

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
CURSO DE ADMINISTRAÇÃO

**INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MACHINE LEARNING NA OTIMIZAÇÃO DA
GESTÃO DA AGRICULTURA 4.0: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA
LITERATURA**

ERIK MANOEL DEMÉZIO DA SILVA

CHAPADÃO DO SUL - MS

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
CURSO DE ADMINISTRAÇÃO

**INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MACHINE LEARNING NA OTIMIZAÇÃO DA
GESTÃO DA AGRICULTURA 4.0: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA
LITERATURA**

ERIK MANOEL DEMÉZIO DA SILVA

Trabalho apresentado como pré-requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Administração, pelo Curso de Graduação em Administração da UFMS.

Orientador: Prof. Dr. Wallace da Silva de Almeida

CHAPADÃO DO SUL - MS

2025

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu guia em todos os momentos, pela força quando as dificuldades pareciam maiores que meus passos e por me lembrar que os sonhos se alcançam com perseverança e fé. À minha companheira Kelly, pelo apoio incondicional, pela paciência nas longas horas de dedicação a esta pesquisa e por ser meu porto seguro nos dias mais cansativos. Ao meu pai, Francisco Manoel da Silva, por ter me ajudado a dar o primeiro passo, apoiando-me desde o vestibular até aqui, sempre acreditando em meu potencial. À minha mãe, Maria José Demézio, pelo incentivo que nunca faltou e pelas palavras que me mantiveram firme, mesmo quando o caminho parecia incerto. Ao meu orientador, Prof. Dr. Wallace da Silva de Almeida, por aceitar me guiar neste trabalho, pela paciência, confiança e ensinamentos que levaram este projeto adiante. Sua contribuição foi essencial não apenas para esta pesquisa, mas para toda a minha formação em Administração. Aos professores que tive ao longo da graduação, pelos conhecimentos compartilhados, pela paixão pelo ensino e pelas lições que ultrapassam as salas de aula. Se hoje chego até aqui, é porque cada um deles deixou uma marca em minha trajetória acadêmica e pessoal. Aos colegas de curso, pelas risadas, parcerias e apoio mútuo durante essa jornada, e a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este momento se tornasse realidade. Minha gratidão eterna a cada pessoa que fez parte desta conquista.

DEMÉZIO DA SILVA, Erik Manoel. **INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MACHINE LEARNING NA OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO DA AGRICULTURA 4.0: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**. TCC (Graduação em Administração) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2025.

Resumo: O agronegócio brasileiro, setor responsável por 23,2% do PIB nacional em 2024, enfrenta o desafio de aumentar a produção de alimentos de forma sustentável frente ao crescimento populacional e à demanda global, prevista pela ONU para exigir 70% mais produção até 2050. Nessa conjuntura, a Agricultura 4.0, sustentada por tecnologias digitais como Inteligência Artificial (IA) e *Machine Learning* (ML), surge como estratégia para otimizar a gestão agrícola, integrando ambientes físico e digital, monitorando cultivos, clima e solo em tempo real e apoiando decisões estratégicas. O objetivo geral desta pesquisa é avaliar como as ferramentas de IA e ML transformam os processos de gestão na Agricultura 4.0, criando valor em eficiência operacional, decisão estratégica e sustentabilidade. O presente estudo, caracterizado pela natureza qualitativa, exploratória e bibliográfica, fundamentou-se em revisão sistemática da literatura (RSL). A questão norteadora foi: Como as soluções de IA e ML transformam processos de gestão na Agricultura 4.0, criando valor em eficiência operacional, decisão estratégica e sustentabilidade? Para responder à questão, definiu-se a *string* (“*Artificial Intelligence (AI)*” OR “*Machine Learning (ML)*”) AND (“*Agriculture 4.0*” OR “*Smart Agriculture*”), aplicada nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science* (WoS), em julho de 2025, limitada a “artigos” e “artigos de revisão”, no idioma inglês, de acesso aberto e publicados entre 2020-2025. Após filtros e critérios de inclusão e exclusão, de 649 registros na *Scopus* e 260 na WoS, chegou-se a 13 estudos considerados suficientes para a RSL. Os resultados apontam que IA e ML, integradas a tecnologias digitais correlatas, possibilitam monitorar e controlar em tempo real variáveis como clima, solo, lavouras e pecuária, prever safras, facilitar consultoria, automatizar irrigação, pulverização inteligente e colheita, otimizar o uso de recursos e melhorar a rastreabilidade. Benefícios comuns identificados na literatura incluem: aumento de produtividade, redução de custos operacionais, uso eficiente de insumos, minimização do impacto ambiental, melhoria na qualidade dos produtos e apoio à tomada de decisão estratégica, baseada em dados. Contudo, existem desafios substanciais, como custos iniciais elevados, necessidade de infraestrutura digital adequada, ausência de mão de obra qualificada, falta de conectividade no campo, dificuldades de integração tecnológica e resistência à adoção. Os achados reforçam que IA e ML, aplicadas de forma integrada e estratégica, têm potencial para redefinir a agricultura e promover uma gestão mais eficiente, sustentável e competitiva, desde que acompanhadas por investimentos em capacitação, infraestrutura e governança de dados.

Palavras-chave: Inteligência Artificial (IA), Machine Learning (ML), Agricultura 4.0, Gestão Agrícola, Transformação Digital, Sustentabilidade.

DEMÉZIO DA SILVA, Erik Manoel. **ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING IN THE OPTIMIZATION OF AGRICULTURE 4.0 MANAGEMENT: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW**. TCC (Undergraduate Course in Administration) – Federal University of Mato Grosso do Sul, 2025.

Abstract: The Brazilian agribusiness sector, responsible for 23.2% of the national GDP in 2024, faces the challenge of increasing food production sustainably in light of population growth and global demand, with UN projections indicating a 70% rise in production needs by 2050. In this context, Agriculture 4.0, supported by digital technologies such as Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML), emerges as a strategy to optimize agricultural management by integrating physical and digital environments, monitoring crops, climate, and soil in real time, and supporting strategic decisions. The general objective of this research is to evaluate how AI and ML tools transform management processes in Agriculture 4.0, creating value in operational efficiency, strategic decision-making, and sustainability. This study, characterized as qualitative, exploratory, and bibliographic, was based on a systematic literature review (SLR). The guiding question was: How do AI and ML solutions transform management processes in Agriculture 4.0, creating value in operational efficiency, strategic decision-making, and sustainability? To address this question, the following search string was defined: (“Artificial Intelligence (AI)” OR “Machine Learning (ML)”) AND (“Agriculture 4.0” OR “Smart Agriculture”), applied to the Scopus and Web of Science (WoS) databases in July 2025, restricted to “articles” and “review articles,” in English, open access, and published between 2020–2025. After applying filters and inclusion and exclusion criteria, from 649 records in Scopus and 260 in WoS, a total of 13 studies were considered sufficient for the SLR. The results indicate that AI and ML, integrated with related digital technologies, enable real-time monitoring and control of variables such as climate, soil, crops, and livestock, as well as yield prediction, consultancy support, automation of irrigation, smart spraying, and harvesting, optimization of resource use, and improved traceability. Common benefits identified in the literature include increased productivity, reduced operational costs, efficient use of inputs, minimization of environmental impact, improved product quality, and support for data-driven strategic decision-making. However, substantial challenges remain, including high initial costs, the need for adequate digital infrastructure, shortage of skilled labor, lack of field connectivity, technological integration difficulties, and resistance to adoption. The findings reinforce that AI and ML, when applied in an integrated and strategic manner, hold the potential to redefine agriculture and promote more efficient, sustainable, and competitive management, provided they are accompanied by investments in training, infrastructure, and data governance.

Keywords: Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), Agriculture 4.0, Agricultural Management, Digital Transformation, Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é reconhecido no cenário global por sua forte atuação no agronegócio, impulsionado por fatores naturais como solo fértil, diversidade climática e abundância hídrica. Esse setor desempenha papel estratégico na economia nacional, promovendo a integração de cadeias produtivas, a geração de empregos e uma contribuição expressiva ao Produto Interno Bruto (PIB) do país (FGV, 2019). O agronegócio representou 23,2% do PIB brasileiro em 2024, evidenciando sua relevância para o crescimento econômico nacional (CEPEA, 2025).

Projeções da Organização das Nações Unidas (ONU) indicam que a população mundial deverá chegar a 9 bilhões de habitantes em 2037 e ultrapassar 9,5 bilhões em 2050, exigindo aumento de aproximadamente 70% na produção global de alimentos (ONU, 2025; SAATH; FACHINELLO, 2018). Nas últimas duas décadas, o Brasil duplicou sua safra de grãos sem expandir significativamente a área cultivada, resultado da incorporação de tecnologias que elevaram substancialmente a eficiência produtiva (PEREIRA; DUTRA, 2022).

Ante as crescentes demandas por eficiência operacional, inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental no cenário global, a transformação do setor torna-se indeclinável para manter o diferencial competitivo do agronegócio brasileiro. Como destaca Pavinato (2025), tecnologias emergentes, como drones e sistemas autônomos, possibilitam maximizar ganhos, o que torna a agricultura mais precisa e, por consequência, mais produtiva.

Contudo, produtividade não basta em um contexto em que a adoção de práticas sustentáveis, alinhadas às diretrizes ESG (*Environmental, Social and Governance*), torna-se cada vez mais um requisito estratégico fundamental para a expansão da capacidade de competição nos mercados globais. À luz dessa tendência, a inovação digital faz-se necessária para sustentar a competitividade e a sustentabilidade do agronegócio nacional em toda a cadeia de valor.

Não obstante os avanços obtidos, persistem barreiras que limitam a expansão da produção e das exportações, entre as quais se destacam obstáculos tecnológicos (CNA, 2024). Assim, as tecnologias habilitadoras da chamada “Agricultura 4.0”, em especial a Inteligência Artificial (IA) e *Machine Learning* (ML), assumem papel estratégico na modernização das práticas agrícolas. Ao integrar os ambientes físico e digital, tais ferramentas permitem monitoramento em tempo real de cultivos, clima e solo, aprimorando a tomada de decisão e

viabilizando sistemas de irrigação e pulverização inteligentes (DIAS *et al.*, 2023). A IA, concebida para replicar processos cognitivos humanos, pode aliar técnicas de ML e automação de alta precisão para resolver problemas complexos (RUSSELL; NORVIG, 2013).

Kaufman (2022) argumenta que a lógica da IA tende a tornar-se predominante na criação de valor econômico, sobretudo no setor do agronegócio. Ao potencializar capacidades humanas de raciocínio e decisão, máquinas baseadas em IA podem impulsionar a obtenção de ganhos de eficiência (GABRIEL FILHO, 2023).

Diante desse horizonte de inovação tecnológica e da necessidade de soluções eficientes e eficazes no campo, o presente estudo parte do seguinte questionamento: Como as soluções de Inteligência Artificial (IA) e *Machine Learning* (ML) transformam processos de gestão na Agricultura 4.0, criando valor em eficiência operacional, decisão estratégica e sustentabilidade? A partir do questionamento realizado, o objetivo geral desta pesquisa é avaliar como as ferramentas de IA e ML transformam os processos de gestão na Agricultura 4.0.

