



ANAIS

MODELAGEM DE GÊMEOS DIGITAIS HUMANOS NA AGRICULTURA 5.0: PROPOSTA DE TAXONOMIA BASEADA EM ASPECTOS ERGONÔMICOS E LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

MICHELE BARTH

mibarth@feevale.br

UNIVERSIDADE FEEVALE

BERNARDO DE CERQUEIRA

bernardo.cerqueira@senairs.org.br

UNIVERSIDADE FEEVALE

FLAVIO AVILA

flavio.rocha.avila@gmail.com

UNISINOS

JORGE BARBOSA

jbarbosa@unisinis.br

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)

DÉBORA BARBOSA

deboranice@feevale.br

FEEVALE - UNIVERSIDADE FEEVALE

RESUMO: Na Agricultura 5.0, os Gêmeos Digitais Humanos (GDH) possibilitam o monitoramento em tempo real dos trabalhadores, integrando tecnologia e fatores humanos para promover maior produtividade, saúde, segurança e sustentabilidade no setor agrícola. Este estudo visa propor taxonomias para modelagem de GDH na Agricultura 5.0 com foco na ergonomia e legislação brasileira. A pesquisa adota uma abordagem qualitativa, exploratória e analítica, apoiada por uma revisão teórica de artigos científicos publicados nos últimos 15 anos nas áreas de ergonomia, agricultura e tecnologias digitais, bem como pela análise de normas regulamentadoras e leis brasileiras relevantes. Foram identificados dois perfis de trabalhadores que centram os estudos sobre esta temática: o operador de máquinas e o trabalhador de campo. O operador de máquinas está mais exposto aos impactos das vibrações e do ruído provenientes do maquinário sobre a saúde ocupacional, bem como o risco de fadiga muscular decorrente da execução repetitiva dos comandos operacionais. O trabalhador de campo está exposto aos riscos físicos relacionados à adoção frequente de posturas de flexão do tronco, ao manuseio de cargas e à execução de atividades fisicamente exigentes. A legislação brasileira reforça a necessidade de vigilância contínua das condições de saúde e segurança dos trabalhadores. Assim, a tecnologia poderá ser aliada na identificação precoce de riscos ocupacionais e na prevenção de acidentes de trabalho. Contudo, os GDHs ainda enfrentam desafios relacionados à precisão na coleta de dados, ao processamento das informações e à capacidade de armazenamento dos dados gerados.

PALAVRAS CHAVE: Agricultura 5.0, Gêmeos Digitais Humanos, Ergonomia, Trabalhador, Legislação brasileira.

ABSTRACT: In Agriculture 5.0, Human Digital Twins (HDTs) enable real-time monitoring of workers, integrating technology and human factors to promote greater productivity, health, safety, and sustainability in the agricultural sector. This study aims to propose taxonomies for HDT modeling in Agriculture 5.0, with a focus on ergonomics and Brazilian legislation. The research adopts a qualitative, exploratory, and analytical approach, supported by a theoretical review of scientific articles published over the last 15 years in the fields of ergonomics, agriculture, and digital technologies, as well as by the analysis of relevant Brazilian regulatory standards and legislation. Two worker profiles were identified as central to studies on this topic: machine operators and field workers. Machine operators are more exposed to the occupational health impacts of machinery-induced vibration and noise, as well as to the risk of muscular fatigue resulting from the repetitive execution of operational commands. Field workers, in turn, are exposed to physical risks associated with frequent trunk-flexion postures, manual handling of loads, and the performance of physically demanding tasks. Brazilian legislation reinforces the

need for continuous monitoring of workers' health and safety conditions. In this context, technology can serve as an important ally in the early identification of occupational risks and the prevention of workplace accidents. However, HDTs still face challenges related to data collection accuracy, information processing, and the storage capacity required for the large volumes of data generated.

KEY WORDS: Agriculture 5.0, Human Digital Twins, Ergonomics, Worker, Brazilian legislation.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os maiores produtores agrícolas do mundo e enfrenta continuamente o desafio de ampliar eficiência, produtividade e sustentabilidade. Segundo o Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2019), o agronegócio tem papel central na economia nacional, com destaque para o cultivo de grãos como, por exemplo, a soja, que ocupa mais de 30 milhões de hectares e responde por 104 milhões de toneladas produzidas. Esse avanço produtivo está diretamente associado à incorporação de tecnologias, que têm contribuído para modernizar o setor e aumentar a eficiência das atividades rurais.

Com o advento da Indústria 5.0, consolida-se um novo paradigma produtivo que reposiciona o ser humano no centro da inovação, promovendo tecnologias orientadas ao aprimoramento das capacidades humanas. Nesse contexto, os Gêmeos Digitais Humanos (GDH) emergem como modelos digitais dinâmicos capazes de reproduzir, em tempo real, propriedades físicas e comportamentais dos trabalhadores (Asad et al., 2023). Os GDH expandem a Agricultura de Precisão, permitindo que a tomada de decisão no agronegócio considere simultaneamente eficiência operacional, ergonomia, segurança e desempenho do trabalhador. Embora já existam aplicações de GDH em setores como manufatura e saúde (Tokuda et al., 2020; Naudet, Stahl & Gallais, 2023), sua adoção integrada à capacitação, saúde e segurança do trabalhador rural ainda é incipiente, apesar do potencial para promover bem-estar e desempenho ocupacional no meio agrícola (Garré et al., 2026).

A ergonomia contribui para esse cenário, ao estudar a interação entre pessoas, sistemas e ambientes, visando a melhoria do bem-estar, segurança e desempenho (Moraes & Mont'Alvão, 2010). A integração dos domínios físico, cognitivo e organizacional da ergonomia ao desenvolvimento de GDH pode ampliar a capacidade de antecipar riscos e testar soluções antes da aplicação real. No entanto, a implementação de GDH na agricultura brasileira exige alinhamento à legislação vigente, especialmente à Norma Regulamentadora n. 31, que define diretrizes de segurança e saúde no trabalho rural (Brasil, 2024), além da observância de questões éticas relacionadas à coleta e ao uso de dados sensíveis dos trabalhadores, reconhecidas como um dos principais desafios para o desenvolvimento desses sistemas (Garré et al., 2026). Neste contexto, questiona-se quais são os aspectos relacionados aos fatores humanos e da legislação brasileira para a modelagem de GDH na Agricultura 5.0?

