivo, organizada en siete grupos principales (véase Tabla V). Sin embargo, un análisis crítico de estos datos expone una asimetría metodológica significativa según el perfil del usuario. Por un lado, las poblaciones de estudiantes universitarios [33, 41, 45, 46, 50, 52, 56, 58, 60, 64, 66, 71, 77, 78, 82, 83, 85] y personal sanitario clínico [26, 31, 32, 35, 42, 43, 47, 61, 62, 67, 70, 73, 74, 79] concentran el mayor volumen de la investigación y los diseños metodológicos más robustos (predominancia de Ensayos Controlados Aleatorizados - RCT, Niveles de Evidencia Ib y IIb), alcanzando muestras amplias que superan los 100 y hasta 500 participantes. Por otro lado, los sectores tácticos y operativos de primera línea tales como militares [27, 34, 44, 63], bomberos y equipos de emergencias [51, 54, 75,

81], y trabajadores o técnicos industriales [28, 29, 30, 36, 37, 39, 49, 53, 55, 57, 59, 65, 72, 76, 80, 84] presentan una fuerte dependencia de estudios piloto y diseños cuasi-experimentales (Niveles III y IV) con muestras menores a 30.

Tabla V
CARACTERIZACIÓN DE LA POBLACIÓN OBJETIVO

Población Objetivo	Perfil	Muestra (n)	Diseño del Estudio	Nivel de Evidencia
Universitarios [33, 41, 45, 46, 50, 52, 56, 58, 60, 64, 66, 71, 77, 78, 82, 83, 85]	Estudiantes de medicina, enfermería e ingeniería. Mayoría sin experiencia clínica.	21 – 518	RCT y Cuasi-experimentales.	Ib, IIb, III
Personal Sanitario [26, 31, 32, 35, 42, 43, 47, 61, 62, 67, 70, 73, 74, 79]	Médicos, residentes y enfermeros. Niveles de experiencia mixtos (novatos a expertos).	18 – 128	RCTs, Estudios Observacionales y de Cohorte.	Ib, IIb, III, IV, V
Trabajadores Industriales [28, 29, 30, 37, 39, 49, 55, 57, 59, 65, 72, 76, 80, 84]	Operarios y técnicos de manufactura, construcción y energía. Experiencia variada.	3 – 124	Cuasi-experimentales, (RCT) y Estudios Piloto.	Ib, IIb, III, IV
Militares [27, 34, 44, 63]	Cadetes y médicos militares. Desde sin experiencia hasta 17 años de servicio.	12 – 132	RCT y Experimentales/Observacionales.	Ib, IIb, III
Bomberos y Emergencias [51, 54, 75, 81]	Bomberos operativos y en formación; líderes de protección civil. Experiencia media.	11 – 32	RCT y Experimentales intra-sujetos.	Ib, IIb
Público General / Escolar [38, 40, 48, 68, 69]	Estudiantes y ciudadanos en espacios públicos. Sin formación previa en salud/emergencias.	45 – 401	Principalmente RCTs y protocolos.	Ib
Técnicos Especializados [36, 53, 76]	Pilotos y técnicos eléctricos. Formación dependiente de la industria específica.	15 – 124	RCT y Cuasi-experimentales.	Ib, I

RQ2: ¿Qué tecnologías inmersivas (VR, AR, MR) se implementan y con qué características?

En respuesta a la RQ2, la evaluación de las tecnologías inmersivas implementadas revela una marcada hegemonía de la Realidad Virtual (VR) en los procesos de capacitación frente a otras soluciones (véase Tabla VI). La adopción mayoritaria de la VR [27, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 38, 39, 43, 45, 46, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 60, 61, 63, 64, 65, 69, 71, 73, 74, 75, 78, 79, 82, 84, 85] se explica por la accesibilidad comercial y madurez de herramientas como Oculus o HTC Vive, las cuales permiten recrear escenarios clínicos o industriales con gamificación guiada y a costos decrecientes. Sin embargo, desde una perspectiva crítica, el principal obstáculo de estas plataformas sigue siendo la carencia de interfaces hápticas avanzadas. Esta limitación restringe severamente el realismo de la interacción física, lo que sugiere que la VR actual es altamente efectiva para entrenar la toma de decisiones y procesos cognitivos espaciales, pero aún es deficiente para la consolidación de habilidades motoras complejas. Por otro lado, la Realidad Aumentada (AR) [41, 49, 58, 62, 66, 72] aborda el entrenamiento desde una aproximación in-situ, optimizando la superposición de datos y la asistencia remota sin aislar al usuario de su entorno. No obstante, su integración clínica o industrial se ve obstaculizada por desafíos técnicos críticos, tales como la dependencia de una conectividad de red estable, errores de desalineación virtual-real y una pronunciada curva de aprendizaje

técnico inicial. Paralelamente, los sistemas de Realidad Mixta y Extendida (MR/XR) [34, 42, 44, 80, 81] representan la evolución natural hacia simulaciones colaborativas dinámicas; aun así, su escalabilidad a corto plazo está limitada por la alta complejidad de implementación y la ausencia de validación sobre su eficacia longitudinal. Finalmente, el empleo marginal de tecnologías alternativas sin cascos inmersivos (IVR) [36, 38, 40] demuestra ser una opción viable de compromiso para mitigar la cinetosis o restricciones espaciales, sacrificando inevitablemente el nivel de inmersión total.

Tabla VI.
IMPLEMENTACIÓN Y ATRIBUTOS DE TECNOLOGÍAS VR, AR, XR

Tecnología y Autores	Herramientas Principales	Funcionalidades Clave	Limitaciones Reportadas
Realidad Virtual (VR) [27, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 38, 39, 43, 45, 46, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 60, 61, 63, 64, 65, 69, 71, 73, 74, 75, 78, 79, 82, 84, 85]	Oculus, HTC Vive, Meta Quest, Simuladores (VR-SET, LapSim, Da Vinci), Unity/Unreal.	• Simulación 3D clínica/industrial. • Feedback visual y háptico básico. • Gamificación guiada. • Práctica de toma de decisiones.	• Interacción física y realismo limitados. • Carencia de hápticos avanzados. • Alto costo y dependencia de laboratorios. • Baja validación científica estandarizada.
Realidad Aumentada (AR) [41, 49, 58, 62, 66, 72]	HoloLens 2, Vuzix, Apps móviles.	• Superposición de datos en tiempo real. • Asistencia remota y guías visuales. • Triage aumentado integrado al entorno.	• Dependencia de conexión de red estable. • Errores de desalineación virtual-real. • Curva de aprendizaje técnico inicial.
Realidad Mixta/Extendida (MR/XR/Híbridos) [34, 42, 44, 80, 81]	CRM ³ , Digital Twins, Mesas XR, HoloLens + VR.	• Entornos híbridos colaborativos. • Simulación dinámica multitécnica. • Retroalimentación multicanal.	• Alta complejidad de implementación. • Difícil replicabilidad. • Escasa evidencia de eficacia a largo plazo.
Otros Sistemas (IVR / AV sin HMD) [36, 38, 40]	Simulador 6DOF, CBS 2.0, Guías ópticas 3D.	• Movimiento libre (sin casco). • Simulación óptica para autoaprendizaje. • Entrenamiento bajo presión.	• Menor grado de inmersión total. • Restricciones por espacio/iluminación. • Interacción física reducida.