A fim de viabilizar o alcance do objetivo geral proposto, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- i. Apresentar o impacto da IA e ML no contexto da Agricultura 4.0;
- ii. Sintetizar, através de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), os benefícios reportados das tecnologias digitais quanto ao aumento de produtividade, otimização de recursos, aprimoramento da tomada de decisão e oportunizar mitigação de impactos ambientais, entre outras, no setor agrícola;
- iii. Discutir barreiras de adoção e recomendações estratégicas para a gestão agrícola.

A estrutura deste artigo, além desta introdução, compreende outras quatro seções. Na seção a seguir, são revisitados os conceitos de IA, ML e Agricultura 4.0; a terceira seção busca apresentar o protocolo metodológico da Revisão Sistemática da Literatura (RSL); a quarta seção, expõe os resultados obtidos por meio do procedimento metodológico adotado; por fim, apresenta-se as considerações finais do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

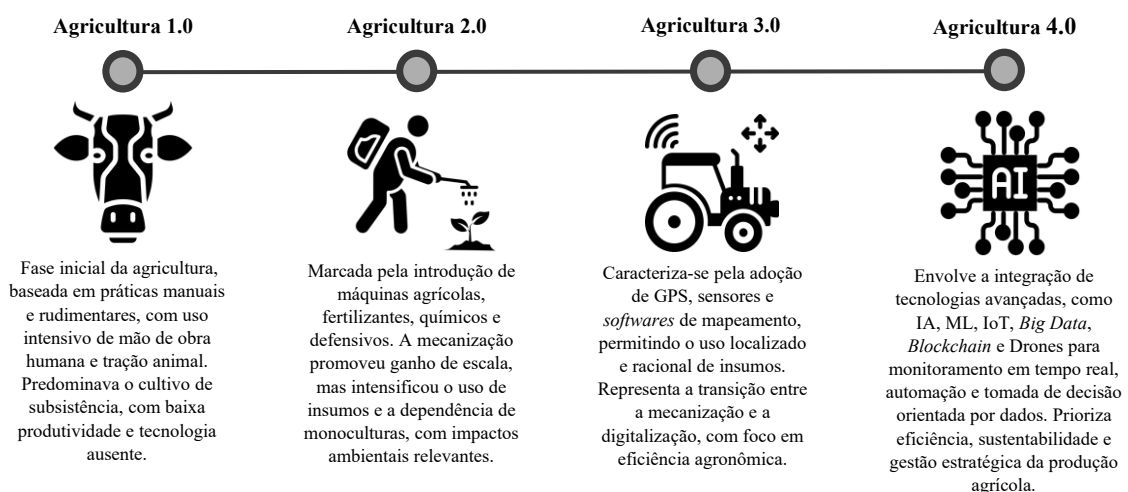
2.1 AGRICULTURA 4.0: CONCEITOS, EVOLUÇÃO E PERSPECTIVAS

Historicamente, a agricultura evoluiu de práticas manuais intensivas (Agricultura 1.0) para sistemas altamente tecnológicos, impulsionada pelo crescimento populacional e pela limitação territorial. Após a mecanização e a introdução dos agroquímicos na Agricultura 2.0, surgiu a Agricultura 3.0, comumente chamada “Agricultura de Precisão” (MANSOOR *et al.*, 2025), utilizando tecnologias como *Global Positioning System* (GPS) para otimizar recursos agrícolas (ATES; SAHIN, 2021).

Nas últimas décadas, emergiu a chamada Agricultura Inteligente, também conhecida como Agricultura 4.0, marcada pela integração digital das operações agrícolas por meio de tecnologias como *Internet das Coisas* (IoT), Computação em Nuvem (CC), *Big Data* (BD), *Blockchain*, Inteligência Artificial (IA), *Machine Learning* (ML), Sensores Remotos (SR), Robótica Agrícola, entre outras.

Esse novo paradigma conecta máquinas, pessoas e dados, transformando a gestão das atividades rurais, ampliando eficiência, conectividade e capacidade analítica no campo, além de responder à crescente demanda por alimentos de forma sustentável, elevando a produtividade e reduzindo impactos ambientais (BORBA *et al.*, 2022; GYAMFI *et al.*, 2024; ALBIERO *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2023). A figura 1 apresenta as inovações que marcaram cada estágio dessa evolução agrícola.

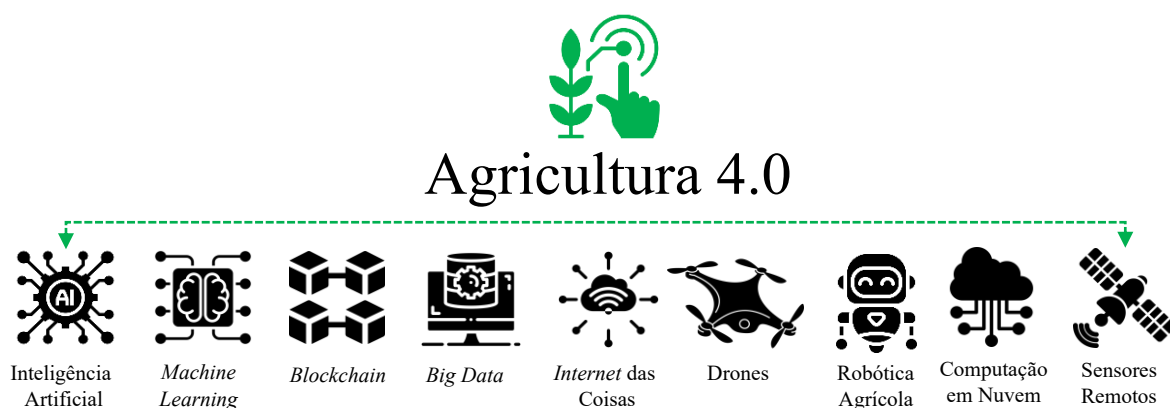
Figura 1 – Evolução da Agricultura 1.0 à 4.0



Fonte: Adaptado a partir de Montenegro e Dolce (2024).

Conforme Sponchioni *et al.*, (2019), a Agricultura 4.0 aprofunda e amplia a lógica da Agricultura de Precisão ao ir além, integrando dados de toda a operação agrícola e da cadeia de suprimentos para decisões mais eficientes, elevando a produtividade, rentabilidade e sustentabilidade. Maffezzoli *et al.*, (2022) salientam que a evolução da Agricultura 3.0 para a Agricultura 4.0 envolve substituir rotinas tradicionais por plataformas digitais, que capturam e processam dados de sensores e máquinas de forma automatizada, colocando a informação como fator central na cadeia produtiva e viabilizando, simultaneamente, a minimização de custos, ganhos de eficiência e menor impacto ambiental. A figura 2 apresenta uma síntese com algumas das tecnologias digitais utilizadas para otimizar a gestão e a produção agrícola no contexto da Agricultura 4.0.

Figura 2 – Técnicas e Ferramentas Tecnológicas da Agricultura 4.0



Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicações práticas dessas tecnologias incluem sensores inteligentes para monitoramento ambiental e manejo preciso dos recursos, robótica agrícola – que automatiza atividades de campo – e iniciativas que favoreçam o ambiente de inovação vinculado ao setor de agronegócio. Exemplo de ações inovadoras são: a criação do Vale *Agtech*, em Piracicaba - SP, onde bolsas e editais (FAPESP, CAPES, CNPq; PIPE-FAPESP, FINEP, EMBRAPAII) financiam P&D; parcerias entre universidades (ESALQ/USP, UNICAMP), institutos de pesquisa (IAC, IPECEGE) e multinacionais (por exemplo, *Corteva Agriscience*), que aceleram o processo de geração de *spillovers* tecnológicos por meio da criação e transferência de conhecimento técnico e tecnológico; e *hubs* de incubação, como o *AgTech Garage* que reúne *startups* que operam em *coworkings* e incubadoras, tornando o local um reconhecido centro brasileiro de inovação tecnológica do agronegócio (ALCANTARA *et al.*, 2021).

A crescente demanda alimentar, impulsionada pelo aumento populacional, reforça a importância estratégica da agricultura. Nesse contexto, a agricultura inteligente ou 4.0 surge como alternativa promissora ao integrar tecnologias digitais, que permitem o monitoramento preciso das lavouras e a gestão eficiente dos processos produtivos. A incorporação de sistemas tecnológicos ao longo da cadeia agroindustrial amplia a produtividade, reduz incertezas e promove ganhos de eficiência, superando as limitações das práticas produtivas convencionais (HASSAN *et al.*, 2021).

A despeito dos benefícios projetados, a adoção da Agricultura 4.0 ainda esbarra em custos iniciais de implantação elevados, exigência de infraestrutura digital avançada, escassez de profissionais capacitados e resistência às mudanças tecnológicas, fatores estes decisivos para que a incorporação dessas inovações seja efetiva e sustentável no campo (BERTOGLIO; SEHNEM, 2024; SILVA *et al.*, 2023).

Ainda sobre obstáculos associados a adoção das tecnologias digitais, Sordi e Vaz (2021) identificam cinco entraves perceptíveis tanto no Brasil quanto em outros países, a saber: *i*) falta de conectividade estável e de boa qualidade nas redes de comunicação; *ii*) carência de capacitação técnica para produtores e consultores; *iii*) receio no compartilhamento de dados e informações sobre como riscos e benefícios serão divididos; *iv*) dificuldade de integração entre diferentes soluções tecnológicas; e *v*) restrições de capital e crédito que pesam principalmente sobre os pequenos e médios agricultores. Superar essas dificuldades é uma condição imprescindível para que as tecnologias supracitadas cumpram seu potencial no avanço da Agricultura 4.0 no Brasil.

Gorni Neto (2020) destaca que as tecnologias digitais podem ser usadas em conjunto por meio de sistemas, equipamentos e *softwares* que contribuem para otimizar o desempenho da produção agrícola em todas as suas fases. Essa transformação digital visa aumentar a eficiência, produtividade e sustentabilidade no campo.

Mais do que um simples caso de aplicação de metodologias e práticas de automação dos processos produtivos, a Agricultura 4.0 é uma evolução da agricultura tradicional, integrando tecnologias com foco na expansão da eficiência produtiva e redução de custos, incorporando ferramentas digitais capazes de realizar o monitoramento e controle de forma contínua, em tempo real (DIAS *et al.*, 2023).

Inspirada nos preceitos da Indústria 4.0, a Agricultura 4.0 vem redefinindo o agronegócio brasileiro ao integrar recursos avançados de automação, sensoriamento e análise

de dados (FASCILOLO; PANZA; LOMBARDI, 2024). Barbosa (2021) salienta que essa nova fase tecnológica é sustentada por sistemas computacionais de elevada capacidade, robótica aplicada, tecnologias de georreferenciamento via GPS e Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), contribuindo para elevar a produtividade mesmo em contextos de conectividade restrita e escassez de mão de obra especializada.

