

Agricultural applications of biomechanics in productivity: A systematic literature review

Ruben A. Figueroa-León¹ 

¹Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Industrial, Lima-Perú, C28920@utp.edu.pe

Abstract— A systematic review of the literature was developed (SLR) with the purpose of analyzing the influence of biomechanics on the productivity of workers suffering from musculoskeletal disorders in the agricultural sector. For this, a scientific search was carried out in the Scopus database, using the PIOC and PRISMA techniques, which allowed us to obtain a final sample of 53 articles, of which, the bibliometric analysis shows that the USA is the country with the largest number of research on the subject, with 2023 being the year with the greatest scientific participation, in addition, it is evident that the muscles are the most affected components due to inadequate postures associated with harvesting, basically, with low back pain being the prevailing TME. In fact, the authors highlight the use of exoskeletons which allow reducing muscular activity and workload, reaching the conclusion that, although there is still a scientific gap due to the influence of environmental settings, adaptability and high investment costs, exoskeletons turn out to be a very good technological option to this problem.

Keywords— musculoskeletal disorder, biomechanics, productivity, agricultural sector, ergonomics.

Aplicaciones agrícolas de la biomecánica en la productividad: Una revisión sistemática de literatura

Ruben A. Figueroa-León¹ 

¹Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Industrial, Lima-Perú, C28920@utp.edu.pe

Resumen– Se desarrolló una revisión sistemática de literatura (RSL) con el propósito de analizar la influencia de la biomecánica en la productividad de los trabajadores que padecen trastornos musculoesqueléticos en el sector agrícola. Para ello se realizó una búsqueda científica en la base de datos Scopus, utilizando las técnicas PIOC y PRISMA, que permitió obtener una muestra final de 53 artículos, de los cuales, el análisis bibliométrico muestra que USA, es el país con una mayor cantidad de investigaciones en torno a la temática, siendo el año 2023, el de mayor participación científica, además, se evidencia que los músculos son los componentes más afectados debido a posturas inadecuadas asociadas a la cosecha básicamente, siendo el dolor lumbar, el TME que prevalece. De hecho, los autores destacan el uso de exoesqueletos los cuales permiten reducir la actividad muscular y la carga de trabajo, llegando a la conclusión de que, si bien aún existe un vacío científico debido a la influencia de entornos ambientales, la adaptabilidad y los altos costos de inversión, los exoesqueletos resultan ser una muy buena opción tecnológica para este problema.

Palabras clave– trastornos musculoesqueléticos, biomecánica, productividad, sector agrícola.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los trastornos musculoesqueléticos (TME) en personas que realizan actividades agrícolas se han incrementado, surgiendo la necesidad de incorporar elementos tecnológicos a este quehacer, es ahí donde toma importancia el campo de la biomecánica, que mediante exoesqueletos busca ser una solución prometedora, [1] señalan que estos elementos son una solución atractiva en los trabajadores manuales para reducir la prevalencia del desgaste y los TME, como el dolor lumbar, tal es así que su uso durante la manipulación de materiales resulta en una variación reducida del 13 al 20 % en la actividad de los músculos de la espalda y condiciones de elevación, incluida la extensión del tronco, además los cambios en la variación son impulsados por una disminución de la actividad muscular máxima que se reduce aún más entre un 6% y un 9%, además [2] muestran que los exoesqueletos pasivos de las extremidades superiores pueden tener potencial como una intervención eficaz para reducir la carga muscular y el esfuerzo físico durante el trabajo por encima de la cabeza, puesto que la actividad muscular disminuye significativamente entre un 29.3% y un 58.1%.

Por otra parte, [3] señalan a la productividad laboral como la producción económica por unidad de aporte de mano de obra, rara vez se menciona como el principal impulsor de aumento de la producción agrícola a pesar de que se ha modernizado a una agricultura notablemente eficiente, en esa línea, [4] menciona que la innovación tecnológica mejora la

productividad agrícola en un factor de 0.017 y 0.03, con respecto a los efectos específicos de cada país.

Debido a esta situación, existe una variedad de artículos que vinculan la biomecánica con productividad, si bien muchos han analizado esta correlación en varios escenarios, existe una brecha de investigación sobre el panorama agrícola, la cual es significativa dada su naturaleza compleja y diversa, donde la incidencia tecnológica puede variar mucho dependiendo de las características socioeconómicas y agrícolas específicas de cada población [5].

De acuerdo a lo planteado anteriormente, la problemática que evidencian los distintos autores corresponde a problemas de TME debido a las posturas inadecuadas que los trabajadores adoptan en sus actividades agrícolas, señalando que, a lo largo de una jornada laboral de cosecha, esta les genera lumbalgias, tendinitis o tenosinovitis [6], que si bien se cuenta con tratamientos efectivos, estos son limitados, evidenciando la necesidad de incluir métodos de evaluación basada en dispositivos inteligentes para la recopilación y seguimiento de datos [7]. Cabe señalar que estos problemas están presentes desde hace muchos años y conllevan a que los trabajadores adquieran con el tiempo, distintas enfermedades ocupacionales, lo cual disminuye su productividad, teniendo en cuenta además, que la mayoría de los exoesqueletos existentes no proporcionan entrenamiento de resistencia activo y asequible [8], tal es el caso de la plantación de palma aceitera, la cual consta de varias actividades como la cosecha, el abono y la pulverización, por lo que el agricultor queda expuesto a problemas ergonómicos en su quehacer habitual. Aunque, si bien se han desarrollado importantes avances tecnológicos, el proceso de recolección todavía utiliza herramientas manuales, por lo que necesita de fuerza, energía, habilidad y técnica, las cuales exponen a los agricultores a un alto riesgo postural [9].

De esta forma, se justifica el desarrollo de una nueva RSL sobre el análisis de la inclusión de nuevos sistemas y modos de trabajo que incorporen las principales alternativas tecnológicas para mejorar la productividad, aunada al bienestar laboral de los trabajadores del sector agrícola que padecen de TME, siendo la biomecánica, la opción que complementa los vacíos bibliográficos existentes, los cual es crucial para obtener una visión integral de cómo la tecnología puede impactar en la productividad agrícola.

En consecuencia, el objetivo de la presente RSL es analizar la influencia de la biomecánica, en la productividad de los trabajadores que padecen de TME en el sector agrícola.

En ese sentido, la sección 2 correspondiente a metodología, presenta los métodos utilizados para el desarrollo de la RSL, iniciando con la estrategia PIOC que da lugar a las preguntas orientadoras, seguidas de las palabras clave y sus relaciones; se incluye, además, la ecuación de búsqueda, los criterios de elegibilidad y el proceso de selección de estudios, para finalizar con el diagrama de flujo PRISMA, luego en la sección 3 de resultados, se presentan y organizan los principales hallazgos obtenidos sobre la biomecánica y su impacto en la productividad, mediante análisis bibliométrico y académico. En la sección 4, en la discusión se muestra la interpretación de los datos de los artículos, mostrando una visión general sobre las aplicaciones agrícolas de la biomecánica en la productividad. Por último, en la sección 5, conclusiones, se da respuesta al objetivo general, se sintetizan los principales hallazgos, se muestran las limitaciones y se brindan recomendaciones para trabajos futuros acorde a la temática en cuestión.

