ARTÍCULO ORIGINAL
ERGONOMÍA Y SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO

Uso de exoesqueletos en el ámbito laboral internacional: una revisión sistemática de la literatura

Use of Exoskeletons in the International Workplace: A Systematic Literature Review

Juan Lázaro Acosta Prieto [1,*] https://orcid.org/0000-0003-1390-2380
Javier Camacho Mesa[2] https://orcid.org/0009-0004-3529-0578
Melisa Rodríguez Fernández[2] https://orcid.org/0009-0005-5548-0624
José Antonio Pernas Carrasco[2] https://orcid.org/0009-0006-4963-2772
Yilena Cuello Cuello[1] https://orcid.org/0000-0003-4589-8670

[1]Universidad Carlos III de Madrid, España.
[2]Universidad de Matanzas, Facultad de Ingeniería Industrial, Departamento de Industrial. Matanzas, Cuba

*Autor para la correspondencia: acostaprietojuanlazaro@gmail.com

RESUMEN
Este artículo revisa sistemáticamente el uso de exoesqueletos en el ámbito laboral internacional para analizar su contribución a la reducción de trastornos musculoesqueléticos (TMEs) y fatiga muscular. La metodología sigue las guías de Kitchenham y Okoli y Schabram, con enfoque tipo PRISMA, revisando artículos de Scopus, Web of Science, Scielo y Latindex publicados entre 2015 y 2025. Los resultados confirman que los exoesqueletos industriales, predominantemente pasivos, reducen cargas biomecánicas y actividad muscular, con disminuciones significativas en actividad muscular y esfuerzo percibido. También emergen nuevas tecnologías de asistencia. Persisten desafíos: transferencia de carga, falta de normativas estandarizadas para certificación como equipo de protección personal y ausencia de estudios sobre efectos a largo plazo. Se concluye que son una herramienta valiosa como último recurso en la jerarquía de controles, pero su implementación debe adaptarse a cada tarea.

Palabras clave: exoesqueletos; fatiga muscular; herramienta valiosa; metodología; trastornos musculoesqueléticos.

ABSTRACT
This article presents a systematic review of the use of exoskeletons in the international workplace, aiming to analyze their contribution to reducing musculoskeletal disorders (MSDs) and muscle fatigue. The methodology follows Kitchenham and Okoli and Schabram guidelines, with a PRISMA-like approach, reviewing articles from Scopus, Web of Science, Scielo, and Latindex published between 2015 and 2025. Results confirm that industrial exoskeletons, predominantly passive, reduce biomechanical loads and muscle activity, with significant decreases in muscle activity and perceived exertion. New assistive technologies are also emerging. Challenges persist: load transfer, lack of standardized regulations for certification as personal protective equipment, and absence of long-term studies. It is concluded that they are a valuable tool as a last resort in the hierarchy of controls, but their implementation must be adapted to each task.
Keywords: exoskeletons; muscle fatigue; musculoskeletal disorders; methods; valuable tool.

Recibido: 02/10/2026
Aceptado: 11/10/2026

Introducción

El sistema musculoesquelético está compuesto por articulaciones, músculos y tendones que posibilitan el movimiento. Ante esfuerzos físicos intensos pueden aparecer fatiga y dolor muscular, cuya recuperación depende de la duración, intensidad y condición física del trabajador [1]. Los trastornos musculoesqueléticos (TMEs) alteran la función y las estructuras corporales, y el NIOSH señala que su origen se debe a movimientos repetitivos, falta de pausas activas, posturas forzadas y manipulación manual de cargas [1]. La prevención temprana es indispensable para evitar lesiones mayores y garantizar la capacidad laboral [2]. Los TMEs constituyen una de las principales causas de incapacidad laboral y generan costos significativos para los sistemas de salud y las empresas [3].

La evaluación temprana de dolores y limitaciones por TMEs resulta indispensable para prevenir lesiones mayores, aliviar la carga de trabajo y garantizar la capacidad de los trabajadores para realizar sus tareas laborales, sin sufrir fatiga muscular debido a un estado de agotamiento y debilidad posterior a una actividad intensa o prolongada [2].

Adicionalmente, al situarse los TMEs como una de las mayores causas de incapacidad laboral en el mundo, se debe considerar que la detección, prevención y asignación de puestos de trabajo determina un importante estudio para el medio ocupacional [2].

Lamentablemente, muchas tareas ejecutadas manualmente implican exigencias físicas importantes y exponen a los trabajadores a factores de riesgo laborales de origen ergonómico, entre los cuales se destacan los movimientos repetitivos, la adopción de posturas incómodas y la realización de esfuerzos físicos excesivos. Esta exposición contribuye, en gran medida, al desarrollo y la aparición de desórdenes musculoesqueléticos como el síndrome del túnel carpiano, la bursitis del hombro, la tendinitis, la epicondilitis del codo, la hernia discal, el esguince lumbar y el dolor en la zona lumbar, entre muchos otros [4, 5]. Es por ello por lo que la prevención de TMEs es un elemento fundamental para garantizar entornos de trabajo saludables, productivos y sostenibles. En particular si se considera que, según la Organización Internacional del Trabajo, los TMEs constituyen alrededor del 40 % de los costos globales de indemnización por lesiones y enfermedades profesionales [6].

A pesar de los esfuerzos realizados desde diversas disciplinas como la Ergonomía, la Medicina Laboral, la Salud Laboral y la Seguridad en el Trabajo, la prevención de los TMEs plantea desafíos importantes. En muchas ocasiones, debido a la complejidad asociada a la naturaleza de la tarea y el contexto de trabajo, no es posible llevar a cabo un rediseño del sistema de trabajo que tome en cuenta los principios de la Ergonomía. En consecuencia, el margen de maniobra en términos de diseño ergonómico del sistema de trabajo (métodos, herramientas, ambiente y organización del trabajo) es limitado [7].

Los exoesqueletos industriales son una tecnología de creciente interés para la prevención de los TMEs, si bien los exoesqueletos existen desde hace ya cierto tiempo en el campo de la rehabilitación de pacientes y en el sector militar, no es hasta hace algunos años que se dispone de la tecnología especialmente diseñada para contextos laborales [7].