Dias *et al.*, (2023) ampliam essa perspectiva ao demonstrar que a Agricultura 4.0 transcende a mera automação de máquinas, constituindo-se enquanto arquitetura integrada que abrange desde o monitoramento remoto das lavouras até a rastreabilidade completa da cadeia produtiva, consolidando-se como eixo estratégico para a competitividade e a sustentabilidade do setor. Logo, a Agricultura 4.0 permite a integração entre *softwares* e sistemas digitais com os equipamentos agrícolas, tornando a gestão do agronegócio mais eficiente e reduzindo o tempo necessário para a realização das atividades (FACHIN, 2018).

No contexto da Agricultura 4.0, a IA busca desenvolver sistemas capazes de simular a inteligência humana, compreendendo, aprendendo e tomando decisões autônomas em situações complexas (PICCOLO *et al.*, 2024). Essa tecnologia tem se mostrado essencial em diversos setores, incluindo o agronegócio, onde sua capacidade de processar grandes volumes de dados e identificar padrões contribui para a otimização de processos.

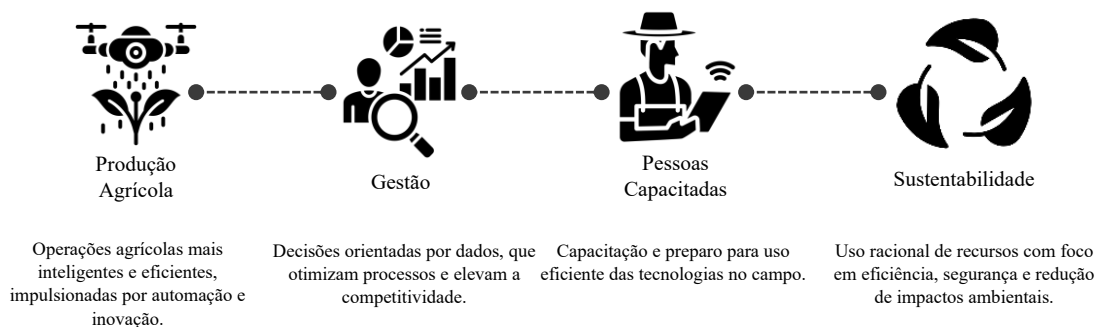
2.2 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MACHINE LEARNING NO AGRONEGÓCIO

A IA surgiu na década de 1950, com uso de conceitos matemáticos e teoria da computação, disseminando-se com o avanço do poder de processamento de informatização e uso de *big data*. O desenvolvimento da IA inclui marcos como sistemas especialistas, redes neurais e aprendizado profundo, permitindo aplicações complexas em reconhecimento de padrões, processamento de linguagem natural e automação avançada (MENDONÇA *et al.*, 2023).

As ferramentas de IA vêm sendo aplicadas à gestão com o objetivo de otimizar decisões, reduzir custos e expandir a produtividade. Por meio do uso de sensores, por exemplo, dados são coletados e analisados em nuvem, permitindo ações automatizadas e preditivas nas áreas de produção, como clima, análise e manejo de solo. Isso fortalece a eficácia e eficiência operacional e auxilia no alcance aos requisitos relativos à sustentabilidade nas propriedades rurais (SEBRAE, 2021).

A digitalização altera a lógica produção e reprodução do capital no setor do agronegócio, pois a integração de sensores, com uso de técnicas e ferramentas de IA, IoT e automação transforma tarefas rotineiras em fluxos de informação contínua que sustentam decisões gerenciais em tempo real (MASSRUHÁ *et al.*, 2020). Na Agricultura 4.0, as tecnologias deixam de ser mero suporte técnico e passam a orientar estratégia, produtividade e sustentabilidade em toda a cadeia (BOLFE; MASSRUHÁ, 2020). A figura 3, adaptada da palestra de Neves (2017), sintetiza os quatro pilares que sustentam a Agricultura 4.0. A seguir, apresenta-se a descrição de cada um desses pilares, com destaque no fator humano como principal agente de transformação digital no campo.

Figura 3 – Pilares que Sustentam a Agricultura 4.0



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Neves (2017).

De acordo com Neves (2017), a Agricultura 4.0 se sustenta sobre quatro pilares: produção, gestão, pessoas e sustentabilidade. Destaca, ainda, que as pessoas constituem o fator de maior impacto, pois, quando devidamente capacitadas, irão operar as tecnologias, interpretar os dados e tomar as decisões estratégicas no campo.

Contudo, mesmo com o avanço de máquinas modernas e sistemas digitais, muitos agricultores não utilizam os recursos disponíveis por falta de conhecimento, o que expõe a importância da formação técnica nesse novo cenário. Os demais pilares complementam essa estrutura: a produção, voltada à eficiência operacional; a gestão, relacionada à análise e uso dos dados na tomada de decisões; e a sustentabilidade, que visa aumentar a produtividade com responsabilidade ambiental e minimização de custos operacionais.

Essa transformação exige reconfigurar processos, cultura organizacional e modelos de negócios inteligentes (com uso de técnicas de *Business Intelligence*). A conectividade em nuvem, análise de grandes volumes de dados e plataformas colaborativas criam propriedades

rurais orientadas por inteligência operacional (MASSRUHÁ *et al.*, 2023). Consequentemente, gestores precisam dominar técnicas de inovação, gestão de dados e indicadores de desempenho para alinhar rentabilidade e responsabilidade socioambiental e empresarial.

Quando aplicadas de forma combinada, IA e IoT, automação e aplicativos móveis oferecem ganhos diretos de eficiência, redução de custos e diferenciação competitiva; todavia, a geração de valor está condicionada a eficácia na execução de um planejamento estratégico claro e a uma cultura organizacional receptiva a promoção de inovação aberta (FGV AGRO, 2025).

Modelos preditivos sustentados por imagens de satélite, drones e sensores permitem otimizar irrigação, adubação e controle fitossanitário, mesmo em pequenas propriedades rurais, desde que disponham de conectividade a redes de comunicação (MUNZ *et al.*, 2024). Assim, a transformação digital no campo impõe uma agenda de gestão estratégica da tecnologia.

A literatura aponta que conectividade, interoperabilidade e governança de dados são condicionantes para que a Agricultura 4.0 evolua rumo a modelos de negócio baseados em serviços e plataformas, reduzindo riscos gerados a partir de fatores operacionais (OECD, 2022). Para viabilizar essa transição, é recomendável que os gestores alinhem investimentos em infraestrutura, capacitação técnica e métricas de impacto socioambiental, consolidando a agricultura de decisão em vez da mera agricultura de precisão (SHEPHERD *et al.*, 2018).

Elbehri e Chestnov (2021, pp. 3-4) informam que as principais áreas de aplicação da IA na agricultura incluem:

Monitoramento de culturas, solo e gado. Os sistemas de IA podem apoiar os agricultores no monitoramento das condições de suas culturas, solo e gado, fornecendo recomendações oportunas sobre ações e decisões específicas. Por exemplo, ao analisar dados de sensores de campo ou estudar imagens, os algoritmos de IA podem ajudar a determinar o melhor momento para semear, colher frutos, aplicar fertilizantes e/ou fornecer tratamento específico ao gado. Também podem identificar quais plantas ou animais precisam de intervenção, permitindo o uso mais eficiente de recursos.

Deteção de pragas e doenças. Sistemas de IA podem analisar imagens digitais captadas por drones, robôs agrícolas ou até mesmo por agricultores utilizando câmeras de smartphones para detectar pragas e fornece recomendações concretas sobre como prevenir sua disseminação, tratar plantas afetadas ou mitigar os danos. Além disso, a IA pode analisar o comportamento do gado para detectar anomalias e identificar possíveis doenças, permitindo tratamentos em tempo hábil.

Previsão do tempo e temperatura. Algoritmos de IA são capazes de auxiliar na previsão do clima e temperatura em nível local, utilizando dados históricos e medições feitas por estações meteorológicas locais e sensores de campo. Melhorias na previsão do clima ajudam os agricultores a tomarem decisões mais assertivas sobre quando semear, aplicar pesticidas e planejar a colheita.

Análise preditiva. A partir da análise de diversos dados de campo e/ou do exame de imagens de plantas, a IA pode gerar previsões precisas sobre produtividade e, potencialmente, sobre a qualidade do produto. Isso permite que os agricultores projetem suas receitas e tomem decisões estratégicas sobre quanto vender e quanto armazenar para consumo próprio. Além disso, sistemas de IA podem ser usados para analisar padrões de consumo e prever a demanda por determinados produtos agrícolas, ajudando os produtores a evitarem escassez ou excesso de oferta.

Robôs agrícolas autônomos e equipamentos agrícolas. Sistemas de IA podem ser implantados em plataformas robóticas para direcionar e controlar seu trabalho realizando tarefas assistivas, como irrigação direcionada, aplicação de fertilizantes e pesticidas, coleta de frutas e transporte de equipamentos em uma fazenda, entre outros.

O mercado global de IA na agricultura está em acelerado processo de expansão. No ano de 2023, os negócios relacionados ao ramo foram estimados em US\$ 1,7 bilhão, com expectativa de crescimento de US\$ 4,7 bilhões até 2028, o que corresponde a uma taxa de crescimento anual composta de 23,1% (MARKETS AND MARKETS, 2023).

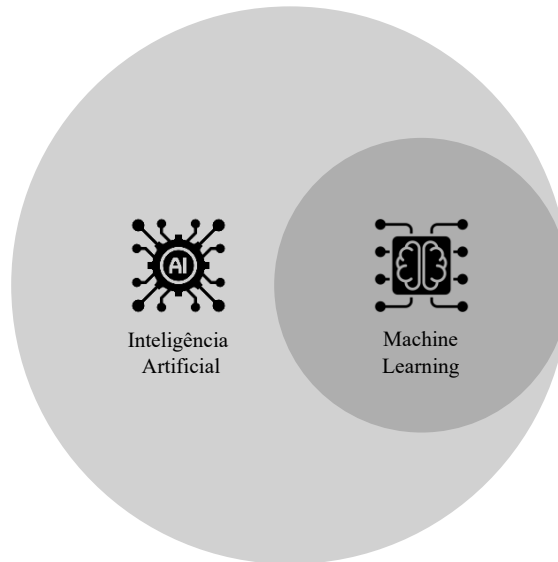
A partir do relatório intitulado “*Sizing the Prize*” realizado pela *Price Water House Coopers* (PWC, 2017), a IA pode adicionar US\$ 15,7 trilhões ao PIB global até 2030, sendo US\$ 6,6 trilhões por aumento de produtividade e US\$ 9,1 trilhões por meio da expansão do consumo. De acordo com o estudo, a China deve liderar o processo com US\$ 7 trilhões, seguida pela América do Norte com US\$ 3,7 trilhões e a Europa com até US\$ 1,8 trilhão. Já os mercados em desenvolvimento, como América Latina e África, principais fornecedores, tendem a apresentar menor impacto no quantitativo consumido de produtos agrícolas, inicialmente, mas com tendência de crescimento.

Outra importante técnica utilizada no âmbito de aplicação da IA é o *Machine Learning* (ML) ou “Aprendizado de Máquina”. Esta técnica diz respeito à capacidade das máquinas reconhecerem padrões a partir do uso de bancos de dados disponíveis. Por exemplo, existe a possibilidade de desenvolver um modelo que antecipa a informação quanto a qualidade do café examinando dados como a altura do cultivo, volume de chuva, temperatura, propriedades do solo (como tipo, fertilidade e umidade), exposição à luz solar, a coloração dos grãos, entre outros indicadores. Apesar de parecer uma tecnologia avançada, esse processo pode ser tão elementar quanto a aplicação de uma simples técnica estatística, como a regressão linear (QUEIROZ *et al.*, 2022).