Considerando um sistema digital, torna-se relevante a elaboração de taxonomia, que consiste na estrutura organizada que classifica informações, conceitos ou objetos em uma hierarquia de categorias e subcategorias. Ela funciona como uma árvore de classificações, facilitando a organização, a busca e o entendimento de grandes volumes de dados. Garré et al. (2026) mostram que esses sistemas para GDH dependem da categorização clara de aplicações, desafios e fatores relacionados ao bem-estar, segurança, otimização e adaptação ao trabalhador. Taxonomias bem construídas facilitam a integração de dados heterogêneos, apoiam a padronização necessária para enfrentar desafios como integração de dados e *frameworks*, e melhoram a capacidade dos gêmeos digitais representarem e preverem o comportamento humano em cenários agrícolas complexos. Para tanto, o objetivo central dessa pesquisa é propor taxonomias para modelagem de Gêmeos Humanos Digitais na Agricultura 5.0 com foco nos fatores humanos e legislação brasileira, adentrando nos métodos de avaliação ergonômica do trabalho e sobre as variáveis envolvidos para o desenvolvimento de GDH do trabalhador agrícola.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho é de natureza qualitativa e consiste numa revisão narrativa da literatura, de caráter exploratório e analítico, cujo propósito é oferecer uma análise interpretativa sobre a produção científica relacionada à ergonomia aplicada às tecnologias contemporâneas no contexto agrícola. Esse tipo de revisão caracteriza-se por permitir uma abordagem abrangente e contextual do tema, sem a necessidade de um protocolo sistemático previamente estabelecido.

O referencial desse estudo é composto por: artigos científicos na área de ergonomia, agricultura e tecnologias digitais publicadas nos últimos 15 anos (2011 a março de 2026); além de leis e normas regulamentadoras brasileiras. A busca dos estudos foi realizada entre os meses de dezembro/2025 e abril/2026, nas bases de dados Google Acadêmico, SciELO, Scopus, Web of Science e Wiley. Foram utilizados descritores em inglês ou português, combinando termos como “ergonomics”, “agriculture”, “posture”, “sensor”, “risk assessment”, “human digital twin”, “wearable sensors”, “ergonomics”, “computer vision” e “machine learning”. A busca de normas e legislações ocorreu diretamente em bases oficiais do governo brasileiro.

Salienta-se que a seleção das fontes ocorreu de forma intencional e não probabilística, baseada na relevância teórica, na contribuição para o debate e na aderência ao objetivo do estudo. Após a seleção, procedeu-se à leitura integral dos textos e à análise qualitativa do conteúdo. Os resultados foram agrupados em categorias temáticas definidas a posteriori, permitindo a identificação de tendências, convergências e lacunas no campo investigado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo em vista a complexidade da natureza humana, marcada por variações físicas, cognitivas e emocionais dos trabalhadores, para o desenvolvimento de GDH é imprescindível considerar qual sua função no setor agrícola. Analisando-se artigos científicos que versam sobre GDH e fatores humanos na agricultura foi possível identificar dois perfis de trabalhadores que centram os estudos sobre esta temática: o operador de máquinas e o trabalhador de campo.

O operador de máquinas atua diante de sistemas tecnológicos e de interação humano-máquina, tais como colheitadeiras e tratores (Gao et al. 2021; Aiello et al.; 2022; Hota et al., 2023; Sing et al., 2023; Sing et al., 2024; Almady et al., 2025; Cividino et al. 2025; Hota & Tewari, 2025, Nagarajan & Palanivelu, 2025; Tian & Ji, 2025). Já o trabalhador rural, também chamado trabalhador de campo, é responsável pelas funções de plantio, colheita e manejo de culturas (Rai et al., 2023; Kapse & Thamsuwan, 2024; Naik et al., 2026) e pelo manuseio de materiais e logísticas de armazenagem (Adhaye & Jolhe, 2023; Cividino et al, 2025).

Nessa seção foram apresentadas as taxonomias dos fatores humanos do trabalho do operador de máquinas (Figura 1) e do trabalhador de campo (Figura 2). Os aspectos envolvidos nas atividades desenvolvidas por estes trabalhadores foram subdivididos em categorias de acordo com o campo de abrangência da ergonomia, ferramentas de avaliação ergonômica e tipo de dados a serem coletados, além da legislação e Normas Regulamentadoras (NRs) envolvidas.