En los últimos diez años, los avances asociados a tecnologías han lanzado al mercado diversos dispositivos portables de tipo exoesqueleto, definidos como dispositivos mecánicos compuestos por palancas que se ajustan estrechamente al cuerpo del usuario y que trabajan en conjunto, lo que permite asistir y compensar los movimientos de éste. Esto se logra mediante la aplicación de fuerzas externas que trabajan en paralelo con la musculatura del usuario; el exoesqueleto altera la mecánica corporal para proteger áreas vulnerables, como la zona lumbar, las extremidades superiores e inferiores [7].

La prevención de los TMEs continúa planteando desafíos, pues la complejidad asociada a la naturaleza de la tarea y al contexto de trabajo a menudo impide un rediseño ergonómico integral, lo que limita las opciones para reducir la exposición a factores de riesgo [8].

Si bien numerosos estudios de laboratorio han documentado reducciones en la actividad muscular y la percepción de esfuerzo, persisten interrogantes sobre la efectividad diferencial entre exoesqueletos pasivos y activos, la transferencia de carga a segmentos corporales no asistidos [9], los efectos a largo plazo sobre la salud musculoesquelética y la ausencia de marcos normativos estandarizados para su certificación como equipo de protección personal [10].

En este contexto, la presente revisión sistemática se propone responder a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la efectividad de los exoesqueletos industriales, tanto pasivos como activos, en la reducción de la fatiga muscular y la carga biomecánica en trabajadores expuestos a riesgos ergonómicos, y cuáles son los principales desafíos para su implementación efectiva en entornos laborales internacionales?

El objetivo de esta revisión es analizar la efectividad de los exoesqueletos industriales, pasivos y activos, en la reducción de la fatiga muscular y la carga biomecánica en trabajadores expuestos a riesgos ergonómicos, así como identificar las principales barreras para su implementación en entornos laborales internacionales.

Métodos

La presente revisión sistemática se ha desarrollado siguiendo la metodología propuesta por Kitchenham (2004) [11] y Okoli y Schabram (2015) [12], la cual constituye el eje metodológico principal de este estudio. Asimismo, el proceso de búsqueda, selección y reporte de la información se ha estructurado siguiendo un enfoque similar a la declaración PRISMA [13], lo que garantiza la transparencia y el rigor en la presentación de los resultados. La metodología comprende una guía de ocho pasos para llevar a cabo una revisión sistemática de la literatura. Estos pasos incluyen: determinar el propósito de la revisión; protocolo y formación; búsqueda de literatura; criterio para la inclusión; evaluación de la calidad; extracción de datos; síntesis de los estudios y escritura de la reseña. Estos pasos aseguran una planificación, desarrollo y reporte adecuados de la revisión sistemática [14].

La investigación es descriptiva y recopilatoria, enfocada en identificar y registrar, a través de una revisión sistemática de documentos y artículos científicos que aborden la implementación, clasificación y utilización de exoesqueletos industriales en trabajos físicos, tanto en español como en inglés. Para guiar la revisión, se planteó la siguiente interrogante:

- **¿Cuál es la efectividad de los exoesqueletos industriales, tanto pasivos como activos, en la reducción de la fatiga muscular y la carga biomecánica en trabajadores expuestos a riesgos ergonómicos, y cuáles son los principales desafíos para su implementación efectiva en entornos laborales internacionales?**

La búsqueda se realizó en cuatro bases de datos: Scopus, Web of Science, SciELO y Latindex, con el fin de garantizar una cobertura exhaustiva de la literatura internacional y regional. Para asegurar la reproducibilidad, se empleó una ecuación de búsqueda combinando operadores booleanos y términos controlados: ("industrial exoskeletons" OR "occupational exoskeletons" OR "exosuit") AND ("musculoskeletal injuries" OR "musculoskeletal disorders" OR "muscle fatigue"). Los filtros aplicados fueron: periodo de publicación (2015-2025), idioma (inglés y español) y disponibilidad de texto completo. La última actualización de la búsqueda se realizó en enero de 2025.

Para enfocar la búsqueda, se establecieron los siguientes criterios de inclusión:
• Se limitó el año de publicación en las bases de datos Scopus, Web of Science, SciELO y Latindex al periodo 2015-2025.
• Se incluyeron artículos publicados indistintamente en inglés o español, sin priorización temporal entre ambos idiomas.
• Disponibilidad de texto completo.
• Documentos y publicaciones relacionados con los modelos de exoesqueletos industriales y las normas técnicas, que incluyeran uno o más términos de búsqueda relacionados con las interrogantes planteadas.

La selección de los estudios fue realizada por dos revisores independientes, quienes revisaron los resúmenes y palabras clave. Las discrepancias durante la selección se resolvieron por consenso con un tercer revisor. Los duplicados fueron eliminados mediante un software de gestión bibliográfica. De las revisiones sistemáticas incluidas, se recopiló información sobre autoría, año, introducción, fuentes de información, resultados obtenidos y conclusiones.
Se incluyeron estudios primarios y secundarios (revisiones y meta-análisis) del período 2015-2025. Para evitar el doble conteo, los datos cuantitativos se extrajeron exclusivamente de estudios primarios, empleando las revisiones solo para triangulación contextual. El riesgo de sesgo se evaluó mediante herramientas estandarizadas: la escala Newcastle-Ottawa para estudios observacionales y la herramienta ROBINS-I para estudios cuasi-experimentales.
Los temas de los artículos buscados estuvieron relacionados con trabajadores sanos expuestos a riesgos ergonómicos en entornos laborales (industria, logística, construcción, agricultura), excluyendo estudios centrados en rehabilitación médica o aplicaciones militares [15, 16]; uso de exoesqueletos industriales (pasivos, activos o semiactivos) para la prevención de TMEs o reducción de la fatiga muscular; tareas equivalentes realizadas sin el uso del exoesqueleto como condición de comparación; medición objetiva de actividad muscular (EMG), percepción del esfuerzo (escalas validadas), carga biomecánica y/o efectos adversos reportados.
Como criterios de exclusión se establecieron estudios centrados exclusivamente en exoesqueletos para rehabilitación médica, terapia neurológica o aplicaciones militares no transferibles al ámbito laboral; artículos sin texto completo accesible o con datos insuficientes; publicaciones en idiomas distintos al inglés o español; estudios publicados antes del año 2015; y aquellos que mencionan exoesqueletos pero no abordan su aplicación en la prevención de TMEs o fatiga muscular en el ámbito laboral. Igualmente, como criterios de exclusión se desecharon los artículos desactualizados, que estuvieran relacionados con los exoesqueletos, pero que no contuvieran las palabras clave definidas para la búsqueda bibliográfica.
Estos criterios permitieron refinar la información. El proceso de selección se detalla en la figura 1. De los 459 registros iniciales, se eliminaron 49 duplicados (n=410) y 134 por título/resumen (n=276). Tras aplicar filtros de idioma y acceso, se descartaron 15 (n=261). De los 261 textos completos evaluados, se excluyeron 19 por no reportar datos cuantitativos de fatiga o carga biomecánica (n=242). Finalmente, 6 estudios

fueron excluidos durante la extracción de datos por baja calidad metodológica, resultando en 236 estudios incluidos.