Destaca-se a diferença entre IA e ML. A IA engloba sistemas capazes de imitar processos cognitivos humanos, enquanto o ML, subcampo da própria IA, concentra-se em algoritmos que aprendem de forma autônoma a partir da análise de grandes volumes de dados

(GYAMFI *et al.*, 2024). Essa distinção é sintetizada na figura 4, que posiciona o *Machine Learning* como subcampo da Inteligência Artificial.

Figura 4 – ML como Subárea da IA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse sentido, o ML é parte integrante da IA que confere às máquinas mecanismo de aprendizado independente a partir de um histórico de experiências acumuladas, sem necessitar de programação explícita. Inclui três categorias: supervisionado, não supervisionado e por reforço (AHMAD; NABI, 2021). Desta maneira, ML é um método que utiliza dados de treinamento para criar modelos matemáticos capazes de fazer previsões e tomar decisões (BAL; KAYAALP, 2021).

Na perspectiva da Agricultura 4.0, o uso de técnicas de ML tem possibilitado vários avanços em diversas frentes. Attri, Awasthi e Sharma (2024) destacam que o ML tem sido amplamente explorado no setor agrícola, notadamente na gestão de culturas. As principais áreas de aplicação envolvem:

- A. **Deteccção de pragas e plantas daninhas:** Algoritmos de ML analisam imagens capturadas por drones ou sensores para identificar infestações em estágios iniciais, possibilitando intervenções pontuais e reduzindo o uso excessivo de pesticidas.
- B. **Diagnóstico de doenças em plantas:** Modelos treinados com imagens de folhas e caules infectados são capazes de detectar doenças com alto grau de acurácia,

auxiliando na escolha do tratamento mais adequado e na contenção da disseminação.

- C. **Deteção de estresse nas plantas:** Sensores aliados a algoritmos de ML monitoram fatores como umidade do solo, temperatura e índice de clorofila, permitindo identificar situações de estresse hídrico ou nutricional.
- D. **Fazendas inteligentes e automação:** O ML integra-se a dispositivos IoT em sistemas de agricultura de precisão, como irrigação automatizada, aplicação localizada de insumos e monitoramento contínuo das condições ambientais.
- E. **Estimativa e previsão de produtividade:** Com base em dados históricos e imagens de satélite, o ML realiza previsões sobre o rendimento das safras, permitindo um planejamento logístico e financeiro mais assertivo.

Essas aplicações demonstram o potencial do ML em transformar a agricultura em uma atividade mais precisa, sustentável e lucrativa, respondendo aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela crescente demanda alimentar. Nesse contexto, torna-se necessário compreender, de forma sistemática, quais soluções e implicações das tecnologias de IA e ML despontam como *benchmarking* na Agricultura 4.0, bem como os benefícios e limitações reportados pela literatura. Na sequência, na Seção 3, descreve-se o percurso metodológico seguido neste estudo, fundamentado no protocolo da Revisão Sistemática da Literatura (RSL).

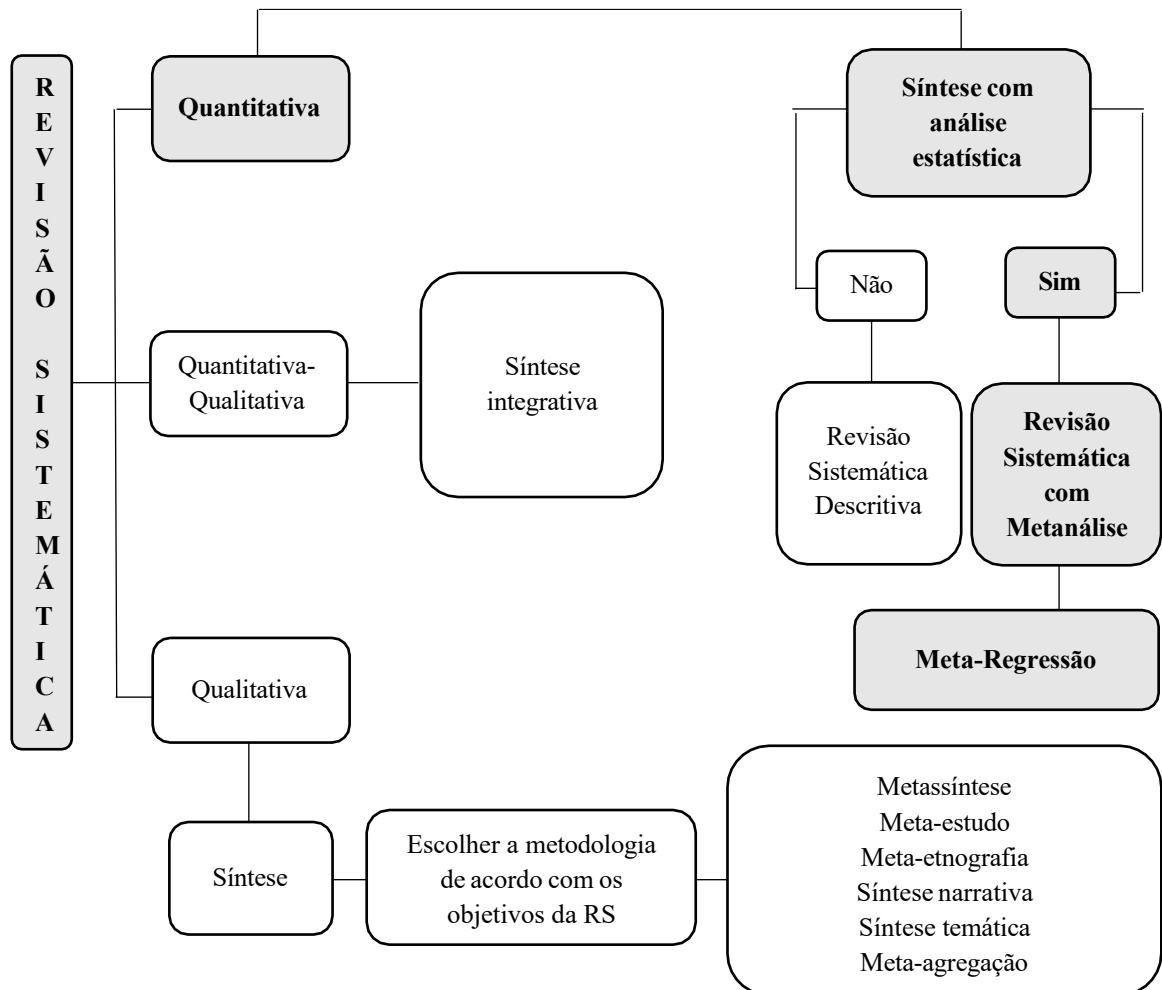
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo adota a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) como estratégia metodológica para identificar, analisar e sintetizar as evidências científicas a fim de mapear o impacto da IA e do ML nos processos de gestão da Agricultura 4.0. Trata-se, portanto, de investigação qualitativa, exploratória e bibliográfica. A RSL foi escolhida porque oferece rigor, rastreabilidade e reprodutibilidade, ao empregar procedimentos explícitos de busca, seleção crítica e extração de dados (MOHER *et al.*, 2009; GALVÃO; RICARTE, 2019). Adicionalmente, esta técnica possibilita que seja evitado um eventual viés de confirmação a partir de concepções ideológicas particulares do próprio pesquisador.

Conforme enfatiza Silva (2020), a revisão sistemática admite diferentes percursos metodológicos, permitindo ao pesquisador adotar o modelo mais adequado à natureza da

investigação; dentre os modelos apresentados a seguir, na figura 5, adotou-se a síntese qualitativa.

Figura 5 – Processo de Revisão Sistemática



Fonte: Silva, 2020, p. 16.

No passo inicial, realizou-se a formulação da questão de pesquisa (etapa a), que guia todo o processo de investigação científica empregada. Considerando o objetivo deste trabalho, a questão que guia todo o processo de RSL é: Como as soluções de IA e ML transformam processos de gestão na Agricultura 4.0, criando valor em eficiência operacional, decisão estratégica e sustentabilidade?

Após a definição da questão de pesquisa, passou-se à etapa (b), em que foi determinada a base de dados a ser utilizada; e à etapa (c), relativa à construção da estratégia de busca. Utilizaram-se, como descritores, as seguinte palavras-chave: “*Artificial Intelligence*”,

“*Machine Learning*”, “*Agriculture 4.0*” e “*Smart Agriculture*”. Todos os termos foram grafados na língua inglesa por se tratar do idioma predominante na literatura científica internacional. Esses termos foram combinados com operadores *booleanos AND* e *OR*, além do uso de aspas (“”), de modo a refinar a recuperação dos registros, técnica esta considerada vital para buscas precisas em bases científicas (PICALHO; BARBOSA; MEIRELLES, 2023). Desse modo, a sintaxe buscou assegurar a identificação de estudos alinhados ao escopo de análise do estudo proposto.

À luz desses pressupostos, formulou-se a seguinte *string* base de busca (quadro 1), que orientou a construção da consulta final nas bases.

Quadro 1 – *String* Base de Busca Formulada

(“*Artificial Intelligence (AI)*” OR “*Machine Learning (ML)*”) AND (“*Agriculture 4.0*” OR “*Smart Agriculture*”)

Fonte: Elaborado pelo autor.

À semelhança de investigações recentes (CIOFFI *et al.*, 2020; ABBASI; MARTINEZ; AHMAD, 2022; TRABELSI *et al.*, 2023; COLIZZI *et al.*, 2025; KASHYAP *et al.*, 2025; BOTERO-VALÊNCIA *et al.*, 2025), e considerando o estudo de Prancutè (2021), a prospecção foi conduzida nas bases *Scopus* e *Web of Science* (WoS), acessadas por meio do Portal de Periódicos da CAPES. A busca foi finalizada em julho de 2025, utilizando como corte para a data de publicação o período de janeiro de 2020 a junho de 2025. Limitou-se a consulta aos campos *TITLE-ABS-KEY* (*Scopus*) e *TOPIC* (WoS) a fim de garantir a cobertura dos avanços e evoluções mais recentes no campo de estudo associado a Agricultura 4.0.

Durante a implementação da seleção de estudos (etapa d) na base dados *Scopus*, constatou-se que, a aplicação da *string* de busca utilizada resultou, no primeiro momento, em uma profusão de 649 publicações científicas. Após a aplicação do filtro limitado ao tipo de documento “artigos” e “artigos de revisão”, suprimiu 384 documentos, resultando em 265 publicações, descartando 59,17% dos documentos iniciais encontrados por incompatibilidade ao escopo da pesquisa. Em seguida, com o recorte temporal (2020-2025), obteve-se 258 resultados. Ao circunscrever os resultados ao idioma inglês, alcançou-se 252 documentos. Além disso, foi restringido os resultados apenas por acesso integralmente aberto, o que resultou na saída final de 118 publicações. Esse processo depurou cerca de 81,82% do conjunto inicial do protocolo de busca empregado no estudo.