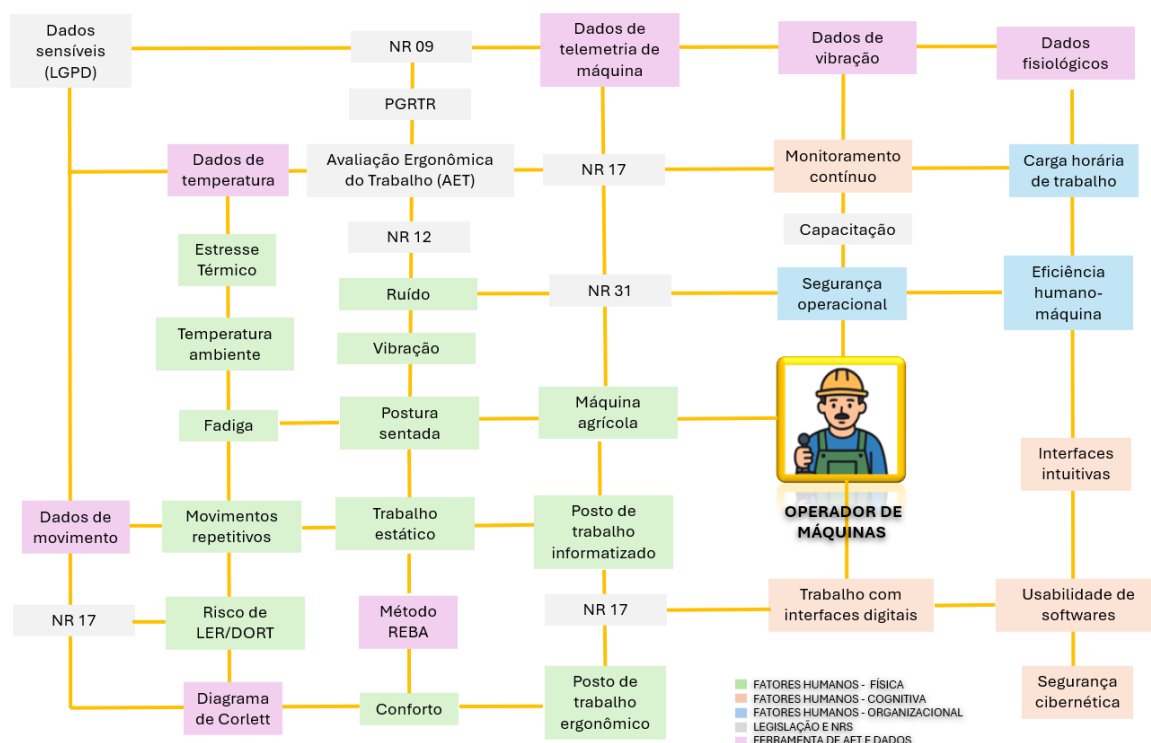
Em verde estão os aspectos relacionados à ergonomia física, ou seja, que possuem relação com a anatomia humana. De acordo com Iida e Guimarães (2016), a ergonomia física abrange questões ligadas à postura no trabalho, manuseio de materiais, movimentos repetitivos, distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho (DORT), projeto de postos de trabalho, projeto de ambiente físico do trabalho, segurança do trabalhador e saúde do trabalhador. No tom alaranjado estão os aspectos relacionados à ergonomia cognitiva, ou seja, referente aos processos mentais envolvidos no trabalho. Esta abrange a interação humano-máquina, percepção de sinais, memória, carga mental, tomada de decisões, alarmes, erros, estresse e treinamento (Iida & Guimarães, 2016). Na cor azul, as questões vinculadas à ergonomia

organizacional (também conhecida como macroergonomia, ou seja, que envolvem os sistemas sócio-técnicos do trabalho. Conforme os autores, a ergonomia organizacional diz respeito às comunicações, projeto de trabalho, programação do trabalho em grupo, projeto participativo, trabalho cooperativo, turno de trabalho, cultura organizacional e gestão de qualidade. Na cor cinza estão as questões que incorrem à legislação e NRs brasileiras. E, por fim, na cor lilás, as ferramentas clássicas comumente utilizadas para fazer a análise ergonômica dessas atividades, bem como, os tipos de dados que podem ser coletados para realizar estas avaliações.

3.1 Operador de máquinas agrícolas

O operador de máquinas agrícolas é o profissional responsável por conduzir, ajustar e manter equipamentos utilizados nas atividades rurais, como tratores, colheitadeiras, pulverizadores e implementos mecanizados. Sua função envolve executar operações de preparo de solo, plantio, colheita e outros processos mecanizados. Além do domínio operacional, deve compreender princípios básicos de manutenção, calibração e uso seguro das máquinas, identificando riscos e adotando práticas que garantam eficiência, proteção à saúde e integridade física no ambiente agrícola.

FIGURA 1. Taxonomia dos fatores humanos no trabalho do operador de máquinas



Fonte: Os autores (2026)

No que diz respeito à ergonomia física, ao passar a maior parte do tempo na atividade de operar máquinas agrícolas, este trabalhador adota a postura sentada, por vezes estática e com movimentos repetitivos ao executar os comandos da máquina. Em longo prazo, sem variação de tarefas, a atividade poderá causar fadiga e risco de lesão por esforço repetitivo (LER) e distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho (DORT). Dentre as operações repetitivas

está o acionamento dos pedais de freio e embreagem, os quais exigem forças de atuação elevadas (até 332 N), resultando em fadiga muscular nos membros inferiores (Hota et al., 2023).

Um agravante para a atividade de operador é a vibração da máquina, podendo causar dor/desconforto especialmente na região da coluna vertebral do trabalhador. As vibrações de baixa frequência (1-20 Hz) geradas pelo motor e pelo terreno irregular induzem ressonância em órgãos internos, podendo causar doenças cardiovasculares, distúrbios neurológicos e degeneração da coluna lombar (Tian & Ji, 2025; Sing et al., 2023). Máquinas agrícolas cuja cabine e sistemas de operação tenham sido ergonomicamente projetados, promovem maior conforto ao trabalhador e minimizam os riscos de agravos à saúde em decorrência do trabalho em longo prazo.

De acordo com o Anexo I da NR 09, se identificados, no Programa de Gerenciamento de Riscos no Trabalho Rural (PGRTR), a exposição ocupacional do trabalhador às vibrações em mãos e braços e às vibrações de corpo inteiro na operação das máquinas e equipamentos, a organização deverá comprovar a adoção de medidas preventivas e corretivas para controle e redução da exposição a vibrações. Os operadores de máquinas agrícolas estão diariamente expostos às vibrações geradas pelos equipamentos que conduzem. De acordo com a NR 09, a exposição às vibrações deve ser medida por meio de sistemas capazes de determinar a aceleração resultante de exposição normalizada (aren), que representa a dose diária recebida pelo trabalhador. Para vibrações de mãos e braços, a NR define um nível de ação de $2,5 \text{ m/s}^2$, indicando o ponto em que medidas preventivas devem ser adotadas, e estabelece um limite máximo de exposição de 5 m/s^2 , acima do qual a saúde do trabalhador pode ser seriamente comprometida. No caso das vibrações de corpo inteiro, como ocorre ao operar tratores, colheitadeiras e outros veículos agrícolas, o nível de ação é um aren de $0,5 \text{ m/s}^2$ ou valor da dose de vibração resultante (VDVR) de $9,1 \text{ m/s}^{1.75}$, enquanto o limite de exposição diária corresponde a um aren de $1,1 \text{ m/s}^2$ ou VDVR de $21,0 \text{ m/s}^{1.75}$. Assim, a norma orienta que a atividade seja monitorada e controlada sempre que os níveis medidos se aproximarem desses valores, garantindo que o operador de máquinas agrícolas trabalhe dentro de condições seguras e evitando danos cumulativos ao sistema musculoesquelético e à saúde como um todo. Dentre as medidas preventivas listadas pela NR 09 e que competem ao produtor rural no âmbito da organização do trabalho, é a redução do tempo e da intensidade de exposição diária à vibração, através da alternância com outras atividades que não apresentem exposição à vibração ou pelo menos, exposição à menores níveis.