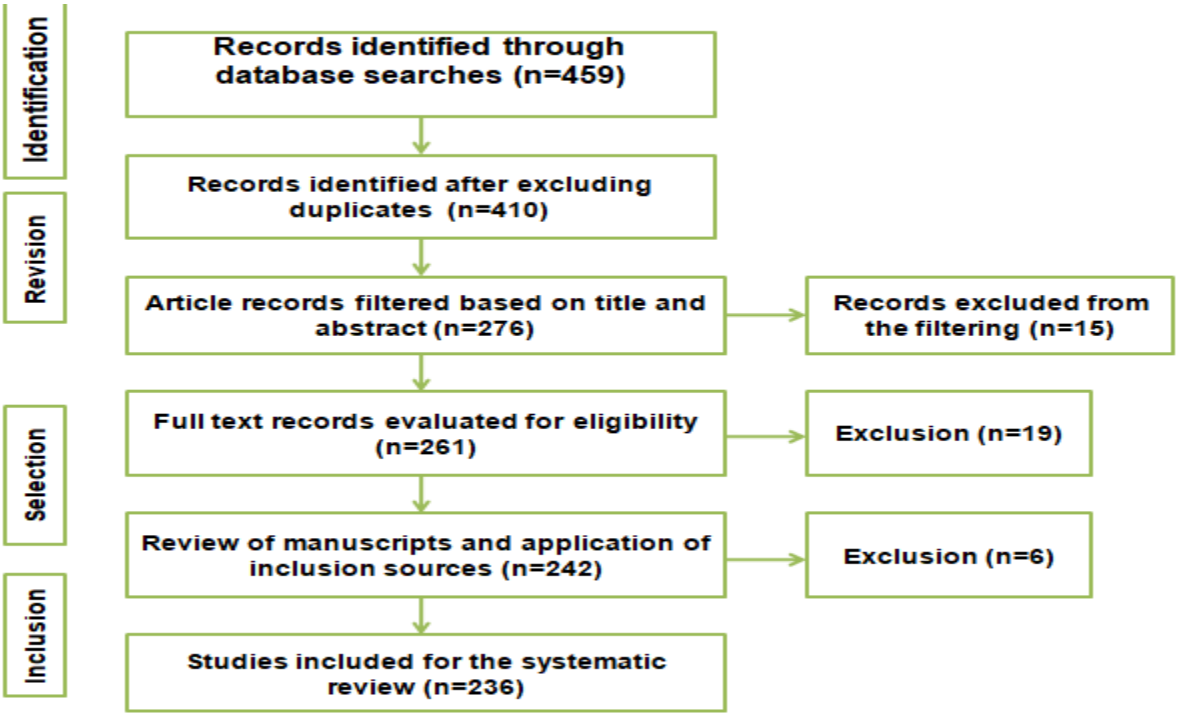


Fig. 1 - Procedimiento de búsqueda y selección de artículos.
Fuente: Autores.

Procedimiento de análisis:

Para el análisis de los estudios seleccionados se empleó un enfoque combinado de análisis bibliométrico y síntesis temática. En primer lugar, se construyó un mapa de gestión del conocimiento mediante el software VOSviewer, utilizando la co-ocurrencia de palabras clave como unidad de análisis, con método de conteo completo, umbral mínimo de 2 ocurrencias, normalización por asociación y selección de 24 términos agrupados en 4 clústeres temáticos. Este mapa se alimentó con los 34 documentos exportados con metadatos completos, que corresponden a las 43 referencias del manuscrito y representan el subconjunto de estudios incluido en la síntesis bibliométrica. Cabe aclarar que los 236 estudios del diagrama de flujo corresponden al total de registros cribados en la búsqueda sistemática. En segundo lugar, se realizó una síntesis narrativa de los hallazgos, agrupándolos en ejes temáticos que estructuran la sección de Resultados y que se detallan a continuación.

Estructura del análisis:

El análisis de los hallazgos se organiza en cuatro ejes temáticos que responden a la pregunta de investigación y que se desarrollan en la sección de Resultados:

1. Panorama bibliométrico y tendencias de investigación: coocurrencia de palabras clave y clústeres temáticos identificados mediante VOSviewer.
2. Concepto y definiciones de exoesqueletos: revisión de las definiciones aportadas por diferentes autores.
3. Clasificación de los exoesqueletos: según su funcionamiento (activos, pasivos y semiactivos) y según la zona corporal asistida (tren superior, tren inferior, espalda y cuerpo entero).
4. Casos de uso y evidencia empírica: estudios de caso en Boeing (Levitate Airframe), HAPO, SkelEx, Laevo, Levitate, HAL, exotrajes blandos (Health Suits) y avances en Cuba.

Esta organización permite articular los resultados en torno a la efectividad de los dispositivos, los factores que condicionan su implementación y los desafíos identificados en la literatura, los cuales se discuten posteriormente en la sección de Discusión.