Na *Web of Science* (WoS), a mesma *string* identificou 260 documentos. O filtro por tipo de documento reduziu o total para 217, o que representa redução de aproximadamente 16,5%. A delimitação temporal 2020-2025 ajustou o conjunto de dados para 211 títulos, todos já em inglês. Por fim, a seleção por acesso aberto integral suprimiu mais 80 registros, resultando em 131 publicações, o que representa uma redução de cerca de 49,62% sobre o resultado inicial.

Consolidaram-se, portanto, 249 estudos com base nos critérios de busca estabelecidos, sendo 118 na *Scopus* e 131 na WoS para as etapas subsequentes (nesta etapa já existiam pesquisas duplicadas entre as duas bases), sendo necessário a realização destas duplicações. A partir da *string* base de busca (quadro 1), e considerando os recursos de filtragem de cada repositório de artigos, geraram-se as *strings* finais automaticamente ajustadas pelas plataformas *Scopus* e WoS, conforme apresenta o quadro 2.

Quadro 2 – Strings Geradas a Partir dos Filtros Aplicados nas Bases

Base	Strings de busca aplicada nas bases de dados
Scopus	<i>TITLE-ABS-KEY(("Artificial Intelligence (AI)" OR "Machine Learning (ML)") AND ("Agriculture 4.0" OR "Smart Agriculture")) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (OA,"all")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English"))</i>
Web of Science	<i>("Artificial Intelligence (AI)" OR "Machine Learning (ML)") AND ("Agriculture 4.0" OR "Smart Agriculture"). (Topic) and Article or Review Article (Document Types) and 2020 or 2021 or 2022 or 2023 or 2024 or 2025 (Publication Years) and All Open Access (Open Access)</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na etapa (e), aplicaram-se critérios de inclusão e exclusão (quadro 3) para assegurar literatura relevante a este tópico de estudo. Primeiro, todos os registros recuperados nas duas bases foram triados por título, resumo e palavras-chave, a fim de identificar, a princípio, estudos que de forma nítida exibam *insights* acerca de IA e do ML nos processos de gestão da Agricultura 4.0, o que resultou em 61 estudos (31 *Scopus*; 30 *Web of Science*), dos quais 18 constavam em ambas as bases. Após esse primeiro momento, priorizou-se apenas os artigos que tivessem as características delineadas no quadro 3 apresentado a seguir.

Quadro 3 – Critérios de Inclusão e Exclusão

Critério	Tipo	Descrição
Temática	Para Inclusão	A pesquisa deve tratar de Agricultura 4.0 ou denominações equivalentes.
Relevância	Para Inclusão	A pesquisa deve descrever, comprovar ou discutir (explícita ou inferida) a contribuição de tecnologias de IA, ML, ou soluções digitais de ponta correlacionadas a estas supraditas para processos de gestão no contexto da Agricultura 4.0 e, como a aplicação desses recursos computacionais impacta em uma das seguintes frentes, a saber (a) aumento da produção; (b) redução ou controle de custos; (c) eficiência operacional; (d) gestão estratégica; (e) suporte à tomada de decisão baseada em dados, entre outras.
Período	Para Inclusão	A pesquisa é publicada dentro do recorte delimitado (2020 a 2025).
Acesso	Para Inclusão	A pesquisa tem disponibilidade integral para leitura.
Tipo	Para Inclusão	A pesquisa deve ser artigo produto de pesquisa original ou de revisão.
Escopo	Para Exclusão	A pesquisa aborda outras etapas da cadeia agroalimentar sem conexão explícita com Agricultura 4.0.
Período	Para Exclusão	A pesquisa está fora do intervalo temporal estabelecido.
Acesso	Para Exclusão	A pesquisa não está disponível para leitura integral.
Tipo	Para Exclusão	A pesquisa trata exclusivamente do desempenho de algoritmos (como acurácia, arquitetura ou <i>performance</i>), sem apresentar implicações gerenciais ou aplicabilidade na ótica da gestão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Após a aplicação dos critérios do quadro 3 sobre os 61 estudos selecionados, 13 artigos atenderam aos requisitos de temática, relevância, período, acesso e formato. Das 13 pesquisas qualificadas, 8 constam em ambas as bases. Os 48 trabalhos remanescentes foram excluídos por apresentarem, isoladamente: foco à performance de algoritmos sem implicações gerenciais; escopo em etapas não relacionadas à gestão na Agricultura 4.0; ou indisponibilidade do texto completo. Os estudos que constituem a base de dados utilizada para a análise empreendida são apresentados no quadro 4.

Quadro 4 – Pesquisas que Constituem a Base de Dados da RSL

Autor	Título	Ano
Hassan <i>et al.</i>	<i>A Systematic Review on Monitoring and Advanced Control Strategies in Smart Agriculture</i>	2021
Mohamed <i>et al.</i>	<i>Smart farming for improving agricultural management</i>	2021
Lugonja <i>et al.</i>	<i>Smart Agriculture Development and Its Contribution to the Sustainable Digital Transformation of the Agri-Food Sector</i>	2022

Awais <i>et al.</i>	<i>AI and machine learning for soil analysis: an assessment of sustainable agricultural practices</i>	2023
Alzubi e Galyna	<i>Artificial Intelligence and Internet of Things for Sustainable Farming and Smart Agriculture</i>	2023
Vijayakumar <i>et al.</i>	<i>Smart spraying technologies for precision weed management: A review</i>	2023
Yousaf <i>et al.</i>	<i>Artificial intelligence-based decision support systems in smart agriculture: Bibliometric analysis for operational insights and future directions</i>	2023
Mandal <i>et al.</i>	<i>Adaption of smart applications in agriculture to enhance production</i>	2024
Kuska, Wahabzada e Paulus	<i>AI for crop production – Where can large language models (LLMs) provide substantial value?</i>	2024
Muhammed <i>et al.</i>	<i>Artificial Intelligence of Things (AIoT) for smart agriculture: A review of architectures, technologies and solutions</i>	2024
Ahmed e Shakoor	<i>Advancing agriculture through IoT, Big Data, and AI: A review of smart technologies enabling sustainability</i>	2025
Ali <i>et al.</i>	<i>Artificial Intelligence for Sustainable Agriculture: A Comprehensive Review of AI-Driven Technologies in Crop Production</i>	2025
Assimakopoulos <i>et al.</i>	<i>AI and Related Technologies in the Fields of Smart Agriculture: A Review</i>	2025

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Com esse conjunto final de 13 pesquisas, segue-se à seção 4, em que são explorados os principais resultados obtidos quanto às aplicações, aspectos de melhoria e desafios da IA e do ML na gestão do agronegócio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente seção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do percurso metodológico fundamentado na técnica de Revisão Sistemática da Literatura (RSL). A análise abrange um conjunto de 13 pesquisas selecionadas que atendem aos critérios de inclusão estabelecidos, lidos com o desígnio de identificar informações pertinentes ao tema desta pesquisa, os quais priorizaram-se estudos que abordam as soluções de IA, do ML e, por conseguinte, suas tecnologias digitais correlatas, ou sinérgicas, pois, como observou Fasciolo, Panza e Lombardi (2024), essas abordagens tecnológicas infreqüentemente operam de forma isolada na agricultura, sendo muitas vezes integradas de maneira conjunta a outras soluções digitais para melhorar as práticas agrícolas.

A adoção de tecnologias digitais na Agricultura 4.0 tem redefinido tanto as operações no campo quanto os processos de gestão do setor agrícola. Conforme evidenciado pelos estudos analisados (quadro 5), diferentes soluções tecnológicas estão transformando práticas tradicionais em sistemas inteligentes, sustentáveis e orientados por dados. A seguir, no quadro 5, são expostos os principais achados dos artigos analisados, destacando como essas inovações

estão sendo aplicadas na prática e quais impactos de gestão são percebidos e, após esse primeiro momento, será discutido quais desafios ainda precisam ser superados.

Quadro 5 – Aplicações Tecnológicas e Benefícios Estratégicos na Agricultura 4.0

Referência	Descrição geral da pesquisa	Melhorias identificadas
Hassan <i>et al.</i> , (2021)	Revisão sistemática que analisa diferentes estudos, e evidencia que Robôs, sensores IoT conectados a drones com câmeras hiperespectrais e técnicas de IA e ML podem monitorar em tempo real solo, água, clima, pragas e nutrientes para acionar sistemas automáticos de irrigação, fertirrigação e proteção das culturas	Aumento da Produtividade, Maior Fertilidade do Solo, Redução de Custos Operacionais e de Insumos, Minimização do Impacto Ambiental, Tomada de Decisão Baseada em Dados em Tempo Real, Melhoria da Rastreabilidade e da Qualidade
Mohamed <i>et al.</i> , (2021)	Revisão bibliográfica que destaca IoT, Rede 5G, redes de sensores, VANTs, robôs agrícolas e Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) que combinados, podem coletar e transmitir dados do campo para automatizar irrigação, pulverização, plantio e monitoramento em tempo real de cultivos e rebanhos	Aumento da Produtividade, Redução de Custos Operacionais, Minimização do Impacto Ambiental, Tomada de Decisão em Tempo Real Baseada em Dados, Melhoria da Rastreabilidade e Qualidade dos produtos
Lugonja <i>et al.</i> , (2022)	Revisão bibliográfica acerca de IoT, <i>System-of-Systems</i> (SoS), VANTs, SR, ML e BD que sustentam a agricultura inteligente e, por consequência, promovem a transformação digital sustentável do setor agroalimentar, destacando dados de solo, clima e lavouras para monitorar em tempo real e planejar digitalmente irrigação, rotação de culturas e demais decisões de gestão agrícola	Otimização da Produtividade e Uso de Recursos, Redução de Custos Operacionais, Melhor Rastreabilidade e Qualidade, Minimização do Impacto Ambiental, Decisões Estratégicas Baseadas em Dados
Awais <i>et al.</i> , (2023)	Por meio de revisão bibliográfica, com evidências da literatura, destacam que IA e ML, associadas a sensores IoT, geoestatística e fibra óptica analisam textura e teor de água do solo para mapear, prever e atualizar em tempo real bancos de dados que alimentam sistemas de irrigação inteligente	Aumento da Produtividade, Redução de Custos Operacionais, Uso Eficiente de Recursos, Tomada de Decisão em Tempo Real, Minimização do Impacto Ambiental
Alzubi e Galyna (2023)	Por via de uma revisão de literatura, apontam que Sensores IoT aliados a IA e ML, drones, sistemas de agricultura de precisão e <i>analytics</i> em nuvem proporciona coletar dados de solo, clima, lavouras e rebanhos para automatizar condições de estufas, controlar irrigação, rastrear gado e apoiar decisões operacionais em tempo real na Agricultura 4.0, sustentando a <i>Smart Sustainable Agriculture</i> (SSA) ou Agricultura Inteligente Sustentável (AIS)	Aumento da Produtividade, Redução de Custos e Desperdícios, Eficiência de Recursos e Minimização do Impacto Ambiental, Tomada de Decisão Baseada em Dados em Tempo Real, Geração de Novos Empregos Rurais
Vijayakumar <i>et al.</i> , (2023)	Revisão sistemática que sintetiza o estado da arte em tecnologias de pulverização inteligente, foi observado que Visão Computacional (VC) com IA e ML integrada a câmeras, sensores e bicos de pulverizadores “ <i>See-and-Spray</i> ”, que possibilita orientar robôs e tratores agrícolas a detectarem plantas daninhas e aplicar herbicida de forma localizada em tempo real	Redução Expressiva de Agroquímicos, Aumento da Produtividade e Qualidade, Eficiência Operacional, Minimização do Impacto Ambiental, Suporte à Decisão em Tempo Real
Yousaf <i>et al.</i> , (2023)	Análise bibliométrica que destaca, na literatura, que SAD, IoT, IA, ML, SR e VANTs são utilizados na Agricultura 4.0 para mapear áreas irrigadas, prever crescimento de culturas, alocar recursos escassos,	Aumento da Produtividade, Redução de Custos Operacionais, Minimização do Impacto Ambiental, Tomada de Decisão