RQ3: ¿Qué métodos tradicionales se emplean como comparadores?

En relación con los métodos tradicionales utilizados como línea base comparativa, los estudios incluidos se categorizaron en siete enfoques principales (véase Tabla VII). Un análisis crítico de estos diseños revela importantes implicaciones para la validez de los resultados. Una proporción sustancial de las investigaciones contrasta las tecnologías inmersivas contra métodos de recepción pasiva, tales como material audiovisual y teórico [28, 29, 38, 39, 41, 43, 44, 49, 54, 55, 56, 69, 72] o instrucción en aula tradicional [30, 46, 57, 61, 65, 66, 70, 84]. Metodológicamente, comparar una simulación interactiva 3D contra la lectura pasiva de un manual introductorio presenta un riesgo elevado de sobreestimar la eficacia de la RV/RA (especialmente en métricas de motivación y compromiso), estableciendo una línea base desigual al carecer de práctica activa en el grupo control. Por el contrario, el verdadero contraste de rigor metodológico (el *Gold Standard*) se evidencia en las investigaciones que emplean práctica en entornos reales o clínicos [32, 51, 63, 75, 77, 79, 83] y simulaciones físicas de alta fidelidad con equipos táctiles [26, 33, 40, 42, 53, 64, 73, 74, 78]. Estas comparaciones exponen las verdaderas fronteras de las tecnologías inmersivas: si bien la RV reduce drásticamente los

costos logísticos y el riesgo humano frente a simulacros en fuego real o con cadáveres, la simulación física a menudo retiene una ventaja competitiva en la precisión de la retroalimentación táctil y el desarrollo de memoria muscular fina. Finalmente, la alta prevalencia de modelos formativos mixtos [35, 36, 37, 48, 50, 62, 71, 76, 80, 81, 85] y estudios basados en comparaciones internas sin grupo control externo [27, 31, 45, 47, 52, 68] refleja los desafíos éticos y prácticos de la formación en emergencias. A menudo, resulta inviable o poco ético privar a profesionales de alto riesgo del mejor estándar formativo disponible, empujando a los investigadores hacia diseños intra-sujetos o hacia el aislamiento de tareas motoras a ciegas [34, 58, 59, 60, 67, 82] para poder evaluar el impacto tecnológico.

Tabla VII.
MÉTODOS TRADICIONALES UTILIZADOS COMO COMPARADORES

Categoría y Autores	Instrumentos	Descripción
Simulación Física y Maniqués [26, 33, 40, 42, 53, 64, 73, 74, 78]	Maniqués de alta fidelidad (CAE), simuladores básicos (Rescue Anne), modelos anatómicos sintéticos (Sawbones), Box trainers.	• Práctica táctil directa y repetitiva. • Entorno físico sin inmersión digital. • Retroalimentación física limitante o nula.
Material Audiovisual y Teoría [28, 29, 38, 39, 41, 43, 44, 49, 54, 55, 56, 69, 72]	Videos instruccionales, manuales técnicos (SOP, guías OSHA), folletos impresos, lectura de documentación.	• Recepción pasiva de información. • Estudio autónomo e individual. • Carencia de práctica motora o interactividad.
Aula Tradicional / Expositiva [30, 46, 57, 61, 65, 66, 70, 84]	Clases presenciales, presentaciones estáticas (PowerPoint), e-learning asincrónico, conferencias magistrales.	• Enseñanza teórica dirigida por instructor. • Aprendizaje unidireccional. • Discusión grupal básica sin práctica aplicada.
Entorno Real / Práctica Clínica [32, 51, 63, 75, 77, 79, 83]	Quirófanos y hospitales, pacientes estandarizados (actores), cadáveres humanos, instalaciones con fuego real.	• Entrenamiento in-situ (escenarios auténticos). • Instrucción clínica/operativa supervisada. • Considerado frecuentemente el <i>Gold Standard</i>.
Modelos Mixtos e Híbridos [35, 36, 37, 48, 50, 62, 71, 76, 80, 81, 85]	Ejercicios de mesa (tabletop), robots industriales físicos (KUKA), mesas de arena tradicionales (AST), simulacros combinados.	• Integración de teoría y práctica de campo. • Uso de simulaciones analógicas especializadas. • Ejecución de protocolos técnicos mixtos.
Sin Comparador Externo (Interna) [27, 31, 45, 47, 52, 68]	Diseños pre/post-test intra-sujetos, comparación entre niveles de experiencia clínica o tipos de feedback.	• Ausencia de un grupo control tradicional independiente. • Evaluación de viabilidad técnica o contraste intrapersonal.
Otros (Tareas Motoras / A ciegas) [34, 58, 59, 60, 67, 82]	Tareas de destreza pura (Grooved Pegboard), palpación a ciegas (sin visualización), ejecución motora aislada.	• Enfoque en la respuesta ejecutiva o física básica. • Aislamiento estricto de variables psicomotoras.

RQ4: ¿Qué indicadores de efectividad se reportan y con qué resultados?

Al evaluar los indicadores de efectividad reportados (véase Tabla VIII), un análisis crítico de la literatura revela que el impacto de las tecnologías inmersivas es altamente dependiente del dominio cognitivo o motor que se pretenda estimular. La Realidad Virtual (VR) demuestra una superioridad consolidada frente a métodos tradicionales [27, 29-33, 35, 38, 39, 43, 45, 46, 50-56, 60, 61, 63-65, 69, 71, 73-75, 78, 79, 82, 84, 85]. Sin embargo, más allá de la evidente reducción de la tasa de errores, las métricas estandarizadas (como NASA-TLX y OSATS) indican que el verdadero catalizador del aprendizaje en VR es la mitigación del estrés fisiológico y el aumento de la autoeficacia, lo que facilita una mayor transferencia de la memoria procedimental a largo

plazo. Por su parte, la Realidad Aumentada (AR) [36, 41, 44, 49, 58, 59, 72] encuentra su nicho crítico no en la inmersión profunda, sino en la precisión sub-métrica para tareas de control motor fino, actuando como un andamiaje cognitivo que reduce errores críticos en tiempo real. No obstante, el hallazgo más revelador para el estado del arte surge de los estudios con resultados mixtos o de equivalencia estadística [26, 28, 37, 48, 57, 66-68, 70, 76, 77, 83] y las investigaciones comparativas de entornos híbridos [34, 40, 42, 62, 80, 81]. Estos trabajos desmitifican la noción de que la tecnología inmersiva es inherentemente superior en todos los frentes. En tareas que requieren un *feedback* háptico preciso y percepción de peso real (como las compresiones de RCP o cirugías de alta resistencia), la simulación física tradicional (HFS) retiene su superioridad. Por lo tanto, el análisis transversal de la evidencia sugiere que el valor definitivo de la VR/AR y MR no radica en el reemplazo absoluto de la práctica física, sino en su alta repetibilidad, escalabilidad y eficiencia en el Retorno de Inversión (ROI), permitiendo a los aprendices alcanzar la competencia cognitiva antes de interactuar con recursos físicos limitados o escenarios de riesgo real.