Resultados

El mapa bibliométrico (Fig. 2) revela 4 clústeres temáticos: evaluación ergonómica (REBA, RULA, evaluación de riesgos); exoesqueletos y tecnología (exosuit, estándares); salud ocupacional y rehabilitación; y riesgos ergonómicos y TMEs. Los nodos de mayor tamaño son “industrial exoskeleton” y “musculoskeletal disorders” (9 ocurrencias cada uno). La fuerza de enlace más sólida se da entre ambos términos (20 enlaces). La evolución temporal (colores) muestra un giro hacia temas de exoesqueletos y salud ocupacional en publicaciones recientes (2015-2022), frente a los métodos tradicionales (2010-2015)

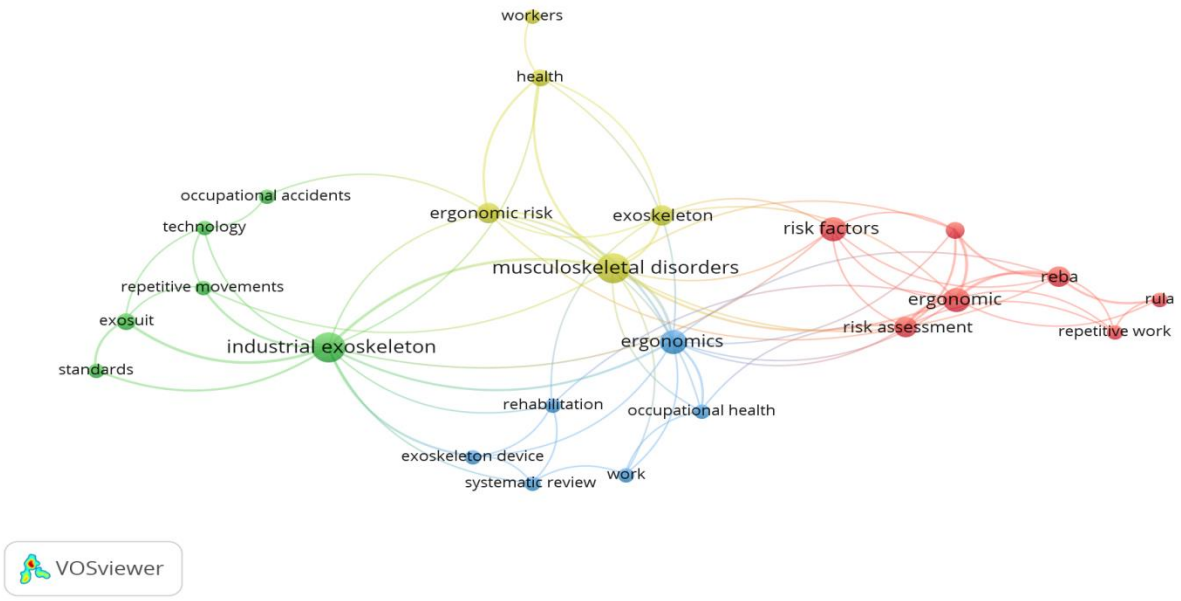


Fig. 2 - Mapa bibliométrico de coocurrencia de palabras clave de los artículos analizados.
Fuente: elaboración propia.

El mapa bibliométrico creado con el software VOSviewer a partir de la coocurrencia de palabras clave de los artículos incluidos revela las siguientes tendencias:

- Clúster 1 (Rojo): Evaluación ergonómica y métodos posturales (REBA, RULA, evaluación de riesgos).
- Clúster 2 (Verde): Exoesqueletos, tecnología y estándares (industrial exoskeleton, exosuit, estándares).
- Clúster 3 (Azul): Salud ocupacional y rehabilitación (ergonomía, salud ocupacional, rehabilitación).
- Clúster 4 (Amarillo): Riesgos ergonómicos y TMEs (ergonomic risk, musculoskeletal disorders, workers).

Los exoesqueletos como dispositivo para reducir los TMEs.

En la evaluación de los riesgos asociados con los TMEs, todos los posibles factores de riesgo deberían ser medidos; sin embargo, resulta problemático considerar todos los riesgos simultáneamente.

Los métodos de evaluación ergonómica generalmente se centran en el análisis de un determinado factor de riesgo (las posturas forzadas, los levantamientos de carga o la repetitividad de movimientos) [17] hasta que exista un consenso sobre la utilización de escalas homogéneas para la clasificación del riesgo que permitan obtener un resultado global que considere todos los factores de riesgo.

En este contexto, los exoesqueletos han emergido como una solución práctica para mitigar la exposición a factores de riesgo como posturas forzadas, movimientos repetitivos y manipulación manual de cargas [18, 19]. Su aplicación en entornos laborales requiere una evaluación previa de las tareas para seleccionar el dispositivo adecuado, considerando tanto la zona corporal a asistir (tren superior, espalda o tren inferior) como el tipo de funcionamiento (pasivo o activo). La implementación efectiva de estos dispositivos en empresas como Boeing y en estudios con el exoesqueleto HAPO ha demostrado reducciones significativas en la carga biomecánica, aunque persisten desafíos relacionados con la transferencia de carga a otras zonas del cuerpo y la necesidad de estándares de certificación [7, 15].
Las nuevas tecnologías han cambiado la forma de trabajar y los entornos de trabajo. Se pueden utilizar para reducir los accidentes laborales y mejorar las condiciones de seguridad y salud de las personas. Se han desarrollado unos dispositivos para reducir la carga física en la manipulación manual de cargas o evitar, entre otras cosas, las tareas repetitivas, las posturas estáticas, las posturas forzadas y los TMEs. Algunos de estos dispositivos son drones, vehículos autoguiados, robots colaborativos y exoesqueletos [20].

Definiciones de exoesqueletos por diferentes autores:

Las definiciones de exoesqueletos varían según su aplicación: algunos autores los describen como dispositivos portátiles para asistir al sistema musculoesquelético y reducir el estrés muscular [21], mientras que otros los enfocan como sistemas de asistencia a la marcha o rehabilitación [22, 23].

No obstante, debe señalarse que la mayoría de los exoesqueletos que se comercializan en la actualidad están diseñados para la espalda (47 %) y las extremidades superiores (33 %) [24].
Existen diferentes tipos de exoesqueletos los cuales se basan en el tipo de suplemento local de fuerza que ofrecen. Los exoesqueletos son diseñados con el objetivo de proporcionar un suplemento local de fuerza en diversas regiones corporales durante la ejecución de movimientos específicos. Este suplemento local de fuerza se puede obtener por compensación de esfuerzos o por un aumento de capacidades motrices. La compensación de esfuerzos se logra a partir de exoesqueletos pasivos, mientras que el aumento de capacidades motrices implica el uso de exoesqueletos activos. Cerca del 70 % de los exoesqueletos que actualmente se comercializan en el mercado son de tipo pasivo, mientras que el resto son de tipo activo o semiactivo. Estos últimos incluyen componentes o modos de uso activos y pasivos [24].