	otimizar aplicação de herbicida/pesticida, reduzir emissões de dióxido de carbono e maximizar o lucro agrícola	Baseada em Dados, Melhoria na Alocação de Recursos
Mandal <i>et al.</i> , (2024)	Por meio de revisão bibliográfica, é observado na literatura que IoT e IA, via sensores conectados, drones e veículos autônomos, <i>chatbots</i> , possibilitam monitorar o campo em tempo real, e estão sendo combinados para automatizar irrigação, pulverização, semeadura e colheita, elevando a Agricultura 4.0 rumo a 5.0 e demais tarefas agrícolas	Aumento da Produtividade, Redução de Custos, Eficiência de Recursos e Minimização do Impacto Ambiental, Tomada de Decisão Baseada em Dados em Tempo Real, Segurança e Qualidade Alimentar, Novas Oportunidades de Negócio Rural
Kuska, Wahabzada e Paulus (2024)	Destacam na literatura o potencial que os Grandes Modelos de Linguagem (LLMs, do inglês <i>Large Language Models</i>), por exemplo o <i>ChatGPT</i> , da <i>OpenAI</i> , combinados a <i>chatbots</i> e fluxos de busca, podem processar regulamentos, dados de sensores e saídas de modelos preditivos para oferecer consultoria instantânea, gerar documentação automática e traduzir resultados complexos em orientações compreensíveis aos produtores	Tomada de Decisão Ágil, Redução de Custos Administrativos, Capacitação Técnica Acelerada, Explicação de Modelos Complexos em Linguagem Simples, Melhoria da Conformidade Regulatória
Muhammed <i>et al.</i> , (2024)	Por meio de revisão sistemática, destacam o potencial de Inteligência Artificial das Coisas (AIoT) que unem IA e ML, sensores IoT, 5G/6G, <i>Edge/Fog/Cloud</i> , <i>Federated Learning</i> (FL), <i>Digital Twins</i> e <i>Blockchain</i> coletar e processar dados de solo, clima, cultivos e pecuária para automatizar irrigação, manejo de insumos, rastreamento logístico e suporte decisório em tempo real	Aumento da Produtividade, Redução de Custos Operacionais, Minimização do Impacto Ambiental, Tomada de Decisão Baseada em Dados, Rastreabilidade e Novos Modelos de Negócio
Ahmed e Shakoore (2025)	Apresentam uma revisão teórica, destacam que sensores IoT, BD e IA é usado para monitorar e mitigar emissões de carbono na Agricultura 4.0; tecnologias estas que processam dados de solo, clima e emissões de gases prejudiciais, para monitorar a pegada de carbono e apoiar decisões de <i>Climate-Smart Agriculture</i> (CSA) ou Agricultura Climaticamente Inteligente (ACI)	Monitoramento Preciso da Pegada de Carbono, Aumento da Eficiência Operacional, Redução de Custos, Minimização do Impacto Ambiental, Suporte à Tomada de Decisão Estratégica
Ali <i>et al.</i> , (2025)	Através de revisão sistemática, evidencia-se, pela literatura, que técnicas de ML e <i>Deep Learning</i> (DL), SR, IoT e outras combinadas à análise de séries temporais possibilitam o processamento de dados de clima, solo e colheitas para selecionar culturas, prever safras, classificar a fertilidade do solo e orientar a gestão do manejo hídrico	Aumento da Produtividade, Redução de Custos Operacionais, Tomada de Decisão Baseada em Dados, Apoio à Adaptação Climática Por meio de Previsões Precisas, Eficiência de Recursos
Assimakopoulos <i>et al.</i> , (2025)	IA e ML combinadas a sensores IoT, drones, robôs, <i>Digital Twins</i> , 5G/ <i>Edge computing</i> e <i>Blockchain</i> coletam e analisam dados de solo, clima, plantas e animais para automatizar irrigação, nutrir cultivos, monitorar estufas, gerenciar pecuária e registrar rastreabilidade em sistemas que vão do campo aberto às fazendas verticais	Aumento da Produtividade, Redução de Custos Operacionais, Minimização do Impacto Ambiental, Tomada de Decisão Baseada em Dados, Rastreabilidade e Novos Modelos de Negócio

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

No estudo conduzido por Yousaf *et al.*, (2023), é efetuado uma sintetização das tendências e potenciais benefícios reportadas na literatura acerca das tecnologias digitais na agricultura. É observado que a IA e o ML são utilizados para análise preditiva e classificação de culturas, como no mapeamento de áreas irrigadas. Além disso, essas técnicas podem

proporcionar a identificação precisa de necessidades hídricas e a detecção de anomalias em plantações, contribuindo para o aumento da produtividade e a redução de custos com insumos.

Por sua vez, na pesquisa de Lugonja *et al.*, (2022), destaca-se que essas tecnologias viabilizam a identificação de padrões de crescimento, surtos de pragas e condições ideais de plantio, oferecendo suporte à tomada de decisão agrícola. Ademais, a integração de sensores IoT em sistemas de irrigação inteligente possibilitam o monitoramento em tempo real de umidade do solo e temperatura, promovendo o uso eficiente de recursos hídricos e a sustentabilidade (YOUSAF *et al.*, 2023).

Na mesma perspectiva, os sensores conectados a sistemas automatizados são apontados na literatura como capazes de facilitar a automação de estufas e sistemas de criação animal, o que pode contribuir para diminuir a dependência de mão de obra manual (LUGONJA *et al.*, 2022).

De modo semelhante, a pesquisa de Assimakopoulos *et al.*, (2025), indica que IA e o ML são utilizados para analisar grandes volumes de dados (*big data*) provenientes de sensores, satélites e drones, gerando *insights* preditivos sobre condições climáticas, saúde das culturas e surtos de pragas. Como resultado, essa abordagem pode favorecer o aumento da produtividade por meio de intervenções precisas, como irrigação e aplicação de fertilizantes em doses otimizadas, tendendo a reduzir desperdícios e custos operacionais.

Nesse contexto, os drones e a robótica agrícola tem sido utilizados para pulverização precisa de defensivos, colheita automatizada e monitoramento de grandes áreas por meio de imagens multiespectrais. Essa ferramenta tende a favorecer a redução dos custos com mão de obra, podendo também diminuir a exposição de trabalhadores a produtos químicos e otimizar a aplicação de insumos. Outro aspecto relevante é que a rastreabilidade pode ser aprimorada com o uso de *blockchain*, que registra de forma imutável dados sobre origem, manejo e transporte de produtos, contribuindo para aumentar a transparência para consumidores e reguladores (ASSIMAKOPOULOS *et al.*, 2025).

Segundo os estudos analisados, a integração entre sistemas (SoS) é apontada como um fator que pode conectar dispositivos IoT, plataformas de análise e máquinas agrícolas. Consequentemente, essa integração tende a melhorar a rastreabilidade e a transparência, desde a produção até o consumidor final, atendendo a demandas por sustentabilidade e segurança alimentar (LUGONJA *et al.*, 2022).

Do mesmo modo, análise de *big data* e plataformas baseadas em nuvem é relatada como utilizada para consolidar informações de múltiplas fontes, oferecendo suporte à tomada de decisão estratégica. Dessa forma, agricultores podem acessar recomendações personalizadas sobre épocas de plantio, rotação de culturas e gestão de riscos, o que potencialmente eleva a eficiência operacional e a resiliência frente a variações climáticas (ASSIMAKOPOULOS *et al.*, 2025).

Mohamed *et al.* (2021), em sua revisão bibliográfica, sintetizam estudos que abordam soluções tecnológicas para a Agricultura 4.0, destacando como a integração de IA, IoT, SR, VANTs, robótica agrícola e redes 5G tem sido proposta como estratégia para otimizar a gestão agrícola. Relatam, ainda, que na literatura a IoT conecta sensores capazes de monitorar as características como umidade do solo, temperatura, nutrientes em tempo real, o que, segundo os estudos revisados, poderia viabilizar irrigação e fertilização precisas. Como consequência, isso é apontado como capaz de melhorar a produtividade ao garantir condições ideais para as culturas, enquanto também reduz custos com insumos e água, promovendo eficiência no uso de recursos e sustentabilidade (MOHAMED *et al.*, 2021).

A adoção de redes 5G é apontada como um facilitador para essas tecnologias, devido à sua capacidade de transmitir dados em alta velocidade, essencial para aplicações em tempo real, como monitoramento remoto e controle de máquinas autônomas. Já os Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) integram dados geoespaciais e modelos preditivos com base em pesquisas anteriores, visando orientar o manejo de recursos e a tomada de decisão estratégica (MOHAMED *et al.*, 2021).

O estudo realizado por Muhammed *et al.*, (2024) apresenta uma revisão sobre a integração da AIoT na agricultura inteligente (*Smart Agriculture*), destacando soluções tecnológicas que, segundo a literatura, podem impulsionar o setor. Vale ressaltar que a AIoT, que combina IoT e IA, tem sido aplicada em diversas áreas, como monitoramento de culturas, gestão de solos e água, detecção de pragas e doenças, colheita automatizada e cadeia de suprimentos.

Conforme a literatura analisada, sensores IoT coletam dados ambientais (umidade do solo, temperatura, entre outras) em tempo real, enquanto algoritmos de ML analisam essas informações para otimizar a irrigação e a adubação, reduzindo o desperdício de recursos e aumentando a produtividade. Não obstante, a automação é um dos pilares evidenciados na

revisão, com drones e robôs agrícolas sendo utilizados para monitoramento de larga escala e colheita precisa.

Como resultado direto, essas tecnologias permitem a identificação de áreas com estresse hídrico ou infestação de pragas, possibilitando intervenções localizadas, o que reduz custos com insumos e minimiza impactos ambientais. Adicionalmente, a rastreabilidade é aprimorada por meio de *blockchain* e IoT, garantindo transparência na cadeia de suprimentos, desde a produção até o consumidor final.

