Articulo de revisión

Revisión Sistemática: Integración de tecnologías inmersivas y emergentes para la prevención de riesgos en entornos industriales

Systematic Review: Integration of immersive and emerging technologies for risk prevention in industrial environments



Andrea Jemima Naranjo Soriano[1]
https://orcid.org/0009-0004-8970-828X
Ramiro Fernando Isa Jara[1]
https://orcid.org/0000-0001-5624-5822

[1]Universidad Nacional de Chimborazo UNACH | Riobamba - Ecuador | CP 060104

jemima.naranjo@unach.edu.ec

http://doi.org/10.26423/rctu.v12i1.885
Páginas: 88- 102

Resumen

La seguridad laboral históricamente se abordó mediante regulaciones y formación, pero las alarmantes estadísticas globales exigieron nuevos enfoques. La Industria 4.0 introdujo tecnologías disruptivas, generando tanto avances en eficiencia como nuevos riesgos, dando origen al concepto Seguridad 4.0. Este estudio analizó críticamente la integración de tecnologías inmersivas e inteligencia artificial para la prevención de riesgos, con enfoque global, latinoamericano y ecuatoriano. La metodología revisó literatura científica en cuatro ejes: beneficios en la retención de conocimiento, personalización mediante inteligencia artificial, impacto en seguridad operativa y barreras para su adopción. Los resultados demostraron que la sinergia de estas tecnologías, basada en un análisis sistemático de literatura con cuatro ejes temáticos, facilita entrenamientos adaptativos y detección de riesgos en tiempo real, fortaleciendo la prevención. Persisten desafíos técnicos y organizacionales; además se sugiere validación longitudinal, marcos éticos, planes de adopción contextuales y mayor investigación.

Palabras clave: Capacitación en seguridad, gestión de riesgos, inteligencia artificial, realidad aumentada, seguridad industrial.

Abstract

Occupational safety was historically addressed through regulations and training, but alarming global statistics demanded new approaches. Industry 4.0 introduced disruptive technologies, generating both efficiency gains and new risks, giving rise to the concept of Safety 4.0. This study critically analyzed the integration of immersive technologies and artificial intelligence for risk prevention, with a global, Latin American, and Ecuadorian focus. The methodology reviewed scientific literature along four axes: benefits in knowledge retention, personalization through artificial intelligence, impact on operational safety, and barriers to adoption. The results showed that the synergy of these technologies, based on a systematic analysis of literature with four thematic axes, facilitates adaptive training and real-time risk detection, strengthening prevention. Technical and organizational challenges remain; furthermore, longitudinal validation, ethical frameworks, context-specific adoption plans, and further research are suggested.

Keywords: Security training, risk management, artificial intelligence, augmented reality, industrial security.

Recepción: 15/04/2025 | Aprobación: 17/06/2025 | Publicación: 27/06/2025

1. Introducción

La salud y la seguridad de los trabajadores en lugares industriales ha sido una prioridad ya que ayuda a evitar accidentes y enfermedades debido al trabajo con regulaciones claras, programas de enseñanza y modos de control. Aunque hay mejoras en las condiciones del trabajo a lo largo del tiempo, las cifras globales de sucesos en las industrias todavía muestran una situación grave. Según datos de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), alrededor de 2 millones de personas fallecen anualmente por causas vinculadas a sus actividades laborales, de las cuales aproximadamente un 19 % son atribuibles a accidentes o lesiones en el trabajo, lo que representa un costo económico estimado de 3 billones de dólares cada año [1]. Este impacto, tanto en términos humanos como financieros, pone de manifiesto la necesidad de explorar enfoques novedosos que fortalezcan la prevención de riesgos, superando las limitaciones de los métodos tradicionales.

No obstante, un reto constante en economías emergentes es la limitada existencia de modelos de adopción tecnológica específicos para las pequeñas y medianas empresas (PyMEs). A diferencia de las grandes industrias, las PyMEs enfrentan mayores barreras de entrada, escasez de recursos técnicos y financieros, y una falta de marcos adaptativos que orienten la implementación progresiva de tecnologías como la RA, RV e IA. Esta escasez de modelos contextualizados limita las estrategias efectivas para integrar innovaciones en procesos de capacitación y gestión de riesgos, perpetuando la dependencia de métodos tradicionales.

En los últimos años, el inicio de la Cuarta Revolución Industrial, conocida como Industria 4.0, ha introducido tecnologías transformadoras como los sistemas ciberfísicos, el Internet de las cosas (IoT), el análisis de macrodatos y la inteligencia artificial (IA), que están alterando radicalmente las operaciones industriales [2]. Si bien estos avances han mejorado la eficiencia operativa y la productividad, al mismo tiempo han suscitado nuevas preocupaciones en relación con la seguridad laboral [2]. Por ejemplo, la implementación generalizada de la automatización puede crear interacciones complejas entre humanos y máquinas, lo que aumenta el riesgo de nuevos peligros, como fallos en los sistemas autónomos o una sobrecarga de información para los operadores [2]. Además, el proceso de adopción tecnológica no depende únicamente de la disponibilidad de infraestructura o inversión inicial, sino también de factores psicosociales como la percepción de utilidad, la facilidad de uso y la actitud hacia la tecnología, los cuales están bien descritos en modelos como el *Technology Acceptance Model (TAM)*. Este modelo ha demostrado ser útil para analizar cómo los usuarios deciden aceptar o rechazar nuevas herramientas, y su aplicación al contexto de la seguridad industrial podría facilitar estrategias de implementación más efectivas y sostenibles. En respuesta a estos desafíos, se ha desarrollado el concepto de seguridad 4.0, que aboga por la integración de las tecnologías fundamentales de la industria 4.0 en los sistemas de gestión de la seguridad para evitar de forma proactiva los accidentes y prever los posibles peligros antes de que ocurran [2]. Cabe destacar que las soluciones inmersivas y la inteligencia artificial ocupan un lugar destacado entre estas tecnologías debido a su capacidad para transformar las estrategias de prevención de riesgos.

Las tecnologías inmersivas han comenzado a ocupar un lugar destacado en el ámbito de la seguridad laboral, particularmente a través de la Realidad Virtual (RV) y la Realidad Aumentada (RA). La RV permite crear entornos digitales completamente simulados, en los que es posible representar situaciones de riesgo sin que los trabajadores se vean expuestos a peligros reales [3, 4]. Por ejemplo, se pueden recrear incendios, derrames de sustancias químicas o caídas desde altura, lo que brinda una oportunidad valiosa para que el personal practique protocolos de respuesta ante emergencias en condiciones seguras y controladas [3]. La RA, en cambio, enriquece el entorno físico con información digital proyectada en tiempo real, facilitando la ejecución de tareas como el mantenimiento o la inspección técnica. A través de dispositivos móviles o gafas inteligentes, el operario puede visualizar listas de verificación, alertas de seguridad o instrucciones paso a paso directamente en su campo visual, lo que mejora la precisión y reduce la probabilidad de errores [1]. Diversas investigaciones han evidenciado que el uso de estas herramientas supera a los métodos tradicionales en aspectos clave como la retención del conocimiento, la identificación oportuna de riesgos y el nivel de compromiso de los participantes durante el proceso formativo [4]. Sin embargo, su puesta en marcha dentro del ámbito industrial ha sido limitado hasta recientemente, debido a razones como los altos costos de creación y equipamiento, además de la falta de pruebas científicas ampliamente entendidas sobre su capacidad. En la Figura 1, se muestra la utilización de la RV y de la RA dentro de ambientes de industria.



Figura 1. Comparativa y aplicaciones de la RV y RA en la industria.

© 2025 Derechos de autor: Naranjo A.| Isa R.

Por otra parte, la Inteligencia Artificial (IA) añade habilidades muy buenas para organizar grandes cantidades de datos, encontrar patrones entre ellos y dar sugerencias o tomar decisiones por su cuenta. En cuanto a prevenir problemas, la IA usa algoritmos en el análisis de datos para la prevención de riesgos [5], modelos que intentan saber qué va a pasar usando datos históricos [5], asistentes virtuales que mejoran reglas de protección y robots que trabajan juntos y hacen cosas peligrosas en lugar de los empleados. La inteligencia artificial está cambiando la forma en que se aborda la seguridad industrial. En lugar de esperar a que ocurran los accidentes para actuar, ahora es posible anticiparlos y tomar medidas antes que causen daños reales. [2]. Por ejemplo, algoritmos de aprendizaje automático pueden predecir fallos en equipos críticos mediante estrategias de mantenimiento predictivo, evitando accidentes causados por averías imprevistas [5]. Además, la IA tiene la capacidad de supervisar en tiempo real factores ambientales como la temperatura, la presencia de gases tóxicos o el cansancio de los trabajadores a través de dispositivos wearables, emitiendo alertas inmediatas ante cualquier anomalía [5]. Estas funcionalidades han dado lugar a sistemas de seguridad inteligentes con el potencial de transformar los indicadores de siniestralidad laboral.