TABLA VIII.
INDICADORES DE EFECTIVIDAD Y RESULTADOS REPORTADOS

Categoría de Eficacia (Autores)	Indicadores evaluados	Resultados Principales
Realidad Virtual (Superioridad Confirmada) [27, 29-33, 35, 38, 39, 43, 45, 46, 50-56, 60, 61, 63-65, 69, 71, 73-75, 78, 79, 82, 84, 85]	Competencia clínica (OSATS), carga cognitiva (NASA-TLX), usabilidad (SUS), presencia (IPQ), motivación (SIMS), estrés fisiológico (HRV, Alfa-amilasa), transferencia (Kirkpatrick).	• ↑ Retención de conocimiento a largo plazo y memoria procedimental. • ↓ Tasa de errores técnicos y tiempos de ejecución. • ↑ Autoeficacia, engagement y mitigación de estrés fisiológico. • Alta transferencia de destrezas a la práctica clínica/industrial real.
Realidad Aumentada (Superioridad Confirmada) [36, 41, 44, 49, 58, 59, 72]	Destreza motora (Grooved Pegboard), decaimiento cognitivo, carga de trabajo (Modified Cooper Harper), precisión métrica (distancia angular/tisular).	• ↑ Precisión sub-métrica en tareas de control motor fino. • ↓ Errores críticos procedimentales. • Superposición contextual efectiva (guía visual en tiempo real). • Mitigación de la curva de olvido (retención a 4 semanas).
Realidad Extendida/Mixta y Comparativos [34, 40, 42, 62, 80, 81]	Cinetosis/Mareo (SSQ), tiempos de respuesta (FIRE/CEASE), carga mental (SIM-TLX), efectividad de triaje (MCI).	• MR/XR superior en toma de decisiones complejas y colaborativas. • VR destaca en inmersión espacial; AR en velocidad de ejecución. • Elección tecnológica dependiente de la carga motora vs. carga táctica.
Resultados Mixtos o Equivalencias [26, 28, 37, 48, 57, 66-68, 70, 76, 77, 83]	Retorno de inversión (ROI), calidad de resucitación (SVB/RCP), habilidades no técnicas, eficiencia del <i>feedback</i> concurrente vs. terminal.	• Equivalencia estadística frente a métodos tradicionales en tareas motrices básicas. • VR/AR proveen alta repetibilidad y escalabilidad a menor costo logístico. • Simulación física (HFS) mantiene superioridad en retroalimentación táctil y de peso real.

RQ5: ¿En qué contextos se llevan a cabo las capacitaciones?

En respuesta a la RQ5, el análisis de los entornos de capacitación (véase Tabla IX) demuestra que la viabilidad de las tecnologías inmersivas está intrínsecamente ligada a la gestión del riesgo físico y a la accesibilidad logística del escenario real. La mayor

concentración de estudios ocurre en entornos de Salud Clínica y Quirúrgica [27, 32, 35, 41, 43, 53, 58, 60, 61, 69, 73, 74, 78, 83] y Educación Formal [38, 45, 46, 48, 71], donde se aprovechan laboratorios y aulas controladas para reproducir procedimientos de alta complejidad espacial sin comprometer la seguridad del paciente o del estudiante. En estos contextos, la tecnología inmersiva funciona como un puente estandarizado entre la teoría y la práctica clínica de "primer contacto". En marcado contraste, la adopción de simulaciones inmersivas en áreas tácticas como Seguridad Industrial [28, 49, 50, 57, 59, 76, 84], Construcción y Ergonomía [29, 30, 39, 55, 65, 72], y Defensa y Respuesta a Desastres [34, 36, 51, 54, 63, 75, 81] obedece a la imposibilidad material o ética de recrear emergencias auténticas. Replicar amenazas radiológicas (CBRN), incendios forestales de gran magnitud o accidentes por caídas estructurales en la vida real es inviable. Por ende, para estos operarios, la RV proporciona el único "entorno de error seguro" (fail-safe environment) donde pueden experimentar las consecuencias letales de una mala decisión (y activar la memoria somática del estrés) sin riesgo vital real. Adicionalmente, se observa un cambio de paradigma hacia la descentralización formativa y el aprendizaje in-situ. Las aplicaciones en Emergencias de Primera Respuesta [26, 31, 33, 40, 42, 62, 66, 68, 77, 79, 85] y Salud Pública o escenarios multisede [47, 67, 70, 82] evidencian cómo los cascos autónomos permiten trasladar entrenamiento ultra-especializado (como el triaje de múltiples víctimas o la descontaminación HAZMAT) directamente al punto de atención clínico o rural, democratizando el acceso a simulaciones de alto nivel. Paralelamente, en sectores como la Robótica y Automatización [37, 80], la Realidad Aumentada y Mixta difuminan la barrera entre la sala de formación y la planta de producción, superponiendo la capacitación directamente sobre la maquinaria real en el espacio de trabajo.

Tabla IX.

CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LAS CAPACITACIONES

Área Profesional y Autores	Entornos Simulados (Contextos)	Condiciones específicas
Salud Clínica y Quirúrgica [27, 32, 35, 41, 43, 53, 58, 60, 61, 69, 73, 74, 78, 83]	Quirófanos, laboratorios de cateterismo (Cath labs), salas de radiología, laboratorios anatómicos.	• Cirugía laparoscópica (TAPP) y ortopédica (LPSI, SCFE). • Procedimientos invasivos: Cricotirotomía, canulación ECMO. • Anestesia epidural, bioseguridad radiológica y gasometría.
Emergencias y 1ª Respuesta [26, 31, 33, 40, 42, 62, 66, 68, 77, 79, 85]	Departamentos de Emergencia (ED), UCIN (Neonatología), zonas urbanas de desastre, estaciones ECOE.	• Resucitación bajo protocolos RCP / ACLS / BLS. • Triage en Incidentes con Múltiples Víctimas (MCI: START/SORT). • Manejo de anafilaxia, shock séptico y soporte vital neonatal.
Seguridad Industrial [28, 49, 50, 57, 59, 76, 84]	Plantas químicas, subestaciones eléctricas (110kV/Media Tensión), líneas de manufactura CNC.	• Mantenimiento preventivo y procedimientos LOTO. • Control de fugas químicas en simuladores de planta (OTS). • Operación de maquinaria pesada y carros industriales.
Construcción y Ergonomía [29, 30, 39, 55, 65, 72]	Obras de construcción civil activas, construcción de redes de metro, líneas de ensamblaje automotriz.	• Identificación de peligros estructurales y de caída. • Prevención de riesgos biomecánicos y estrés térmico (OSHA). • Colaboración logística operario-maquinaria.
Defensa y Desastres [34, 36, 51, 54, 63, 75, 81]	Destruyores navales (plataformas 6-DOF), bases militares, estaciones forestales, zonas de exclusión.	• Respuesta a amenazas nucleares/radiológicas (CBRN). • Comando en extinción de incendios forestales e internos. • Maniobras de combate naval y aterrizajes de helicópteros.
Educación Formal y Académica	Aulas K-12, campus universitarios, laboratorios	• Protocolos de evacuación sísmica escolar.

[38, 45, 46, 48, 71]	académicos STEM virtuales.	• Respuesta ante tirador activo ("Run, Hide, Fight"). • Experimentación en física y química orgánica.
Robótica y Automatización [37, 80]	Celdas didácticas de ingeniería, laboratorios de integración tecnológica.	• Programación, operación y control de brazos robóticos (KUKA). • Colaboración Humano-Robot (HRC) y mantenimiento de AGVs.
Salud Pública y Multisede [47, 67, 70, 82]	Redes hospitalarias descentralizadas, zonas de aislamiento infeccioso, áreas de contención.	• Desescalada de agresiones a personal sanitario (Código Negro). • Descontaminación de pacientes HAZMAT. • Prevención de infecciones nosocomiales (<i>C. difficile</i>).

C. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA EVIDENCIA

La evaluación metodológica evidenció una solidez científica favorable. El 50% de la muestra (30 estudios) corresponde a Ensayos Controlados Aleatorizados (RCT) de Nivel Ib , y el 21.6% (13 estudios) a diseños cuasi-experimentales o de cohortes de Nivel IIb. Además, pese a las barreras logísticas y de costos del hardware inmersivo, los RCT lograron consolidar tamaños de muestra rigurosos de entre 30 y 135 participantes (con extremos poblacionales que variaron desde 3 hasta 518 sujetos). No obstante, el 28.4% restante (17 estudios) se agrupó en los Niveles III, IV y V, abarcando estudios observacionales, investigaciones pre-experimentales de un solo grupo y pruebas piloto exploratorias. (véase Tabla V)

IV. DISCUSIÓN

El hallazgo más relevante de esta revisión es la evidencia consistente sobre la superioridad de la Realidad Virtual (RV) frente a los métodos instruccionales de recepción pasiva. La RV mejora sustancialmente las habilidades técnicas, la retención de conocimientos y reduce la tasa de errores en contextos de alto riesgo [27], [29], [31], [33], [52]. Bajo el Aprendizaje Situado y la Simulación Basada en Competencias [47], [59], [82], la RV permite alcanzar el dominio técnico (mastery learning) mediante la repetición segura de protocolos en contextos realistas de alto estrés, cerrando la brecha entre teoría y práctica; no obstante, en tareas motrices, la simulación física tradicional mantiene una eficacia equivalente o superior [26], [66]. Esta divergencia se explica por la carencia actual de interfaces hápticas avanzadas en la RV, lo cual limita el desarrollo de la memoria muscular en escenarios que exigen una interacción física realista, como las maniobras de resucitación o las cirugías complejas [32], [54]. En consecuencia, para maximizar la transferencia del aprendizaje (RQ4), resulta fundamental optimizar el realismo táctil y sensorial. Por otro lado, la fortaleza intrínseca de RA radica en la superposición de información contextual en tiempo real. Analizado a través de la Teoría de la Carga Cognitiva [31], [44], [81], la RA mitiga el "efecto de atención dividida" al proyectar instrucciones directamente sobre el área de trabajo, reduciendo drásticamente la carga cognitiva extrínseca. Esta característica incrementa significativamente la precisión en tareas motoras finas y optimiza el entrenamiento guiado in-situ [41], [49], [58]. A pesar de estos beneficios, la RA enfrenta barreras de adopción debido a su estricta dependencia de una conectividad estable y a los frecuentes errores de desalineación virtual-real, lo que incrementa la carga cognitiva inicial del usuario [62], [72]. Paralelamente, la Realidad Extendida y Mixta (XR/MR) emerge como una solución colaborativa prometedora. Diversos estudios demuestran su capacidad para mejorar la toma de decisiones conjuntas en escenarios de comando y control [34], [42]. No obstante, la complejidad técnica para su implementación y la escasez de evidencia longitudinal dificultan su escalabilidad a corto plazo [80], [81]. Esto sugiere que la elección tecnológica (RQ2) debe supeditarse estrictamente a los

objetivos instruccionales y a la infraestructura disponible. A nivel metodológico, la marcada heterogeneidad entre los diseños de investigación dificulta la comparación estadística directa [9], [18]. Se observa una asimetría poblacional evidente: mientras las intervenciones con universitarios y personal clínico cuentan con ensayos controlados aleatorizados robustos y muestras amplias [33], [41], [45], [46], los sectores operativos de primera línea (bomberos, militares e industriales) dependen mayoritariamente de estudios piloto con muestras reducidas [51], [54], [59], [75]. Esta carencia de potencia estadística en entornos tácticos, sumada a la ausencia de evaluaciones longitudinales, impide medir la sostenibilidad real de las competencias adquiridas [14]. Adicionalmente, la omisión sistémica de personas con discapacidad en el diseño de simuladores refleja una falta de inclusividad que debe corregirse categóricamente en futuras investigaciones [12], [13]. Más allá de las métricas globales, es imperativo contextualizar estos hallazgos en la realidad sociotécnica de América Latina. En esta región, el acceso a simuladores físicos de alta fidelidad [26], [78] suele ser escaso o de costo prohibitivo. Ante esta limitación, el despliegue de hardware de RV autónomo y asequible (como los visores Meta Quest o adaptadores smartphone) representa una oportunidad inmejorable para democratizar la formación técnica. Esta accesibilidad es de vital importancia para preparar a rescatistas frente a desastres naturales recurrentes [48], [63] y para elevar los estándares de seguridad en operaciones industriales complejas e inhóspitas, tales como la minería o la construcción [29], [39], [55]. Sin embargo, la implementación de plataformas in-situ de RA o XR choca directamente con el obstáculo de la brecha digital regional. Su dependencia de redes estables y de alto ancho de banda [41], [62], [72] restringe drásticamente su uso en zonas rurales, galerías subterráneas o de geografía compleja. Por tanto, se exige el desarrollo de soluciones inmersivas que garanticen una ejecución offline o asincrónica. Entre las limitaciones de la presente revisión, se reconoce el sesgo de publicación potencial derivado de incluir exclusivamente artículos de acceso abierto (Open Access) publicados hasta abril de 2025, lo que podría haber excluido investigaciones empíricas relevantes publicadas en revistas sujetas a pago. Asimismo, la alta variabilidad de las plataformas empleadas y la frecuente omisión de datos sobre el Retorno de Inversión (ROI) impiden realizar un análisis económico estandarizado [4], [20]. Para trabajos futuros, se recomienda unificar los protocolos de evaluación apoyándose en marcos teóricos consolidados (como la Teoría de la Carga Cognitiva o el Aprendizaje Situado) y el uso de métricas validadas. De igual forma, es indispensable diseñar estudios longitudinales, fomentar la inclusión de usuarios con limitaciones motrices, y priorizar la integración de dispositivos hápticos avanzados [22]. Finalmente, resulta necesario fundamentar la adopción de estas tecnologías mediante análisis de costo-beneficio que comparen la inversión inicial en hardware con la prevención económica de errores operativos a largo plazo.

