

# Integración de la inteligencia artificial y métodos clásicos para la evaluación de riesgos ergonómicos

## *Integration of artificial intelligence and traditional methods for ergonomic risk assessment*

Felipe, Larez<sup>1</sup>  , Yéssika, Maribao<sup>2</sup> 

(1) Carlisle Construction Materials, Carlisle, EE UU.

(2) Centro de Investigación Anglo Latín Culture 369, Florida, EE UU.

### Resumen

La evaluación de riesgos ergonómicos ha dependido históricamente de métodos clásicos basados en observación directa, medición manual y categorización postural, lo que expone los resultados a variaciones derivadas de la experiencia y criterio del evaluador. La incorporación de inteligencia artificial (IA), mediante visión computacional, sensores inerciales y sistemas de captura de movimiento, introduce una herramienta capaz de incrementar la precisión, la consistencia y el monitoreo continuo en tiempo real. El presente estudio analiza las ventajas y limitaciones de ambos enfoques en la evaluación de Trastornos Musculoesqueléticos (TME), proponiendo un modelo híbrido que integra IA con métodos validados como REBA, RULA y NIOSH, garantizando rigor científico y aplicabilidad en entornos laborales reales. Desde la perspectiva normativa, se examina el contexto internacional y el marco legal estadounidense actualizado. La Unión Europea lidera con el Reglamento (UE) 2024/1689, que establece obligaciones vinculantes para sistemas de alto riesgo, incluyendo supervisión humana, trazabilidad y protección de datos. En Asia, la ASEAN y Singapur avanzan mediante guías éticas y estrategias nacionales sin carácter obligatorio, orientadas a la gobernanza responsable de la IA. En Estados Unidos, la Orden Ejecutiva de octubre de 2023 fue revocada el 20 de enero de 2025 y sustituida por la Executive Order 14179 – Removing Barriers to American Leadership in Artificial Intelligence, la cual prioriza la innovación e instruye a las agencias federales a revisar regulaciones previas, aunque aún no existe una ley federal general de IA. Se advierte que el uso no regulado de herramientas automatizadas, sin validación profesional, puede generar riesgos legales y técnicos para trabajadores y empleadores. En conclusión, el enfoque híbrido constituye la alternativa más eficiente, científicamente robusta y jurídicamente defendible, al conjugar la rapidez de la IA con la supervisión profesional, la trazabilidad metodológica y el cumplimiento de estándares internacionales.

**Palabras clave:** Inteligencia Artificial, Ergonomía Aplicada, Riesgos Ergonómicos, Métodos Clásicos, Marco Legal.

### Abstract

The evaluation of ergonomic risks has traditionally relied on classical methods involving direct observation, manual measurement, and postural categorization. These approaches are susceptible to variations based on the evaluator's experience and criteria. The adoption of artificial intelligence (AI), through computer vision, inertial sensors, and motion capture systems, offers a tool capable of enhancing accuracy, consistency, and real-time continuous monitoring. This study examines the benefits and drawbacks of both methods in assessing Musculoskeletal Disorders (MSDs), proposing a hybrid model that combines AI with validated techniques like REBA, RULA, and NIOSH, ensuring scientific rigor and practical relevance in actual work settings. From a regulatory standpoint, the global context and the latest U.S. legal framework are reviewed. The European Union leads with Regulation (EU) 2024/1689, which sets binding requirements for high-risk systems, including human oversight, traceability, and data protection. In Asia, ASEAN and Singapore are progressing through ethical guidelines and non-binding national strategies aimed at responsible AI governance. In the U.S., the October 2023 Executive Order was revoked on January 20, 2025, and replaced by Executive Order 14179 – Removing Barriers to American Leadership in Artificial Intelligence, emphasizing innovation and instructing federal agencies to review existing regulations. However, there is currently no comprehensive federal AI law. The order warns that unregulated use of automated tools, without professional validation, can pose legal and technical risks to workers and employers. In conclusion, a hybrid approach remains the most efficient, scientifically sound, and legally justifiable option, as it couples the speed of AI with professional oversight, methodological traceability, and adherence to international standards.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Applied Ergonomics, Ergonomic Risks, Classical Methods, Legal Framework.

Recibido/Received	21-08-2025	Aprobado/Approved	29-10-2025	Publicado/Published	30-10-2025
-------------------	------------	-------------------	------------	---------------------	------------

## Introducción

La ergonomía se ha transformado en una ciencia aplicada que busca perfeccionar la interacción entre las personas y los sistemas en los que operan, utilizando principios, teorías y métodos para diseñar entornos laborales que promuevan tanto el bienestar humano como el rendimiento organizacional (Bazaluk et al., 2023). En este contexto, la identificación y gestión de riesgos laborales se convierte en una prioridad, especialmente en lo que respecta a los Trastornos Musculoesqueléticos (TME), considerados hoy como uno de los principales retos de la salud ocupacional. Estas afecciones, que comprometen músculos, tendones, articulaciones, huesos y nervios (Nygaard et al., 2022), afectan gravemente la calidad de vida de los trabajadores y generan un impacto económico considerable en los sistemas de salud y en la productividad global (Hulshof et al., 2021).

La exposición a factores de riesgo ergonómico se ha consolidado como la causa predominante de los TME, con evidencia que señala consistentemente a la manipulación de cargas, las posturas mantenidas, los movimientos repetitivos y las vibraciones como los principales desencadenantes (Fan et al., 2022; Paskarini et al., 2025). Estos riesgos se manifiestan en múltiples sectores, desde el ámbito sanitario — donde enfermeras y fisioterapeutas enfrentan exigencias físicas intensas (Ayvaz et al., 2023; Pejčić et al., 2021)— hasta la industria manufacturera, la agricultura e incluso profesiones altamente especializadas como la cirugía, donde los procedimientos prolongados y las posturas estáticas generan lesiones significativas (Aaron et al., 2021; Monfared et al., 2022). En este escenario, la evaluación ergonómica rigurosa no es una sugerencia técnica, sino una exigencia ética y operativa.

Históricamente, la ergonomía ha confiado en métodos estandarizados que han demostrado su validez durante décadas (Holzgreve et al., 2022). Herramientas como la Ecuación Revisada de NIOSH (1991), RULA y REBA han sido adoptadas por organismos internacionales como OSHA, NIOSH, ISO e INSST, lo que garantiza su legitimidad científica y legal. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones evidentes en entornos laborales modernos, caracterizados por su dinamismo y variabilidad. Requieren observación directa, mediciones manuales y dependen del criterio del evaluador, lo que introduce subjetividad y ambigüedad (Pejčić et al., 2021). Además, al capturar solo momentos específicos de riesgo, pueden pasar por alto la variabilidad postural y la fatiga acumulada (Raghavan et al., 2022). Su aplicación exhaustiva también demanda tiempo, lo que limita la capacidad de evaluación en múltiples puestos de trabajo.