La sinergia entre las tecnologías inmersivas y la inteligencia artificial mejora la gestión de riesgos. Un ejemplo son los gemelos digitales de instalaciones industriales que combinan simulación virtual con inteligencia artificial para prever y mitigar riesgos operativos. En la Figura 2, se presenta un modelo de gemelo digital para la prevención de riesgos.



Figura 2. Gemelo digital en la prevención de riesgos.

Este artículo busca analizar en profundidad los avances más recientes en el uso de tecnologías inmersivas, como la realidad aumentada (RA) y la realidad virtual (RV), junto con la inteligencia artificial (IA), para fortalecer la prevención de riesgos en entornos laborales. El estudio abarca perspectivas globales, con un enfoque particular en América Latina y Ecuador, y se basa en investigaciones publicadas desde 2019 en diversas fuentes académicas. A través de una revisión detallada de la literatura, se exploran los procesos clave que estas tecnologías habilitan para mejorar la seguridad industrial, destacando sus ventajas, como la optimización de la formación y la reducción de incidentes, así como los retos y limitaciones que enfrentan, incluyendo barreras tecnológicas y organizativas. El análisis también propone direcciones futuras para la investigación, con el objetivo de contribuir al desarrollo de entornos de trabajo más seguros y eficientes, considerando no solo los aspectos técnicos, sino también los factores humanos que influyen en la adopción exitosa de estas innovaciones.

El objetivo de este estudio fue analizar la integración de la realidad virtual, la realidad aumentada y la inteligencia artificial en la seguridad industrial, identificando sus ventajas, desafíos y vías de aplicación, para orientar su adopción y reducir los riesgos laborales.

2. Materiales y Métodos

Esta revisión sistemática exhaustiva se llevó a cabo mediante una exploración meticulosa de la literatura académica dentro de prestigiosas bases de datos académicas internacionales. Para garantizar la relevancia y la puntualidad de las pruebas, se dio preferencia a las publicaciones académicas y técnicas difundidas en los cinco años anteriores.

La información obtenida de las fuentes seleccionadas se organizó y analizó de manera sistemática, agrupándola temáticamente según cuatro líneas principales establecidas en la introducción: los beneficios que aportan la RV y la RA, el papel de la IA, los efectos de combinar estas tecnologías y las barreras que dificultan su implementación. Además, se realizó una evaluación crítica de las metodologías empleadas y los resultados presentados en los estudios, con el objetivo de ofrecer una perspectiva completa y actualizada sobre el tema

Análisis y resultados de la literatura

A continuación, se evalúan los hallazgos de los estudios seleccionados de la literatura científica publicada entre 2019 y 2024, que abordan la integración de tecnologías inmersivas, como la realidad aumentada (RA) y la realidad virtual (RV), con la inteligencia artificial (IA) para prevenir riesgos en entornos industriales. Se analiza cómo estas tecnologías han evolucionado hacia sistemas combinados que promueven una mayor seguridad en el trabajo. El análisis se estructura en torno a los cuatro ejes definidos previamente, incorporando perspectivas globales, latinoamericanas y ecuatorianas, con el propósito de ofrecer una visión contextualizada de los progresos alcanzados y las limitaciones actuales.

Beneficios de la realidad aumentada (RA) y la realidad virtual (RV) en la capacitación en seguridad

Las tecnologías inmersivas, RV y RA, están redefiniendo paradigmas en la capacitación en seguridad industrial

al proporcionar métodos experienciales, interactivos y, fundamentalmente, seguros para la adquisición de competencias [6]. La Tabla 1 ofrece una comparación directa de las características y aplicaciones principales de RV y RA donde se analizan los parámetros claves para su aplicación en el contexto de la seguridad industrial.

Tabla 1: Comparativa RV vs. RA para Capacitación en Seguridad Industrial.

Característica	Realidad Virtual (RV)	Realidad Aumentada (RA)
Inmersión	Total (entorno completamente digital)	Parcial (superposición digital sobre mundo real)
Dispositivo Típico	Casco/Gafas HMD (Head-Mounted Display)	Smartphone, Tablet, Gafas Inteligentes
Caso de Uso Principal	Simulación de escenarios peligrosos/raros, práctica	Asistencia en tareas reales, visualización contextualizada
Ventaja Clave	Experiencia segura para situaciones de alto riesgo	Información relevante in-situ, mejora eficiencia tareas
Limitación Clave	Desconexión del entorno real, posible cybersickness	Precisión del registro, ergonomía dispositivos (gafas)
Costo Hardware	Moderado a Alto (HMDs)	Bajo (móvil/tablet) a Alto (gafas industriales)
Potencial IA	Adaptación dinámica de escenarios, evaluación IA	Reconocimiento de objetos/peligros IA, alertas inteligentes

Realidad virtual (RV): Crea entornos digitales totalmente simulados, permitiendo la inmersión completa del usuario con escenarios de alto riesgo o de baja frecuencia de ocurrencia, sin exponer al trabajador a peligros reales [7, 8]. La evidencia acumulada, proveniente principalmente de estudios comparativos, sugiere consistentemente que la capacitación asistida por RV conduce a mejoras significativas en la retención del conocimiento a corto y mediano plazo, el desarrollo de habilidades procedimentales y psicomotoras, y el fomento de la conciencia situacional, superando a menudo los métodos pasivos tradicionales [9, 10, 11]. Investigaciones como la de [12] han medido los avances en la capacidad de reconocer los peligros en entornos complejos, incluidos los sitios de construcción. No obstante, la interpretación de estos resultados debe considerar las limitaciones metodológicas discutidas en la Tabla 2.

Tabla 2: Resumen de Métodos en Estudios de RV/RA para Capacitación en Seguridad.

Característica metodológica	Realidad Virtual (RV)	Realidad Aumentada (RA)	Referencias ejemplificadoras
Diseño de investigación	Predominantemente experimental (grupo RV vs. control u otros); estudios comparativos; evaluaciones de usabilidad.	Estudios de usabilidad; comparativos (RA vs. métodos tradicionales); estudios de caso; evaluación de carga cognitiva.	[7, 9, 12, 13, 14]
Participantes típicos	Estudiantes; trabajadores de sectores como construcción o manufactura; personal novato en seguridad.	Trabajadores técnicos de mantenimiento, inspección, ensamblaje; supervisores operativos	[8, 10, 15, 16]
Variables dependientes / Métricas clave	Retención del conocimiento (tests pre/post); desempeño en tareas (tiempo, errores, precisión); identificación de peligros; comportamiento seguro simulado; engagement / motivación; usabilidad (SUS); cybersickness.	Eficiencia en tareas (tiempo, errores); precisión; carga cognitiva (NASA-TLX, indicadores fisiológicos); comprensión de instrucciones; usabilidad (SUS); aceptación del usuario.	[11, 17, 18, 19]
Herramientas de evaluación	Cuestionarios; pruebas de conocimiento; observación de desempeño en simulación; eye-tracking; escalas tipo Likert (engagement, usabilidad).	Medición de tiempo/errores; cuestionarios (NASA-TLX, SUS); entrevistas; observación directa de tareas reales o simuladas.	[9, 12, 14]
Limitaciones metodológicas comunes	Muestras pequeñas y específicas; entorno de laboratorio (baja validez ecológica); evaluaciones a corto plazo (sin seguimiento); medición indirecta del impacto en accidentes reales; posible efecto novedad.	Dificultad para controlar variables en entornos reales; dependencia tecnológica (registro y seguimiento); enfoque en tareas puntuales; escasez de estudios longitudinales.	[20, 21]

Nota: SUS = System Usability Scale; NASA-TLX = NASA Task Load Index

Realidad aumentada (RA): A diferencia de la RV, la RA no aísla al usuario, sino que enriquece su percepción del entorno físico real mediante la superposición contextualizada de información digital (instrucciones textuales, modelos 3D, alertas visuales, datos de sensores) [22]. Su aplicación en seguridad industrial se centra en la asistencia cognitiva in-situ durante la ejecución de tareas operativas complejas o críticas, como procedimientos de mantenimiento, inspecciones técnicas o ensamblajes [15]. La RA guía al operario y visualiza peligros no evidentes en tiempo real [17, 18]. Esta presentación integrada de información reduce potencialmente la carga cognitiva asociada a la consulta de manuales o dispositivos externos y puede disminuir la probabilidad de errores humanos en tareas críticas [13]. Sin embargo, la efectividad de la RA está supeditada a desafíos técnicos y factores humanos, como se presentan en la Tabla 2.