Muitos testes revelaram que a exposição diária excede o nível de ação de $0,5 \text{ m/s}^2$. No estudo de Sing et al. (2024) verificou-se que os níveis de vibração aumentam proporcionalmente à velocidade de deslocamento e às rotações do motor. Os autores apontam que níveis extremamente elevados de vibração de corpo inteiro foram registrados em laboratório para mini colheitadeiras autopropelidas em altas rotações, variando de 3,13 e $13,40 \text{ m/s}^2$ em 1200 rpm e chegando até $381,57$ e $457,97 \text{ m/s}^2$ em 2400 rpm. Os autores sugerem o uso de assentos com isoladores (como materiais piezoelétricos) pode reduzir esses níveis em até 50%.

Dentre os fatores de risco físico, ainda é importante mencionar a exposição ao ruído excessivo. De acordo com a NR 17, ambientes internos de trabalho que exigem atenção constante, o nível de ruído de fundo aceitável é de até 65 dB(A). No entanto, pelo estudo de Nagarajan e Palanivelu (2025), foi verificado que o ruído em tratores com cabine variou entre 90,15 e 99,60 dB(A). Já, a exposição diária em tratores sem cabine situou-se entre 120,5 e 124,3 dB(A), superando largamente os limites de segurança, podendo causar perda auditiva, hipertensão e aumento do estresse psicológico. Os autores sugerem o uso de cabines fechadas e o uso de protetores auriculares para atenuar o ruído para níveis abaixo dos limites prejudiciais.

Ademais, a NR 31 exige que os empregadores forneçam treinamento aos operadores sobre os riscos do ruído e as técnicas de operação segura.

A avaliação ergonômica da atividade de operação de máquinas agrícolas pode ser realizada através do método REBA (*Rapid Entire Body Assessment*), o qual objetiva a avaliação de risco postural de corpo inteiro, que analisa posturas forçadas (tronco, pescoço, pernas, braços, punhos), movimentos repetitivos, esforço físico e carga aplicada, gerando uma pontuação que indica o nível de risco para lesões musculoesqueléticas (Laperuta et al., 2018). Além disso, o Diagrama de Corlett é uma ferramenta de avaliação subjetiva e semiquantitativa de avaliação do desconforto postural por meio de um mapa de regiões corporais (Corlett & Manenica, 1980).

Diversas máquinas agrícolas contam com sistemas informatizados visando maior segurança operacional, aumentando a eficiência humano-máquina e, conseqüentemente a produtividade. Em razão deste trabalhador estar em contato com interfaces digitais, adentra também em aspectos da ergonomia cognitiva, que consideram a usabilidade de *softwares*, monitoramento contínuo dos painéis e comandos, interfaces intuitivas e questões de segurança cibernéticas. Especificamente no que se refere à segurança no trabalho em máquinas e equipamentos, cabe às fabricantes estarem em consonância com a NR 12, desenvolvendo componentes que possibilitem a interação clara e precisa com o operador de maneira a reduzir erros de interpretação. A NR 12 apresenta o anexo XI que trata especificamente sobre máquinas e implementos de uso agrícola, porém redireciona para a NR 17 nos aspectos relacionados à ergonomia para o trabalho nestes. Observou-se que a NR 17 inclusive trata sobre a importância do painel de controle e dos comandos sejam de fácil acesso e manejo, além de seguros. Além disso, segundo a referida norma, quando o equipamento apresenta processamento eletrônico de dados com terminais de vídeo, deve permitir que o trabalhador possa ajustá-lo conforme as tarefas a serem executadas, além de permitir o ajuste de tela à iluminação do ambiente para proporcionar visibilidade adequada.

Uma vez que a tecnologia já está presente no posto de trabalho do operador de máquinas agrícolas, torna-se viável a introdução de dispositivos capazes de realizar o monitoramento em tempo real da atividade. Para monitoramento da vibração, poderão ser utilizados acelerômetros triaxiais MEMS no assento e na plataforma, até acelerômetros analisadores de vibração humana (Tian & Ji, 2025). O monitoramento em tempo real da fadiga muscular, de postura e dos sinais vitais poderão ser realizados mediante a eletromiografia de superfície (sEMG), unidades de medição inercial (IMUs), goniômetros, monitores de frequência cardíaca, analisadores metabólicos portáteis e sensores integrados via Bluetooth Low Energy (BLE) (Hota et al., 2023; Hota & Tewari, 2025; Tian & Ji, 2025; Singh et al., 2023; Aiello et al., 2021; Singh et al., 2024; Martins et al., 2025; Almady et al., 2025). Contudo, Gao et al. (2021) observam que a captura dos sinais fisiológicos do operador é afetada por fatores como temperatura ambiente, umidade e as irregularidades da superfície que impactam nos estudos experimentais da vibração na fadiga humana. Para além dos dispositivos fixos ao corpo, podem ser utilizadas tecnologias de monitoramento não-invasivo através da visão computacional para estimar a postura e o risco ergonômico do operador, fazendo uso de câmeras e algoritmos de aprendizado profundo (Naik et al. 2026; Cividino et al., 2025).