Ante estas restricciones, la última década ha presenciado una transformación radical con la incorporación de la Inteligencia Artificial (IA) en la evaluación ergonómica (Camargo Salinas et al., 2024). El desarrollo de algoritmos de aprendizaje automático, visión computacional y sensores portátiles ha permitido automatizar el proceso de observación, medición y análisis de riesgos. Herramientas como OpenPose, DeepLabCut y MediaPipe permiten realizar análisis biomecánicos en tiempo real mediante el seguimiento de puntos corporales clave, lo que posibilita mediciones continuas y objetivas sin intervención humana (Chatzis et al., 2022; Scataglini et al., 2025). Esta capacidad de monitoreo constante permite identificar patrones de movimiento y carga que escapan a la observación humana (Yunus et al., 2021). Los dispositivos portátiles complementan esta información con datos fisiológicos como la frecuencia cardíaca y la aceleración, facilitando análisis predictivos sobre la fatiga y el riesgo de TME. Los resultados se presentan en reportes detallados con mapas de calor, simulaciones tridimensionales y análisis multifactoriales que reducen el margen de error humano (Chatzis et al., 2022). Esta tecnología ya ha demostrado su eficacia en entornos de alto riesgo, como la cirugía robótica, donde se ha logrado reducir el riesgo ergonómico en comparación con procedimientos laparoscópicos tradicionales (Dixon et al., 2024; Monfared et al., 2022; Aaron et al., 2021).

No obstante, el uso de IA en ergonomía profesional enfrenta obstáculos importantes. En Estado Unidos, el más crítico es la falta de estandarización legal: los métodos basados en IA aún no cuentan con reconocimiento oficial por parte de organismos como OSHA o NIOSH, lo que limita su uso normativo. Además, el costo inicial de implementación —estimado en \$500 mensuales— y la necesidad de capacitación técnica especializada dificultan su adopción por pequeñas y medianas empresas. La grabación

continúa en el entorno laboral también plantea preocupaciones sobre la privacidad. Desde el punto de vista técnico, la IA suele generar recomendaciones correctivas que son demasiado genéricas y no aborda adecuadamente riesgos complejos como la carga mental, el envejecimiento de la fuerza laboral o las diferencias de género (Nygaard et al., 2022). Tan bien, existe el riesgo de que la facilidad de uso de estas herramientas desplace el juicio experto, debilitando el enfoque integral que requiere la ergonomía.

Este dilema plantea una tensión fundamental entre la validación normativa de los métodos clásicos y la eficiencia objetiva de la IA. El desafío consiste en encontrar un equilibrio entre la precisión tecnológica y el rigor científico, sin sacrificar el criterio profesional (Danylak et al., 2024). El presente artículo propone resolver esta tensión mediante un análisis comparativo y el desarrollo de una metodología integrada que evalúe las ventajas y limitaciones de ambos enfoques en la evaluación cuantitativa de riesgos ergonómicos.

En cuanto al marco regulatorio, la aplicación de IA en el entorno laboral ha avanzado de manera desigual. La Unión Europea ha tomado la delantera con el Reglamento 2024/1689, que establece requisitos vinculantes para sistemas de IA considerados de alto riesgo, incluyendo supervisión humana, transparencia algorítmica, trazabilidad y protección de datos personales (European Commission, 2024). En Asia, el enfoque es más ético y técnico. La ASEAN publicó en 2024 una guía para la gobernanza de la IA basada en principios como equidad, seguridad y control humano, aunque sin fuerza legal vinculante (ASEAN, 2024). Singapur ha desarrollado una estrategia nacional de IA reforzada en 2023, que incluye protocolos técnicos y lineamientos sectoriales aplicables a salud ocupacional y manufactura, como herramientas de evaluación postural automatizada (Smart Nation Singapore, 2023).

En Estados Unidos, el panorama cambió en 2025. La Orden Ejecutiva de octubre de 2023, que proponía lineamientos de seguridad y supervisión para el uso de IA, fue revocada el 20 de enero de 2025 y sustituida por la Executive Order 14179 – Removing Barriers to American Leadership in Artificial Intelligence, firmada el 23 de enero de 2025, la cual reorienta la política federal hacia la innovación y la infraestructura tecnológica (The White House, 2025). Aunque esta orden establece directrices de alcance federal, Estados Unidos aún no cuenta con una ley federal que regule la aplicación de IA. En el ámbito de la seguridad y salud ocupacional, tampoco se han emitido normas técnicas específicas que regulen la aplicación de IA en evaluaciones ergonómicas. Tanto OSHA como NIOSH han reconocido el potencial de estas tecnologías y han publicado documentos orientativos sobre automatización, robótica e innovación en el lugar de trabajo; sin embargo, dichos materiales tienen carácter investigativo o de buenas prácticas y no constituyen requisitos obligatorios. Por lo tanto, en ausencia de estándares federales vinculantes, la IA solo puede utilizarse como herramienta complementaria y su legitimidad técnica depende de la supervisión profesional, la trazabilidad metodológica y la utilización de métodos ergonómicos validados como REBA, RULA y NIOSH.

## **Materiales y métodos**

### **Ergonomía clásica y métodos estandarizados**

Los métodos clásicos requieren observación directa o medición manual (posturas, ángulos, frecuencias, peso, duración) y sus resultados dependen del criterio del evaluador y del registro visual o escrito. Son métodos estandarizados y ampliamente aceptados por OSHA, NIOSH, ISO, INSST. Entre los métodos clásicos podemos citar la Ecuación Revisada de NIOSH (1991), Métodos RULA y REBA (postura corporal, Moore & Garg (Strain Index), MAPO y DINO (sector hospitalario), ISO 11228 y ISO 12296. La Figura 1 ilustra un ejemplo de la plantilla clásica utilizada para la aplicación del Método REBA.

### **Evaluaciones con inteligencia artificial**

Las evaluaciones mediante IA se llevan a cabo a través de:

- **Análisis de video por visión computacional:** Utilizando herramientas como OpenPose, DeepLabCut o MediaPipe.

- **Sensores portátiles (wearables):** Con IA integrada para medir variables fisiológicas y biomecánicas como frecuencia cardíaca, aceleración, postura y fatiga.
- **Algoritmos de aprendizaje automático:** Estos predicen el riesgo de TME a partir de grandes bases de datos.