Panorama regional (Latinoamérica y Ecuador): La adopción de RV/RA para capacitación en seguridad en latinoamerica muestra una tendencia creciente pero aún limitada si se compara con regiones más industrializadas. Factores económicos, brechas de infraestructura tecnológica y la disponibilidad de contenido adaptado cultural y normativamente son barreras relevantes [23]. Aun así, emergen iniciativas puntuales: Brasil ha explorado RV para entrenamiento en evaluación de plataformas offshore [24]; Colombia ha investigado el uso de RA para identificación de riesgos en construcción [25]; y en Ecuador, aunque la aplicación industrial es escasa, universidades y centros tecnológicos desarrollan prototipos y estudios piloto, por ejemplo, en riesgos eléctricos [26] o trabajos en altura, favorecidos por la creciente disponibilidad de dispositivos de visualización montados en la cabeza (HMD, por sus siglas en inglés), cuya accesibilidad se ha incrementado gracias a su comercialización en el mercado de consumo. La Tabla 2 resume los enfoques metodológicos predominantes, las métricas clave y las limitaciones identificadas en los estudios que evalúan la efectividad de la RV y la RA para la capacitación en seguridad industrial durante el período revisado.

En las Figuras 3, 4 y 5 se presenta un esquema general de los métodos propuestos basados en RV y RA.

© 2025 Derechos de autor: Naranjo A.| Isa R.

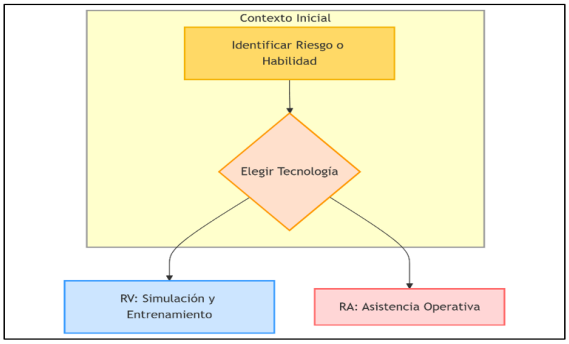


Figura 3. Esquema general del proceso de RV y RA en procesos de prevención de riesgos (Parte 1).

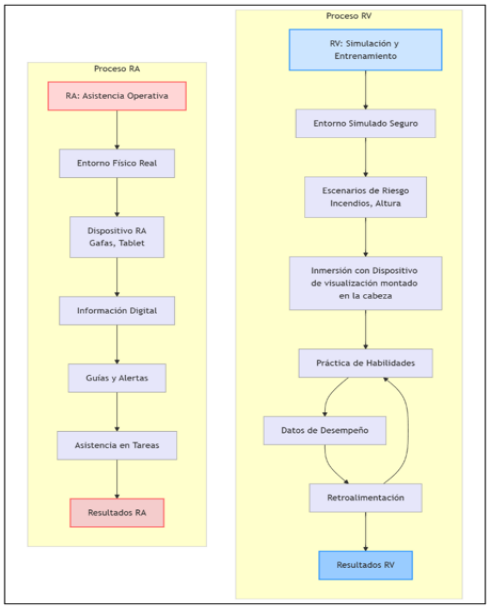


Figura 4. Esquema general del proceso de RV y RA en procesos de prevención de riesgos (Parte 2).

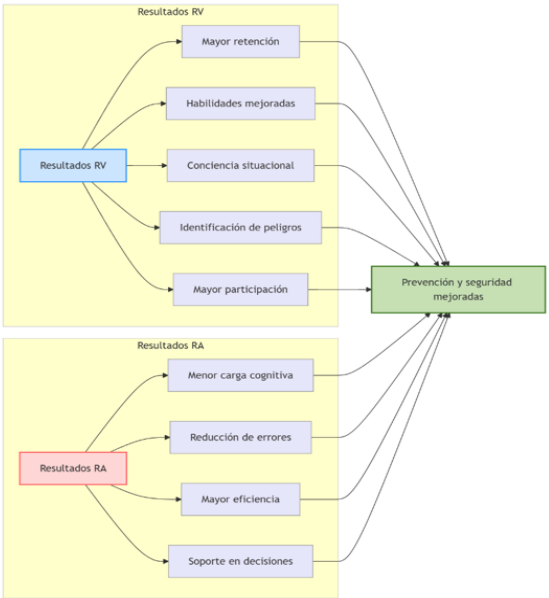


Figura 5. Esquema general del proceso de RV y RA en procesos de prevención de riesgos (Parte 3).

El papel de la inteligencia artificial (IA) en la personalización y proactividad de la Seguridad

La IA introduce capacidades de análisis avanzado, reconocimiento de patrones y predicción que complementan las tecnologías inmersivas y permiten transitar desde enfoques reactivos hacia una gestión de la seguridad proactiva, adaptativa y basada en datos [27, 28].

Monitoreo inteligente y detección proactiva de riesgos: Una aplicación prominente es el uso de la visión por computador (IA aplicada a imágenes/video) para analizar flujos de video de cámaras (fijas, móviles, drones) y detectar automáticamente condiciones o comportamientos inseguros en tiempo real. Esto incluye la verificación del uso correcto de Equipos de Protección Personal (EPP) [29], la detección de posturas ergonómicas de riesgo, el monitoreo de la proximidad entre trabajadores y maquinaria peligrosa, o la identificación de obstáculos y derrames [30, 31, 32]. Paralelamente, la IA procesa datos provenientes de redes de sensores IoT (Internet of Things) distribuidos en el entorno laboral (monitorizando gases, temperatura, ruido, vibraciones) y de dispositivos wearables portados por los trabajadores (registrando signos vitales, niveles de fatiga, exposición a agentes nocivos) para detectar desviaciones y generar alertas tempranas de condiciones ambientales o fisiológicas de riesgo [33, 34].

Análisis predictivo y evaluación de riesgos: La aplicación de metodologías de aprendizaje automático (ML) a conjuntos de datos extensos que comprenden información histórica y operativa (incluidos registros de incidentes y accidentes, cuasi-accidentes, auditorías de seguridad, métricas de producción, variables ambientales y elementos organizativos) permite la formulación de modelos predictivos que evalúan la probabilidad de ocurrencias negativas en ubicaciones designadas, tareas operativas, cronogramas o cohortes de trabajadores [35, 36]. Estos modelos facilitan la identificación de los factores contribuyentes más importantes [2] y permiten a los gerentes de seguridad asignar recursos e implementar medidas preventivas con mayor eficacia, abordando así los posibles problemas de forma preventiva.

Personalización del entrenamiento basado en IA: Potencia significativamente la efectividad de los entrenamientos basados en RV/RA. Analizando métricas detalladas del desempeño del usuario durante la simulación (patrones de mirada con eye-tracking, tiempos de reacción, decisiones tomadas, errores cometidos, rutas seguidas), los algoritmos de IA pueden inferir el nivel de competencia del aprendiz, identificar sus debilidades específicas y adaptar dinámicamente el contenido o la dificultad del entrenamiento [37, 38]. Esto permite ofrecer itinerarios de aprendizaje personalizados y retroalimentación específica y oportuna, optimizando la adquisición de competencias [39].

Panorama regional (Latinoamérica y Ecuador): La aplicación de IA en seguridad industrial en Latinoamérica está en etapas iniciales. Las implementaciones suelen concentrarse en grandes corporaciones de sectores como minería, energía o manufactura avanzada, principalmente para mantenimiento predictivo y algunas aplicaciones de visión por computador [40]. La investigación académica existe, especialmente en áreas como el mantenimiento predictivo mediante aprendizaje automático, el monitoreo de condiciones con sensores inteligentes, y la aplicación de visión por computador para la detección de riesgos operativos. Sin embargo, la transferencia de estos avances a la industria enfrenta barreras como la disponibilidad de datos de calidad, la falta de talento especializado y los costos asociados. En Ecuador, la adopción es aún más limitada, observándose principalmente esfuerzos académicos y pruebas de concepto a pequeña escala [41].

Las metodologías empleadas en la integración de la inteligencia artificial en el ámbito de la seguridad industrial, junto con los desafíos asociados que surgen, se resumen en la Tabla 3, enfatizando así las técnicas prevalentes y las métricas de evaluación.

Tabla 3: Comparativa RV vs. RA para Capacitación en Seguridad Industrial.