V. CONCLUSIÓN

En conclusión, esta revisión sistemática exploró la efectividad, los desafíos y las oportunidades de implementación de las tecnologías inmersivas (RV, RA, XR) en capacitaciones para contextos de emergencia. Los resultados confirman que la RV mejora de forma consistente las habilidades técnicas, promueve la retención de conocimientos y reduce las tasas de error frente a la instrucción teórica convencional. Simultáneamente, la RA optimiza la precisión motora mediante el apoyo visual en tiempo real, mientras que la XR y MR despuntan como herramientas invaluable para el

entrenamiento táctico colaborativo y la reducción de la sobrecarga cognitiva. A partir del mapeo exhaustivo de 60 estudios primarios, este trabajo consolida el estado del arte y expone brechas críticas en la literatura. Las deficiencias más notables radican en la heterogeneidad de las métricas de evaluación, la dependencia de estudios metodológicamente débiles en sectores operativos no sanitarios, y la preocupante exclusión de poblaciones con discapacidad en el diseño de simulacros. Para superar estas barreras, es perentorio estandarizar los protocolos de validación y ejecutar ensayos multicéntricos longitudinales que comprueben la verdadera transferencia del aprendizaje al mundo real. Por último, en el contexto de regiones emergentes como América Latina, el reto primordial consiste en sortear la brecha digital de infraestructura; para ello, se debe priorizar el desarrollo de plataformas inmersivas de bajo costo, inclusivas y de ejecución autónoma que garanticen una verdadera democratización de la formación para salvar vidas en contextos críticos.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradecemos profundamente a los que se dedican a la investigación y brindan fuentes confiables que permiten analizar y entender la realidad de manera objetiva, además que son fundamentales para la realización de revisiones sistemáticas.

REFERENCES

- [1] Business Research Insights, "VR Emergency Security Training Market Size & Growth 2033," BRI Report ID: 112790, Apr. 2025. [Online]. Available: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/vr-emergency-security-training-market-112790>.
- [2] N. K. B. Akbulut, A. Anani, and S. O. Adewuyi, "Review of virtual reality integration for safer and efficient mining operations," IEEE, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3541724>.
- [3] A. Evangelista, V. M. Manghisi, V. De Giglio, R. Mariconte, C. Giliberti, and A. E. Uva, "From knowledge to action: Assessing the effectiveness of immersive virtual reality training on safety behaviors in confined spaces using the Kirkpatrick model," *Safety Science*, vol. 181, p. 106693, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.ssci.2024.106693.
- [4] T. O. Sanni, J. Chen, W. Shao, J. Liu, and Y. Shi, "Investigating the feasibility of adopting virtual reality as a method for natural hazard risk communication," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 119, Mar. 2025, Art. no. 105296. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105296>.
- [5] M. Mirza, A. Clark, S. Lukosch, and H. Lukosch, "Risk perception and awareness in an augmented reality flood response game: The role of player perspectives," *Computers in Human Behavior Reports*, vol. 18, May 2025, Art. no. 100657. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2025.100657>.
- [6] R. Sun, Y. Wang, Q. Wu, S. Wang, X. Liu, P. Wang, Y. He, and H. Zheng, "Effectiveness of virtual and augmented reality for cardiopulmonary resuscitation training: a systematic review and meta-analysis," *BMC Medical Education*, vol. 24, p. 730, Jul. 2024, doi: 10.1186/s12909-024-04520-4.
- [7] A. Givati et al., "Augmented reality- virtual reality wartime training of reserve prehospital teams: a pilot study," *Isr. J. Health Policy Res.*, vol. 13, 2024. [Online]. <https://doi.org/10.1186/s13584-024-00634-8>
- [8] M. Lupia et al., "Virtual Reality and Augmented Reality Training in Disaster Medicine Courses for Students in Nursing: A Scoping Review of Adoptable Tools," *Behavioral Sciences*, vol. 13, 2023. [Online]. <https://doi.org/10.3390/bs13070616>
- [9] S. Xie et al., "Virtual reality for safety training: A systematic literature review and meta-analysis," *Safety Science*, vol. 173, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106372>
- [10] N. Abouelkher, M. T. Shafiq, A. Rauf, and N. Alsheikh, "Enhancing Construction Management Education through 4D BIM and VR: Insights
- [11] D. Li and Y. Sun, "Improvement of students' sports performance in VR-based smart sports teaching in colleges and universities," *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 9, no. 1, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2478/amns-2024-1373>
- [12] G. Bernardini et al., "Characterization and future perspectives of Virtual Reality Evacuation Drills for safe built environments: A Systematic Literature Review," *Safety Science*, vol. 164, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106141>
- [13] M. L. Kolivand et al., "Virtual reality for indoor emergency evacuation studies: Design, development, and implementation review," *Safety Science*, vol. 174, 2025. [Online]. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106678>