The image shows a detailed 'REBA Assessment Worksheet' with 13 steps for evaluating posture. It includes diagrams of the human body showing posture angles and corresponding scores. The steps are: 1. Locate Neck Position, 2. Locate Trunk Position, 3. Locate Legs, 4. Look-up Posture Score in Table A, 5. Add Force/Load Score, 6. Score A, Find Row in Table C, 7. Locate Upper Arm Position, 8. Locate Lower Arm Position, 9. Locate Wrist Position, 10. Look-up Posture Score in Table B, 11. Add Coupling Score, 12. Score B, Find Column in Table C, 13. Activity Score. The worksheet also includes several tables (A, B, C) for scoring and a final REBA Score calculation.

**Figura 1.** Plantilla clásica del Método REBA

## Enfoque híbrido propuesto

Se propone llevar a cabo evaluaciones de riesgo ergonómico basadas en un enfoque híbrido. Este modelo integra la IA con los métodos clásicos, buscando la ecuación de IA + Método clásico = precisión + validación científica. El proceso recomendado es:

1. Grabación del trabajador con cámara o sensor IA (capturando postura, ángulos, carga).
2. El *software* detecta automáticamente la posición del tronco y extremidades.
3. Los datos biomecánicos se exportan y se les aplica automáticamente un método clásico (ej., RULA o REBA).
4. El ergonomista valida el resultado final mediante observación humana, listando los factores contribuyentes.

## Resultados

Esta sección presenta los aportes de los métodos de evaluación ergonómica tradicionales (RULA, REBA y NIOSH) en la muestra de puestos de trabajo analizados. Estos datos servirán como base comparativa para discutir la precisión, el tiempo de ejecución y la objetividad de la IA en la siguiente sección.

### Aportes del riesgo postural con el Método RULA y REBA

Se presenta la evaluación de las posturas adoptadas por los trabajadores en las tareas críticas. Se detallan las puntuaciones finales de RULA y REBA para identificar el nivel de riesgo y la necesidad de acción correctiva inmediata. La Tabla 1 resume estos resultados.

En la tabla 1, se presenta la aplicación de los métodos clásicos de evaluación ergonómica utilizados para el análisis de posturas de trabajo. Tanto el método REBA (Rapid Entire Body Assessment) como el RULA (Rapid Upper Limb Assessment) permiten al evaluador, mediante la observación sistemática de las tareas, determinar el nivel de riesgo ergonómico al que está expuesto el trabajador.

Durante el proceso de evaluación, se identifican y registran los ángulos articulares, cargas y fuerzas aplicadas sobre diferentes segmentos corporales, como cuello, hombros, espalda, muñecas y

extremidades inferiores. Con base en estos parámetros, se establecen los niveles de riesgo y las acciones requeridas para su control.

**Tabla 1.** Aportes de la evaluación postural de riesgo ergonómico (RULA y REBA)

Puesto de trabajo	Tarea analizada	Puntuación RULA	Nivel de acción RULA (1-4)	Puntuación REBA	Nivel de acción REBA (1-5)	Prioridad de intervención (Alta/Media/Baja)
Operador de Ensamblaje (Línea A)	Colocación de piezas superiores	6	3 (Acción Pronto Necesaria)	9	3 (Riesgo Alto)	Alta
Inspector de Calidad (Estación 4)	Revisión visual de componentes	3	1 (Riesgo Aceptable)	4	1 (Riesgo Insignificante)	Baja
Operador de Bodega (Picking)	Levantamiento de cajas medianas	7	4 (Acción Inmediata Necesaria)	12	4 (Riesgo Muy Alto)	Alta
Auxiliar de Oficina (Digitación)	Trabajo en teclado y mouse	4	2 (Investigar)	6	2 (Riesgo Medio)	Media

(... Otros puestos de la muestra)

Por ejemplo, en los puestos de Auxiliar de Oficina e Inspector de Calidad, los riesgos identificados pueden mitigarse mediante la implementación de medidas administrativas. En contraste, cuando los niveles de riesgo son elevados, como ocurre en los cargos de Operador de Ensamblaje y Operador de Bodega, se recomienda la aplicación de medidas de ingeniería, ya que estas resultan más efectivas para la reducción y control de los factores de riesgo ergonómico.

#### Evaluación del riesgo por manipulación manual de cargas (NIOSH)

Se presentan los resultados obtenidos mediante la Ecuación Revisada de NIOSH (1991) para las tareas de levantamiento de cargas. El análisis se centra en el Límite de Peso Recomendado (LPR) en contraste con el peso levantado y la determinación del Índice de Levantamiento (IL), que indica el nivel de riesgo. La Tabla 2 se muestran los hallazgos.

**Tabla 2.** Aportes de la evaluación de levantamiento de cargas (Ecuación NIOSH)

Tarea de levantamiento	Peso levantado (Kg)	Factores de reducción (FR)	Límite de peso recomendado (LPR)	Índice de levantamiento (IL)	Riesgo ( $IL \geq 1$ )
Operador de Bodega (Picking)	18	FR = 0,65	11,3 Kg	1,59	Riesgo Alto
Operador de Línea (Apilado)	10	FR = 0,80	14,7 Kg	0,68	Riesgo Aceptable
Cargador de Camiones	25	FR = 0,45	8,8 Kg	2,84	Riesgo Crítico

(... Otras tareas de la muestra)

En la tabla 2, se presenta la aplicación de otro método clásico de evaluación ergonómica, la Ecuación de Levantamiento de NIOSH (*NIOSH Lifting Equation*), empleada para el análisis cuantitativo del riesgo asociado a tareas de manipulación manual de cargas. En este ejemplo se evaluaron tres puestos de trabajo con distintos parámetros de esfuerzo físico.