Clasificación de los exoesqueletos según su funcionamiento.

- Activos:

Cuentan con partes móviles accionadas por motores eléctricos o neumáticos.
Son utilizados como ayuda en el manejo manual de cargas por tanto supone una clara reducción de la carga física para el usuario.

Suelen ser equipos pesados.
Debe contar con un apoyo añadido del dispositivo al suelo, con la intención de reducir el peso provocado por el mismo.
No son los exoesqueletos más frecuentes en los puestos de trabajo por su peso y por sus complejas características.

- Pasivos:

No cuentan con un aporte externo de energía que mueva partes del equipo.
Utilizan la energía generada por el movimiento del propio usuario que, almacenada y repartida, servirá para reacomodar la carga física soportada por diferentes segmentos corporales.
Son los que mayor implantación tienen a día de hoy ya que están dirigidos a disminuir las cargas que, especialmente a nivel lumbar, soporta la espalda.
Se ha demostrado una reducción de la tensión soportada por la columna.
Por otro lado, esa reducción se logra a base de desplazar el peso a otros segmentos del cuerpo, tanto es así que se ha detectado un aumento considerable en la carga que deben soportar las piernas [15, 24].

Existe un amplio abanico de modelos comerciales dedicados a diferentes articulaciones, como por ejemplo modelos para la reducción de la carga lumbar, de soporte para miembro inferior o dispositivos de miembro superior, que descargan tensión en hombros y brazos.
Uno de los criterios de clasificación de los exoesqueletos industriales comúnmente usados es la zona corporal, los cuales se dividen en: extremidades superiores, la espalda y las extremidades inferiores. También existen algunos especialmente diseñados para las manos o como dispositivos de sujeción de herramientas.
En la tabla 1 se puede observar la clasificación de los exoesqueletos según la parte del cuerpo que recibe ayuda según los criterios definidos por Molinuevo [25].

Tabla 1 - Clasificación de los exoesqueletos según la parte del cuerpo que apoyan.

Clasificación	**Función que realizan**	**Imágenes**
Tren superior	• Ayudar a soportar el peso de herramientas y brazos, en especial cuando se trabaja con estos elevados por encima de los hombros; algunos de ellos son específicos para las manos. • Incrementar la precisión en tareas técnicas, en trabajos que requieren habilidades manuales precisas, como la soldadura o el montaje; los exoesqueletos pueden proporcionar estabilidad.	

Tren inferior	• Mejorar el desempeño de las piernas o permitir un apoyo continuado durante el desarrollo de la tarea. • Incrementar la productividad. • Prevenir lesiones comunes en la parte inferior del cuerpo, como esguinces, distensiones y lesiones en las rodillas o caderas, al asistir en la realización de movimientos y al proporcionar soporte adicional.	
Espalda	• Ayudar a protegerla y a mantener una alineación adecuada de la columna vertebral. • Reducir la tensión en la columna vertebral y los músculos de la espalda. • Incentivar una postura más saludable al proporcionar soporte en áreas claves.	
Cuerpo entero	• Mejorar las capacidades tanto del tren superior como del inferior. • Asistir en el levantamiento y manejo de cargas. • Reducir el esfuerzo físico y prevenir la fatiga muscular	

Fuente: tomado de [25].

Si bien los exoesqueletos existen desde hace ya cierto tiempo en el campo de la rehabilitación de pacientes y en el sector militar, no es hasta hace algunos años que se dispone de la tecnología especialmente diseñada para contextos laborales. Los exoesqueletos industriales son una tecnología de creciente interés para la prevención de los TMEs, por su potencial impacto en la reducción de esfuerzos físicos [10, 24].

Las tecnologías destinadas a aumentar las capacidades fisiológicas del trabajador (estabilidad, fuerza y producción de energía) en el desempeño de tareas industriales para aumentar la capacidad de trabajo o reducir las cargas biomecánicas y/o la fatiga del trabajador, lo cual mitiga así el riesgo de sobreesfuerzo, son los exoesqueletos. Estos abordan un desajuste entre las exigencias físicas del lugar de trabajo y las capacidades humanas de fuerza/resistencia, en consonancia con cualquier otra intervención de equipamiento ergonómico [26].
Otra línea de mejora es la integración de materiales más ligeros y biocompatibles. La literatura reporta el uso de polímeros biodegradables y componentes neumáticos ligeros en la fabricación de prototipos [26]. Sin embargo, la evidencia sobre su

impacto directo en la reducción de la fatiga o la carga biomecánica en entornos laborales reales es aún limitada, por lo que se requiere mayor validación.

Los beneficios potenciales de los exoesqueletos ocupacionales, sobre todo para las extremidades superiores y la región lumbar, están claramente documentados; sin embargo, la mayoría de los estudios son experimentos de laboratorio con prototipos [26, 27].
La evaluación de la carga física y los factores de riesgo biomecánico asociados al uso de exoesqueletos ha sido documentada en estudios experimentales y de campo [16, 17, 18, 19, 20]. En conjunto, los dispositivos reducen la actividad muscular y la percepción del esfuerzo, aunque la transferencia de carga a zonas no asistidas y la falta de normativas estandarizadas limitan su adopción [24, 28]. Los prototipos desarrollados y las revisiones sobre beneficios y limitaciones coinciden en señalar reducciones significativas en la actividad muscular de miembros superiores y zona lumbar [26, 27]. La evidencia sobre exoesqueletos lumbares pasivos, como el Laevo, muestra reducciones en la actividad muscular y mejoras en la comodidad percibida, aunque los resultados varían según la tarea y el ajuste individual [29]. Estudios previos sobre exoesqueletos de soporte de brazos [30] y de espalda [31] han reportado resultados similares, y el análisis introductorio sobre exoesqueletos ocupacionales [32] coincide en destacar su potencial preventivo. En paralelo a los exoesqueletos rígidos, han emergido los denominados Health Suits o exotrajes blandos (softexosuits), que utilizan textiles funcionales, cables y actuadores neumáticos o eléctricos para asistir movimientos sin restringir la libertad articular. A diferencia de los exoesqueletos pasivos, estos dispositivos distribuyen la asistencia de forma más fisiológica y permiten una integración más cómoda durante jornadas laborales prolongadas [31, 32].

En la figura 3 se observan los modelos de exoesqueleto HAPO UP y Levitate Airframe.