II. METODOLOGÍA

Para la presente RSL, se aplicó la estrategia PIOC para definir los puntos principales del análisis, de acuerdo con la Fig. 1, la sección “Problem” (problema) describe el fenómeno a resolver, como son los “Trastornos musculoesqueléticos”, seguidamente, “Intervention” (intervención), muestra el aporte de la “Biomecánica” para resolver el problema, posteriormente “Outcome” (resultado) describe el efecto de la intervención, en este caso, el impacto en la “productividad”, y por último, “Context” (contexto), define el alcance del problema netamente abocado al “sector agrícola”.

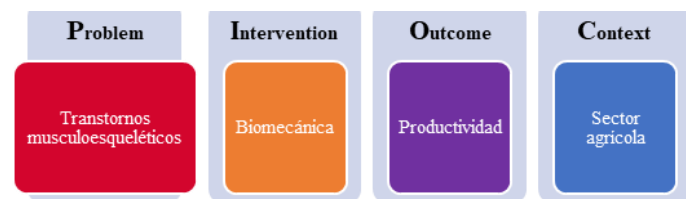


Fig. 1 Componentes PIOC.

Así también, la Tabla I, muestra la pregunta orientadora con las subpreguntas asociadas a cada componente PIOC.

TABLA I
PREGUNTA ORIENTADORA PIOC Y SUBPREGUNTAS

RQ: ¿De qué manera la biomecánica influye en la productividad de los trabajadores con trastornos musculoesqueléticos en el sector agrícola?
RQ1: ¿Qué tipos de trastornos musculoesqueléticos se evidencian en el sector agrícola?
RQ2: ¿Qué aplicaciones biomecánicas se han implementado?
RQ3: ¿Qué niveles de productividad se han obtenido y qué limitaciones se han presentado?
RQ4: ¿En qué contextos del sector agrícola se ha investigado, con qué poblaciones, muestras?

Asimismo, la Tabla II, presenta las palabras clave de cada componente, así como las relaciones de búsqueda existentes.

TABLA II
PALABRAS CLAVE Y RELACIONES DE BÚSQUEDA

#	Término principal	Relaciones
P	Trastornos musculoesqueléticos	"Musculoskeletal disorders" OR "Musculoskeletal diseases" OR "Musculoskeletal symptoms" OR "Occupational diseases" OR "Ergonomic problems" OR "low back pain"
I	Biomecánica	biomechanics OR bioengineering OR robotics OR technology OR mechanics OR exoskeletons OR devices
O	Productividad	productivity OR performance OR ergonomics OR health OR production OR result
C	Sector agrícola	"Agricultural sector" OR agriculture OR agricultural OR planting OR harvesting OR collection OR crop OR forestry OR irrigation

A. Estrategia de búsqueda

La búsqueda sistemática se desarrolló en la base de datos de Scopus, para ello se usó la ecuación siguiente:

(TITLE-ABS-KEY ("Musculoskeletal disorders" OR "Musculoskeletal diseases" OR "Musculoskeletal symptoms" OR "Occupational diseases" OR "Ergonomic problems" OR "low back pain") AND TITLE-ABS-KEY (biomechanics OR bioengineering OR robotics OR technology OR mechanics OR exoskeletons OR devices) AND TITLE-ABS-KEY (productivity OR performance OR ergonomics OR health OR production OR result) AND TITLE-ABS-KEY ("Agricultural sector" OR agriculture OR agricultural OR planting OR harvesting OR collection OR crop OR forestry OR irrigation))

B. Criterios de elegibilidad

Se consideraron los siguientes criterios de inclusión:

CI1: Estudios que reporten evidencias de trastornos musculoesqueléticos.

CI2: Investigaciones que muestren aplicaciones biomecánicas implementadas en el sector agrícola.

CI3: Artículos que manifiesten niveles de productividad mediante aplicación de la biomecánica.

CI4: Publicaciones que contemplen distintas actividades del sector agrícola.

Además, se aplicaron los siguientes criterios de exclusión:

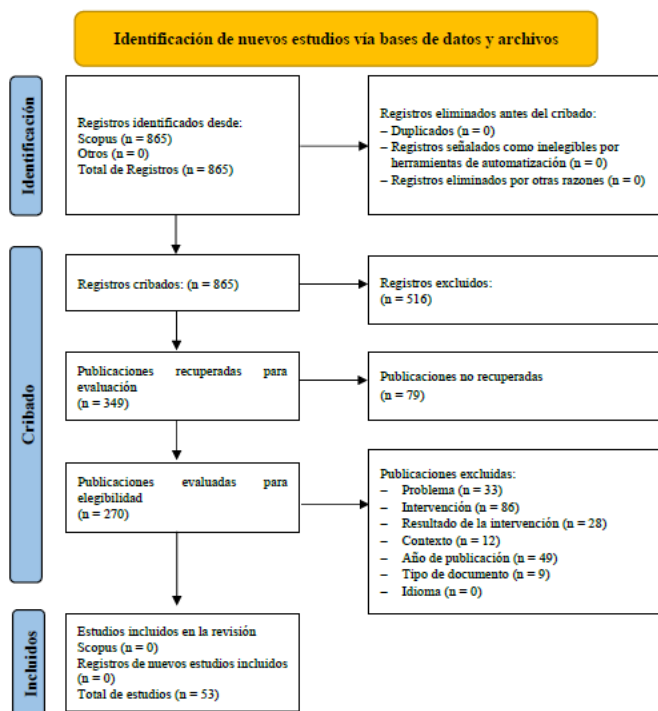
CE1: Documentos NO comprendidos entre el 2019-2024.

CE2: Publicaciones que NO correspondan a artículos científicos originales.

CE3: Investigaciones en idiomas diferentes al chino, inglés y español.

C. Proceso de selección de estudios

Para el proceso de búsqueda sistemática, se siguieron los lineamientos de la declaración PRISMA, según Fig. 2, luego mediante SCOPUS se identificaron 865 artículos, de los cuales 516 fueron excluidos por no cumplir con la temática y 349, pasaron a evaluación, donde sólo 270 fueron recuperados a texto completo, luego, aplicando los criterios de elegibilidad, se descartaron 217, teniendo finalmente 53 estudios.