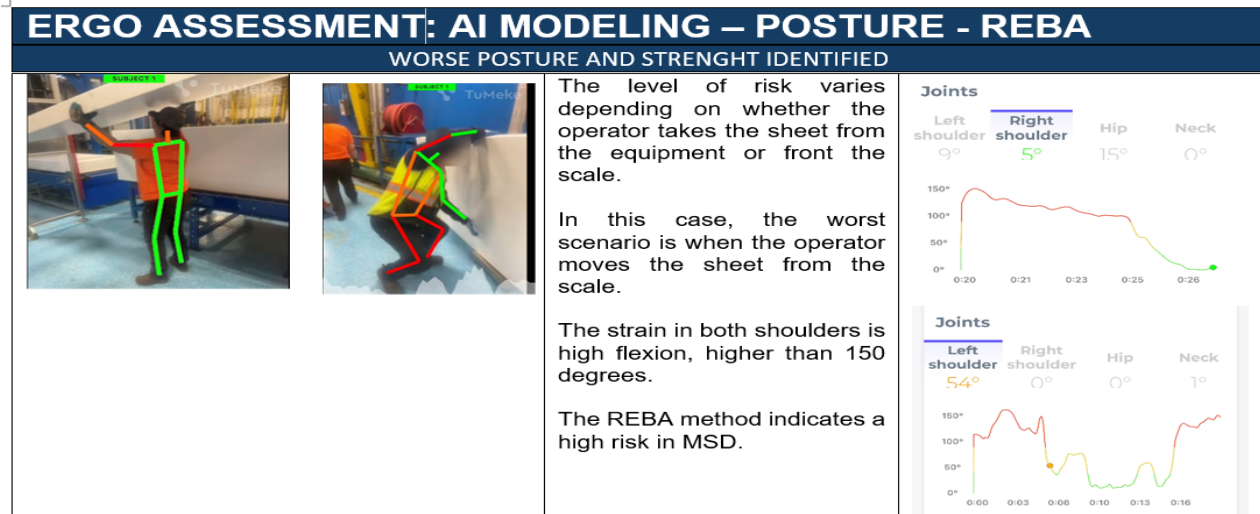
El método NIOSH requiere la determinación precisa de variables como las coordenadas horizontales (H) y verticales (V) de la carga, la distancia de desplazamiento (D), la frecuencia de levantamientos (F), la duración de la tarea (t) y la calidad del acoplamiento (C) entre las manos y el objeto manipulado. Con base en estos factores se calcula el Índice de Levantamiento (LI), que permite estimar el nivel de riesgo ergonómico y definir las acciones correctivas correspondientes.

En este contexto, el control de riesgos puede iniciarse mediante medidas administrativas, tales como la reducción de la frecuencia de levantamientos o la redistribución de tareas para disminuir la exposición individual. Sin embargo, cuando estas medidas no logran reducir el riesgo a niveles aceptables, resulta obligatoria la implementación de medidas de ingeniería, orientadas a modificar las condiciones físicas del puesto de trabajo y garantizar la reducción efectiva de los riesgos ergonómicos asociados al levantamiento de cargas.



## Aportes de la IA análisis biomecánico en tiempo real

La Figura 2 ilustra la capacidad de la IA para realizar un análisis biomecánico en tiempo real, demostrando cómo se visualizan los esfuerzos asociados a diferentes segmentos corporales, lo cual representa una ventaja significativa al compararse con el registro manual de ángulos de los métodos clásicos. La automatización y “Ahorro de Tiempo” es un elemento importante ya que los análisis reducen el tiempo de análisis de horas a minutos; el “Monitoreo Continuo” permite evaluar al trabajador durante toda la jornada, reduciéndose el tiempo de exposición para la toma de datos (Tabla 3).



**Figura 2.** Visualizan los esfuerzos asociados a diferentes segmentos corporales mediante a IA

**Tabla 3.** Funcionalidades de la inteligencia artificial para el análisis biomecánico en tiempo real

Aspecto	Capacidad del sistema de IA	Beneficio ergonómico
<b>Captura y Medición de Datos</b>	Análisis de video mediante visión computacional (OpenPose, DeepLabCut, MediaPipe) o sensores portátiles ( <i>wearables</i> ).	Permite la medición precisa de ángulos, postura y aceleración sin la dependencia de la medición manual.
<b>Eficiencia Temporal</b>	Automatiza el proceso de observación, medición y cálculo.	El tiempo de análisis se reduce significativamente, pasando de horas a minutos.
<b>Monitoreo y Consistencia</b>	Permite el monitoreo continuo y la aplicación de criterios uniformes por algoritmos.	Reduce la subjetividad y ambigüedad de los resultados, y evalúa al trabajador durante toda la jornada.
<b>Detección de Patrones</b>	Identifica patrones de movimiento, fuerza o carga que podrían pasar inadvertidos al ojo humano.	Aumenta la rigurosidad y precisión del diagnóstico de riesgo.
<b>Análisis Avanzado</b>	Genera Visualización Avanzada Multi Factorial (mapas de calor, reportes 3D, simulaciones biomecánicas).	Permite la integración de múltiples variables en tiempo real: postura, ritmo cardíaco, velocidad, fatiga y estrés térmico.
<b>Capacidad Predictiva</b>	Algoritmos de aprendizaje automático predicen el riesgo de TME.	Permite la identificación de patrones de riesgo antes de la manifestación de lesiones y TME.

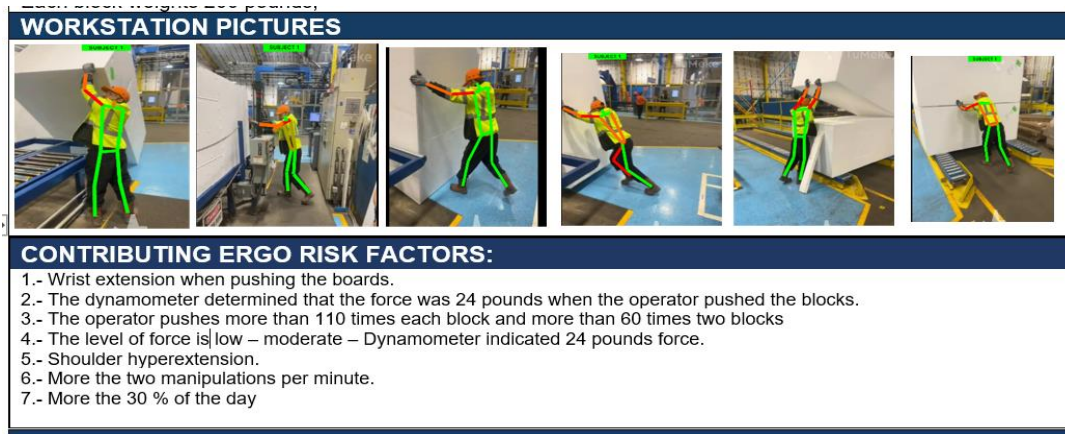
La “Objetividad y consistencia” permite por medio de los algoritmos aplicar criterios iguales a todos para todas las evaluaciones “Reduciéndose la Subjetividad y Ambigüedad”; estos algoritmos disponen de “Capacidad Predictiva” en la identificación de patrones de riesgo antes de que se manifiesten lesiones y TME.