Fig. 3 - Exoesqueletos HAPO UP y Levitate Airframe.
Fuente: tomado de (24).

Como contexto nacional y fuera de la síntesis principal de evidencia laboral (dado que la revisión se centra en aplicaciones industriales y excluye rehabilitación médica), los avances en Cuba se centran en exoesqueletos médicos de rehabilitación. Estos incluyen un exoesqueleto robótico para miembros superiores (utilizado para el Síndrome del Hombro Doloroso y la Capsulitis Adesiva), un dispositivo para pacientes amputados de manos con sensores electromiográficos, y un prototipo para pacientes hemipléjicos (miembro superior) en desarrollo [33].

Discusión

Mientras que la mayoría de los autores coinciden en la efectividad de los exoesqueletos para reducir la carga biomecánica [9, 30], existen discrepancias respecto a su efectividad en tareas dinámicas versus estáticas [32, 34], así como en los efectos adversos derivados de la transferencia de carga [24, 35]. Los exoesqueletos pasivos predominan por su ligereza y bajo mantenimiento [24]. Los activos avanzan con predicción de intención mediante IA y sensores [35].

Se reportó que aproximadamente el 70 % de los dispositivos comercializados son pasivos, por su simplicidad y bajo coste. En este sentido, la evidencia científica confirma el predominio de los sistemas pasivos, especialmente para soporte lumbar y de hombros, debido a su ligereza, bajo mantenimiento y facilidad de ajuste morfológico [24].

La evidencia revisada muestra que los exoesqueletos industriales, tanto pasivos como activos, reducen de forma consistente la actividad muscular y la carga biomecánica en tareas estáticas y dinámicas [15, 24, 29, 36]. Los dispositivos pasivos, como el Laevo, han demostrado reducir la actividad del erector spinae y mejorar la percepción de comodidad, aunque su efectividad depende del tipo de tarea y del ajuste individual [29, 37]. El exoesqueleto HAPO UP, diseñado para soporte de brazos [34], es un ejemplo de dispositivo pasivo cuyo efecto ha sido evaluado en tareas de laboratorio. Los exoesqueletos activos, por su parte, avanzan hacia sistemas con predicción de intención mediante inteligencia artificial y sensores, lo que representa la frontera tecnológica para entornos dinámicos. Revisiones recientes sobre predicción de intención en exoesqueletos de miembro superior confirman que esta capacidad es esencial para habilitar un control intuitivo y adaptativo en entornos industriales dinámicos [38].

La transferencia de carga a segmentos no asistidos es uno de los principales desafíos identificados. Si bien puede ser beneficiosa cuando se anticipa en el diseño ergonómico, requiere una evaluación individualizada para evitar nuevas demandas musculares o molestias en zonas no asistidas [39]. En esta línea, la revisión de Flor-Unda et al. [39] concluye que, aunque los exoesqueletos reducen la actividad de músculos como el trapecio o el pectoral mayor, activan otros como el deltoides posterior y el dorsal ancho, lo que subraya la necesidad de un diseño ergonómico adaptable y validaciones en campo. La experimentación en contextos industriales

reales [40] y la evaluación del bienestar del usuario [41] son aspectos clave para una adopción segura.

Otro desafío crítico es la ausencia de normativas estandarizadas. Actualmente no existe un consenso unificado sobre las métricas de evaluación y los protocolos de certificación para exoesqueletos, lo que dificulta la comparación objetiva entre dispositivos y su adopción generalizada [38].

La implementación de exoesqueletos exige evaluación ergonómica previa, formación, ajuste personalizado, monitoreo de efectos adversos y evaluación por el médico del trabajo. Los exoesqueletos deben entenderse como el último eslabón en la jerarquía de controles, complementando el rediseño del puesto o la automatización [15]. Se requieren estudios longitudinales, validación en entornos reales y desarrollo de normativa estandarizada [15, 42, 43].

En conjunto, la evidencia revisada confirma que los exoesqueletos industriales representan una herramienta valiosa para la prevención de TMEs en el ámbito laboral, pero su implementación debe ser cuidadosa, adaptada a cada tarea y trabajador, y complementada con otras medidas.

Conclusiones

La presente revisión confirma que los exoesqueletos industriales reducen significativamente la actividad muscular y la carga biomecánica en trabajadores expuestos a riesgos ergonómicos. La evidencia también indica que la transferencia de carga a segmentos no asistidos, si bien puede ser beneficiosa cuando se anticipa en el diseño ergonómico, requiere una evaluación individualizada para evitar efectos adversos.

Persisten la ausencia de normativas estandarizadas para la certificación de estos dispositivos como equipo de protección personal, la necesidad de estandarizar métricas de evaluación y la limitada validación en entornos laborales reales. Su implementación debe concebirse como el último eslabón en la jerarquía de controles, complementando medidas como el rediseño del puesto o la automatización.

Se requieren estudios longitudinales que evalúen los efectos a largo plazo sobre la salud musculoesquelética, así como investigaciones en entornos reales que permitan generalizar los hallazgos de laboratorio.

Referencias

1. Howard DD. and Director of the National Institute of Safety and Health (NIOSH). 2025. Available from: https://www.911healthwatch.org/files/2025-0204-Petition.pdf

2. Alias AN, Karuppiah K, Tamrin SBM, Abidin EZ, Shafiei UKM. A systematic review of intervention to reduce musculoskeletal disorders: hand and arm disorders. Jurnal Teknologi. 2015;77(27). doi:10.11113/jt.v77.6901