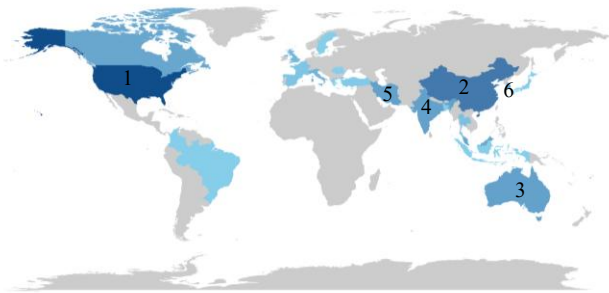


III. RESULTADOS

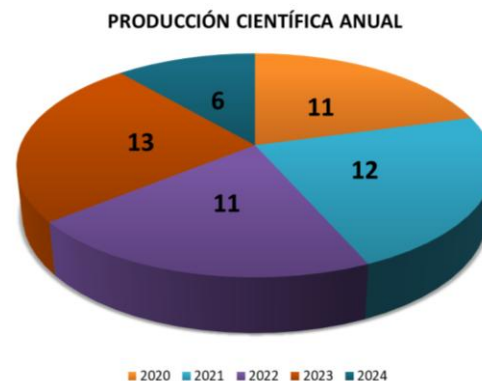
Los resultados se obtuvieron mediante dos tipos de análisis como son datos bibliométricos y académicos.

A. Análisis bibliométrico

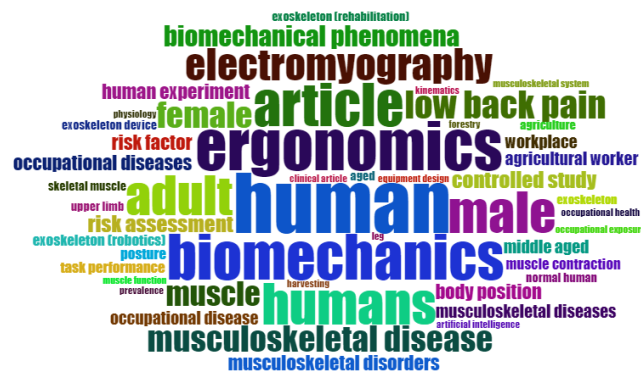
La Fig. 3 muestra a los principales países que dedicaron esfuerzos en desarrollar investigaciones orientadas al estudio de la biomecánica en el sector agrícola a nivel mundial, quedando en evidencia que USA (1), es el país con un mayor nivel de investigaciones en torno a esta temática, seguido por China (2), Australia (3), India (4), Irán (5) y Corea del Sur (6).



En la Fig. 4, se evidencia que el año de mayor participación científica, fue el 2023, seguido del año 2021, además es importante resaltar que no aparece el año 2019, por no mostrar intervenciones significativas que cumplan con los criterios de cribado acorde a la temática en estudio.



Además, la Fig. 5, presenta los términos más frecuentes encontrados dentro de los 53 artículos que se analizaron, pudiendo observar que las palabras “ergonomics”, “human” y “biomechanics” son las más frecuentes, lo cual deja en evidencia el gran impacto que tiene la biomecánica en la ergonomía de los seres humanos.



B. Análisis académico

RQ1: ¿Qué tipos de trastornos musculoesqueléticos se evidencian en el sector agrícola?

RQ1.1: ¿Qué definición de trastornos musculoesqueléticos fue utilizada en el estudio?

Para definir a los TME en las investigaciones, se consideraron dos aspectos muy importantes, que incluye el lugar de afectación, así como las causas que los originan.

De los 53 estudios incluidos, se contabilizó el número total de menciones a las estructuras anatómicas abordadas, considerando que un mismo estudio podía referirse a más de una categoría, donde la más mencionada fueron los músculos con 36 menciones (31%) [10]-[13], [15], [20], [21], [23], [26], [28]-[32], [34]-[46], [49]-[56], [62], mientras que sólo 5 investigaciones (4%) [10], [11], [34], [44], [62] enfatizan a los nervios como el área de mayor impacto.

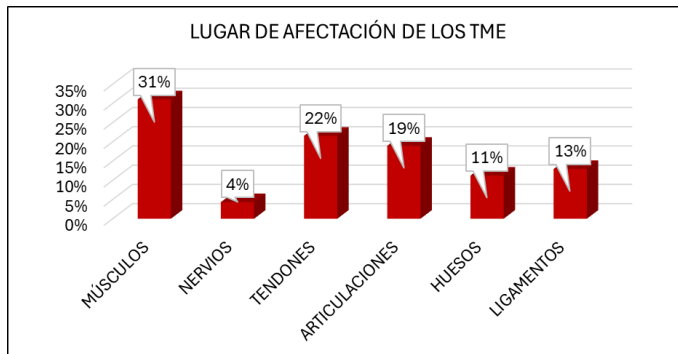


Fig. 6 Lugar de afectación de los TME.

En ese contexto, en la Fig. 7, los hallazgos muestran que 21 artículos (36%) [15], [23], [28]-[31], [34]-[37], [41]-[44], [46], [49], [50], [52], [54], [55], [62] enfatizan a las posturas inadecuadas como el principal catalizador de estos problemas, seguido de 18 estudios (31%) [10]-[13], [15], [20], [21], [29]-[31], [34], [37], [44], [46], [52], [54], [55], [62] que destacan a los movimientos repetitivos y luego, 15 [15], [20], [21], [23], [32], [35]-[37], [40]-[46] que señalan a la carga laboral excesiva como una causa de importante TME (26%).

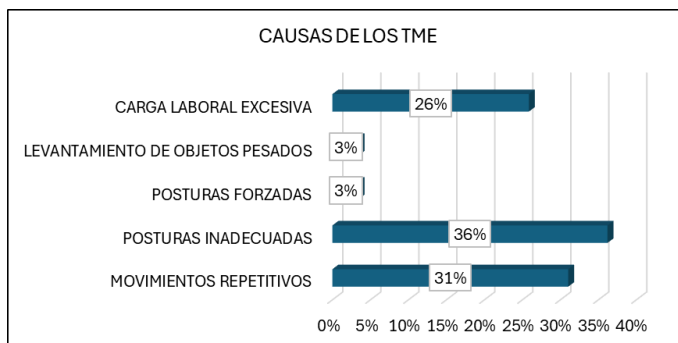


Fig. 7 Causas de los TME.

De todo lo anterior expuesto se puede definir a los trastornos musculoesqueléticos como problemas que tienen una mayor incidencia en los músculos, siendo las posturas inadecuadas, la causa principal.

RQ1.2: ¿Qué tipo(s) de trastorno musculoesquelético fue discutido en el sector agrícola?

Al respecto, en la Fig 8, resalta una mayor frecuencia de los TME en la espalda.

De hecho, 34 investigaciones (41%) consideran al dolor lumbar como un problema prevalente en la agricultura, principalmente debido a las tareas que implican flexión, torsión y levantamiento de cargas [10], [18], [30], [41], [45], [47], [49].