La IA en la ergonomía permite una “Visualización Avanzada Multi Factorial” al generarse mapas de calor, reportes 3D, simulaciones biomecánicas con la integración de múltiples variables: postura, ritmo cardíaco, velocidad, fatiga, estrés térmico.

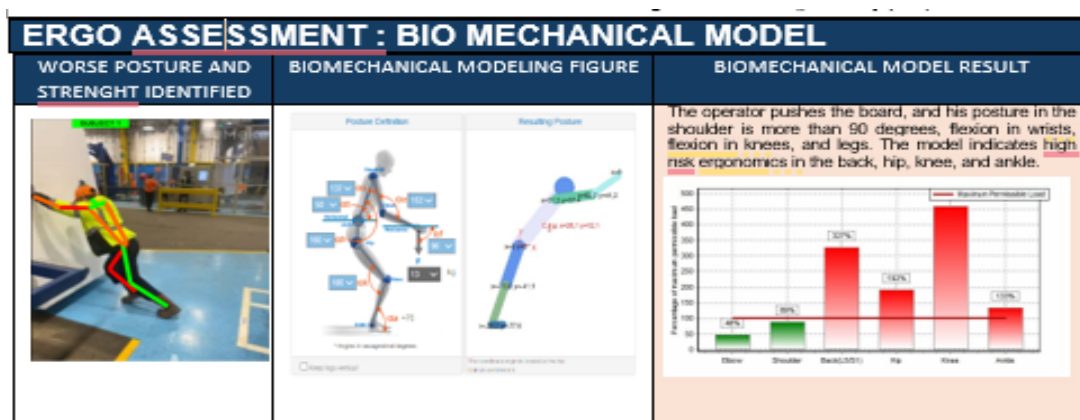
### Ergonomía aplicada: enfoque híbrido

La validación práctica y visual de un enfoque híbrido de evaluación ergonómica, que integra la IA con métodos ergonómicos clásicos y mediciones físicas. La Figura 3 (a, b y c) sirve como evidencia de esta metodología integrada, mostrando cómo la tecnología apoya y es supervisada por el juicio experto.

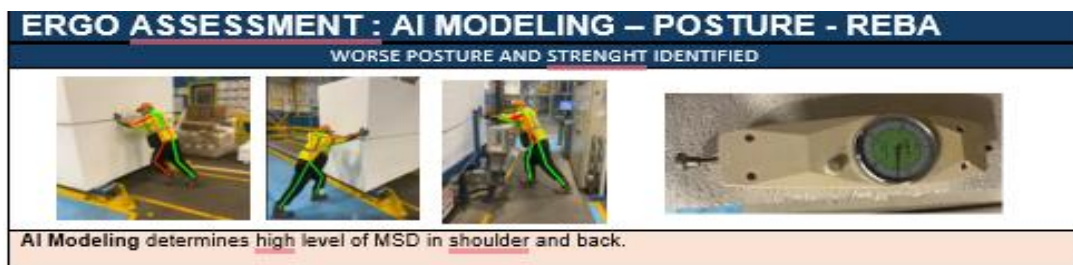
En la figura 3 se observa que la IA se encarga de la captura y el procesamiento inicial, modelando la postura del trabajador en tiempo real e identificando automáticamente los esfuerzos y las peores posturas en articulaciones como hombros, codos, muñecas, espalda y piernas. Este análisis asistido por tecnología es complementado con la validación del ergonomista, quien revisa los datos, lista los factores contribuyentes específicos (como la extensión de muñeca o la hiper-extensión de hombro) y asegura que el proceso se alinee con la prevención de Trastornos Musculoesqueléticos (TME).



a



b



c

**Figura 3.** a) Esfuerzos por parte del trabajador utilizándose la inteligencia artificial observándose los esfuerzos en hombros, codos y muñecas; pero a su vez el ergónomo valida listando los factores contribuyentes que pueden ocasionar un TME. b) Análisis de ergonomía bajo un enfoque híbrido; con la IA se observan los esfuerzos en tiempo real observándose esfuerzos en piernas, espalda, hombros y codos; mezclados este resultado podemos determinar la fuerza aplicada utilizando en modelo biomecánico bidimensional y el dinamómetro como equipo de medición. c) Ergonomista valida el resultado listando los factores contribuyentes que pueden ocasionar un TME (ej., extensión de la muñeca, fuerza determinada

*por dinamómetro, hiper extensión del hombro, y frecuencia de manipulación), mientras la IA observa los esfuerzos corporales.*

Además, el enfoque híbrido incorpora herramientas de medición física y modelado avanzado, como se ve en el análisis biomecánico bidimensional y el uso de un dinamómetro para determinar la fuerza real aplicada (ejemplo: 24 libras). Este cruce de datos permite un análisis cuantitativo, donde el modelo biomecánico genera resultados gráficos que comparan las demandas articulares (e.g., espalda, rodilla) con la Carga Máxima Permissible, confirmando la existencia de altos riesgos ergonómicos en múltiples segmentos corporales debido a posturas extremas y alta frecuencia de manipulación. En síntesis, las figuras demuestran la sinergia entre la automatización de la IA y la interpretación contextual y rigurosa del profesional.

Otro aspecto relevante para considerar son las acciones correctivas que generan los modelos de inteligencia artificial, las cuales suelen ser genéricas, simples y poco específicas. En este sentido, se propone que los profesionales de la ergonomía utilicen esta herramienta como apoyo para reducir los tiempos de análisis y mejorar la precisión de los resultados. Sin embargo, la interpretación profunda de los factores de riesgo y la resolución efectiva de los problemas continúan siendo

## Discusión

Los resultados de esta investigación revelan una profunda dualidad en el panorama de la evaluación de riesgos ergonómicos: por un lado, la solidez normativa y la validación histórica de los métodos clásicos; por otro, la eficiencia y objetividad sin precedentes ofrecidas por la Inteligencia Artificial (IA). La discusión se centra en contrastar estos dos enfoques, analizar las limitaciones críticas de la IA y justificar la necesidad imperante de un Enfoque Híbrido donde el ergonomista profesional mantiene el rol de validador y estratega.