- [14] M. Akhtar et al., "Virtual reality in simulation-based emergency skills training: A systematic review with a narrative synthesis," *Resuscitation Plus*, vol. 15, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resplu.2023.100484>
- [15] J. He et al., "Virtual and augmented reality technologies for emergency management in the built environments: A state-of-the-art review," *J. Safety Sci. & Resilience*, vol. 2, 2021. [Online]. <https://doi.org/10.1016/j.jinssr.2020.11.004>
- [16] T. Walter et al., "Virtual reality in medical emergencies training: benefits, perceived stress, and learning success," *Multimedia Systems*, 2023. [Online]. <https://doi.org/10.1007/s00530-023-01102-0>
- [17] T. K. Krüger et al., "Extended reality training for mass casualty incidents: a systematic review on effectiveness and experience of medical first responders," *Int. J. Emerg. Med.*, vol. 17, 2024. [Online]. <https://doi.org/10.1186/s12245-024-00685-3>
- [18] C. A. Brock et al., "Use of virtual reality exercises in disaster preparedness training: A scoping review," *SAGE Open Med.*, vol. 12, 2024. [Online]. <https://doi.org/10.1177/20503121241241936>
- [19] Encuesta de Población Activa de la Unión Europea (UE), citado en ONUDI, Plataforma de Análisis Industrial (IAP), "Cómo la realidad aumentada ha transformado la formación de los trabajadores," 2024. [En línea]. Disponible en: <https://iap.unido.org/es/articulos/como-la-realidad-aumentada-ha-transformado-la-formacion-de-los-trabajadores>.
- [20] M. De Fino, F. Cassano, G. Bernardini, E. Quagliarini, and F. Fatiguso, "On the user-based assessments of virtual reality for public safety training in urban open spaces depending on immersion levels," *Safety Science*, vol. 185, May 2025, Art. no. 106803. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106803>
- [21] Z. Feng, V. A. González, C. Mutch, R. Amor y G. Cabrera-Guerrero, "Exploring spiral narratives with immediate feedback in immersive virtual reality serious games for earthquake emergency training," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 82, pp. 125–147, 2023, doi: 10.1007/s11042-022-13306-z.
- [22] M. De Fino, R. Tavalare, G. Bernardini, E. Quagliarini, and F. Fatiguso, "Boosting urban community resilience to multihazard scenarios in open spaces: A virtual reality – serious game training prototype for heat wave protection and earthquake response," *Sustainable Cities and Society*, vol. 99, Dec. 2023, Art. no. 104847. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104847>
- [23] Y. Jian and J. A. Abu Bakar, "Comparing cognitive load in learning spatial ability: immersive learning environment vs. digital learning media," *Discover Sustainability*, vol. 5, no. 1, Art. no. 111, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00310-6>
- [24] M.-S. Hosseini, F. Jahanshahloo, M. A. Akbarzadeh, M. Zarei y Y. Vaez-Gharamaleki, "Formulating research questions for evidence-based studies," *Journal of Medicine, Surgery, and Public Health*, vol. 2, art. 100046, dic. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.glmedi.2023.100046>
- [25] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, et al., "Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas," *Revista Española de Cardiología*, vol. 74, no. 9, pp. 790–799, 2021. [ONLINE]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- [26] D. Katz et al., "Utilization of a voice-based virtual reality advanced cardiac life support team leader refresher: Prospective observational study," *Journal of Medical Internet Research*, vol. 22, no. 3, 2020, doi: 10.2196/17425.
- [27] D. Qi et al., "Surgeons With Five or More Actual Cricothyrotomies Perform Significantly Better on a VR Simulator," *Journal of Surgical Research*, vol. 252, pp. 247–254, 2020, doi: 10.1016/j.jss.2020.03.021.
- [28] A. Lanzotti et al., "Interactive tools for safety 4.0: virtual ergonomics and serious games in real working contexts," *Ergonomics*, vol. 63, no. 3, pp. 324–333, 2020, doi: 10.1080/00140139.2019.1683603.
- [29] J. A. Diego-Mas, J. Alcaide-Marzal, and R. Poveda-Bautista, "Effects of using immersive media on the effectiveness of training to prevent ergonomics risks," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 7, 2020, doi: 10.3390/ijerph17072592.
- [30] I. Jeelani, K. Han, and A. Albert, "Development of virtual reality and stereopanoramic environments for construction safety training," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 27, no. 8, pp. 1853–1876, 2020, doi: 10.1108/ECAM-07-2019-0391.
- [31] D. Lerner, S. Mohr, J. Schild, M. Görging, and T. Luiz, "An immersive multi-user virtual reality for emergency simulation training: Usability study," *JMIR Serious Games*, vol. 8, no. 3, 2020, doi: 10.2196/18822.
- [32] M. Portelli, S. F. Bianco, T. Bezzina, and J. E. Abela, "Virtual reality training compared with apprenticeship training in laparoscopic surgery: A meta-analysis," *Annals of the Royal College of Surgeons of England*, vol. 102, no. 9, pp. 672–684, 2020, doi: 10.1308/RCSANN.2020.0178.
- [33] C.-H. Yang, S.-F. Liu, C.-Y. Lin, and C.-F. Liu, "Immersive Virtual Reality-Based Cardiopulmonary Resuscitation Interactive Learning Support System," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 120870–120880, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3006280.