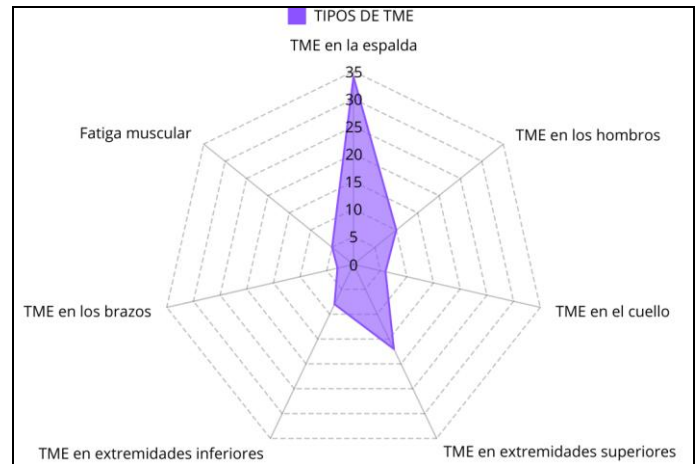


Fig. 8 Tipos de TME.

Así también, 17 artículos [11], [18], [23], [30], [31], [34], [35], [37], [41], [42], [49], [50], [52], [54], [55], [59], [62] hacen énfasis en el dolor en las extremidades superiores producto de las actividades que involucran movimientos repetitivos de las muñecas, manos y brazos, como la cosecha, ya que pueden causar dolor y lesiones.

RQ2: ¿Qué aplicaciones biomecánicas se han implementado?

RQ2.1: ¿Qué aplicaciones biomecánicas (sistemas, dispositivos, prototipos, componentes, etc) se han implementado en el estudio?

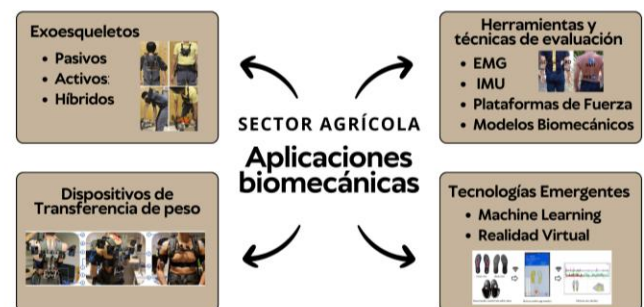


Fig. 9 Aplicaciones biomecánicas en el sector agrícola.

Dentro de las principales aplicaciones de la biomecánica en el sector agrícola, según la Fig. 9, destaca el uso de exoesqueletos pasivos, los cuales utilizan mecanismos mecánicos, como resortes o sistemas de contrapeso, para proporcionar asistencia al movimiento y reducir la carga muscular [10], [13], [15], [19], [20], [32], [36], [50], entre ellos el SuitX ShoulderX, Skelex 360, Levitate AIRFRAME, EksoVest, Laevo, Personal Assist Suit (PAS). Por otro lado, están los exoesqueletos activos como el XoTrunk, que incorporan actuadores electromecánicos para proporcionar una asistencia más potente y adaptable al movimiento [13], [36]. Por último, se mencionan a los exoesqueletos híbridos, los cuales combinan elementos de exoesqueletos pasivos y activos para optimizar la asistencia y el consumo de energía [20].

Así también, se utilizan dispositivos de transferencia de peso, los cuales redirigen la carga de la espalda baja a otras partes del cuerpo, como las piernas o los hombros, para reducir la tensión en la columna lumbar [13], [20].

Además, destacan las herramientas y técnicas de evaluación como la electromiografía (EMG), Unidades de Medición Inercial (IMU), plataforma de fuerza, modelos biomecánicos (softwares de modelado como el OpenSim y Mimics) y tecnologías emergentes como el aprendizaje automático con Machine Learning y la realidad virtual.

RQ2.2: Si varios elementos fueron utilizados/analizados/discutidos en el estudio, ¿cuál fue más preciso/eficaz/etc.?

Se mencionan varios tipos de exoesqueletos, pero no hay suficiente información para determinar cuál es el más preciso o eficaz en general, pues esto depende de factores como el diseño específico, la tarea que se está realizando y las características del usuario, tal es así, que algunos estudios reportan reducciones en la actividad muscular y la carga articular con el uso de exoesqueletos, tanto pasivos como activos [10], [13], [17], [19], [20], [32]. Sin embargo, también se mencionan casos en los que los exoesqueletos pueden aumentar la carga en otras partes del cuerpo o no proporcionar los beneficios esperados [10], [13].

RQ3: ¿Qué niveles de productividad se han obtenido y qué limitaciones se han presentado?

RQ3.1: ¿Qué niveles de productividad (eficiencia, rendimiento, eficacia, etc.) se han obtenido?

Si bien los estudios hablan extensamente sobre la ergonomía y la reducción de la carga física mediante exoesqueletos, la información proporcionada no incluye valores numéricos específicos sobre los niveles de productividad (eficiencia, rendimiento, eficacia) logrados.

Las investigaciones están centradas en la evaluación de la reducción de la actividad muscular y la carga articular, así como en la percepción de comodidad y uso de exoesqueletos, por ejemplo, [32] indica una reducción del 30% en la carga de trabajo percibida por la recolección manual de residuos tras el uso del exoesqueleto Ergo-Vest, luego [33] evidencia una precisión del 85% al usar sensores portátiles, en [36], el exoesqueleto Cex muestra una reducción de la carga de trabajo en un 30%, así también, en [40], un dispositivo de plantilla muestra una precisión del 90% en la clasificación de los niveles de fatiga, por último, el estudio [43] muestra una reducción de la carga en la columna vertebral entre 20 y 30%.

Los estudios [45], [46] muestran una reducción de entre 30 a 40% de la carga en la parte baja de la espalda mediante el uso de exoesqueletos y sistemas de conducción asistida. Al mismo tiempo, en [54], gracias a un dispositivo de escalada, se logró una reducción del 30% en los síntomas de fatiga, así como una reducción del 25% en el dolor musculoesquelético.

RQ3.2: ¿Qué limitaciones se han encontrado?

En la Fig. 10, se presentan las principales limitaciones de la aplicación de sistemas biomecánicos en el sector agrícola.



Fig. 10 Limitaciones encontradas.

Respecto a lo antes mencionado, se acentúa la cantidad reducida de participantes [10], [56], la falta de aleatorización durante las pruebas [10], la inclusión sólo de participantes masculinos [10], [34], la falta de inclusión de diversas edades y características físicas [17], [18], [36], [45], evaluaciones realizadas a nivel de laboratorio [10], [17], [32], [34], [35], [41], limitaciones en los análisis de electromiografía (EMG) [10], [41], modelos biomecánicos [15], [16], [32] y la falta de un enfoque sistemático [13].

Por otro lado, es importante señalar que los estudios no consideran la interacción de los dispositivos biomecánicos con otros elementos [26], la influencia de factores ambientales [17], [32], así como la fatiga muscular a largo plazo [44].

Además, es importante mencionar a la viabilidad económica necesaria para la implementación [50], implicaciones sociales [35], la necesidad de estudios longitudinales [13], [38] y la necesidad de investigar la adaptabilidad de los trabajadores al uso de estos componentes.

RQ4: ¿En qué contextos del sector agrícola se ha investigado, con qué poblaciones, muestras?

RQ4.1: ¿En qué contextos/actividades del sector agrícola (siembra, cosecha, riego, etc.) se ha investigado?