La aplicación de los métodos clásicos como la Ecuación Revisada de NIOSH (1991), RULA y REBA (Holzgreve et al., 2022) confirmó la existencia de riesgos significativos en la muestra de puestos de trabajo, tal como se refleja en la literatura que aborda la morbilidad por TME en diversos sectores (Ayvaz et al., 2023; Fan et al., 2022). Estos instrumentos proporcionan una línea de base indispensable para la gestión de riesgos (Bazaluk et al., 2023), y su uso es obligatorio para garantizar la conformidad con los estándares internacionales establecidos por organizaciones como OSHA, NIOSH e ISO (Hulshof et al., 2021). Sin embargo, los resultados operacionales confirman que la principal limitación de estos métodos radica en su dependencia de la observación directa y la medición manual (posturas, ángulos, frecuencias, peso, duración), lo cual consume un tiempo considerable y es susceptible a la subjetividad y ambigüedad del evaluador. La naturaleza intermitente de la observación—capturando solo el "peor momento"—no logra reflejar la variabilidad postural o la fatiga acumulada durante una jornada, un punto de fricción que ha sido previamente señalado en la literatura (Pejčić et al., 2021; Raghavan et al., 2022). En contraste con la capacidad de monitoreo continuo de la IA, los métodos manuales se demuestran insuficientes para evaluar la exposición real al riesgo durante periodos prolongados.

La integración de la Inteligencia Artificial en la evaluación ergonómica aborda directamente las debilidades operacionales del enfoque clásico. Los hallazgos confirman que la IA, a través de la visión computacional (OpenPose, MediaPipe) y los *wearables*, permite la automatización del proceso de observación, medición y cálculo (Camargo Salinas et al., 2024), lo cual se traduce en un ahorro de tiempo sustancial, reduciendo los análisis de horas a minutos. La ventaja más significativa de la IA reside en su capacidad para el análisis biomecánico en tiempo real, proporcionando una objetividad y consistencia inalcanzables con la medición manual (Chatzis et al., 2022; Scataglini et al., 2025). La IA no solo mide ángulos, sino que identifica patrones de movimiento y fuerza, e integra múltiples variables (postura, ritmo cardíaco, velocidad) a través de la Visualización Avanzada Multi Factorial (Yunus et al., 2021). Esta capacidad de monitoreo continuo y la aplicación uniforme de criterios algorítmicos para todas las evaluaciones minimiza el error humano y la ambigüedad que caracterizan el registro escrito (Chatzis et al.,



2022). Esta precisión es especialmente valiosa en entornos de alta complejidad, como lo demuestran estudios que aplican el análisis cinemático para evaluar el riesgo ergonómico en procedimientos quirúrgicos. La comparación entre la cirugía laparoscópica tradicional y la asistida por robot, por ejemplo, ha revelado que esta última reduce significativamente el riesgo ergonómico para el cirujano gracias a la optimización de posturas estáticas (Aaron et al., 2021; Dixon et al., 2024; Monfared et al., 2022). Estos hallazgos reafirman la IA no solo como una herramienta de medición, sino como un facilitador de soluciones ingenieriles de control de riesgos, proporcionando datos predictivos que superan la mera clasificación de riesgo (*scoring*) típica de REBA y RULA.

Pese a sus notables beneficios, los resultados y la revisión de literatura destacan barreras críticas que impiden que la IA reemplace por completo al ergonomista humano, siendo la más apremiante la falta de estandarización legal. A pesar de su precisión, la IA no está oficialmente reconocida por entidades como OSHA o NIOSH como un método de evaluación primario. Por lo tanto, su resultado, aunque superior en datos brutos, carece del peso legal requerido para el cumplimiento normativo. Esto limita su uso actual a un rol complementario de apoyo y no sustitutivo. Además de las barreras de implementación, como el alto costo inicial del *hardware* y *software* (hasta \$500 por mes) y la necesidad de entrenamiento técnico calificado para configurar y calibrar los modelos, que restringen su adopción generalizada (Camargo Salinas et al., 2024), las preocupaciones éticas sobre la privacidad de datos, dadas las grabaciones continuas de video, deben ser mitigadas con protocolos de anonimización rigurosos.

Esta limitación se acentúa al analizar el marco legal del uso de IA en ergonomía. La Unión Europea ha establecido obligaciones vinculantes mediante el Reglamento (UE) 2024/1689, que clasifica estas aplicaciones como de alto riesgo y exige supervisión humana, trazabilidad y protección de datos. En Asia, la ASEAN y Singapur avanzan con guías éticas y estrategias nacionales orientadas a la gobernanza responsable, aunque sin fuerza legal obligatoria. En Estados Unidos, la Orden Ejecutiva de octubre de 2023 fue revocada y sustituida por la Executive Order 14179 (23/01/2025), que prioriza la innovación y delega en las agencias federales la adecuación regulatoria. Sin embargo, la ausencia de una ley federal general mantiene un marco fragmentado y condiciona el uso de IA en ergonomía a su función complementaria, con supervisión humana y referencia a métodos validados.

A partir de este panorama, surge la interrogante de si una legislación general sobre IA es suficiente para regular su uso en ergonomía. La evidencia indica que no, debido a que las evaluaciones con IA implican captura de datos biométricos, análisis automatizado de movimientos y emisión de recomendaciones que pueden impactar decisiones laborales. Estos elementos requieren lineamientos específicos sobre consentimiento informado, validación científica de los algoritmos, interoperabilidad con métodos clásicos (REBA, RULA, NIOSH) y supervisión profesional por ergonomistas certificados. La ausencia de protocolos claros podría derivar en riesgos jurídicos para empleadores y trabajadores, como evaluaciones automatizadas no validadas, uso indebido de grabaciones o errores algorítmicos que subestimen riesgos reales. En la actualidad, agencias como OSHA y NIOSH permiten el uso de IA como herramienta complementaria, pero exigen que las evaluaciones se sustenten en métodos ergonómicos validados. Por ello, se recomienda avanzar hacia guías técnicas que integren IA como apoyo, establezcan estándares de interoperabilidad y definan protocolos de consentimiento y protección de datos específicos.

El desafío más profundo, sin embargo, es la limitación analítica de la IA. Si bien la tecnología es excelente para medir variables biomecánicas (ángulos, fuerzas, frecuencias), los modelos actuales demuestran ser insuficientes para abordar factores de riesgo ergonómico complejos y no biomecánicos. Estos incluyen la carga mental, los riesgos asociados al envejecimiento de la fuerza laboral (*ageing workforce*, Nygaard et al., 2022), la ergonomía de género o la interacción de factores psicosociales y de estilo de vida que influyen en los TME (Paskarini et al., 2025). Más aún, se observó que las acciones correctivas arrojadas por los modelos de IA son a menudo "muy genéricos, simples y vagos". La máquina puede identificar que la postura del trabajador es de riesgo alto, pero carece de la capacidad cognitiva para listar los factores contribuyentes específicos y proponer una solución ingenieril, de control administrativo o de diseño de proceso, con la profundidad necesaria.