3. Hulshof CT, Pega F, Neupane S, van der Molen HF, Colosio C, Daams JG, et al. The prevalence of occupational exposure to ergonomic risk factors: A systematic review and meta-analysis from the WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and Injury. Environment international. 2021;146:106157. doi:10.1016/j.envint.2020.106157
4. Gómez Galan M, Pérez Alonso J, Callejón Ferre ÁJ, Sánchez Hermosilla J. Musculoskeletal disorders: OWAS review. Industrial Health. 2024;63(3):135-148. Available from: https://www.jstage.jst.go.jp/article/indhealth/55/4/55_2016-0191/_article/-char/ja/
5. Jahn A, Andersen JH, Christiansen DH, Seidler A, Dalbøge A. Occupational mechanical exposures as risk factor for chronic low-back pain: a systematic review and meta-analysis. Scand J Work Environ Health. 2023;49(7):453-465. doi:10.5271/sjweh.4114
6. Lowe BD, Billotte WG, Peterson DR. ASTM F48 formation and standards for industrial exoskeletons and exosuits. IISE transactions on occupational ergonomics human factors. 2019;7(3-4):230-6. Available from: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/24725838.2019.1579769
7. Bhat S, Gavin J, Warner M, Myall M. Mapping the evidence on occupational exoskeleton use for the workforce in healthcare, social care, and industry: A systematic scoping review. Wearable Technologies. 2025;6:e53. doi:10.1017/wtc.2025.10035
8. Zhang M, Grosse EH, Neumann WP. Human Factors in Operations Management: Comparative Perspectives on Decision Support Models. IFAC-PapersOnLine. 2025;59(10):769-74. doi:10.1016/j.ifacol.2025.09.131
9. Bosch T, Van Eck J, Knitel K, de Looze M. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. Applied ergonomics. 2016;54:212-7. doi: 10.1016/j.apergo.2016.12.003
10. Ralfs L, Hoffmann N, Weidner R. Method and test course for the evaluation of industrial exoskeletons. Applied Sciences. 2021;11(20): 9614. Available from: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/20/9614
11. Kitchenham B. Procedures for performing systematic reviews. Keele, UK, Keele University. 2004;33(2004):1-26. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Barbara Kitchenham/publication/228756057_Procedures_for_Performing_Systematic_Reviews/links/618cfae961f09877207f8471/Procedures-for-Performing-Systematic-Reviews.pdf
12. Okoli C, Schabram K. A guide to conducting a systematic literature review of information systems research. 2015. Available from: https://www.academia.edu/download/3250666/OkoliSchabram2010SproutsLitReviewGuide.pdf
13. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. Revista española de cardiología. 2021;74(9):790-9. doi:10.1016/j.recesp.2021.06.016

14. Crisol-Moya E, Herrera-Nieves L, Montes-Soldado R. Educación virtual para todos: una revisión sistemática. Education in the knowledge society. 2020;21:13. doi:10.14201/eks.20327
15. Cardoso A, Ribeiro A, Carneiro P, Colim A. Evaluating exoskeletons for WMSD prevention: A systematic review of applications and ergonomic approach in occupational settings. International journal of environmental research public health. 2024;21(12):1695. doi:10.3390/ijerph21121695
16. Baldassarre A, Lulli LG, Cavallo F, Fiorini L, Mariniello A, Mucci N, et al. Industrial exoskeletons from bench to field: Human-machine interface and user experience in occupational settings and tasks. Frontiers in Public Health. 2022;10:1039680. doi:10.3389/fpubh.2022.1039680
17. Prieto JLA, Ojito RdlCC, Figueroa YC, Garriga YCQ, Cuello YC. Análisis de herramientas empleadas para la evaluación de riesgos ergonómicos posturales en puestos de trabajo. Revista Cubana de Administración Pública y Empresarial. 2024;8(2):e327. doi:10.5281/zenodo.13819723
18. De Looze MP, Bosch T, Krause F, Stadler KS, O'sullivan LWJE. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. 2016;59(5):671-81. Available from: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00140139.2015.1081988
19. Tröster M, Eckstein S, Kennel P, Kopp V, Benkiser A, Bihlmeier F, et al. Person-specific evaluation method for occupational exoskeletons–Biomechanical body heat map. Applied ergonomics. 2026;132:104671. doi:10.1016/j.apergo.2025.104671
20. Muñoz MÁM. Exoesqueletos: Características, Riesgos Y Medidas Preventivas. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). 2024. Available from: https://www.insst.es/documents/94886/375202/Exoesqueletos+caracteristicas%2C+riesgos+y+medidas+preventivas+2023.pdf/b924367c-983a-c897-b58b-d38258350887?t=1697699648465
21. Peters M, Wischniewski S. The impact of using exoskeletons on occupational safety and health. European Agency for Safety Health at Work. 2019:7. Available from: https://osha.europa.eu/en/publications/impact-using-exoskeletons-occupational-safety-and-health
22. Díaz Suárez RA, Moreno Moreno LT, Sanjuan Vargas MA, Prada García CA, Torres LD. Desarrollo de un exoesqueleto para la rehabilitación del movimiento flexo-extensor del codo. Iteckne. 2021;18(1):46-51. Available from: https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-17982021000100046&script=sci_arttext
23. García Oliveros IMI, Nerea Marín Ojea, Juan Ignacio , Lancho Poblador C, Fuentes-Claramonte P, Quemada Ubis JI. Gross Motor Function after Rehabilitation with the Atlas 2030 Pediatric Exoskeleton in Children With Cerebral Palsy. Revista de Neurología. 2025;80(7):46141. Available from: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12415881/

24. Guittienne M, Forestier N. Differential effect of three types of exoskeletons and handling height on muscular activity, postural control and perceived effort during simulated bedside mobilization task. Applied Ergonomics. 2025;125:104467. doi:10.1016/j.apergo.2025.104467
25. Zubizarreta Molinuevo J. Exoesqueletos I: Definición y clasificación. 2021. Available from: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9431060.
26. Garcés Oleas BF, Hurtado Romero JE. Diseño y construcción de un prototipo de exoesqueleto para extremidades superiores que ayude a contrarrestar los movimientos involuntarios en los procesos de alimentación en personas con Parkinson. 2023. Available from: http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/19193
27. Puebla Farías DA. Beneficios y limitaciones del uso de exoesqueletos ocupacionales para la prevención de trastornos musculoesqueléticos: revisión sistemática exploratoria. 2020. Available from: https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3978
28. Niño Diaz YA, Navarro Pinedo HM, Pérez González K, Salas Peña IC. Diseño de un exoesqueleto ergonómico adaptable para la prevención de lesiones en la columna vertebral en trabajadores operativos y administrativos en el contexto laboral colombiano. 2025. Available from: https://bonga.unisimon.edu.co/items/71505929-be51-4c45-8b96-056bf8d078a0
29. Hu D, Wang D. Performance evaluation in lower-limb exoskeleton robotics: State-of-the-art assessment indicators, quantitative methods, and pathways to standardization. Robotics and Autonomous Systems. 2026. doi:10.1016/j.robot.2025.105178
30. de Vries A, Murphy M, Könemann R, Kingma I, de Looze M. The amount of support provided by a passive arm support exoskeleton in a range of elevated arm postures. IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors. 2019;7(3-4):311-21. doi:10.1080/24725838.2019.1669736
31. Hensel R, Keil M. Subjective evaluation of a passive industrial exoskeleton for lower-back support: A field study in the automotive sector. IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors. 2019;7(3-4):213-21. doi:10.1080/24725838.2019.1573770
32. Nussbaum MA, Lowe BD, de Looze M, Harris-Adamson C, Smets M. An introduction to the special issue on occupational exoskeletons. Taylor & Francis; 2019. p. 153-62. Available from: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/24725838.2019.1709695
33. Zayas CMSH, Regalado JB, Zamora CRS, Quesada CMT. Terapia robótica en la rehabilitación de la extremidad superior: implicaciones médicas, científicas, sociales y económicas. Arrancada. 2025;25:11-28. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Roberto-Sagaro-Zamora-2/publication/395205429
34. Iranzo Egea S, Prat Boluda G. Development and Validation of Methodologies for the Physiological and Biomechanical Characterization of the Interaction with Occupational Exoskeletons for Load Handling. 2025. Available from: https://riunet.upv.es/handle/10251/225532