Las investigaciones mencionan a la cosecha como la actividad preponderante del sector agrícola, seguido de la siembra, así como el transporte de productos, más relegadas quedan las actividades de la tala y la escala de árboles respectivamente, de acuerdo con la Fig. 11.



Fig. 11 Actividades del sector agrícola.

RQ4.2: ¿Qué población se ha analizado en el estudio?

De acuerdo con la Fig. 12, los estudios han considerado diferentes grupos poblacionales como son trabajadores de cosecha de palma aceitera [11], [45], trabajadores de cultivo de pimientos [49], trabajadores de arrozales [57], trabajadores de producción de arroz y trigo [31], trabajadores de viveros [50].



Fig. 12 Poblaciones analizadas en el estudio.

Por otro lado, se presentan a pacientes con dolor lumbar crónico [51], pacientes con osteopenia y sarcopenia [33].

Es importante señalar que las fuentes no proporcionan información detallada sobre las características demográficas de los participantes, como el sexo, la edad, la experiencia laboral o las condiciones de salud preexistentes, además se evidencia falta de información sobre el proceso para seleccionar a los participantes.

RQ4.3: ¿Cuál fue el tamaño de la muestra utilizada en la investigación?

Dentro de las investigaciones se presentan muestras que van desde 3 pacientes hasta una cantidad de 1209 participantes, siendo la cantidad de 30, el tamaño de muestra más frecuente, de acuerdo con los datos de la Tabla III.

TABLA III
TAMAÑOS DE MUESTRA

Tamaño de muestra	Artículos
03 pacientes	[58]
13 trabajadores	[17]
15 participantes	[32]
20 participantes	[30], [45]
25 participantes	[46]
30 participantes	[26], [27], [31], [50], [57]
40 participantes	[28]
50 participantes	[29]
55 participantes	[18]
60 agricultores	[55]
100 trabajadores	[49]
120 participantes	[51]
300 trabajadores	[44]
1200 empleados	[42]
1209 participantes	[47]

IV. DISCUSIÓN

De acuerdo con los principales hallazgos obtenidos, en este capítulo se muestra el análisis e interpretación de estos datos, dando respuesta a las preguntas de investigación propuestas en el desarrollo de la RSL.

A. RQ1: Tipos de trastornos musculoesqueléticos que se evidencian en el sector agrícola

En la investigación desarrollada se logró evidenciar que, en el sector agrícola, los trabajadores enfrentan un alto riesgo de desarrollar TME debido a las exigencias físicas de sus actividades. Entre los problemas más comunes se encuentran el dolor lumbar, resultado de posturas prolongadas, levantamiento de cargas pesadas y movimientos repetitivos [10], [18], [30], [41], [45], [47], [49]. También destacan la osteoartritis de cadera y rodilla, que suelen aparecer debido a posiciones forzadas, como agacharse durante largos periodos, especialmente en cultivos como el arroz. Además, condiciones como el síndrome del túnel carpiano y otros dolores en extremidades superiores e inferiores son frecuentes, asociados al uso repetitivo de herramientas y a tareas manuales intensivas. Estas afecciones subrayan la importancia de adoptar medidas ergonómicas para mejorar las condiciones laborales y reducir el impacto en la salud de los agricultores.

B. RQ2: Aplicaciones biomecánicas que se han implementado

En la actualidad se han implementado diversas aplicaciones biomecánicas en el sector agrícola con el objetivo de reducir los riesgos asociados a TME y mejorar las condiciones de trabajo. Estas innovaciones incluyen herramientas y equipos diseñados ergonómicamente, como exoesqueletos híbridos [20], plataformas ajustables y dispositivos mecánicos para minimizar la necesidad de movimientos repetitivos o posturas forzadas [13]. La incorporación de tecnología mecánica y parcialmente automatizada también ha permitido reducir la dependencia de tareas manuales intensivas, como la cosecha y el transporte.

Sin embargo, estas medidas deben complementarse con la capacitación de los trabajadores y la adaptación cultural de las soluciones, asegurando una aceptación efectiva y un impacto significativo en su salud y bienestar.

C. RQ3: Niveles de productividad que se han obtenido y limitaciones presentadas

De acuerdo con las investigaciones actuales, se han establecido beneficios ergonómicos sustanciales como la reducción del 30% en la carga de trabajo percibida por la recolección manual de residuos tras usar el exoesqueleto Ergo-Vest [32], al mismo tiempo, en [54], gracias a un dispositivo de escalada, se logró reducir el 25% en el dolor musculoesquelético, evidenciando que los estudios ponen especial énfasis en la reducción de la actividad muscular y la carga articular, así como en la percepción de comodidad.

Las principales limitaciones en los estudios sobre aplicaciones agrícolas de la biomecánica en la productividad incluyen factores como la falta de compatibilidad tecnológica con los entornos rurales y las capacidades locales, altos costos de adopción para la implementación [50], y una escasa alineación de políticas gubernamentales con las necesidades del sector agrícola en países en desarrollo. Además, el uso de la biomecánica en tareas manuales como la cosecha sigue estando limitado por riesgos musculoesqueléticos y falta de herramientas ergonómicas adecuadas.

D. RQ4: Contextos del sector agrícola, poblaciones y muestras

En la presente revisión sistemática y de acuerdo con las publicaciones analizadas, se pudo evidenciar que en el sector agrícola se han abordado diversos contextos laborales, centrándose en actividades físicamente demandantes, como la cosecha, el cultivo intensivo y el manejo de maquinaria. Estas tareas, realizadas en contextos como plantaciones de arroz en Asia, invernaderos en Europa y cultivos de hortalizas en América Latina, reflejan la diversidad de escenarios analizados [11], [31], [45], [49], [50], [57]. En cuanto a las poblaciones estudiadas, predominan los trabajadores rurales de países en desarrollo, donde las condiciones laborales suelen ser más adversas y la tecnología limitada.

Por ejemplo, se han investigado mujeres agricultoras en India, trabajadores migrantes en plantaciones del sudeste asiático y comunidades agrícolas de África subsahariana. Las muestras suelen ser representativas de grupos específicos, como agricultores involucrados en tareas manuales intensivas o expuestos a riesgos ergonómicos significativos. Sin embargo, la representatividad global es limitada debido al enfoque en poblaciones locales y a las pequeñas escalas de los estudios, lo que subraya la necesidad de investigaciones más amplias que abarquen diferentes contextos y grupos laborales en el sector agrícola.

Es importante señalar que, las condiciones ambientales adversas y los entornos de trabajo desafiantes afectan la eficacia de las soluciones biomecánicas, como exoesqueletos y herramientas ergonómicas. Estos factores aumentan la carga física en los trabajadores, generando dolor, fatiga y otros malestares [50]. Aunque en laboratorio estas tecnologías muestran beneficios [13], en el campo, su efectividad se ve limitada por la variabilidad de tareas, condiciones climáticas y dificultades de implementación [18]. Además, los usuarios reportan incomodidad, calor y restricciones de movimiento [50]. Por ello, se requiere investigación de campo rigurosa que permita adaptar estas soluciones a las condiciones reales del trabajo agrícola, garantizando su funcionalidad, comodidad y aplicabilidad.