La solución a este dilema no es la sustitución, sino la integración o el Enfoque Híbrido de evaluación. Esta tesis central se basa en que la IA y el ergonomista humano desempeñan roles complementarios e insustituibles. La IA debe ser utilizada para capitalizar su fortaleza operacional: reducir el tiempo de análisis mediante el monitoreo continuo y la medición objetiva de la postura y el esfuerzo (velocidad y precisión). Al exportar estos datos objetivos (ángulos, frecuencias) de la IA a una hoja de cálculo, se puede aplicar la fórmula estandarizada de un método clásico (RULA, REBA, NIOSH), asegurando así la validación científica y legal del resultado (Danylak et al., 2024). El ergonomista experto recupera su rol central al realizar la validación final con observación humana, aplicando su criterio para: 1) cotejar que los datos automatizados reflejen la realidad observada, 2) integrar los factores de riesgo no biomecánicos (carga mental, entorno térmico, psicosociales) que la IA omite, y 3) traducir el puntaje de riesgo generado por la máquina en acciones correctivas específicas, profundas y efectivas que aborden el problema de fondo y no solo el síntoma postural.

La fórmula IA + Método Clásico = precisión + validación científica se erige como la propuesta más robusta para el futuro. Permite que la evaluación ergonómica sea más rápida y precisa gracias a la tecnología, pero mantiene la rigurosidad analítica y la aceptación internacional gracias al juicio humano y la estandarización metodológica (Bazaluk et al., 2023). Este enfoque híbrido no solo optimiza el bienestar humano y el desempeño del sistema productivo, sino que también posiciona al ergonomista profesional en la vanguardia de la tecnología. En este contexto, el enfoque híbrido —que combina IA con métodos clásicos validados como REBA, RULA y NIOSH— no solo es técnicamente eficaz, sino también la vía más segura y legalmente defendible.

Finalmente, es fundamental destacar que el empresario, como responsable legal de las condiciones de trabajo, también requiere protección normativa. El empleador es quien contrata al profesional de ergonomía, implementa las recomendaciones derivadas de los estudios y responde ante los trabajadores y las agencias federales (como OSHA y NIOSH) en caso de incumplimiento o negligencia. Por ello, la normativa debe contemplar protocolos claros de responsabilidad compartida entre el ergonomista y el empleador, estándares técnicos que validen el uso de IA como herramienta complementaria, y guías de cumplimiento que permitan al empresario demostrar diligencia debida en la evaluación de riesgos ergonómicos. Una regulación equilibrada no solo protege al trabajador frente a posibles abusos tecnológicos, sino también al empresario frente a demandas laborales injustificadas o errores derivados de sistemas automatizados no validados. En suma, un marco regulatorio sobre la ergonomía con IA no es solo una necesidad técnica, sino una obligación ética y jurídica para garantizar entornos laborales seguros, transparentes y equitativos.

## Consideraciones finales

El uso de inteligencia artificial representa un avance sustantivo en la evaluación cuantitativa de riesgos ergonómicos, al ofrecer mayor objetividad, consistencia y eficiencia en comparación con los métodos tradicionales. Sin embargo, la IA aún presenta limitaciones: falta de estandarización jurídica, elevados costos, dependencia tecnológica y menor capacidad para captar factores cualitativos o contextuales. Por ello, la literatura y la práctica profesional coinciden en que la estrategia más efectiva es un enfoque híbrido: la IA como herramienta de captura y análisis de datos, y el ergonomista como autoridad técnica capaz de interpretar, validar y traducir esos resultados en decisiones correctivas. Esta sinergia garantiza rigor científico, aceptación internacional y resultados defendibles desde el punto de vista técnico y legal.

En el plano regulatorio, la Unión Europea adoptó un marco vinculante mediante el Reglamento (UE) 2024/1689, que exige transparencia, trazabilidad y supervisión humana en sistemas de alto riesgo. En Asia, la ASEAN y Singapur han impulsado marcos éticos y estrategias nacionales que guían el uso responsable de la IA sin fuerza legal obligatoria.

En Estados Unidos, la política federal cambió en 2025. La Orden Ejecutiva emitida en octubre de 2023 fue revocada el 20 de enero de 2025 y sustituida por la Executive Order 14179 – Removing Barriers to American Leadership in Artificial Intelligence, del 23 de enero de 2025. Este nuevo marco prioriza la innovación y delega en las agencias federales la revisión y actualización de regulaciones previas. Sin embargo, el país aún carece de una ley federal general de IA que establezca principios mínimos y uniformes para todo el sistema. En ausencia de esa norma, la regulación queda fragmentada entre distintas agencias, lo que puede derivar en vacíos, inconsistencias o estándares dispares.

Desde una perspectiva jurídico-comparada, una ley marco federal de IA no implicaría legislar cada aplicación específica —como la ergonomía—, sino fijar principios rectores: seguridad, transparencia algorítmica, supervisión humana, protección de datos, responsabilidad profesional y trazabilidad. Cada agencia federal, incluida OSHA, podría entonces desarrollar normas técnicas sectoriales bajo ese marco legal común, lo cual otorgaría coherencia, estabilidad institucional y certeza jurídica para empleadores, trabajadores y desarrolladores tecnológicos.

En este contexto, el enfoque híbrido —IA más métodos clásicos validados como RULA, REBA y NIOSH— continúa siendo la vía más segura, científicamente robusta y jurídicamente defendible. Permite mantener la supervisión profesional, asegurar trazabilidad metodológica y reducir la subjetividad en los análisis, ofreciendo defensas técnicas sólidas ante auditorías o reclamaciones laborales.

En síntesis, mientras Estados Unidos avanza desde la práctica y la innovación, la ausencia de una ley marco federal limita la coherencia normativa y deja en manos de cada agencia la construcción de lineamientos parciales. Contar con un marco legal general no significaría restringir la tecnología, sino garantizar que la IA aplicada al trabajo —incluida la ergonomía— se desarrolle bajo principios éticos universales y derechos laborales mínimos. La tecnología ya está preparada; ahora corresponde al derecho establecer las reglas que permitan su uso seguro, equitativo y compatible con la protección de la integridad y bienestar de los trabajadores en el entorno laboral.

## Agradecimientos

A nuestros colaboradores.

## Conflicto de intereses

Ninguno.