Na mesma direção, os resultados da revisão de Alzubi e Galyna (2023) evidenciam que a IA e a IoT são empregadas em estufas inteligentes para monitorar condições ambientais de forma automatizada e remota. Segundo a literatura revisada, isso reduz a necessidade de intervenção humana e garante condições ideais para o cultivo, o que resulta no aumento da produtividade e diminuição do desperdício de recursos hídricos e energéticos, favorecendo a sustentabilidade.

No que diz respeito ao monitoramento climático, os autores citam estudos em que sensores IoT coletam dados meteorológicos em tempo real, fornecendo aos agricultores alertas sobre condições adversas e suporte para decisões baseadas em dados, o que possibilita minimizar riscos e perdas nas lavouras. Complementarmente, ferramentas de análise preditiva, como as mencionadas no estudo, utilizam IA, ML e *big data* para prever safras e flutuações de preços no mercado, auxiliando no planejamento estratégico e na maximização de lucros (ALZUBI; GALYNA, 2023).

Avançando na discussão, a pesquisa de Ali *et al.*, (2025), efetuam uma revisão sistemática das tecnologias de IA aplicadas à agricultura sustentável. Em particular, sintetizam estudos, que destacam a integração de sensores IoT e drones equipados com VC para coletar dados sobre saúde das plantas, infestação de pragas e condições do solo, que auxilia na identificação de doenças em estágios iniciais com alta precisão, com base em evidências reportadas na literatura (ALI *et al.*, 2025). Essa aplicação estimula a sustentabilidade ao diminuir o uso indiscriminado de pesticidas e água. Outrossim, viabiliza a automação de processos como irrigação, que ajusta o fluxo de água conforme a necessidade detectada por sensores.

A revisão aponta que para previsões de safra e preços de *commodities*, ML, DL e técnicas de séries temporais, têm sido utilizadas em estudos para analisar dados históricos de clima, demanda de mercado e produtividade (ALI *et al.*, 2025). Essas previsões, por sua vez,

sugerem benefícios como apoio a tomada de decisão, permitindo que agricultores planejem cultivos mais lucrativos e reduzam riscos financeiros.

Em complemento a esses achados, Ahmed e Shakoor (2025) apresentam uma revisão acerca da integração de tecnologias digitais na Agricultura 4.0, destacando distintas aplicações para monitoramento e mitigação da pegada de carbono na agricultura. Por meio de sensores acoplados em equipamentos agrícolas que permitem a coleta de dados em tempo real sobre variáveis ambientais, emissões de gases de efeito estufa e condições meteorológicas, torna-se possível reduzir o consumo de água, monitorar o nível de emissões dos maquinários e otimizar o uso de combustíveis (AHMED; SHAKOOR, 2025).

A análise de grandes volumes de dados possibilita a predição de safras, otimização de insumos e identificação de padrões climáticos. Segundo Ahmed e Shakoor (2025), algoritmos de ML podem analisar históricos climáticos e dados de solo para recomendar práticas agrícolas sustentáveis, como a aplicação precisa de fertilizantes, o que possibilita reduzir emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente. Ainda nesse contexto, a integração de dados de cadeias de suprimentos melhora a rastreabilidade e a logística, minimizando desperdícios.

Por outro lado, os modelos de IA e ML são empregados para tomada de decisão facilitando o processamento de informações localmente, gerando recomendações em tempo real para ajustes em irrigação ou adubação. Como resultado, a automação de máquinas agrícolas, como tratores que operam por GPS, reduz o consumo de combustível e emissões ao otimizar rotas durante as operações no campo (AHMED; SHAKOOR, 2025).

Da mesma forma, a robótica também viabiliza a colheita seletiva e a aplicação localizada de defensivos, diminuindo o uso de produtos químicos e fortalecendo a sustentabilidade. Sistemas baseados em nuvem armazenam e processam dados coletados por IoT, enquanto o *blockchain* é proposto para mercados de crédito de carbono, assegurando transparência (AHMED; SHAKOOR, 2025). Essa combinação apoia a gestão agrícola com dados auditáveis e modelos preditivos escaláveis.

Expandindo essa perspectiva, Mandal *et al.*, (2024) demonstram que a combinação de sensores, drones e veículos autônomos está viabilizando a transição da Agricultura 4.0 para a 5.0, esta última sendo considerada a próxima fase da agricultura, que representa uma integração mais equilibrada entre tecnologia e valores humanos (BISSADU; SONKO; HOSSAIN, 2025). Essa evolução tecnológica, conforme a literatura, pode permitir automatizar tarefas como

irrigação, colheita e manejo de culturas, com possíveis benefícios para a eficiência operacional e sustentabilidade ambiental (MANDAL *et al.*, 2024).

Os autores identificam que a IA e ML, com base na literatura analisada, são aplicados para analisar grandes volumes de dados coletados, identificando padrões que auxiliam na previsão de pragas, doenças e na recomendação de práticas agrícolas personalizadas. Como resultado, essa abordagem potencializa a produtividade ao mesmo tempo que aprimora a tomada de decisão orientada por dados, reduzindo riscos e desperdícios (MANDAL *et al.*, 2024).

No que tange aos drones, tem sido utilizado para mapeamento de lavouras, aplicação precisa de insumos e monitoramento da saúde das plantas. Dessa maneira, essa tecnologia proporciona eficiência operacional, reduzindo a necessidade de mão de obra manual e garantindo aplicações localizadas de fertilizantes e pesticidas, o que diminui custos e impactos ambientais (MANDAL *et al.*, 2024).

Similarmente, a robótica agrícola é empregada em tarefas como colheita, semeadura e controle de ervas daninhas, promovendo automação e precisão em operações que tradicionalmente demandam alto esforço humano. Um ponto importante é que esses sistemas robóticos, aliados a algoritmos de IA, são capazes de distinguir entre plantas cultivadas e invasoras, aplicando intervenções específicas e melhorando a eficiência no uso de recursos (MANDAL *et al.*, 2024).

Adicionalmente, tecnologias como *blockchain*, conforme já evidenciado, podem viabilizar a rastreabilidade, garantindo maior transparência e segurança na cadeia de suprimentos agrícolas. Ao efetuar o registro de dados desde o plantio até a distribuição, os *stakeholders* podem assegurar a qualidade e a origem dos produtos, atendendo às demandas de consumidores por informações confiáveis.

Já a *big data* integra informações de diversas categorias (climáticas, de solo e de mercado) em plataformas acessíveis, oferecendo suporte estratégico para os gestores no agronegócio. Essa integração facilita o planejamento e previsão de safras, a logística de distribuição e a adaptação a variações climáticas, reforçando a resiliência do setor (MANDAL *et al.*, 2024).

O estudo executado por Awais *et al.* (2023), destaca a aplicação de soluções digitais avançadas para análise e gestão do solo na Agricultura 4.0. Essas aplicações são empregadas

para superar as limitações dos métodos convencionais de análise de solo, que são lentos, custosos e pouco precisos. Também, destacam estudos que apontam o uso da IA e do ML para processar dados com potencial para prever a textura do solo e o teor de água de forma mais eficiente e com custos reduzidos.

Além disso, a automação desses processos reduz a necessidade de intervenção manual, tornando as operações agrícolas mais sustentáveis e menos suscetíveis a erros humanos, permitindo prever cenários futuros e adaptar práticas agrícolas de forma dinâmica (AWAIS *et al.*, 2023).

No mesmo contexto de inovações práticas, Vijayakumar *et al.*, (2023) destacam que sistemas de pulverização inteligentes, sistemas “*See-and-Spray*” ou “*Ver-e-Pulverizar*”, têm potencial de identificar e diferenciar ervas daninhas nas culturas agrícolas. A análise aponta que essa tecnologia pode reduzir o uso de herbicidas, já que os robôs pulverizam apenas áreas infestadas, o que, em tese, contribuiria para a sustentabilidade ambiental e a eficiência no uso de recursos, como mão de obra e insumos. A automação desses processos também melhora a rastreabilidade, pois os dados coletados podem ser armazenados e analisados para otimizar decisões futuras.

Hassan *et al.* (2021) reforçam a relevância da IA e do ML para análise preditiva e diagnóstico de estresses vegetais, o que permite intervenções precisas, reduzindo o uso excessivo de pesticidas e fertilizantes, gerando economia de custos e menor impacto ambiental. Sistemas automatizados de irrigação, baseados em dados, ajustam o fornecimento de água conforme a necessidade das plantas, promovendo eficiência no uso de recursos hídricos e evitando desperdícios. Além disso, a integração com plataformas de *big data* permite a análise histórica e a geração de *insights* para tomada de decisão estratégica.

A revisão destaca que drones, por meio de imagens térmicas e multiespectrais, podem auxiliar na avaliação da saúde das culturas, identificando variações espaciais no campo, como estresse hídrico ou infestação de pragas, permitindo a aplicação localizada de insumos (HASSAN *et al.*, 2021). Essa prática tende a aumentar a produtividade ao direcionar recursos apenas onde são necessários, além de facilitar a rastreabilidade da produção também reduzem a dependência de mão de obra humana, especialmente em operações repetitivas ou de larga escala.

O estudo de Kuska, Wahabzada e Paulus (2024) explora o potencial dos Grandes Modelos de Linguagem (LLMs), como o *ChatGPT* da *OpenAI*, na Agricultura 4.0, destacando

sua aplicação em quatro áreas principais: consultoria agrícola, documentação automatizada, educação técnica e interpretação de dados. De acordo com os autores, essas soluções digitais visam otimizar a gestão agrícola, tornando-a mais eficiente e acessível, especialmente para produtores com baixa disponibilidade de recursos humanos qualificados.

Na consultoria agrícola, os LLMs são utilizados para traduzir regulamentos complexos, como leis de proteção fitossanitária, em linguagem acessível, auxiliando os agricultores na conformidade legal e podendo favorecer na adoção de práticas sustentáveis. Para documentação automatizada, os LLMs podem converter dados brutos de sistemas de gestão agrícola, como registros de maquinário ou monitoramento de safras, em relatórios estruturados (KUSKA; WAHABZADA; PAULUS, 2024). Isso agiliza a burocracia e facilita a análise histórica, apoiando a tomada de decisão baseada em dados e a redução de custos operacionais.

No aspecto educacional, os modelos geram tutoriais personalizados sobre técnicas agrícolas digitais, como o uso de sensores IoT ou drones para monitoramento de culturas. Essa capacitação democratiza o acesso à Agricultura 4.0, aumentando produtividade e eficiência no uso de recursos, como água e fertilizantes. Na interpretação de dados, os LLMs viabilizam transformar saídas complexas de algoritmos de ML (por exemplo, previsões de doenças em plantas) em recomendações acionáveis. Isso permite intervenções precisas, como aplicação localizada de pesticidas, reduzindo desperdícios e fortalecendo a automação de processos (KUSKA; WAHABZADA; PAULUS, 2024).

Agricultura 4.0, respaldada em tecnologias digitais, transforma a gestão agrícola ao aumentar a eficiência, reduzir impactos ambientais e viabilizar decisões precisas. Contudo, ainda existem obstáculos substanciais. Analisando os estudos, foi possível identificar barreiras ou desafios que obstruem sua plena adoção. Os problemas percebidos compreendem insuficiências estruturais, como infraestrutura de conectividade e interoperabilidade e, até aspectos culturais e organizacionais, técnicos, econômicos e regulatórios. De modo a sistematizar os principais desafios identificados nas pesquisas consultadas nesta RSL, apresenta-se o quadro 6, que sintetiza as barreiras mais recorrentes à adoção das inovações digitais no contexto agrícola atual.