Característica metodológica	Descripción / Ejemplos	Referencias ejemplificadoras
Área de aplicación de IA	Monitoreo (visión: EPP, posturas, proximidad); detección de anomalías (sensores IoT); predicción de riesgos (ML sobre datos históricos/operativos); personalización del entrenamiento (análisis de desempeño en RV/RA); asistentes inteligentes y cobots.	[37, 30, 33, 35, 42]
Técnicas de IA clave	Visión por computador (CNN, YOLO, R-CNN); aprendizaje automático (SVM, árboles de decisión, random forest, redes neuronales); aprendizaje profundo; procesamiento de lenguaje natural (NLP para informes y chatbots); algoritmos de clustering y regresión.	[2, 29, 31, 36]
Fuentes de datos	Imágenes/video (cámaras fijas, móviles, drones); sensores IoT (ambientales, de máquinas); dispositivos portables (fisiológicos, de localización); registros históricos (accidentes, inspecciones); datos de desempeño del entrenamiento.	[32, 33, 34, 36]
Métricas de evaluación de modelos	Precisión, recall, F1-score, exactitud (clasificación/detección); área bajo la curva (AUC); error cuadrático medio (predicción); métricas específicas según la tarea (porcentaje de EPP correctamente detectado).	[2, 29]
Validación del sistema	Pruebas offline (conjuntos de datos); pruebas online (tiempo real); estudios piloto en entornos controlados o reales; comparación con línea base humana o métodos tradicionales.	[31, 36]
Desafíos metodológicos / implementación	Calidad, cantidad y sesgo de datos; explicabilidad (XAI) y transparencia de modelos; privacidad y ética; robustez en entornos dinámicos; necesidad de experiencia en IA y análisis de datos; integración con sistemas existentes.	[43, 44, 45, 46]

Impacto de la integración de RA, RV e IA en la seguridad operativa Entrenamiento inmersivo adaptativo: La combinación RV/RA + IA trasciende los escenarios predefinidos. Permite crear simulaciones que no solo evalúan el desempeño, sino que lo utilizan para ajustar en tiempo real la complejidad, introducir eventos inesperados basados en los errores del usuario, o proporcionar retroalimentación y guía personalizada, maximizando la transferencia del aprendizaje al puesto de trabajo [38, 47].

Asistencia inteligente contextualizada que utiliza la realidad aumentada (RA): la integración de las capacidades de inteligencia artificial, particularmente en el ámbito de

© 2025 Derechos de autor: Naranjo A.| Isa R.

la visión artificial, en los sistemas de RA permite que los dispositivos portátiles o la tecnología móvil no solo presenten información preestablecida, sino que analicen e interpreten activamente el entorno del usuario. Estos sistemas tienen la capacidad de identificar objetos, interpretar indicadores, detectar anomalías en el cumplimiento de los protocolos de seguridad (por ejemplo, herramientas incorrectas o secuencias inadecuadas) y producir alertas u orientaciones correctivas en tiempo real y contextualmente relevantes [48, 49]. Funcionan como un copiloto cognitivo para la persona que participa en la tarea.

Gemelos digitales (digital twins) para la simulación y predicción de seguridad: La creación de réplicas virtuales dinámicas de procesos, equipos o instalaciones completas, alimentadas con datos en tiempo real (sensores IoT) y potenciadas con modelos de IA, constituye un Gemelo Digital. Esta herramienta permite simular escenarios ”what-if”, predecir la emergencia de condiciones de riesgo bajo diferentes supuestos operativos, probar virtualmente la efectividad de medidas de control antes de su implementación física y optimizar planes de respuesta a emergencias [50, 51]. La RV/RA puede servir como interfaz intuitiva para la visualización e interacción con estos gemelos digitales.

En las Figuras 6, 7 y 8 se presenta un esquema general de procesos para la integración de métodos basados en RV/RA y su integración con la IA para ambientes de seguridad industrial.

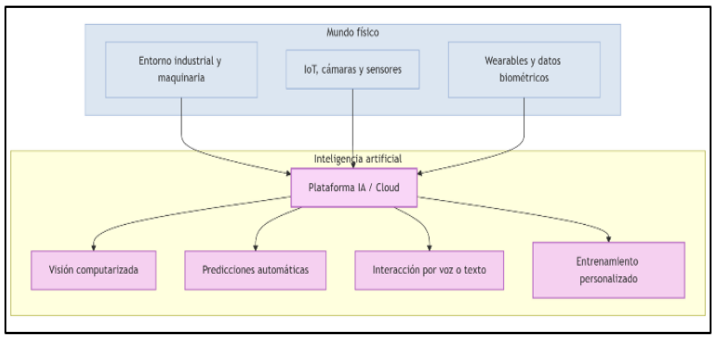


Figura 6. Esquema de Integración RV/RA + IA para Seguridad Industrial, integración del entorno físico como fuente de datos para la IA (Parte 1).

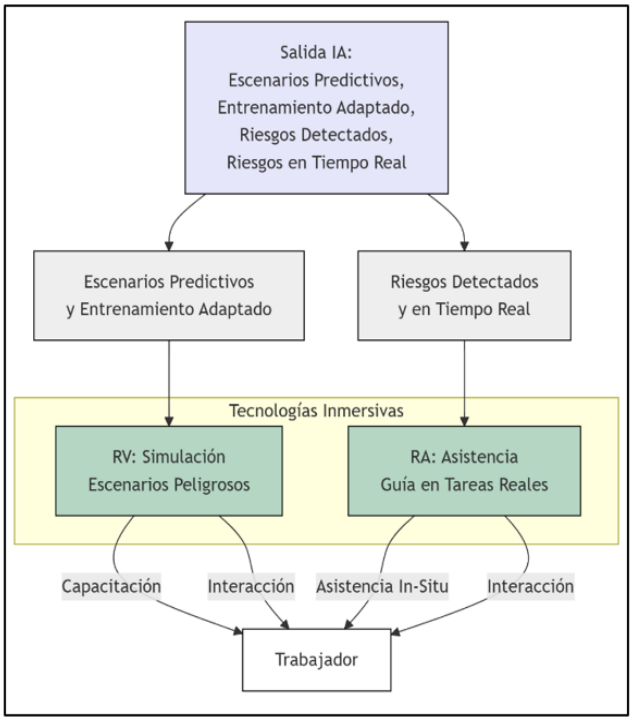


Figura 7. Esquema de Integración RV/RA + IA para Seguridad Industrial, procesamiento de datos de IA para las herramientas inmersivas (Parte 2).

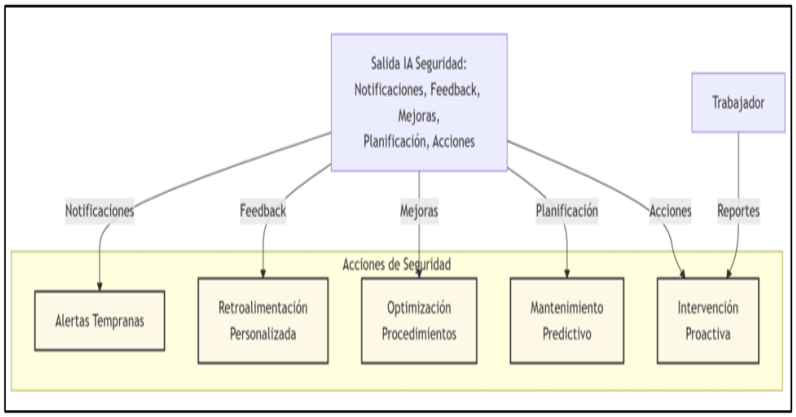


Figura 8. Esquema de Integración RV/RA + IA para Seguridad Industrial, resultado de la analítica de datos y sus diversas ejecuciones para la toma de decisión. (Parte 3).

Nota. Ilustra cómo los datos del entorno físico y del trabajador son procesados por la IA para generar insights y acciones preventivas, interactuando con el trabajador a través de interfaces inmersivas (RV/RA) para entrenamiento adaptativo y asistencia contextualizada.

Panorama Regional (Latinoamérica y Ecuador): La integración avanzada de RV/RA+IA para seguridad es aún un campo predominantemente exploratorio en la región, confinado a centros de investigación universitarios o proyectos piloto muy específicos en grandes multinacionales [52]. La complejidad técnica y los costos asociados a la integración representan barreras aún mayores que para la adopción de las tecnologías por separado.

La Tabla 4 presenta una descripción general completa de los marcos metodológicos empleados para investigar la interacción entre la realidad virtual/realidad aumentada (RV/RA) y la inteligencia artificial (IA) en el ámbito de la seguridad, haciendo hincapié en los indicadores clave de rendimiento (KPI, por sus siglas en inglés Key Performance Indicators) evaluados y los obstáculos particulares para su integración.

Tabla 4: Resumen de Métodos en Estudios de Integración RV/RA + IA para Seguridad.