Obviamente, há de se considerar o uso de dados sensíveis, o que recai em questões éticas, de privacidade e soberania dos dados, em atenção à Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD), Lei nº 13.709/2018. O trabalhador deverá estar atento às questões éticas da coleta, tratamento e armazenamento dos seus dados de saúde e posturais. Em conformidade com a LGPD, somente poderá ser realizada a coleta e uso dos dados mediante a autorização formal do trabalhador, garantindo total transparência da necessidade e objetivo da obtenção

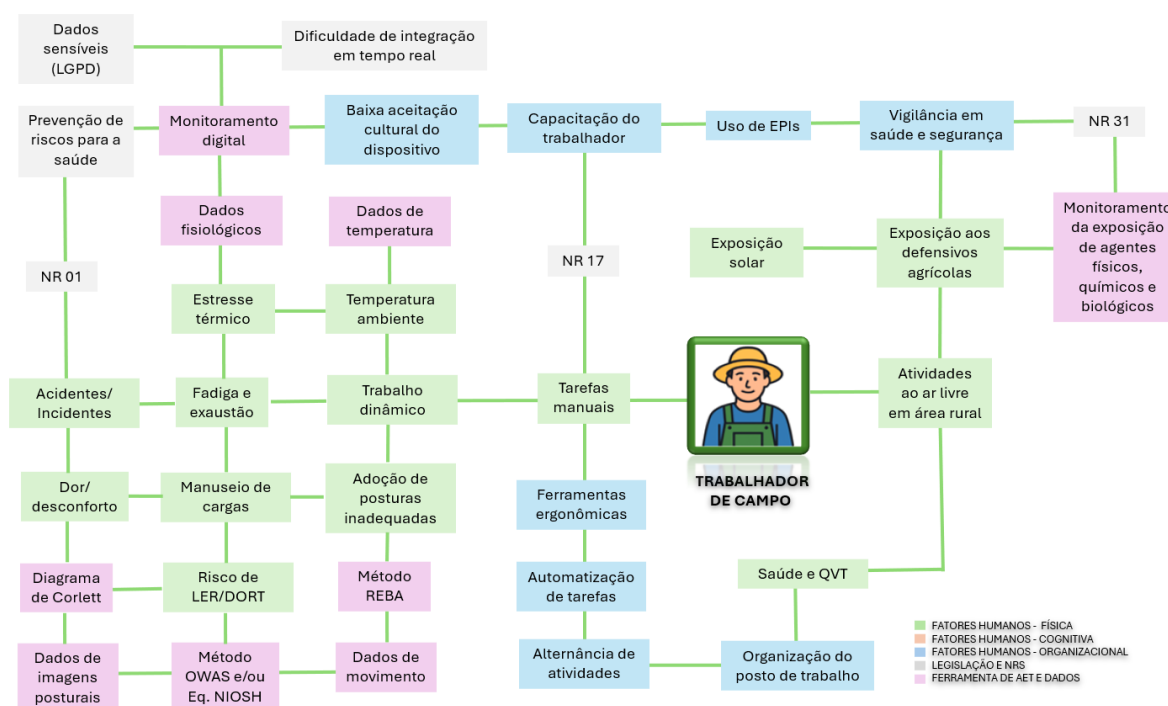
dessas informações, anonimização e segurança contra qualquer incidente com os dados (Brasil, 2018).

Entende-se que a tecnologia em máquinas agrícolas impulsiona e otimiza a produção agrícola. Para isto, o produtor rural requer maior investimento também em capacitação dos trabalhadores para operar estas máquinas agrícolas e o uso dos dispositivos de monitoramento. A NR 31 estabelece que os operadores de máquinas autopropelidas e implementos devem passar por capacitação teórica e prática (mínimo de 24 horas), com pelo menos 12 horas de prática supervisionada no próprio equipamento. O uso de dispositivos vestíveis e IoT podem ser usados para fornecer *feedback* imediato sobre a atividade ao trabalhador, funcionando como uma forma de "treinamento contínuo" durante a execução da tarefa e alerta para riscos ocupacionais (Naik et al., 2026; Cividino et al., 2025). Assim, o emprego dessas tecnologias, aliado à capacitação contínua dos trabalhadores, configura-se como uma importante estratégia para aprimorar o desempenho operacional das atividades agrícolas, ao mesmo tempo em que fortalece a gestão dos riscos ocupacionais e a promoção da saúde e segurança no meio rural.

3.2 Trabalhador de campo

O trabalhador de campo na agricultura é o profissional responsável pela execução direta das atividades operacionais realizadas no ambiente rural, incluindo preparo do solo, plantio, tratos culturais, colheita, manejo de insumos e cuidados com animais ou culturas, dependendo do sistema produtivo. Suas funções exigem esforço físico, atenção aos riscos ambientais e domínio de práticas seguras.

FIGURA 2. Taxonomia dos fatores humanos no trabalho do trabalhador de campo



Fonte: Os autores (2026)

A atividade de campo é a que mais requer da condição física do trabalhador. Em virtude da execução de tarefas, em sua maioria, de forma manual, o trabalho se configura como dinâmico. Este também requer manuseio de cargas e adoção de posturas inadequadas em termos ergonômicos, principalmente com inclinação posterior de tronco (Barth et al., 2016).

De acordo com Adhaye e Jolhe (2023), o manuseio de materiais é comum em muitos locais de trabalho como na agricultura, envolvendo atividades de levantar, abaixar, empurrar, puxar, carregar, segurar ou conter a carga específica. No estudo de Barth et al. (2016) foi verificado que a frequente adoção de posturas que requerem a flexão anterior da coluna vertebral gera desconforto na região da coluna lombar. As autoras ressaltam que essa postura é bastante adotada em função do cultivo dos alimentos no solo. O risco para lesão na coluna lombar aumenta quando essa postura é adotada com tronco torcido e, principalmente, associada ao manuseio de cargas. Cabe destacar que, de acordo com as autoras, mesmo que o trabalho seja dinâmico e que agricultor não manuseie cargas repetidamente, o peso excessivo aliado a uma postura inadequada de levantamento pode ser muito prejudicial à saúde, podendo causar fadiga e exaustão, dor/desconforto e elevar o risco de LER/DORT.

Dependendo da demanda de trabalho, a fadiga e exaustão reduzem o grau de atenção no trabalho, aumentando o risco de acidentes e incidentes. O risco para acidentes é agravado se essa condição estiver aliada à estresse térmico, especialmente de trabalho em altas temperaturas. Riscos físicos decorrentes de posturas inadequadas e manuseio de cargas podem ser reduzidos mediante o fornecimento de ferramentas de trabalho ergonômicas, automatização de tarefas, bem como, pela alternância de atividades ao longo do turno de trabalho (Barth et al., 2016).

As atividades que envolvem o levantamento, o manuseio e o transporte de cargas, exige atenção às recomendações da NR 17 para prevenir danos à saúde e garantir condições seguras de trabalho. Segundo a norma, não se deve exigir que um trabalhador transporte manualmente cargas cujo peso possa comprometer sua integridade física, devendo esse limite ser ainda menor no caso de mulheres e jovens trabalhadores. Além disso, o levantamento e o transporte de cargas devem ser organizados de forma a evitar flexões, rotações e extensões excessivas do tronco, mantendo os objetos próximos ao corpo e em locais acessíveis, com espaço adequado para movimentação, a fim de reduzir o esforço físico e posturas nocivas.