La adopción de soluciones biomecánicas depende de su viabilidad económica y aceptación social. Aunque tecnologías como los exoesqueletos ofrecen beneficios en salud y productividad [10], [13], [19], [20], [50], su implementación enfrenta obstáculos como altos costos, necesidad de adaptaciones para entornos exigentes y falta de comodidad y flexibilidad [48], [49]. Además, la diversidad antropométrica de los trabajadores [11] exige diseños inclusivos. Para lograr una adopción sostenible, se requiere investigación de campo, colaboración entre desarrolladores y usuarios, y una valoración de los beneficios a largo plazo que justifiquen la inversión.

En referencia a todo lo expuesto, queda claro que las aplicaciones agrícolas de la biomecánica han demostrado ser un recurso clave para optimizar la productividad en el sector, por lo que implementar estas tecnologías avanzadas ayuda a evaluar y mejorar no sólo las posturas y técnicas de los trabajadores, sino, además, reducir el riesgo de lesiones y aumentar la eficiencia operativa.

V. CONCLUSIONES

La investigación que tuvo como objetivo principal analizar la influencia de la biomecánica, en la productividad de los trabajadores que padecen de TME en el sector agrícola permite concluir que las tecnologías ergonómicas, como los exoesqueletos y dispositivos de monitoreo biomecánico, han logrado reducciones significativas en la carga física, la fatiga y el dolor, mejorando el bienestar laboral. Sin embargo, los estudios se centran en la percepción subjetiva de esfuerzo y reducción de cargas articulares, sin aportar datos concretos sobre incrementos en productividad, eficiencia o rendimiento, limitándose a contextos y poblaciones específicas, lo que restringe la generalización de los hallazgos. Para futuras investigaciones, se recomienda integrar métricas cuantitativas de productividad y evaluar el impacto longitudinal de estas tecnologías en diferentes entornos agrícolas, lo cual permitirá demostrar de manera clara, el valor integral de las aplicaciones biomecánicas tanto en la salud como en el desempeño laboral.