Característica metodológica	Descripción / Ejemplos	Referencias ejemplificadoras
Tipo de sistema integrado estudiado	Entrenamiento inmersivo adaptativo (RV/RA + IA para personalizar dificultad y retroalimentación); asistencia RA inteligente (RA + visión IA para alertas contextuales); gemelos digitales aumentados con IA (simulación predictiva de seguridad); plataformas de monitoreo integrado (IoT + IA + visualización inmersiva).	[38, 48, 49, 50, 53]
Enfoque de integración	Arquitecturas multinivel; plataformas en la nube; middleware; APIs; integración de sensores, IA e interfaz inmersiva.	[51]
Tipo de estudio	Desarrollo de prototipos; pruebas de concepto; estudios piloto (laboratorio o campo); estudios de caso; evaluaciones heurísticas y de usabilidad.	[39, 47, 52]
KPIs / Métricas clave (sistema integrado)	Eficacia del aprendizaje (vs. sistemas no adaptativos); reducción de errores en tareas asistidas; precisión en detección de peligros (RA-IA); capacidad predictiva (gemelo digital); tiempo de respuesta a incidentes; usabilidad y carga cognitiva del sistema; aceptación del usuario a la integración.	[38, 49, 53]
Barreras específicas identificadas (integración)	Complejidad técnica de integración (hardware/software); interoperabilidad y falta de estándares; latencia y ancho de banda (en tiempo real); costo total de la solución integrada; mantenimiento de sistemas complejos; gestión del flujo de datos masivos.	[54, 55, 56]
Limitaciones investigación actual	Predominio de prototipos y pilotos a pequeña escala; escasez de validación a largo plazo en entornos reales; dificultad para aislar el efecto sinérgico vs. componentes individuales; enfoque técnico por encima de factores humanos u organizacionales.	[20, 57]

© 2025 Derechos de autor: Naranjo A.| Isa R.

Barreras y Soluciones para la Adopción

A pesar del potencial evidenciado, la traslación de estas tecnologías desde el laboratorio o el piloto hacia una adopción amplia y sostenible en los entornos industriales enfrenta múltiples barreras interrelacionadas [55].

Factores Económicos: La inversión inicial requerida para adquirir hardware especializado (como visores montados en la cabeza (HMD, por sus siglas en inglés Head-Mounted Display) de grado industrial, sensores avanzados, infraestructura computacional para IA), licencias de software, y especialmente, para desarrollar contenido de simulación y modelos de IA personalizados y validados, puede ser prohibitiva, particularmente para las Pequeñas y Medianas Empresas (PyMEs) [56]. La cuantificación del Retorno de la Inversión (ROI) sigue siendo un desafío.

Complejidad Técnica y Brecha de Habilidades: La implementación exitosa exige una convergencia de conocimientos expertos en áreas como RV/RA, ciencia de datos, IA/ML, integración de sistemas IoT y ciberseguridad, que a menudo no están disponibles internamente en las empresas industriales [58]. La falta de personal capacitado es una limitación crítica.

Factores Humanos y Organizativos: La resistencia mostrada por los empleados y los mandos intermedios, que a menudo se ve exacerbada por el escepticismo con respecto a la eficacia genuina, la preocupación por la privacidad (debido a la vigilancia de la IA), la aprensión ante un posible desplazamiento laboral o la incomodidad asociada a los problemas ergonómicos derivados de los dispositivos constituye un obstáculo sustancial [59, 60]. Si bien la usabilidad, la confianza en los avances tecnológicos y una estrategia integral de gestión del cambio son esenciales, con frecuencia permanecen infravaloradas.

Soluciones y Estrategias: La literatura también apunta hacia posibles soluciones, como modelos de negocio basados en servicios (*SaaS, TaaS - Training as a Service*), el desarrollo de plataformas low-code/no-code para democratizar la creación de contenido, el enfoque inicial en casos de uso de alto impacto, programas integrales de capacitación y sensibilización, la colaboración público-privada para fomentar estándares y la inversión en investigación aplicada para validar soluciones en contextos reales [20, 56, 58, 59]. La Tabla 5 presenta una comparación cualitativa del costo relativo de adopción de distintas tecnologías aplicadas a la seguridad industrial, según los factores técnicos y económicos identificados en la literatura revisada.

Tabla 5: Comparación cualitativa del costo relativo de adopción de tecnologías aplicadas a la seguridad industrial.

Tecnología o método	Nivel estimado de costo relativo	Principales factores que inciden en el costo de adopción
Métodos tradicionales	Bajo	No requieren infraestructura digital ni personal altamente especializado.
Digitalización básica	Moderado	Requiere dispositivos móviles, conectividad y software básico.
Realidad aumentada	Moderado a alto	Necesita desarrollo de contenido contextualizado y dispositivos ópticos.
Realidad virtual	Alto	Demanda simuladores, HMDs y entornos controlados para capacitación.
RA/RV con inteligencia artificial	Muy alto	Integración de IA, personalización, mayor complejidad técnica
Gemelos digitales con IA	Muy alto	Infraestructura IoT, modelos dinámicos, análisis en tiempo real.

Panorama Regional (Latinoamérica y Ecuador): Las barreras mencionadas se magnifican en el contexto latinoamericano debido a limitaciones estructurales en inversión en I+D+i, infraestructura digital desigual, menor disponibilidad de capital humano especializado y, en algunos casos, culturas organizacionales menos permeables a la innovación disruptiva [23, 41]. Las estrategias de adopción deben ser necesariamente adaptadas, considerando soluciones de menor costo, buscando sinergias entre empresas, universidades y gobierno, y priorizando la transferencia de conocimiento y tecnología adaptada a las necesidades locales.

3. Discusión

Se comparan las expectativas generadas por estas tecnologías con los desafíos prácticos de su implementación, destacando las limitaciones metodológicas identificadas, señalando vacíos relevantes en el conocimiento actual y sugiriendo líneas futuras para la investigación y la aplicación práctica en este campo en desarrollo.

Utilidad General y Validez de los Métodos: La literatura demuestra consistentemente, a través de estudios experimentales y de usabilidad [9, 12, 14], que la RV y la RA son herramientas pedagógicas superiores a los métodos tradicionales para ciertas tareas de capacitación en seguridad, mejorando la retención, las habilidades y el engagement [11, 16]. De manera similar, la IA muestra capacidad para detectar condiciones inseguras [29, 31] y predecir riesgos con base en datos [2, 36].

La aplicabilidad esencial de estas tecnologías parece estar firmemente establecida en entornos controlados. Sin embargo, la validez externa y la generalización de numerosos hallazgos siguen siendo objeto de escrutinio. Predominantemente, las investigaciones a corto plazo se llevan a cabo en contextos de laboratorio o simulados, utilizando muestras de conveniencia (como estudiantes) o cohortes particulares de trabajadores, lo que restringe la capacidad de generalizar a la heterogeneidad de los contextos industriales, las tareas laborales y las poblaciones trabajadoras [20]. Determinar el impacto efectivo en la disminución de las tasas de accidentes prolongados sigue siendo un objetivo difícil de alcanzar. Los métodos para evaluar la inteligencia artificial suelen centrarse en la precisión de los algoritmos (por ejemplo, el porcentaje de equipos de protección individual identificados correctamente), pero a menudo pasan por alto cómo esa detección se convierte en acciones preventivas efectivas, cambios duraderos en el comportamiento de los trabajadores o mejoras concretas en indicadores de seguridad reactivos,

como el índice de frecuencia de incidentes.

Limitaciones, Inconsistencias y Deficiencias:

Impacto Longitudinal y ROI: Existe una deficiencia significativa en forma de una investigación longitudinal exhaustiva que mide con precisión los efectos duraderos de estas tecnologías en las métricas de seguridad esenciales (como las tasas de frecuencia y la gravedad) y establece un retorno de la inversión (ROI) claro y justificable [57]. A falta de esta evidencia a largo plazo sobre la viabilidad y la eficacia económicas, resulta difícil para las organizaciones, especialmente para las pequeñas y medianas empresas (PYMES), racionalizar los importantes compromisos financieros que son necesarios.

Factor Humano, Aceptación y Confianza: Si bien se reconoce la importancia de la usabilidad y la aceptación [59, 60], la investigación sobre cómo diseñar e integrar estas tecnologías de manera que empoderen al trabajador, mejoren su bienestar y se perciban como herramientas de apoyo y no de vigilancia o control (preocupación particular con IA y wearables [45]), es insuficiente. Aspectos como la construcción de confianza en las recomendaciones de la IA [44], la gestión de la carga cognitiva inducida por RA [18], el diseño inclusivo adaptado a diversas habilidades tecnológicas y características demográficas, y la comprensión de los factores psico-sociales que influyen en la adopción, necesitan una exploración más profunda.

Una preocupación emergente que requiere mayor desarrollo es el riesgo de vigilancia laboral asociada al uso de tecnologías wearables. Si bien estos dispositivos permiten monitorear signos vitales, niveles de fatiga o cumplimiento del uso de EPP en tiempo real, también introducen prácticas de supervisión constante que pueden percibirse como invasivas o coercitivas. Esta sensación de monitoreo intensivo puede generar rechazo por parte de los trabajadores, especialmente si no se establecen límites claros sobre la recopilación, uso y protección de los datos personales. Es fundamental que la implementación de estas tecnologías se acompañe de protocolos éticos, mecanismos de transparencia y consentimiento informado, así como de marcos de gobernanza que garanticen su utilización como herramientas de prevención y no de control punitivo [45, 49].De igual manera, el uso de algoritmos para la detección automática de elementos de protección personal (EPP) puede incurrir en sesgos algorítmicos si los modelos han sido entrenados con datos no representativos o desequilibrados. Estos sesgos podrían conducir a falsas alertas, omisiones en la detección o incluso a discriminación indirecta hacia ciertos grupos por diferencias en morfología, color de piel o condiciones de iluminación. La literatura recomienda aplicar prácticas de Inteligencia Artificial Explicable (XAI), auditorías periódicas de equidad algorítmica, y validaciones cruzadas en entornos reales diversos para mitigar estos riesgos y reforzar la confianza en las decisiones automatizadas [43, 44, 45].