A NR 17 também proíbe o levantamento não eventual de cargas quando o alcance horizontal ultrapassar 60 centímetros, pois essa distância aumenta significativamente o risco de lesões. Nos casos em que a movimentação ocorre por meio de equipamentos como carros de mão ou vagonetes, é necessário considerar fatores como peso, frequência e distância percorrida para que a atividade não gere sobrecarga. Para reduzir os riscos, a norma recomenda medidas como a adoção de tecnologias facilitadoras, a adequação do tamanho e peso das cargas, a limitação da duração e frequência dos movimentos, a redução das distâncias percorridas e a alternância das tarefas com pausas apropriadas. Ademais, todo trabalhador que realiza transporte manual não eventual de cargas deve receber treinamento específico sobre técnicas adequadas de levantamento e deposição, garantindo que a execução dessas atividades ocorra de forma segura e ergonômica.

Em razão de as tarefas serem realizadas, em sua maioria, ao ar livre, o trabalhador de campo está mais suscetível à exposição aos raios ultravioleta (Singh et al., 2024), à exposição aos defensivos agrícolas (Naik et al., 2025) e ao risco de acidentes, tais como quedas (Son et al., 2023). Essas condições requerem do trabalhador maior vigilância em saúde e segurança, que deverá ser garantida pelo gerente da propriedade através de capacitações e fornecimento de EPIs. O gestor do agronegócio responde pelas questões legais especialmente no cumprimento da NR-31 e suas derivações para a NR-01 e NR-17.

Para a análise ergonômica de atividades que envolvem o corpo inteiro e manuseio de cargas, podem ser usados, dentre os métodos clássicos, o REBA, o OWAS e a Equação de NIOSH (Laperuta et al., 2018). Já o Diagrama de Corlett torna-se essencial para identificar a percepção de dor/desconforto do trabalhador (Barth et al., 2016). Para a obtenção de dados digitais de análise das atividades do trabalhador de campo, podem ser usados vestíveis, com sensores de medição inercial – acelerômetros, giroscópios e magnetômetros (Son et al., 2022; Kapse et al., 2024; Cividino et al., 2025) –, sensores de eletromiografia de superfície, sensores de pressão e *feedback*, oxímetros de pulso e termômetros cutâneos (Rai et al., 2023; Cividino et al., 2025; Oztoprak & Ryu, 2025). Além disso, ainda há a possibilidade de usar câmeras de visão computacional com *deep learning* para a análise postural do trabalhador (Kapse et al., 2024; Naik et al., 2026). Cividino et al. (2025) ainda propõe o uso de sensores ambientais para detectar concentração de gases e material particulado, que são capazes de identificar fatores de risco químico no campo, os quais, segundo Sing et al. (2024), quando integrados à Internet das Coisas (IoT), permite a implantação de sistemas de alerta em tempo real para a exposição a produtos químicos perigosos, auxiliando na proteção proativa dos trabalhadores. Cividino et al. (2025) também sugere sistemas de Inteligência Artificial baseados em visão treinados para identificar se os operadores estão utilizando corretamente os Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) durante as fases de preparação e aplicação de produtos fitossanitários e outras atividades de risco.

No entanto, a utilização dessas ferramentas pode apresentar limitações práticas decorrentes da necessidade de instalação de sensores, cabos ou marcadores diretamente no trabalhador, o que pode interferir na execução natural das tarefas, provocar desconforto e influenciar o comportamento do operador durante a atividade (Yang et al., 2024; Agostinelli et al., 2024). Soma-se a isso o elevado custo de implementação, associado tanto aos equipamentos especializados, como sistemas de captura de movimento e sensores avançados, quanto aos *softwares* destinados ao processamento e análise dos dados. Além dos investimentos em infraestrutura tecnológica, esses sistemas demandam profissionais capacitados para sua configuração, posicionamento adequado dos sensores e realização dos procedimentos de calibração necessários antes de cada coleta de dados (Grooten & Johanssons, 2018; Yang et al., 2024). Outro importante desafio, conforme Garré et al. (2026), é a captação de dados digitais em razão da grande variabilidade climática, de terreno e de conectividade, o que afeta diretamente a estabilidade operacional dos GDHs. De acordo com os autores, ao aplicar sensores e sistemas nas lavouras estes ficam expostos à poeira, umidade e intensas vibrações mecânicas, prejudicando a coleta contínua de dados humanos e dificultando a integração em tempo real entre o mundo físico e o digital.

No âmbito da LGPD, informações relacionadas à saúde dos trabalhadores de campo são classificadas como dados pessoais sensíveis, exigindo proteção reforçada e tratamento condicionado a requisitos legais específicos. O tratamento desses dados somente é permitido mediante consentimento explícito do titular para finalidades determinadas, ou, sem consentimento, em situações estritamente necessárias, como o cumprimento de obrigações legais, a realização de estudos por órgãos de pesquisa com anonimização, a tutela da vida ou da integridade física e procedimentos de saúde realizados por profissionais ou serviços autorizados. No contexto da agricultura, onde dados de saúde podem ser coletados para avaliações ergonômicas, gestão de riscos ou acompanhamento de condições laborais, o cumprimento dessas exigências constitui garantia essencial para a proteção dos direitos dos trabalhadores e para a legitimidade dos processos avaliativos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo propor taxonomias para modelagem de GDH na Agricultura 5.0 com foco na ergonomia e legislação brasileira. A partir do referencial teórico selecionado, foram identificados diversos estudos voltados ao monitoramento das atividades de trabalho de operadores de máquinas agrícolas e trabalhadores de campo.