- [34] K. A. Pettijohn, A. T. Biggs, C. Peltier, J. R. Lukos, and J. N. Norris, "Virtual and augmented reality in a simulated naval engagement: Preliminary comparisons of simulator sickness and human performance," *Applied Ergonomics*, vol. 89, 2020, doi: 10.1016/j.apergo.2020.103200.
- [35] M. Frendo, L. Konge, P. Cayé-Thomasen, M. Sø. Sørensen, and S. A. W. Andersen, "Decentralized Virtual Reality Training of Mastoidectomy Improves Cadaver Dissection Performance: A Prospective, Controlled Cohort Study," *Otology and Neurotology*, vol. 41, no. 4, pp. 476–481, 2020, doi: 10.1097/MAO.0000000000002541.
- [36] A. H. P. Morice, J. R. Serres, F. Ruffier, and T. Rakotomamonjy, "Ecological design of augmentation improves helicopter ship landing maneuvers: An approach in augmented virtuality," *Plos One*, vol. 16, no. 8 August, 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0255779.
- [37] F. G. Praticò and F. Lamberti, "Towards the adoption of virtual reality training systems for the self-tuition of industrial robot operators: A case study at KUKA," *Computers in Industry*, vol. 129, 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103446.
- [38] Z. Feng, V. A. González, C. Mutch, R. Amor, and G. Cabrera-Guerrero, "Instructional mechanisms in immersive virtual reality serious games: Earthquake emergency training for children," *Journal of Computer Assisted Learning*, vol. 37, no. 2, pp. 542–556, 2021, doi: 10.1111/jcal.12507.
- [39] Z. Xu and N. Zheng, "Incorporating virtual reality technology in safety training solution for construction site of urban cities," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3390/su13010243.
- [40] D. K. Lee et al., "Comparison of extended reality and conventional methods of basic life support training: protocol for a multinational, pragmatic, noninferiority, randomised clinical trial (XR BLS trial)," *Trials*, vol. 22, no. 1, 2021, doi: 10.1186/s13063-021-05908-z.
- [41] J. Wolf, V. Wolfer, M. Halbe, F. Maisano, Q. Lohmeyer, and M. Meboldt, "Comparing the effectiveness of augmented reality-based and conventional instructions during single ECMO cannulation training," *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 16, no. 7, pp. 1171–1180, 2021, doi: 10.1007/s11548-021-02408-y.
- [42] S. Ricci, A. Calandrino, G. Borgonovo, M. Chirico, and M. Casadio, "Viewpoint: Virtual and Augmented Reality in Basic and Advanced Life Support Training," *JMIR Serious Games*, vol. 10, no. 1, 2022, doi: 10.2196/28595.
- [43] N. Cevallos, B. Zukotynski, D. Greig, M. Silva, and R. M. Thompson, "The Utility of Virtual Reality in Orthopedic Surgical Training," *Journal of Surgical Education*, vol. 79, no. 6, pp. 1516–1525, 2022, doi: 10.1016/j.jsurg.2022.06.007.
- [44] X.-W. Liu et al., "Research on Training Effectiveness of Professional Maintenance Personnel Based on Virtual Reality and Augmented Reality Technology," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 21, 2022, doi: 10.3390/su142114351.
- [45] R. Lovreglio, N. Daphney-Chloe, A. Rahouti, D. Paes, Z. Feng, and A. Shipman, "Prototyping and testing a virtual reality counterterrorism serious game for active shooting," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 82, 2022, doi: 10.1016/j.ijdrr.2022.103283.
- [46] Y. Han, J. Yang, Y. Diao, R. Jin, B. Guo, and Z. Adamu, "Process and outcome-based evaluation between virtual reality-driven and traditional construction safety training," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 52, 2022, doi: 10.1016/j.aei.2022.101634.
- [47] N. Moore, N. Ahmadpour, M. Brown, P. Poronnik, and J. Davids, "Designing Virtual Reality-Based Conversational Agents to Train Clinicians in Verbal De-escalation Skills: Exploratory Usability Study," *JMIR Serious Games*, vol. 10, no. 3, 2022, doi: 10.2196/38669.
- [48] M. Coban and Y. Goktas, "Which training method is more effective in earthquake training: Digital game, drill, or traditional training?," *smart learning environments*, vol. 9, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s40561-022-00202-0.
- [49] E. Brad, C.-V. Trifan, V.-D. Bartos, I. A. Chis, and A. I. Stan, "enhancing cnc milling machine operator training with augmented reality smart glasses," *acta technica napocensis series-applied mathematics mechanics and engineering*, Vol. 66, pp. 123–130, 2023.
- [50] Jung Jong Won, Jung Kihyo, and Jeong Jae-Wook, "A Study on the Effectiveness of a VR-based Industrial Safety Education," *Journal of Engineering Education Research*, vol. 26, no. 2, pp. 23–31, 2023.
- [51] D. Narciso, M. Melo, S. Rodrigues, J. P. Cunha, J. Vasconcelos-Raposo, and M. Bessa, "Using Heart Rate Variability for Comparing the Effectiveness of Virtual vs Real Training Environments for Firefighters," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 29, no. 7, pp. 3238–3250, 2023, doi: 10.1109/TVCG.2022.3156734.
- [52] P. Chan, T. van Gerven, J.-L. Dubois, and K. Bernaerts, "Study of motivation and engagement for chemical laboratory safety training with VR serious game," *Safety Science*, vol. 167, 2023, doi: 10.1016/j.ssci.2023.106278.
- [53] G. A. L. Kennedy, S. Pedram, and S. Sanzone, "Improving safety outcomes through medical error reduction via virtual reality-based clinical skills training," *Safety Science*, vol. 165, 2023, doi: 10.1016/j.ssci.2023.106200.
- [54] D. Calandra, F. de Lorenzis, A. Cannavò, and F. Lamberti, "Immersive virtual reality and passive haptic interfaces to improve procedural learning in a formal