REFERENCIAS

- [1] L. S. Jakobsen, A. Samani, K. Desbrosses, M. De Zee, y P. Madeleine, "In-Field Training of a Passive Back Exoskeleton Changes the Biomechanics of Logistic Workers", *IJSE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, pp. 1-13, 2024, doi: 10.1080/24725838.2024.2359371.
- [2] Y.-K. Kong, J. H. Kim, H.-H. Shim, J.-W. Shim, S.-S. Park, y K.-H. Choi, "Efficacy of passive upper-limb exoskeletons in reducing musculoskeletal load associated with overhead tasks", *Applied Ergonomics*, vol. 109, p. 103965, 2023, doi: 10.1016/j.apergo.2023.103965.
- [3] J. Cock, S. Prager, H. Meinke, y R. Echeverria, "Labour productivity: The forgotten yield gap", *Agricultural Systems*, vol. 201, p. 103452, 2022, doi: 10.1016/j.agry.2022.103452.
- [4] Y. F. Djoumessi, "What innovations impact agricultural productivity in Sub-Saharan Africa?", *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 6, p. 100228, 2021, doi: 10.1016/j.jafr.2021.100228.
- [5] C. G. Bocean, "A Cross-Sectional Analysis of the Relationship between Digital Technology Use and Agricultural Productivity in EU Countries", *Agriculture*, vol. 14, no. 4, p. 519, 2024, doi: 10.3390/agriculture14040519.
- [6] S. A. Peláez-Gómez y L. E. Rodríguez-Cheu, "Biomechanics analysis in coffee harvesting activity in Colombia", *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, no. 3, pp. 167-178, 2021, doi: 10.18273/revuin.v20n3-2021012.
- [7] E. Kaur, P. D. Haghighi, F. M. Cicuttini, y D. M. Urquhart, "Smartphone-Based Ecological Momentary Assessment for Collecting Pain and Function Data for Those with Low Back Pain", *Sensors*, vol. 22, no. 18, p. 7095, 2022, doi: 10.3390/s22187095.
- [8] X. Xiong y P. Manoonpong, "Online adaptive resistance control of an arm exercise exoskeleton", *3rd International Conference on Climbing and Walking Robots and The Support Technologies for Mobile Machines*, pp. 31-38, 2020, doi: 10.13180/clawar.2020.24-26.08.38.
- [9] R. Rozadi y K. Fatin, "The Analysis of Ergonomic Risk Factors Effecting Health Problem on Workers from Harvesting Activity in Oil Palm Plantation", *IOP Conference Series. Earth And Environmental Science*, vol. 757, no. 1, p. 012008, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/757/1/012008.
- [10] H. H. Harith, M. F. Mohd, y S. N. Sowat, "A preliminary investigation on upper limb exoskeleton assistance for simulated agricultural tasks", *Applied Ergonomics*, vol. 95, p. 103455, 2021, doi: 10.1016/j.apergo.2021.103455.
- [11] U. K. Gangopadhyay, G. S. Nadiger, P. R. Surwase, R. Gandhi, "A review on anthropometric studies on Indian women workers: Special reference to textiles and agriculture", *Man-Made Textiles in India*, vol. 48, no. 1, pp. 18-23, 2020, <https://www.researchgate.net/publication/369453087>.
- [12] L. Hao, Z. Zhao, X. Li, M. Liu, H. Yang, y Y. Sun, "A safe human-robot interactive control structure with human arm movement detection for an upper-limb wearable robot used during lifting tasks", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 5, 2020, doi: 10.1177/1729881420937570.
- [13] P. M. Kuber, M. Abdollahi, M. M. Alemi, y E. Rashedi, "A Systematic Review on Evaluation Strategies for Field Assessment of Upper-Body Industrial Exoskeletons: Current Practices and Future Trends", *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 50, no. 10, pp. 1203-1231, 2022, doi: 10.1007/s10439-022-03003-1.
- [14] Z. Hou et al., "Bibliometric and Visualization Analysis of Biomechanical Research on Lumbar Intervertebral Disc", *Journal of Pain Research*, vol. 16, pp. 3441-3462, 2023, doi: 10.2147/JPR.S428991.
- [15] D. D. Molinaro, A. S. King, y A. J. Young, "Biomechanical analysis of common solid waste collection throwing techniques using OpenSim and an EMG-assisted solver", *Journal of Biomechanics*, vol. 104, p. 109704, 2020, doi: 10.1016/j.jbiomech.2020.109704.
- [16] B. M. M. Gaffney et al., "Biomechanical compensations during a stand-to-sit maneuver using transfemoral osseointegrated prostheses: A case series", *Clinical Biomechanics*, vol. 98, p. 105715, 2022, doi: 10.1016/j.clinbiomech.2022.105715.
- [17] L. Benos, C. Kokkoti, T. Tsatalas, E. Karampina, D. Tsaopoulos, y D. Bochtis, "Biomechanical Effects on Lower Extremities in Human-Robot Collaborative Agricultural Tasks", *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, p. 11742, 2021, doi: 10.3390/app112411742.
- [18] N. B. Fethke, M. C. Schall, H. Chen, C. A. Branch, y L. A. Merlino, "Biomechanical factors during common agricultural activities: Results of on-farm exposure assessments using direct measurement methods", *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 17, no. 2-3, pp. 85-96, 2020, doi: 10.1080/15459624.2020.1717502.
- [19] M. Rossini et al., "Design and Evaluation of a Passive Cable-Driven Occupational Shoulder Exoskeleton", *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 3, no. 4, pp. 1020-1031, 2021, doi: 10.1109/TMRB.2021.3110679.
- [20] N. H. Selamat, N. T. Islam, N. M. F. Haniff, y N. A. J. Alimin, "Design and Implementation of Hybrid Exoskeleton for Oil Palm Harvester to Reduce Muscle Strain", *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, vol. 105, no. 1, pp. 1-11, 2023, doi: 10.37934/aram.105.1.111.
- [21] R. Jitsukawa, H. Kobayashi, K. Matsumoto, y T. Hashimoto, "Development and Evaluation of Arm Lifting Assist Devices", *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 35, no. 6, pp. 1675-1683, 2023, doi: 10.20965/jrm.2023.p1675.
- [22] L. Cui, J. Zhou, N. Wang, J. Xiao, Y. Ji, y M. Jiang, "Development of a Portable Chronic Non-specific Low Back Pain Measurement System", *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, vol. 45, no. 5, pp. 473-478, 2021, doi: 10.3969/j.issn.1671-7104.2021.05.001.
- [23] M. Rafiee, M. Razeghi, A. Choobineh, M. Jahangiri, y M. Seif, "Development of an Ergonomic, Portable, Climber-Propelled Date Tree Climbing Device", *Journal of Agromedicine*, vol. 28, no. 3, pp. 497-510, 2022, doi: 10.1080/1059924X.2022.2158150.
- [24] B. Imeah, E. Penz, M. Rana, y C. Trask, "Economic analysis of new workplace technology including productivity and injury: The case of needle-less injection in swine", *PloS One*, vol. 15, no. 6, p. e0233599, 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0233599.
- [25] Q. Wang, Y. Huo, Z. Xu, W. Zhang, Y. Shang, y H. Xu, "Effects of backrest and seat-pan inclination of tractor seat on biomechanical characteristics of lumbar, abdomen, leg and spine", *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 291-304, 2022, doi: 10.1080/10255842.2022.2062229.
- [26] A. Kristanto, M. S. Neubert, M. T. Gross, R. Puntumetakul, D. B. Kaber, y W. Sessomboon, "Effects of corrective insole on leg muscle activation and lower extremity alignment in rice farmers with pronated foot: a preliminary report", *Foot*, vol. 46, p. 101771, 2021, doi: 10.1016/j.foot.2020.101771.
- [27] A. Abd-Elseyed y R. Moghim, "Efficacy of Peripheral Nerve Stimulation with a High Frequency Electromagnetic Coupled (HF-EMC) Powered Implanted Receiver in Treating Different Pain Targets/Neuralgias", *Journal of Pain Research*, vol. 16, pp. 589-596, 2023, doi: 10.2147/JPR.S399532.
- [28] S. A. Borz, E. Iordache, y M. V. Marcu, "Enhancing Working Posture Comparability in Forest Operations by the Use of Similarity Metrics", *Forests*, vol. 12, no. 7, p. 926, 2021, doi: 10.3390/f12070926.
- [29] A. M. Adhaye y D. A. Jolhe, "Ergonomic assessment for designing manual material handling tasks at a food warehouse in India: A case study", *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 33, no. 6, pp. 499-520, 2023, doi: 10.1002/hfm.21004.
- [30] K. S. R. V. Teja, S. Mohan, G. Patel, S. P. Sivapirakasam, y R. M., "Ergonomic Risk Assessment and Fatigue Analysis During Manual Lifting Tasks in Farming Activities", *International Journal of Occupational Safety and Health*, vol. 14, no. 1, pp. 17-29, 2024, doi: 10.3126/ijosh.v14i1.56148.
- [31] P. Joshi et al., "Ergonomics assessment of drudgery in rice-wheat production system in India: a case study of women farmers", *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 8, p. 1346980, 2024, doi: 10.3389/fsufs.2024.1346980.
- [32] M. Ziaei, A. Choobineh, H. Ghaem, y M. Abdoli-Eramaki, "Evaluation of a passive low-back support exoskeleton (Ergo-Vest) for manual waste collection", *Ergonomics*, vol. 64, no. 10, pp. 1255-1270, 2021, doi: 10.1080/00140139.2021.1915502.