As taxonomias desenvolvidas evidenciam diferenças significativas entre esses grupos de trabalhadores no que se refere aos riscos ergonômicos e aos desafios associados ao monitoramento de suas atividades. No caso dos operadores de máquinas agrícolas, destacam-se os impactos das vibrações e do ruído provenientes do maquinário sobre a saúde ocupacional, bem como o risco de fadiga muscular decorrente da execução repetitiva dos comandos operacionais. Por outro lado, a taxonomia do trabalhador de campo evidencia riscos físicos relacionados à adoção frequente de posturas de flexão do tronco, ao manuseio de cargas e à execução de atividades fisicamente exigentes. Além disso, observa-se maior exposição às condições climáticas e aos defensivos agrícolas, demandando atenção especial à utilização adequada dos equipamentos de proteção individual (EPIs).

Para ambos os perfis de trabalhadores, o monitoramento em tempo real pode ser realizado por meio da integração de sensores e técnicas de aprendizado de máquina, possibilitando a avaliação contínua das atividades e o fornecimento de feedback ao trabalhador. O uso de tecnologias de visão computacional também pode contribuir para o monitoramento postural dos operadores de máquinas agrícolas, especialmente naquelas equipadas com cabines fechadas e sistemas digitais de controle. Entretanto, o monitoramento postural dos trabalhadores de campo por meio de câmeras apresenta limitações decorrentes da dinamicidade das atividades, da ampla área de atuação e da exposição às condições ambientais. Ademais, ressalta-se que as tecnologias de sensoriamento e videomonitoramento em tempo real ainda enfrentam desafios relacionados à precisão na coleta de dados, ao processamento das informações e à capacidade de armazenamento dos dados gerados.

A legislação brasileira vigente reforça a necessidade de vigilância contínua das condições de saúde e segurança dos trabalhadores agrícolas. Nesse contexto, a tecnologia pode atuar como uma importante aliada na identificação precoce de riscos ocupacionais e na prevenção de lesões e acidentes de trabalho. Por fim, destaca-se a importância de que os GDHs sejam desenvolvidos com base em evidências científicas robustas, integrando instrumentos validados de avaliação das atividades laborais e, sobretudo, incorporando a percepção e a participação ativa dos trabalhadores no processo de validação e interpretação dos dados, de modo a garantir maior confiabilidade, aplicabilidade e aceitação dessas tecnologias no ambiente agrícola.

5. FINANCIAMENTO

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto Agro Human DT (CER-AFCCT-2025-10-1-1) suportado pelo Center for Embedded Devices and Research in Digital Agriculture (CEDRA) do SENAI-RS, com recursos financeiros oriundos do PPI IoT/Manufatura 4.0 / PPI HardwareBR do MCTI, através do Termo de Cooperação n.º 056/2023, firmado com a EMBRAPPII.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHAYE, A. M.; JOLHE, D. A. 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**, v. 33, p. 431–544, 2023. <https://doi.org/10.1002/hfm.21004>

AGOSTINELLI, T.; GENEROSI, A.; CECCACCI, S.; MENGONI, M. Validation of computer vision-based ergonomic risk assessment tools for real manufacturing environments. **Scientific Reports**, v. 14, p. 27785, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79373-4>

AIELLO, G.; CATANIA, P.; VALLONE, M.; VENTICINQUE, M. Worker safety in agriculture 4.0: A new approach for mapping operator's vibration risk through Machine Learning activity recognition. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 193, n. 106637, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106637>

ALMADY, S. S.; AL-JANOBI, A. A.; MAREY, S. A.; AL-SAGER, S. M.; ABOUKARIMA, A. M.; GADDAL, Y. H. Establishment of a measuring unit based on Arduino board for recording vibrations on an agricultural tractor during tillage process. **Measurement and Control**, v. 58, n. 9, p. 1147–1157, 2025. <https://doi.org/10.1177/00202940241295569>

ASAD, U.; KHAN, M.; KHALID, A.; LUGHMANI, W. A. Human-Centric Digital Twins in Industry: A Comprehensive Review of Enabling Technologies and Implementation Strategies. **Sensors**, Basel, v. 23, n. 8, p. 3938, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23083938>

BARTH, M.; RENNER, J. S.; MARTINS, R. L.; SILVA, D. R. Q. Agricultura familiar: características ergonômicas das atividades e impactos na saúde dos trabalhadores. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 24, n. 2, p. 471–496, 2016. Disponível em: <https://revistaesa.com/ojs/index.php/esa/article/view/748>

Brasil. (2018). **Lei nº 13.709, de 2018**: Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2014/lei/112965.htmhttps://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/113709.htm

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. **Norma Regulamentadora nº 01**: disposições gerais e gerenciamento de riscos ocupacionais (Portaria MTP nº 6.730, de 9 de março de 2021). Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-01-atualizada-2025-i-1.pdf>

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. **Norma Regulamentadora nº 09**: avaliação e controle das exposições ocupacionais a agentes físicos, químicos e biológicos (Portaria MTP nº 426, de 7 de outubro de 2021). Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-09-atualizada-2021.pdf>

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 12**: segurança no trabalho em máquinas e equipamentos. (Portaria MTP nº 4.219, de 20 de dezembro de 2022). Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-12-atualizada-2022-1.pdf>

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 17**: ergonomia (Portaria MTP nº 423, de 7 de outubro de 2021). Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-17-atualizada-2021-1.pdf>

[social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-17-atualizada-2022.pdf](https://social.conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-17-atualizada-2022.pdf)

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 31:** segurança e saúde no trabalho na agricultura, pecuária, silvicultura, exploração florestal e aquicultura (Portaria MTP nº 22.677, de 22 de outubro de 2020). Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-31-atualizada-2024-1.pdf>

CIVIDINO, S. R. S.; CAPPELLI, A.; BELLUCO, P.; RINALDI, F.; AVRAMOVIC, L.; ZANINELLI, M. Preliminary Study of Vision-Based Artificial Intelligence Application to Evaluate Occupational Risks in Viticulture. **Sensors**, v. 25, n. 6749, 2025. <https://doi.org/10.3390/s25216749>

CORLETT, E. N.; MANENICA, I. The effects and measurement of working postures. **Applied Ergonomics**, v.11, n.1, p.7-16, 1980.