- training course for first responders,” *Virtual Reality*, vol. 27, no. 2, pp. 985–1012, 2023, doi: 10.1007/s10055-022-00704-9.
- [55] A. Alzarrad, M. Miller, S. Chowdhury, J. McIntosh, T. Perry, and R. Shen, “Harnessing Virtual Reality to Mitigate Heat-Related Injuries in Construction Projects,” *CivilEng*, vol. 4, no. 4, pp. 1157–1168, 2023, doi: 10.3390/civileng4040063.
- [56] D. An, H. Deng, C. Shen, Y. Xu, L. Zhong, and Y. Deng, “Evaluation of Virtual Reality Application in Construction Teaching: A Comparative Study of Undergraduates,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 10, 2023, doi: 10.3390/app13106170.
- [57] H. Stefan, M. Mortimer, B. Horan, and G. Kenny, “Evaluating the preliminary effectiveness of industrial virtual reality safety training for ozone generator isolation procedure,” *Safety Science*, vol. 163, 2023, doi: 10.1016/j.ssci.2023.106125.
- [58] T. Hayasaka et al., “Comparison of accuracy between augmented reality/mixed reality techniques and conventional techniques for epidural anesthesia using a practice phantom model kit,” *BMC Anesthesiology*, vol. 23, no. 1, 2023, doi: 10.1186/s12871-023-02133-w.
- [59] J. Lee and B. Ma, “An Operator Training Simulator to Enable Responses to Chemical Accidents through Mutual Cooperation between the Participants,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, 2023, doi: 10.3390/app13031382.
- [60] A. Lamb, B. McKinney, P. Frousiakis, G. Diaz, and S. Sweet, “A Comparative Study of Traditional Technique Guide versus Virtual Reality in Orthopedic Trauma Training,” *Advances in Medical Education and Practice*, vol. 14, pp. 947–955, 2023, doi: 10.2147/AMEP.S395087.
- [61] A. Fujiwara, S. Fujimoto, R. Ishikawa, and A. Tanaka, “Virtual reality training for radiation safety in cardiac catheterization laboratories – an integrated study,” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 200, no. 15, pp. 1462–1469, 2024, doi: 10.1093/rpd/ncac187.
- [62] B. Bauchwitz et al., “The Use of Smartphone-Based Highly Realistic MCI Training as an Adjunct to Traditional Training Methods,” *Military Medicine*, vol. 189, pp. 775–783, 2024, doi: 10.1093/milmed/usac274.
- [63] P. Dziuba, S. Burbela, V. Zhuravel, B. Marchenko, and K. Verheles, “The Impact of Practical Skills on Improving the Servicemen’s Preparedness to Act in Case of Radiation Contamination of the Area,” *International Journal of Statistics in Medical Research*, vol. 13, pp. 199–209, 2024, doi: 10.6000/1929-6029.2024.13.18.
- [64] P. M. Alcázar Artero et al., “Teaching cardiopulmonary resuscitation using virtual reality: A randomized study,” *Australasian Emergency Care*, vol. 27, no. 1, pp. 57–62, 2024, doi: 10.1016/j.auec.2023.08.002.
- [65] A. Alzarrad, M. Miller, L. Durham, and S. Chowdhury, “Revolutionizing construction safety: introducing a cutting-edge virtual reality interactive system for training US construction workers to mitigate fall hazards,” *Frontiers in Built Environment*, vol. 10, 2024, doi: 10.3389/fbuil.2024.1320175.
- [66] S. Aranda-García et al., “New communication tool for basic life support training: smart glasses. A quasi-experimental study | Nueva herramienta de comunicación para el entrenamiento de soporte vital básico: smart glasses. Un diseño cuasiexperimental,” *Medicina Intensiva*, vol. 48, no. 2, pp. 77–84, 2024, doi: 10.1016/j.medin.2023.09.002.
- [67] J. S. A. Lee, T. J. Tan, D. K. P. Teng, Y. Y. Ng, and K. Chen, “Hazardous and Toxic Material Decontamination Facility Training in Virtual Reality,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, no. 2, 2024, doi: 10.3390/electronics13020465.
- [68] M. Ahmadi, S. Yousefi, and A. Ahmadi, “Exploring the most effective feedback system for training people in Earthquake emergency preparedness using immersive virtual reality serious games,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 110, 2024, doi: 10.1016/j.ijdrr.2024.104630.
- [69] K. Poloková et al., “Evaluating Virtual Reality as an Educational Tool in Preoperative Settings for Coronary Angiography | Zhodnocení virtuální reality jako edukačního nástroje před elektivní koronarografií,” *Cor et Vasa*, vol. 66, no. 6, pp. 580–586, 2024, doi: 10.33678/cor.2024.080.
- [70] J. M. Phillips, M. G. Harper, M.-L. Brecht, C.-Y. Li, and H. A. Devon, “Effect of Virtual Reality Simulation Versus Traditional Education on Rates of Clostridium difficile Infection: An Experimental Cluster Randomized Controlled Trial and Return on Investment Analysis,” *Journal of Continuing Education in Nursing*, vol. 55, no. 7, pp. 351–358, 2024, doi: 10.3928/00220124-20240301-03.
- [71] Z. Naz, A. Azam, M. U. G. Khan, T. Saba, S. Al-Otaibi, and A. Rehman, “Development and evaluation of immersive VR laboratories of organic chemistry and physics for students education,” *Physica Scripta*, vol. 99, no. 5, 2024, doi: 10.1088/1402-4896/ad3024.
- [72] P. Gong, Y. Lu, R. Lovreglio, X. Yang, and Y. Deng, “Comparing the effectiveness of AR training and slide-based training: The case study of metro construction safety,” *Safety Science*, vol. 176, 2024, doi: 10.1016/j.ssci.2024.106561.
- [73] J. Huang, Y. Jin, J. Liu, H. Lin, Y. Cui, and Z. Lu, “Application value of virtual reality laparoscopic simulator training in laparoscopic transabdominal preperitoneal hernioplasty: a prospective study | 虚拟现实腹腔镜模拟器训练在腹腔镜经腹腹膜前疝修补术中应用价值的前瞻性研究,” *Chinese Journal of Digestive Surgery*, vol. 23, no. 9, pp. 1209–1213, 2024, doi: 10.3760/cma.j.cn115610-20240717-00341.
- [74] I. Alam et al., “Beyond Traditional Training: Exploring the Benefits of Virtual Reality Simulator in Lumbar Pedicle Screw Insertion – A Randomized Controlled Trial,” *World Neurosurgery*, vol. 189, pp. e61–e68, 2024, doi: 10.1016/j.wneu.2024.05.163.
- [75] D. Narciso et al., “Assessing the perceptual equivalence of a firefighting training exercise across virtual and real environments,” *Virtual Reality*, vol. 28, no. 1, 2024, doi: 10.1007/s10055-023-00917-6.
- [76] F. Górski et al., “The Impact of Virtual Reality on Technical Training: A Case Study in Live-Line Maintenance,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 80019–80032, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3566937.
- [77] T. Muehling, V. Schreiner, M. Appel, T. Leutritz, and S. Koenig, “Comparing Virtual Reality-Based and Traditional Physical Objective Structured Clinical Examination (OSCE) Stations for Clinical Competency Assessments: Randomized Controlled Trial,” *JOURNAL OF MEDICAL INTERNET RESEARCH*, vol. 27, 2025, doi: 10.2196/55066.
- [78] H. Karimi, S. Clarke, and E. Watson, “Comparing Clinical Preparedness of Newly Qualified Diagnostic Radiographers Trained With Immersive Virtual Reality vs. Traditional Simulation: A Mixed-Methods Study,” *Journal of medical radiation sciences*, 2025, doi: 10.1002/jmrs.882.
- [79] A. N. Alruwaili, A. M. Alshammari, A. Alhaiti, N. B. Elsharkawy, S. I. Ali, and O. M. E. Ramadan, “Virtual reality simulation for high-risk neonatal emergency nursing training: a mixed-methods study on nurse competency and outcomes,” *BMC NURSING*, vol. 24, no. 1, 2025, doi: 10.1186/s12912-025-03038-4.
- [80] Y. E. Esen, B. Kaan Cetinca, K. Yayan, H. Guray Gurlek, and U. Yayan, “XR-Driven Robotic System Training for Occupational Health, Safety, and Maintenance,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 61708–61727, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3556699.
- [81] L. Valente, F. de Lorenzis, D. Calandra, and F. Lamberti, “Enhancing Sand-Table-Based Incident Command Training With Extended Reality and Interactive Simulations: A Use Case in Forest Firefighting,” *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 18, pp. 273–288, 2025, doi: 10.1109/TLT.2025.3545436.
- [82] S. H. Yang, H. Jeon, S. Y. Hong, and H. Shin, “Enhancing metacognition and nursing competency in undergraduate students utilizing multi-user virtual environment simulations: A multi-site multi-group comparative study,” *Nurse Education Today*, vol. 150, 2025, doi: 10.1016/j.nedt.2025.106717.
- [83] H. Groves et al., “Assessing the efficacy of a virtual reality lower leg fasciotomy surgery training model compared to cadaveric training,” *BMC Medical Education*, vol. 25, no. 1, 2025, doi: 10.1186/s12909-025-06835-2.
- [84] I. S. Abotaleb et al., “A framework to integrate virtual reality into international standard safety trainings,” *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 32, no. 4, pp. 2320–2341, 2025, doi: 10.1108/ECAM-09-2023-0969.
- [85] K. Chumvanichaya, C. Yuksen, P. Nuanprom, and K. Aramvanitch, “A comparison of SIEVE, SORT, and START triage training effectiveness between immersive interactive 3D learning materials using virtual reality (VR-SSST) and traditional methods in mass casualty incidents,” *International Journal of Emergency Medicine*, vol. 18, no. 1, 2025, doi: 10.1186/s12245-025-00850-2.