- [33] J.-K. Kim, M.-N. Bae, K. Lee, J.-C. Kim, y S. G. Hong, "Explainable Artificial Intelligence and Wearable Sensor-Based Gait Analysis to Identify Patients with Osteopenia and Sarcopenia in Daily Life", *Biosensors*, vol. 12, no. 3, p. 167, 2022, doi: 10.3390/bios12030167.
- [34] N. A. Abdullah *et al.*, "Field measurement of hand forces of palm oil harvesters and evaluating the risk of work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) through biomechanical analysis", *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 96, p. 103468, 2023, doi: 10.1016/j.ergon.2023.103468.
- [35] J. H. Kim y W. Chung, "Forestry professionals' perspectives on exoskeletons (wearable assistive technology) to improve worker safety and health", *International Journal of Forest Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 110-119, 2023, doi: 10.1080/14942119.2023.2256104.
- [36] Y.-K. Kong *et al.*, "Guidelines for Working Heights of the Lower-Limb Exoskeleton (CEX) Based on Ergonomic Evaluations", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 10, p. 5199, 2021, doi: 10.3390/ijerph18105199.
- [37] L. Yang, Z. Zhiqiang, Z. Xiaowei, X. Yujie, X. Jian, C. Lifan, "Hot topics and international frontiers of electromyography in the field of body movements", *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, vol. 26, no. 35, pp. 5707-5715, 2022, doi: 10.12307/2022.1009.
- [38] E. O'hagan *et al.*, "It's safe to move! A protocol for a randomised controlled trial investigating the effect of a video designed to increase people's confidence becoming more active despite back pain", *BMJ Open*, vol. 12, no. 7, p. e063250, 2022, doi: 10.1136/bmjopen-2022-063250.
- [39] J. Webb, H. Allison, y M. Mprah, "Let's Move with Leon - A qualitative evaluation of a UK digital intervention to improve physical activity in people with a musculoskeletal condition", *Public Health*, vol. 227, pp. 32-37, 2024, doi: 10.1016/j.puhe.2023.11.009.
- [40] M. F. Antwi-Afari *et al.*, "Machine learning-based identification and classification of physical fatigue levels: A novel method based on a wearable insole device", *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 93, p. 103404, 2023, doi: 10.1016/j.ergon.2022.103404.
- [41] Y. S. Chan, Y. X. Teo, D. Gouwanda, S. G. Nurzaman, A. A. Gopalai, y S. Thannirmalai, "Musculoskeletal modelling and simulation of oil palm fresh fruit bunch harvesting", *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 8010, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-12088-6.
- [42] M. Bertin, T.-H.-Y. Nguyen, N. Bonvallot, J. Bodin, y Y. Roquelaure, "Occupational co-exposure to biomechanical factors and neurotoxic chemicals in a representative sample of French employees", *Journal of Occupational Health*, vol. 62, no. 1, p. e12090, 2019, doi: 10.1002/1348-9585.12090.
- [43] X. Hongmei, W. Qichao, Z. Wenjie, Y. Hao, Z. Guozhong, "Optimization of tractor seat position parameters based on biomechanical characteristics", *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 38, no. 22, pp. 32-40, 2022, doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.22.004.
- [44] F. Masci *et al.*, "Personal and occupational factors contributing to biomechanical risk of the distal upper limb among dairy workers in the Lombardy region of Italy", *Applied Ergonomics*, vol. 83, p. 102796, 2020, doi: 10.1016/j.apergo.2018.12.013.
- [45] O. Thamsuwan, S. Milosavljevic, D. Srinivasan, y C. Trask, "Potential exoskeleton uses for reducing low back muscular activity during farm tasks", *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 63, no. 11, pp. 1017-1028, 2020, doi: 10.1002/ajim.23180.
- [46] E. Vitale *et al.*, "Precision Agriculture: Assessment of Ergonomic Risks of Assisted Driving System", *Applied Sciences*, vol. 14, no. 9, p. 3738, 2024, doi: 10.3390/app14093738.
- [47] H. J. Lee *et al.*, "Prevalence of Low Back Pain and Associated Risk Factors among Farmers in Jeju", *Safety and Health at Work*, vol. 12, no. 4, pp. 432-438, 2021, doi: 10.1016/j.shaw.2021.06.003.
- [48] A. C. F. Geraldo, A. M. Kuasne, H. U. Kurikic, y R. Marcelino, "Prototype of Wearable Technology Applied to the Monitoring of the Vertebral Column", *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, vol. 16, no. 1, p. 34-50, 2020, doi: 10.3991/ijoe.v16i01.11816.
- [49] M. Gómez-Galán, Á.-J. Callejón-Ferre, M. Díaz-Pérez, Á. Carreño-Ortega, y A. López-Martínez, "Risk of musculoskeletal disorders in pepper cultivation workers", *EXCLI Journal*, vol. 20, pp. 1033-1054, 2021, doi: 10.17179/excli2021-3853.
- [50] R. Villanueva-Gómez, O. Thamsuwan, R. A. Barros-Castro, y L. H. Barrero, "Seasonal Migrant Workers Perceived Working Conditions and Speculative Opinions on Possible Uptake of Exoskeleton with Respect to Tasks and Environment: A Case Study in Plant Nursery", *Sustainability*, vol. 15, no. 17, p. 12839, 2023, doi: 10.3390/su151712839.
- [51] L. M. Garcia *et al.*, "Self-Administered Behavioral Skills-Based At-Home Virtual Reality Therapy for Chronic Low Back Pain: Protocol for a Randomized Controlled Trial", *JMIR Research Protocols*, vol. 10, no. 1, p. e25291, 2021, doi: 10.2196/25291.
- [52] Y. S. Chan, Y. X. Teo, D. Gouwanda, S. G. Nurzaman, y A. A. Gopalai, "Simulation of passive extensor assistive device for agricultural harvesting task", *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, vol. 46, no. 4, pp. 1375-1386, 2023, doi: 10.1007/s13246-023-01305-9.
- [53] E. Kaur, P. D. Haghighi, F. M. Cicuttini, y D. M. Urquhart, "Smartphone-Based Ecological Momentary Assessment for Collecting Pain and Function Data for Those with Low Back Pain", *Sensors*, vol. 22, no. 18, p. 7095, 2022, doi: 10.3390/s22187095.
- [54] H. Abdollah, M. Afshin, y R. Majid, "Strategic analysis of ergonomic and safety problems in mechanization of date palm crown access operation with the sustainable agricultural development approach", *Iran Occupational Health*, vol. 17, no. 1, p. 89, 2020, <https://www.researchgate.net/publication/350631904>.
- [55] M. Nourollahi-Darabad, J. Nosrati, D. Afshari, G.-A. Shirali, y A. Samani, "The Effectiveness of a New Climbing Device on Working Postures, Musculoskeletal Symptoms, and Fatigue in Date Palm Farmers", *Journal of Agromedicine*, vol. 28, no. 3, pp. 511-522, 2022, doi: 10.1080/1059924X.2022.2154297.
- [56] A. Drapeaux y J. Hurdlebrink, "The Effects of Muscle Energy on Low Back Pain: A 3D Analysis of running biomechanics", *International Journal of Kinesiology and Sports Science*, vol. 9, no. 1, p. 51-57, 2021, doi: 10.7575/AIAC.IJKSS.V.9N.1P.51.
- [57] A. Kristanto, R. Nursanti, C. Bariyah, y F. Ma'ruf, "The effects of the muddy surface environment on heart rate and pain perception in the lower extremity during the paddy planting activity", *Engineering and Applied Science Research*, vol. 49, no. 4, pp. 574-580, 2022, doi: 10.14456/easr.2022.55.
- [58] C. Li, F. Xue, y F. Zhou, "The use of three-dimensional model construction of virtual technology in orthopedic treatment", *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 27, no. 4, pp. 1169-1173, 2020, doi: 10.1016/j.sjbs.2020.03.001.
- [59] F. Yang, N. Wang, M. Kang, H. Wang, y M. Wang, "Tractor Cab Ergonomics Optimization Based on the Simplified Model of Upper Limb from the Perspective of Public Health", *Journal of Environmental and Public Health*, vol. 2022, p. 2411301, 2022, doi: 10.1155/2022/2411301.
- [60] C. Lowe, M. Browne, W. Marsh, y D. Morrissey, "Usability Testing of a Digital Assessment Routing Tool for Musculoskeletal Disorders: Iterative, Convergent Mixed Methods Study", *Journal of Medical Internet Research*, vol. 24, no. 8, p. e38352, 2022, doi: 10.2196/38352.
- [61] G. Aksüt, T. Eren, y H. M. Alakaş, "Using wearable technological devices to improve workplace health and safety: An assessment on a sector base with multi-criteria decision-making methods", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, p. 102423, 2024, doi: 10.1016/j.asej.2023.102423.
- [62] A.D. Kadam, A. M. Shende, Pathan M. Gulfam, "Virtual Ergonomics Evaluation of Thresher for Agricultural Women Workers using Digital Human Modeling", *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 11, no. 10s, pp. 340-346, 2023, <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/3257>.