GAO, R.; YAN, H.; YANG, Z. Evaluation of tractor driving vibration fatigue based on multiple physiological parameters. **PLoS ONE**, v. 16, n. 7, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254636>

GARRÉ, S. O.; FRANÇA, R. T. F.; LARA, E. L.; AVILA, F. R.; BARBOSA, J. L. V. Human digital twins for agriculture 5.0: a systematic literature review and taxonomy. **Smart Agricultural Technology**, v. 13, p. 101791, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.101791>

GROOTEN, W. J. A.; JOHANSSONS, E. Observational methods for assessing ergonomic risks for work-related musculoskeletal disorders: a scoping review. **Revista Ciencias de la Salud**, v. 16, n. especial, p. 8–38, 2018. <http://dx.doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/revsalud/a.6840>

HOTA, S.; TEWARI, V. K.; CHANDEL A. K. Workload Assessment of Tractor Operations with Ergonomic Transducers and Machine Learning Techniques. **Sensors**, v. 23, n. 1408, p. 1-20, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23031408>

HOTA, S.; TEWARI, V. K. A Machine Learning–Based Ergonomic Assessment of Wireless Hand Control System for Lower-Limb Disabled Tractor Operators and Able-bodied Female Agricultural Workers. **Journal of Field Robotics**, v. 42, p.1344–1360, 2025. <https://doi.org/10.1002/rob.22458>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 2017:** resultados definitivos. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3096/agro_2017_resultados_definitivos.pdf

IIDA, I.; GUIMARÃES, L. B. M. **Ergonomia:** projeto e produção. São Paulo: Blucher, 2016.

KAPSE, S.; WU, R.; THAMSUWAN, O. Addressing ergonomic challenges in agriculture through AI-enabled posture classification. **Applied Sciences**, v. 14, n. 2, p. 525, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14020525>

LAPERUTA, D. G. P.; OLIVEIRA, G. A.; PESSA, S. L. R.; LUZ, R. P. Revisão de ferramentas para avaliação ergonômica. **Revista Produção Online**, v. 18, n. 2, p. 665–690, 2018. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v18i2.2925>

MARTINS, D.R.; CERQUEIRA, S.M.; POMBEIRO, A.; DA SILVA, A.F.; ROCHA, A.M.A.C.; SANTOS, C.P. ErgoReport: A Holistic Posture Assessment Framework Based on Inertial Data and Deep Learning. **Sensors**, v. 25, n. 2282, 2025.

<https://doi.org/10.3390/s25072282>

MORAES, A.; MONT'ALVÃO, C. **Ergonomia: conceitos e aplicações**. 4. ed. Teresópolis: 2AB, 2010.

NAGARAJAN, S. R.; PALANIVELU, S. Investigation and quantification of perception of human body vibration and noise exposure during operator-tractor-field interaction.

Results in Engineering, v. 28, n. 107339, 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107339>

NAIK, M.A., KUMAR, A., KUSHWAHA, D.K., KUSHWAHA, H.L., GUPTA, S., RAMASUBRAMANIAN, V., SINGH, A.K. AND HASAN, M. Development of a Telerobotic Target-Specific Pesticide Applicator: An Intervention for Enhanced Safety and Efficiency. **Journal of Field Robotics**, v. 42, p. 2469-2491, 2025.

<https://doi.org/10.1002/rob.22524>

NAIK, V. S.; KHURA, T. K.; PARRAY, R. A.; SAHOO, P. K.; KUMAR, A.; KUMAR, D.; HAQUE, M. A.; RACHAMALLA, N. Markerless 3D biomechanical analysis of manual rice transplanting using YOLO11 and depth anything V2. **Results in Engineering**, v. 29, n. 109329, 2026.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109329>

NAUDET, Y.; STAHL, C.; GALLAIS, M. Preliminary systemic model of (human) digital twin. In: **Proceedings of the 16th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments (PETRA '23)**. New York: ACM, 2023. p. 562–567.

<https://doi.org/10.1145/3594806.3596596>

OZTOPRAK, O.; RYU, J.-C. Development of a Mobile Health Monitoring and Alert Application for Agricultural Workers. **Appl. Syst. Innov.**, v. 8, n. 133, 2025.

<https://doi.org/10.3390/asi8050133>

RAI, L.; SKINNER, B. D.; ARIAS-MONGE, E.; JAKOBSSON, K.; WESSELING, C.; WEISS, I.; POVEDA, S.; CERDA-GRANADOS, F. I., GLASER, J.; HANSSON, E.; WEGMAN, D. H. Targeting workload to ameliorate risk of heat stress in industrial sugarcane workers. **Scand J Work Environ Health**, v. 49, n. 1, p. 43-52, 2023.

<https://doi.org/10.5271/sjweh.4057>

SINGH, A.; NAWAYSEH, N.; SAMUEL, S.; DHABI, Y. K.; SINGH, H. Real-time vibration monitoring and analysis of agricultural tractor drivers using an IoT-based system. **J Field Robotics**, v. 40, p.1723–1738, 2023.

<https://doi.org/10.1002/rob.22206>

SINGH, A. A.; NAWAYSEH, N.; DHABI, Y. K.; SAMUEL, S.; SINGH, H. Transforming farming with intelligence: Smart vibration monitoring and alert system. **Journal of Engineering Research**, v. 12, p.190–199, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.08.025>

SON, H.; LIM, J. W.; PARK, S.; PARK, B.; HAN, J.; KIM, H. B.; LEE, M. C.; JANG, K.; KIM, G.; CHUNG, J. H. A Machine Learning Approach for the Classification of Falls and Activities of Daily Living in Agricultural Workers. **IEEE Access**, v. 10, p. 77418-77431, 2022.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3190618>

TIAN, H.; JI, A. Real-Time Adaptive Tractor Ride Comfort Adjustment System Based on Machine Learning Method. **IEEE Access**, v. 13, p. 3274-3284, 2025.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3522959>

TOKUDA, Y.; NAKATANI, S.; SAIKI, S.; NAKAMURA, M.; YASUDA, K. Extracting and evaluating personal interests with a dialogue agent. In: DUFFY, V. G. (ed.). Digital human modeling and applications in health, safety, ergonomics and risk management: posture, motion and health. **Cham: Springer**, 2020. p. 592–608.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-49904-4_44

YANG, Z.; SONG, D.; NING, J.; WU, Z. A systematic review: advancing ergonomic posture risk assessment through the integration of computer vision and machine learning techniques. **IEEE Access**, v. 12, p. 180481–180519, 2024.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3509447>