Complejidad de la Integración Real: La literatura a menudo aborda RV/RA o IA de forma aislada, o describe la integración a nivel conceptual o de prototipo [61]. Faltan estudios de caso empíricos y detallados sobre los desafíos prácticos (técnicos, organizacionales, culturales) de implementar, gestionar y mantener sistemas integrados RV/RA+IA en entornos operativos industriales complejos y dinámicos, incluyendo aspectos críticos como la interoperabilidad de plataformas, la gestión de datos heterogéneos, la ciberseguridad del sistema completo y la escalabilidad [54].

Ética, Transparencia y Gobernanza de la IA: Las implicaciones éticas del monitoreo continuo, la recolección masiva de datos de trabajadores y la toma de decisiones algorítmicas en seguridad (privacidad de datos, potencial de sesgos algorítmicos que discriminen a ciertos grupos [43], rendición de cuentas en caso de fallo) requieren un debate ético-legal más amplio y el desarrollo de marcos de gobernanza claros y aplicables. La necesidad de una IA Explicable (XAI) que permita comprender y auditar las decisiones de los sistemas de seguridad críticos es fundamental para la confianza y la adopción responsable [44].

Adaptación Contextual (LatAm/Ecuador): La literatura académica existente que examina específicamente los matices asociados con la adopción y las ramificaciones de estas tecnologías en el entorno sociotécnico de América Latina y Ecuador es marcadamente limitada [23, 41]. Es probable que las barreras encontradas, como los costos relativos, los desafíos de infraestructura, la disponibilidad de talento calificado y la cultura de innovación imperante, difieran o sean más pronunciadas en esta región, lo que requerirá adaptaciones sustanciales que no se han explorado adecuadamente en la investigación académica. Además, hay una escasez de estudios empíricos que investiguen modelos factibles de adopción y evalúen su eficacia en estos contextos únicos.

Propuestas Alternativas y Nuevos Enfoques Metodológicos:

Investigación de acción participativa (IAP): Es imperativo involucrar a los trabajadores, los técnicos de prevención y otras partes interesadas pertinentes desde el principio en los procesos de diseño, desarrollo, implementación y evaluación de tecnologías. Esta metodología tiene el potencial de mejorar la relevancia práctica, la aceptación y la usabilidad, así como la identificación de las necesidades y los riesgos que los desarrolladores tal vez no hayan previsto, facilitando así la creación de soluciones más eficaces y sostenibles.

Investigación Orientada a PyMEs: Centrar esfuerzos de investigación en el desarrollo y validación de soluciones tecnológicas (hardware, software, modelos de implementación) de menor costo, mayor facilidad de uso y adaptadas a las necesidades y capacidades específicas de las Pequeñas y Medianas Empresas, que constituyen una parte significativa del tejido industrial global y regional.

Enfoques de IA Centrada en el Humano: Priorizar el desarrollo y la implementación de sistemas de IA que sean diseñados para aumentar las capacidades humanas, mejorar la toma de decisiones del trabajador, ser transparentes en su funcionamiento, justos en sus resultados y respetuosos de la autonomía y privacidad del individuo.

4. Conclusiones

La evidencia recopilada confirma que la combinación de Realidad Aumentada, Realidad Virtual e Inteligencia Artificial aporta valor tangible a la formación preventiva en entornos industriales. Los estudios revisados coinciden en que los entornos inmersivos favorecen la asimilación de procedimientos críticos y promueven comportamientos seguros durante la fase de entrenamiento. La IA, al adaptar

© 2025 Derechos de autor: Naranjo A.| Isa R.

la dificultad y el tipo de retroalimentación, potencia esta efectividad y facilita el seguimiento del progreso individual sin incrementar la exposición al riesgo. Entre las aplicaciones más inmediatas destacan las simulaciones de emergencias mediante gemelos digitales y los sistemas de RA para guiar inspecciones en obra, ambos con potencial para integrarse a corto plazo en planes de seguridad corporativos. No obstante, persisten barreras asociadas a la inversión inicial, la resistencia cultural y la escasez de datos de calidad para entrenar modelos robustos.

Las líneas de trabajo futuras deberían centrarse en crear repositorios abiertos de datos multimodales, evaluar el retorno de inversión en proyectos piloto y desarrollar metodologías explicables que fomenten la confianza de operarios y reguladores. De este modo, la adopción de tecnologías inmersivas e IA podrá consolidarse como un pilar estratégico para la reducción sostenida de riesgos laborales.

Financiamiento:

Este trabajo de revisión no contó con financiamiento específico para realizar esta obra de investigación.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses en la preparación de este artículo. No se reciben beneficios comerciales directos de ninguna de las tecnologías o empresas mencionadas, y las opiniones expresadas son independientes y basadas en la evidencia revisada.

Contribución de autor/es:

Bajo los lineamientos CRediT (Taxonomía de Roles de Contribuyente), los autores dan fe de las contribuciones realizadas al trabajo de investigación, que se detallan: Autor principal Andrea Naranjo Soriano 75 %: visualización, redacción de borrador, administrador del proyecto, análisis de datos, conducción de la investigación, creación de datos, metodología, conceptualización. Coautor Ramiro Isa Jara 25 %: revisión-edición, validación, supervisión.

5. Referencias

1. WORLD ECONOMIC FORUM. How augmented reality can improve workplace safety). *WORLD ECONOMIC FORUM* [online]. 2021. Disponible en: https://www.weforum.org/stories/2021/11/augmented-reality-benefits-for-workplace-safety/.
2. PARK, S. - PARK, J. Multilevel Mixed-Effects Models to Identify Contributing Factors on Freight Vehicle Crash Severity). *Sustainability (Switzerland)* [online]. 2022, vol. 14, n.º 19. Disponible en: https://doi.org/10.3390/su141911804.
3. SHAH, I.A. - MISHRA, S. Artificial intelligence in advancing occupational health and safety: An encapsulation of developments. *Journal of Occupational Health* [online]. 2024, vol. 66, n.º 1. Disponible en: https://doi.org/10.1093/joccuh/uiad017.
4. FAIZ, T. - TSUN, M.T.K. - MAHMUD, A. AL - SIM, K.Y. A Scoping Review on Hazard Recognition and Prevention Using Augmented and Virtual Reality. *Computers* [online]. 2024, vol. 13, n.º 12, pág. 307. Disponible en: https://doi.org/10.3390/COMPUTERS13120307.
5. ALEX TOMÁS. Cómo la IA está transformando la seguridad en el entorno industrial. *Fracttal* [online]. 2025. Disponible en: https://www.fracttal.com/es/blog/transformando-la-seguridad-industrial-con-ia.
6. RENGANAYAGALU, S. KUMAR - MALLAM, S.C. - NAZIR, S. Effectiveness of VR Head Mounted Displays in Professional Training: A Systematic Review. *Technology, Knowledge and Learning* [online]. 2021, vol. 26, n.º 4, págs. 999-1041. Disponible en: https://doi.org/10.1007/S10758-020-09489-9.
7. HALABI, O. - SALAHUDDIN, T. - KARKAR, A.G. - ALINIER, G. Virtual reality for ambulance simulation environment. *Multimedia Tools and Applications* [online]. 2022, vol. 81, n.º 22, págs. 32119-32137. Disponible en: https://doi.org/10.1007/S11042-022-12980-3.
8. KMAN, N.E. - PRICE, A. - BEREZINA BLACKBURN, V. - PATTERSON, J. - MAICHER, K. - WAY, D.P. - MCGRATH, J. - PANCHAL, A.R. - LUU, K. - OLISZEWSKI, A. ET AL. First Responder Virtual Reality Simulator to train and assess emergency personnel for mass casualty response. *JACEP Open* [online]. 2023, vol. 4, n.º 1, e12903. Disponible en: https://doi.org/10.1002/EMP2.12903.
9. LOVREGLIO, R. - DUAN, · XINYUE - RAHOUTI, A. - PHIPPS, R. - NILSSON, D. Comparing the effectiveness of fire extinguisher virtual reality and video training. *Springer Nature Link* [online]. 2021, vol. 25, págs. 133-145. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s10055-020-00447-5.
10. KANTAMANENI, K. - JALLA, K. - RENZU, M. - JENA, R. - KANNAN, A. - JAIN, R. - MURALIDHARAN, S. - YANAMALA, V. LAKSHMI - ZUBAIR, Z. - DOMINIC, J.L. ET AL. Virtual Reality as an Affirmative Spin-Off to Laparoscopic Training: An Updated Review. *Cureus* [online]. 2021, vol. 13, n.º 8. Disponible en: https://doi.org/10.7759/CUREUS.17239.
11. EFENDI, D. - APRILIYASARI, R.W. - PRIHARTAMI MASSIE, J.G.E. - WONG, C.L. - NATALIA, R. - UTOMO, B. - SUNARYA, C.E. - APRIYANTI, E. - CHEN, K.H. The effect of virtual reality on cognitive, affective,

and psychomotor outcomes in nursing staffs: systematic review and meta-analysis. *BMC Nursing* [online]. 2023, vol. 22, n.º 1, págs. 1-15. Disponible en: https://doi.org/10.1186/S12912-023-01312-X.