35. Hochreiter D, Schmermbeck K, Vazquez-Pufleau M, Ferscha A. Intention prediction for active upper-limb exoskeletons in industrial applications: A systematic literature review. Sensors (Basel, Switzerland). 2025;25(17):5225. doi:10.3390/s25175225
36. Brunelli G, Dubois O, Tiboni M, Jarrassé N. Review of upper-limb occupational exoskeletons: From technology to assessment. Int J Ind Ergon. 2025;110:103815. doi:10.1016/j.ergon.2025.103815
37. Eskandari AH, Ghezelbash F, Shirazi-Adl A, Arjmand N, Lariviere C. Effect of a back-support exoskeleton on internal forces and lumbar spine stability during low load lifting task. Appl Ergon. 2025;123:104407. doi:10.1016/j.apergo.2024.104407
38. Giustetto A, Favro F, Gobbo S, et al. What is the current state of evidence on passive exoskeletons designed to support the lumbar region? A systematic review and meta-analysis of physiological, biomechanical, and user-related outcomes. Applied Ergonomics. 2026;132:104671. doi:10.1016/j.apergo.2026.104874
39. Flor-Unda O, Arcos-Reina R, Nunez-Nagy S, Alarcos B. Adverse effects due to the use of upper limbs exoskeletons in the work environment: A scoping review. Biomimetics. 2025;10(5):340. Available from: https://www.mdpi.com/2313-7673/10/5/340
40. Ciccarelli M, Tonelli S, Terlizzi S, Scoccia C, Papetti A, Germani M, editors. A preliminary experimentation of passive back-support exoskeleton in a real industrial context. 2024 20th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA); 2024: IEEE. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10704880/
41. Tonelli S, Terlizzi S, Scoccia C, Iadarola G, Ciccarelli M, Spinsante S, et al., editors. Evaluating the Potential of Passive Exoskeletons in Modern Industries: A Comprehensive Analysis of the Impact on User Well-Being and Efficiency. International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region; 2024: Springer. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-59257-7_56
42. Schwerha D, McNamara N, Kim S, Nussbaum MA. Exploratory field testing of passive exoskeletons in several manufacturing environments: perceived usability and user acceptance. IISE Transactions on Occupational Ergonomics Human Factors. 2022;10(2):71-82. Available from: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/24725838.2022.2059594
43. Al-Khiami MI, Lindhard SM, Wandahl S. Charting the Exoskeleton Industry: A Comprehensive Insight into Dynamics and Trends. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024;1389(1):012014. doi:10.1088/1755-1315/1389/1/012014

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de cada autor:
Juan Lázaro Acosta Prieto: Conceptualización; Investigación; Metodología; Supervisión; Redacción - revisión y edición
Javier Camacho Mesa: Curación de datos; Investigación; Visualización; Redacción - borrador original
Melisa Rodríguez Fernández: Curación de datos; Investigación; Visualización; Redacción - borrador original
José Antonio Pernas Carrasco: Curación de datos; Investigación; Redacción - borrador original
Yilena Cuello Cuello: Análisis formal; Investigación; Metodología; Redacción - borrador original

Sobre los autores:
Juan Lázaro Acosta Prieto: Doctor en Ingeniería Industrial por la Universidad de Matanzas, Cuba, graduado con título y premio al mérito científico. Máster en Ergonomía y Seguridad y Salud Ocupacional y Máster en Administración de Empresas, módulo de Gestión de Servicios, Doctor en Ciencias Técnicas de la Ingeniería Industrial en la línea de investigación de Ergonomía Cognitiva. En 2021 obtuvo el Premio Nacional CITMA como investigador estudiantil, en 2021 el Sello de Forjadores del Futuro. En 2020 fue Vicedecano de la Facultad de Ciencias Empresariales de la Universidad de Matanzas; desde 2021 hasta 2023, Director del Centro Universitario Municipal de Cárdenas, y desde 2023 hasta la actualidad, Director de Investigación y Postgrado de la Universidad de Matanzas, Cuba.

Javier Camacho Mesa: estudiante de Ingeniería Industrial perteneciente al grupo científico ErgoSeg de la Universidad de Matanzas, Cuba.

Melisa Rodríguez Fernández: Estudiante de Ingeniería Industrial perteneciente al grupo científico ErgoSeg de la Universidad de Matanzas, Cuba.

José Antonio Pernas Carrasco: Ingeniero Industrial en la Universidad de Matanzas, graduado con título de oro y premio al mérito científico. Pertenece al grupo científico ErgoSeg de la Universidad de Matanzas. Actualmente se desempeña como profesor y Jefe del Departamento de Información, Estadística y Archivo de la Universidad de Matanzas.

Yilena Cuello Cuello: Ingeniera Industrial graduada de la Universidad de Matanzas, Cuba desde 2021. Pertenece al Grupo Científico de Ergonomía Cognitiva, donde ha desarrollado investigación teórica y práctica sobre carga mental. Actualmente cursa una maestría en Ergonomía y Seguridad y Salud Ocupacional. Se desempeña como profesora en la Universidad de Matanzas, Cuba.