## Referencias

- Aaron, K. A., Vaughan, J., Gupta, R., Ali, N. E., Beth, A. H., Moore, J. M., Ma, Y., Ahmad, I., Jackler, R. K., & Vaisbuch, Y. (2021). The risk of ergonomic injury across surgical specialties. *PLoS One*, 16(2), e0244868. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244868>
- ASEAN. (2024). ASEAN guide on AI governance and ethics. ASEAN Secretariat. [https://asean.org/wp-content/uploads/2024/02/ASEAN-Guide-on-AI-Governance-and-Ethics\\_beautified\\_201223\\_v2.pdf](https://asean.org/wp-content/uploads/2024/02/ASEAN-Guide-on-AI-Governance-and-Ethics_beautified_201223_v2.pdf)
- Ayvaz, Ö., Özyıldırım, B. A., İşsever, H., Öztan, G., Atak, M., & Özel, S. (2023). Ergonomic risk assessment of working postures of nurses working in a medical faculty hospital with REBA and RULA methods. *Science Progress*, 106(4), 368504231216540. <https://doi.org/10.1177/00368504231216540>
- Bazaluk, O., Tsopa, V., Cheberiachko, S., Deryugin, O., Radchuk, D., Borovytskyi, O., & Lozynskyi, V. (2023). Ergonomic risk management process for safety and health at work. *Frontiers in Public Health*, 11, 1253141. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1253141>

- Camargo Salinas, M. A., Miranda Arandia, N. Y., & Suárez Pérez, J. F. (2024). Estado del arte en evaluación de métodos de detección automatizada de riesgo ergonómico en entornos de trabajo industrial. *Gestión de la Seguridad y la Salud en el Trabajo*, 6(2), 25–37. <https://doi.org/10.15765/jzdrd646>
- Chatzis, T., Konstantinidis, D., & Dimitropoulos, K. (2022). Automatic ergonomic risk assessment using a variational deep network architecture. *Sensors (Basel)*, 22(16), 6051. <https://doi.org/10.3390/s22166051>
- Danylak, S., Walsh, L. J., & Zafar, S. (2024). Measuring ergonomic interventions and prevention programs for reducing musculoskeletal injury risk in the dental workforce: A systematic review. *Journal of Dental Education*, 88(2), 128–141. <https://doi.org/10.1002/jdd.13403>
- Dixon, F., Vitish-Sharma, P., Khanna, A., Keeler, B. D., & VOLCANO Trial Group. (2024). Robotic assisted surgery reduces ergonomic risk during minimally invasive colorectal resection: The VOLCANO randomised controlled trial. *Langenbeck's Archives of Surgery*, 409(1), 142. <https://doi.org/10.1007/s00423-024-03322-y>
- European Commission. (2024). Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on artificial intelligence. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj>
- Fan, L. J., Liu, S., Jin, T., Gan, J. G., Wang, F. Y., Wang, H. T., & Lin, T. (2022). Ergonomic risk factors and work-related musculoskeletal disorders in clinical physiotherapy. *Frontiers in Public Health*, 10, 1083609. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1083609>
- Holzgreve, F., Fraeulin, L., Betz, W., Erbe, C., Wanke, E. M., Brüggmann, D., Nienhaus, A., Groneberg, D. A., Maurer-Grubinger, C., & Ohlendorf, D. (2022). A RULA-based comparison of the ergonomic risk of typical working procedures for dentists and dental assistants. *Sensors (Basel)*, 22(3), 805. <https://doi.org/10.3390/s22030805>
- Hulshof, C. T. J., Pega, F., Neupane, S., Colosio, C., Daams, J. G., Kc, P., Kuijer, P. P. F. M., Mandic-Rajcevic, S., Masci, F., van der Molen, H. F., Nygård, C. H., Oakman, J., Proper, K. I., & Frings-Dresen, M. H. W. (2021). The effect of occupational exposure to ergonomic risk factors on osteoarthritis of hip or knee and selected other musculoskeletal diseases. *Environmental International*, 150, 106349. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106349>
- Monfared, S., Athanasiadis, D. I., Umana, L., Hernandez, E., Asadi, H., Colgate, C. L., Yu, D., & Stefanidis, D. (2022). A comparison of laparoscopic and robotic ergonomic risk. *Surgical Endoscopy*, 36(11), 8397–8402. <https://doi.org/10.1007/s00464-022-09105-0>
- Nygaard, N. B., Thomsen, G. F., Rasmussen, J., Skadhauge, L. R., & Gram, B. (2022). Ergonomic and individual risk factors for musculoskeletal pain in the ageing workforce. *BMC Public Health*, 22(1), 1975. <https://doi.org/10.1186/s12889-022-14386-0>
- Paskarini, I., Dwiyantri, E., Mahmudah, M., Widarjanto, W., Nugroho, S. A., & Syaiful, D. A. (2025). The interplay of ergonomic risk factor and lifestyle factors on Potter's well-being and work fatigue in Magelang's tourism village. *BMC Public Health*, 25(1), 1550. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-22780-7>
- Pejčić, N., Petrović, V., Đurić-Jovičić, M., Medojević, N., & Nikodijević-Latinović, A. (2021). Analysis and prevention of ergonomic risk factors among dental students. *European Journal of Dental Education*, 25(3), 460–479. <https://doi.org/10.1111/eje.12621>
- Raghavan, R., Panicker, V. V., & Emmatty, F. J. (2022). Ergonomic risk and physiological assessment of plogging activity. *Work*, 72(4), 1337–1348. <https://doi.org/10.3233/WOR-205210>
- Scataglini, S., Fontinovo, E., Khafaga, N., Khan, M. U., Khan, M. F., & Truijen, S. (2025). A systematic review of the accuracy, validity, and reliability of markerless versus marker camera-based 3D motion capture for industrial ergonomic risk analysis. *Sensors (Basel)*, 25(17), 5513. <https://doi.org/10.3390/s25175513>



Larez, F., & Maribao, Y. (2025). Integration of artificial intelligence and traditional methods for ergonomic risk assessment. *e-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 3, e-RMS07102025. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v3i.287>

Smart Nation and Digital Government Office. (2023). National AI Strategy 2.0. Government of Singapore. <https://www.smartnation.gov.sg/initiatives/national-ai-strategy>

The White House. (2025, January 23). Executive Order 14179 – Removing barriers to American leadership in artificial intelligence. <https://www.federalregister.gov/documents/2025/01/31/2025-02172/removing-barriers-to-american-leadership-in-artificial-intelligence>

Yunus, M. N. H., Jaafar, M. H., Mohamed, A. S. A., Azraai, N. Z., & Hossain, M. S. (2021). Implementation of kinetic and kinematic variables in ergonomic risk assessment using motion capture simulation: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8342. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168342>