12. ALZARRAD, A. - MILLER, M. - DURHAM, L. - CHOWDHURY, S. Revolutionizing construction safety: introducing a cutting-edge virtual reality interactive system for training US construction workers to mitigate fall hazards. *Frontiers in Built Environment* [online]. 2024, vol. 10, pág. 1320175. Disponible en: https://doi.org/10.3389/FBUIL.2024.1320175.

13. KRUG, M. - CZOK, V. - MÜLLER, S. - WEITZEL, H. - HUWER, J. - KRUSE, S. - MÜLLER, W. Ein Bewertungsraster für Augmented-Reality-Lehr-Lernszenarien im UnterrichtAR in science education – an AR based teaching-learning scenario in the field of teacher education. *CHEMKON* [online]. 2022, vol. 29, n.º S1, págs. 312-318. Disponible en: https://doi.org/10.1002/CKON.202200016.

14. BILOUS, V. - STÄDTER, J.P. - GEBAUER, M. - BERGER, U. - BILOUS, V. - STÄDTER, J.P. - GEBAUER, Á.M. - BERGER, Á.U. - GEBAUER, M. - BERGER, U. Usage of Augmented Reality for Improved Human-Machine Interaction and Real-Time Error Correction of Laboratory Units. *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021* [online]. 2022, págs. 263-274. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-74032-0_22.

15. DAMIANI, L. - REVETRIA, R. - MORRA, E. Safety in Industry 4.0: The Multi-Purpose Applications of Augmented Reality in Digital Factories. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* [online]. 2020. Disponible en: https://doi.org/10.25046/aj050232.

16. MAKRANSKY, G. - KLINGENBERG, S. Virtual reality enhances safety training in the maritime industry: An organizational training experiment with a non-WEIRD sample. *Journal of Computer Assisted Learning* [online]. 2022, vol. 38, n.º 4, págs. 263-274. Disponible en: https://doi.org/10.1111/JCAL.12670.

17. KLIMANT, P. - KOLLATSCH, C. Concepts for creating augmented reality based technical documentations for the maintenance of machine tools. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* [online]. 2022, vol. 16, n.º 2, págs. 765-773. Disponible en: https://doi.org/10.1007/S12008-022-00880-7.

18. MONTANARO, T. - SERGI, I. - STEFANIZZI, I. - LANDI, L. - DONATO, L. DI - PATRONO, L. IoT-Aware Architecture to Guarantee Safety of Maintenance Operators in Industrial Plants. *Applied System Innovation* [online]. 2023, vol. 6, n.º 2, pág. 46. Disponible en: https://doi.org/10.3390/ASI6020046.

19. MAHMOUD, K. - HARRIS, I. - YASSIN, H. - HURKXKENS, T.J. - MATAR, O.K. - BHATIA, N. - KALKANIS, I. Does immersive vr increase learning gain when compared to a non-immersive vr learning experience? *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* [online]. 2020, vol. 12206, págs. 480-498. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50506-6_33.

20. TRILLO CABELLO, A. - MARTÍNEZ-ROJAS, M. - CARRILLO-CASTRILLO, J.A. - RUBIO-ROMERO, J.C. Occupational accident analysis according to professionals of different construction phases using association rules. *Safety Science* [online]. 2021, vol. 144, pág. 105457. Disponible en: https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2021.105457.

21. ZIELINSKI NGUYEN AJSLEV, J. - ELISABETH EJSTRUP NIMB, I. Virtual design and construction for occupational safety and health purposes – A review on current gaps and directions for research and practice. *Safety Science* [online]. 2022, vol. 155, pág. 105876. Disponible en: https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2022.105876.

22. PEGRUM, M. Augmented reality learning education in real-world contexts. *Research publishing* [online]. 2021. Disponible en: https://doi.org/10.14705/rpnet.2021.50.1245.

23. NETO, L. - MANTA, R. - CAVALCANTI, M. - SANTOS, F. - NEUWALD, A. - LINS, R. Realidade virtual aplicada à segurança do trabalho na construção civil: uma revisão sistemática da literatura. *Conjecturas* [online]. 2022, vol. 22, n.º 11, págs. 875-885. Disponible en: https://doi.org/10.53660/conj-1455-2a12.

24. PUTCHAKARN, W. Journey of Offshore Wellhead Platform Reuse Project. *Conjecturas* [online]. 2020. Disponible en: https://conference.thaince.org/index.php/ncce25/article/view/152/20.

25. NASSEREDDINE, H. - HANNA, A.S. - VEERAMANI, D. - LOTFALLAH, W. Augmented Reality in the Construction Industry:

© 2025 Derechos de autor: Naranjo A.| Isa R.

Use-Cases, Benefits, Obstacles, and Future Trends. *Frontiers in Built Environment* [online]. 2022, vol. 8, pág. 730094. Disponible en: https://doi.org/10.3389/FBUIL.2022.730094.

26. ALMEIDA, J. - JACOME, E.A. - GAVILÁNEZ, T. - PUNINA, D. Feasibility analysis of smart manufacturing systems application in Ecuador. *Ciencia Digital* [online]. 2022, vol. 6, n.º 3, págs. 42-60. Disponible en: https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v6i3.1864.

27. CAMPERO JURADO, I. - MÁRQUEZ SÁNCHEZ, S. - QUINTANAR GÓMEZ, J. - RODRÍGUEZ, S. CORCHADO, J.M. Smart Helmet 5.0 for Industrial Internet of Things Using Artificial Intelligence. *Safety Science* [online]. 2020, vol. 20, n.º 21, pág. 6241. Disponible en: https://doi.org/10.3390/S20216241.

28. PISHGAR, M. - ISSA, S.F. - SIETSEMA, M. - PRATAP, P. - DARABI, H. REDECA. A Novel Framework to Review Artificial Intelligence and Its Applications in Occupational Safety and Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2021, vol. 18, n.º 13, pág. 6705. Disponible en: https://doi.org/10.3390/IJERPH18136705.

29. MASSIRIS, M. - FERNÁNDEZ, J.A. - BAJO, J. - DELRIEUX, C. An automated system for monitoring the use of personal protective equipment in the construction industry. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial* [online]. 2021, vol. 18, n.º 1, págs. 68-74. Disponible en: https://doi.org/10.4995/RIAI.2020.13243.

30. PATEL, V. - CHESMORE, A. - LEGNER, C.M. - PANDEY, S. Trends in Workplace Wearable Technologies and Connected□Worker Solutions for Next□Generation Occupational Safety, Health, and Productivity. *Advanced Intelligent Systems* [online]. 2022, vol. 4, n.º 1. Disponible en: https://doi.org/10.1002/aisy.202100099.

31. MUDIYANSELAGE, S.E. - NGUYEN, P.H.D. - RAJABI, M.S. - AKHAVIAN, R. Automated Workers' Ergonomic Risk Assessment in Manual Material Handling Using sEMG Wearable Sensors and Machine Learning. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2021. Disponible en: https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS10202558.

32. PAUDEL, P. - KWON, Y.J. - KIM, D.H. - CHOI, K.H. Industrial Ergonomics Risk Analysis Based on 3D-Human Pose Estimation. *Electronics (Switzerland)* [online]. 2022, vol. 11, n.º 20. Disponible en: https://doi.org/10.3390/electronics11203403.

33. MÁRQUEZ-SÁNCHEZ, S. - CAMPERO-JURADO, I. - HERRERA-SANTOS, J. - RODRÍGUEZ, S. - CORCHADO, J.M. Intelligent platform based on smart ppe for safety in workplaces. *Sensors)* [online]. 2021, vol. 21, n.º 14. Disponible en: https://doi.org/10.3390/s21144652.

34. LEMOS, J. - GASPAR, P.D. - LIMA, T.M. Individual Environmental Risk Assessment and Management in Industry 4.0: An IoT-Based Model. *Applied System Innovation)* [online]. 2022, vol. 5, n.º 5. Disponible en: https://doi.org/10.3390/asi5050088.

35. HUANG, B. - WEI, J. - TANG, Y. - LIU, C. Enterprise Risk Assessment Based on Machine Learning. *Computational Intelligence and Neuroscience)* [online]. 2021. Disponible en: https://doi.org/10.1155/2021/6049195.

36. KOKLONIS, K. - SARAFIDIS, M. - VASTARDI, M. - KOUTSOURIS, D. Utilization of Machine Learning in Supporting Occupational Safety and Health Decisions in Hospital Workplace. *Engineering, Technology Applied Science Research)* [online]. 2021. Disponible en: https://doi.org/10.48084/ETASR.4205.

37. NIEMI, H. - PEA, R.D. - LU, Y. AI in Learning: Designing the Future. *Springer International Publishing)* [online]. 2022, 1-344 s. ISBN 9783031096877.

38. HORVÁTH, I. An Analysis of Personalized Learning Opportunities in 3D VR. *Frontiers in Computer Science)* [online]. 2022, vol. 21, n.º 3. Disponible en: https://doi.org/10.3389/fcomp.2021.673826.

39. AZCORRA NOVELO, V.G. - GALLARDO CÓRDOVA, K.E. Customisation of a diagnostic and feedback process for the development of intermediate algebra competences. *Revista de Educación a Distancia)* [online]. 2023, vol. 23, n.º 73. Disponible en: https://doi.org/10.6018/RED.525741.

40. ROJAS, L. - PEÑA, Á. - GARCIA, J. AI-Driven Predictive Maintenance in Mining: A Systematic Literature Review on Fault Detection, Digital Twins, and Intelligent Asset Management. *Applied Sciences 2025)* [online]. 2025, vol. 15, n.º 6, pág. 3337. Disponible en: https://doi.org/10.3390/APP15063337.

41. GRÖGER, C. There is no AI without data. *Communications of the ACM)* [online]. 2021, vol. 64, n.º 11, págs. 98-108. Disponible en: https://doi.org/10.1145/3448247.

42. BORBONI, A. - REDDY, K.V.V. - ELAMVAZUTHI, I. - AL-QURAISHI, M.S. - NATARAJAN, E. - AZHAR ALI. The

Expanding Role of Artificial Intelligence in Collaborative Robots for Industrial Applications: A Systematic Review of Recent Works. *Search for Articles MDPI)* [online]. 2023. Disponible en: https://doi.org/10.3390/machines11010111.

43. FELZMANN, H. - FOSCH-VILLARONGA, E. - LUTZ, C. - TAMÒ-LARRIEUX, A. Towards Transparency by Design for Artificial Intelligence. *Science and Engineering Ethics)* [online]. 2020, vol. 26, n.º 6, págs. 3333-3361. Disponible en: https://doi.org/10.1007/S11948-020-00276-4.

44. TOREINI, E. - AITKEN, M. - ELLIOTT, K. - GONZALEZ ZELAYA, C. The relationship between trust in AI and trustworthy machine learning technologies. *ACM Journals)* [online]. 2020, págs. 272-283. Disponible en: https://doi.org/10.1145/3351095.3372834.

45. LI, B. - QI, P. - LIU, B. - DI, S. - LIU, J. - PEI, J. - YI, J. - ZHOU, B. Trustworthy AI: From Principles to Practices. *ACM Computing Surveys)* [online]. 2023, vol. 55, n.º 9, págs. 272-283. Disponible en: https://doi.org/10.1145/3555803.

46. HABBAL, A. - ALI, M.K. - ABUZARAIDA, M.A. Artificial Intelligence Trust, Risk and Security Management (AI TRiSM): Frameworks, applications, challenges and future research directions. *Expert Systems With Applications)* [online]. 2024, vol. 240, pág. 122442. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122442.

47. VÉLIZ VEGA, A. - CORREA MADRIGAL, O. - CUBA, L.H. Aprendizaje adaptativo basado en Simuladores de Realidad Virtual Adaptive learning based on Virtual Reality Simulators. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas)* [online]. 2021, vol. 15, n.º 2. Disponible en: https://orcid.org/0000-0001-7082-9322.

48. LUNG, L.W. - WANG, Y.R. Applying Deep Learning and Single Shot Detection in Construction Site Image Recognition. *Buildings)* [online]. 2023, vol. 13, n.º 4, pág. 1074. Disponible en: https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13041074.

49. IZQUIERDO DOMENECH, J. - LINARES PELLICER, J. - ORTA LOPEZ, J. Towards achieving a high degree of situational awareness and multimodal interaction with AR and semantic AI in industrial applications. *Multimedia Tools and Applications)* [online]. 2023, vol. 82, n.º 10, págs. 15875-15901. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s11042-022-13803-1.

50. BILLER, B. - BILLER, S. Implementing Digital Twins That Learn: AI and Simulation Are at the Core. *Machines)* [online]. 2023, vol. 11, n.º 4. Disponible en: https://doi.org/10.3390/machines11040425.

51. RASHEED, A. - SAN, O. - KVAMSDAL, T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access)* [online]. 2020, vol. 8, págs. 21980-22012. Disponible en: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143.

52. HENRY NELSON AGUILERA VIDAL - FRANKLIN LANDERSON GALLEGOS RAMÍREZ - ANABELL MARTHA REA FREIRE - MICHAEL NILO GALEAS. Casco inteligente de seguridad industrial para la prevención de accidentes y enfermedades ocupacionales. *)* [Online]. 2021. Disponible en: https://doi.org/10.18779.

53. ORTIZ, B. - LINDENBAUM, D. - NASSAR, J. - LAMMERS, B. - WAHL, J. - MANGUM, R. - SMITH, M. - BOSCH, M. A Common Operating Picture Framework Leveraging Data Fusion and Deep Learning. *Accenture Federal Services)* [online]. 2020. Disponible en: https://arxiv.org/pdf/2001.05982.

54. SUN, S. - REPETA, M. - VISH, M.H. - FUNG, N.E. - THOMAS, C. Towards 5G Zero Trusted Air Interface Architecture. *Dell Technologies)* [online]. 2022. Disponible en: https://arxiv.org/pdf/2211.03776.

55. OPOKU, D.G.J. - PERERA, S. - OSEI-KYEI, R. - RASHIDI, M. - BAMDAD, K. - FAMAKINWA, T. Barriers to the Adoption of Digital Twin in the Construction Industry: A Literature Review. *MDPI)* [online]. 2023. Disponible en: https://doi.org/10.3390/informatics10010014.

56. FORTUNA, C. - MUŠIĆ, D. - CERAR, G. - ČAMPA, A. - KAPSALIS, P. - MOHORČIČ, M. On-Premise Artificial Intelligence as a Service for Small and Medium Size Setups. *Computer Science)* [online]. 2022. Disponible en: http://arxiv.org/abs/2210.06956.

57. THONON, F. - GODON-RENSONNET, A.S. - PEROZZIELLO, A. - GARSI, J.P. - DAB, W. - EMSALEM, P. Return on investment of workplace-based prevention interventions: a systematic review. *European Journal of Public Health)* [online]. 2023, vol. 33, n.º 4, págs. 612-618. Disponible en: https://doi.org/10.1093/EURPUB/CKAD092.

58. GOUPIL, F. - LASKOV, P. - PEKARIC, I. - FELDERER, M. - DÜRR, A. - THIESSE, F. Towards Understanding the Skill Gap in

Cybersecurity; Towards Understanding the Skill Gap in Cybersecurity. *European Journal of Public Health)* [online]. 2022. Disponible en: https://doi.org/10.1145/1122445.1122456.

59. DAGOGO, M. - AKPAN, T. - PETER, E. Organizational Change and the Imperatives of Managing Employee Resistance: A Conceptual Review. *Journal of Strategic Management)* [online]. 2021, vol. 6, n.º 1, págs. 18-32. Disponible en: https://doi.org/10.47672/JSM.683.

60. ONYUSHEVA, I. - ELSWERKY, A. FACILITATING ORGANIZATIONAL CHANGE: UNDERSTANDING AND MANAGING RESISTANCE. *International Academic Conference on Educational Social Innovations)* [online]. 2020, vol. 389, págs. 389-396. Disponible en: https://conferaces.com/index.php/journal/article/view/215.

61. APOSTOLAKIS, K.C. - DIMITRIOU, N. - MARGETIS, G. - NTOA, S. - TZOVARAS, D. - STEPHANIDIS, C. DARLENE. Improving situational awareness of European law enforcement agents through a combination of augmented reality and artificial intelligence solutions. *Open Research Europe)* [online]. 2021, vol. 1, pág. 87. Disponible en: https://doi.org/10.12688/openreseurope.13715.1.

Artículo de **libre acceso** bajo los términos de una ***Licencia Creative Commons Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual 4.0 Internacional.*** Se permite que otros remezclen, adapten y construyan a partir de su obra sin fines comerciales, siempre y cuando se otorgue la oportuna autoría y además licencien sus nuevas creaciones bajo los mismos términos.