Quadro 6 – Barreiras à Adoção das Tecnologias Digitais na Agricultura 4.0

Referência	Descrição dos Desafios Identificados
Hassan <i>et al.</i> (2021)	Falta de Capacitação Técnica dos Agricultores, Baixa Conectividade em Áreas Rurais, Alto Custo de Implementação Inicial, Privacidade e Segurança de Dados, Falta de Dados Espaciais

	de Alta Precisão, Complexidade na Integração de Tecnologias, Limitações Técnicas e Operacionais dos Sensores
Mohamed <i>et al.</i> (2021)	Custo Elevado das Tecnologias de Agricultura Inteligente, Baixa Acessibilidade para Pequenas Propriedades, Desafios Relacionados à Interoperabilidade e Integração de Sistemas, Escassez de Profissionais Qualificados no Campo
Lugonja <i>et al.</i> (2022)	Complexidade Técnica e Heterogeneidade dos Sistemas, Custos Elevados de Implementação, Falta de Infraestrutura Digital em Áreas Rurais, Resistência Cultural e Falta de Capacitação, Desafios de Segurança e Privacidade de Dados, Dependência de Condições Naturais Imprevisíveis, Falta de Políticas de Apoio e Subsídios
Awais <i>et al.</i> (2023)	Complexidade e Heterogeneidade dos Dados, Limitações das Técnicas Tradicionais, Desafios na Integração de IA e ML, Falta de Padronização e Interoperabilidade, Viabilidade Econômica e Acesso, Resistência à Mudança e Adoção de Novas Práticas
Alzubi e Galyna (2023)	Fragmentação dos Processos Agrícolas, Altos Custos de Investimento e Manutenção, Necessidade de Estrutura Cooperativa para Acesso Tecnológico, Exigência de Estrutura Computacional para Grandes Volumes de Dados, Interoperabilidade entre Dispositivos e Plataformas
Vijayakumar <i>et al.</i> (2023)	Limitações dos Sistemas Mecânicos de Controle de Plantas Daninhas, Desafios no Uso de Tecnologias, Dificuldades nos Sistemas de VC e ML, Problemas nos Sistemas de Pulverização, Custos e Acessibilidade de <i>Hardware</i>
Yousaf <i>et al.</i> (2023)	Fragmentação das Aplicações de IoT na Agricultura, Estágio Inicial das Tecnologias, Complexidade e Custo de Métodos Baseados em IA e ML, Falta de Pesquisa em Métodos Agrícolas Inovadores, Baixo Uso de Sistemas de Suporte à Decisão para Mudanças Climáticas
Mandal <i>et al.</i> (2024)	Falta de Conhecimento Técnico e Capacitação, Conectividade Limitada, Alto Custo de Implementação, Segurança e Privacidade dos Dados, Incompatibilidade e Padronização Limitada, Falta de Infraestrutura Básica, Complexidade na Análise de Dados
Kuska, Wahabzada e Paulus (2024)	Complexidade das Inovações Digitais, Baixa Interoperabilidade dos Modelos de IA, Dificuldade na Transferência Entre Regiões e Idiomas, Falta de Transparência e Confiança nos Dados Usados pelos LLMs, Alto Custo e Dependência de Grandes Empresas de Tecnologia, Ausência de Diretrizes e Padrões Globais, Acesso Limitado a Dados Agrícolas Abertos
Muhammed <i>et al.</i> (2024)	Acesso Limitado a Energia Sustentável, Disponibilidade e Custo de Hardware, Privacidade, Segurança e Questões Éticas, Escalabilidade e Confiabilidade, Falta de Padrões Comuns, Acesso e Qualidade dos Dados, Investimento de Capital Inicial, Design Centrado no Usuário
Ahmed e Shakoore (2025)	Interoperabilidade de Dados, Eficiência Energética dos Dispositivos, Custo de Implementação, Infraestrutura Limitada, Falta de Capacitação e Conhecimento Técnico, Volume e Diversidade de Dados (<i>big data</i>), Desigualdade no Acesso, Questões Éticas e de Privacidade
Ali <i>et al.</i> (2025)	Custo de Implementação de Tecnologias Baseadas em IA, Escassez de Dados de Qualidade e Acesso a Bancos de Dados Agrícolas, Resistência Cultural e Falta de Conhecimento Técnico, Desafios Relacionados à Interpretação de Resultados Gerados pela IA, Barreiras Regulatórias e de Propriedade Intelectual
Assimakopoulos <i>et al.</i> (2025)	Custos Iniciais Elevados, Complexidade Técnica e Necessidade de Treinamento, Falta de Infraestrutura Digital, Segurança e Privacidade de Dados, Resistência Cultural e Adaptação, Consumo de Energia, Falta de Políticas de Apoio

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A revisão sistemática evidenciou que a infraestrutura digital insuficiente constitui um dos principais obstáculos à adoção da Agricultura 4.0. Em áreas rurais, a baixa cobertura de redes móveis, a instabilidade no fornecimento de energia e o acesso limitado à *internet* de alta velocidade comprometem a adoção das tecnologias dependentes de conectividade, como sensores IoT, drones e soluções baseadas em nuvem e processamento em tempo real (LUGONJA *et al.*, 2022; MOHAMED *et al.*, 2021).

Acrescenta-se a isso a escassez de fontes de energia sustentável, como a energia solar, para alimentar dispositivos IoT, o que agrava a barreira técnica (MUHAMMED *et al.*, 2024), assim como a dificuldade de acesso a *hardware* avançado, como robôs agrícolas, em países em desenvolvimento (MOHAMED *et al.*, 2021).

Na perspectiva brasileira, uma pesquisa conduzida por Bolfe *et al.*, (2020), parceria entre Embrapa, Sebrae e INPE, identificou que quase metade dos produtores rurais (47,8%) relataram dificuldades ou falta de acesso à *internet* nas áreas rurais, o que reforça a limitação estrutural já destacada na literatura e impõe entrave para o contexto nacional.

Essa fragilidade infraestrutural é agravada pela fragmentação tecnológica no setor. A inexistência de padrões e o baixo nível de cooperação entre sistemas dificultam a integração de soluções, reduzindo sua eficácia operacional e, por consequência, a propensão dos agricultores à adoção dessas tecnologias digitais (YOUSAF *et al.*, 2023; MUHAMMED *et al.*, 2024; AHMED; SHAKOOR, 2025). Adicionalmente, os modelos de IA e ML enfrentam demandas técnicas elevadas, como a necessidade de grandes volumes de dados e de infraestrutura com alto poder computacional, além de enfrentarem desafios relacionados à interpretação dos resultados, o que pode limitar sua aplicabilidade em cenários reais (ALI *et al.*, 2025; AWAIS *et al.*, 2023).

O volume massivo de dados (*big data*) gerados por dispositivos IoT e IA exige infraestrutura tecnológica de alta capacidade para armazenamento e processamento, requisito que se apresenta como um desafio para agricultores que não dispõem de recursos técnicos ou financeiros adequados (ALZUBI; GALYNA, 2023). Além disso, a confiabilidade operacional dos sensores IoT pode ser comprometida por condições ambientais adversas, como umidade e variações extremas de temperatura, fatores que reduzem a exatidão das medições e limitam a eficácia das soluções tecnológicas em campo (MANDAL *et al.*, 2024; VIJAYAKUMAR *et al.*, 2023).

No aspecto humano e organizacional, a carência de capacitação técnica configura-se como barreira central à adoção das tecnologias digitais no campo. A complexidade de soluções digitais como IA, ML, IoT e análise de *big data* demandam competências especializadas, ainda pouco difundidas entre produtores e profissionais de extensão rural. A implantação dessas tecnologias pressupõe domínio de conhecimentos avançados, os quais grande parte dos agricultores, sobretudo os pequenos produtores, ainda não possuem (LUGONJA *et al.*, 2022).

Hassan *et al.* (2021) apontam que a falta de conhecimento tecnológico é a principal barreira entre os agricultores que vivem em áreas rurais, especialmente em países em desenvolvimento, onde essa limitação é muito comum devido à falta de educação, barreira esta que dificulta a adoção de sistemas inteligentes na agricultura, uma vez que exige treinamento específico e familiarização com as novas tecnologias.

Essa lacuna de competências alimenta a resistência à mudança e propicia a “ansiedade digital”, caracterizada pelo receio de usar tecnologias aliado à baixa autoconfiança (ALZUBI; GALYNA, 2023; ASSIMAKOPOULOS *et al.*, 2025). Em regiões com baixo grau de letramento digital, a desconfiança em relação aos benefícios das inovações tende a ser mais acentuada (MANDAL *et al.*, 2024).

Esses achados convergem com a realidade observada no Brasil. Na pesquisa de Bolfe *et al.*, (2020), revelou-se que os produtores enfrentam diferentes dificuldades relacionadas à adoção de tecnologias digitais. Entre os entrevistados na pesquisa, 40,9% afirmaram não saber qual tecnologia seria mais adequada para sua propriedade, enquanto 34,7% apontaram a falta de capacitação própria como obstáculo direto à adoção. Ademais, 25,6% relataram dificuldades em encontrar mão de obra qualificada para operar tais ferramentas, e 16,9% demonstraram dúvidas sobre os benefícios reais que essas tecnologias poderiam trazer ao campo. Essa falta de clareza e de orientação técnica reforça o distanciamento entre os avanços tecnológicos e a prática tradicional nas propriedades.

Os elevados custos de implantação representam outro entrave significativo. A aquisição de sensores IoT, drones e sistemas de IA é financeiramente inviável para grande parte dos pequenos e médios agricultores, restringindo a adoção em larga escala (ASSIMAKOPOULOS *et al.*, 2025; MANDAL *et al.*, 2024; AHMED; SHAKOOR, 2025). Ademais, a infraestrutura necessária para as práticas de Agricultura 4.0 (sensores, conectividade, plataformas em nuvem, entre outros recursos) envolve investimentos iniciais expressivos (LUGONJA *et al.*, 2022). Certas tecnologias, como “agricultura vertical” e “estufas inteligentes” implicam investimentos

recorrentes em fontes de energia e manutenção, o que se torna particularmente oneroso em regiões onde a infraestrutura básica apresenta deficiências (MUHAMMED *et al.*, 2024; MOHAMED *et al.*, 2021).

Bolfe *et al.*, (2020), constatou que 67,1% dos produtores destacaram o alto valor necessário para adquirir máquinas, equipamentos ou aplicativos como uma barreira significativa à adoção, seguido do custo elevado para contratação de prestadores de serviço qualificados (44%), e dos custos operacionais com manutenção e atualização tecnológica (35,7%). Esses fatores apontam para um cenário em que, mesmo reconhecendo os potenciais ganhos, muitos produtores hesitam em investir devido à relação custo-benefício percebida.

A inexistência de subsídios, incentivos fiscais ou políticas públicas voltadas à transformação digital no campo contribui para a demora na difusão dessas inovações no setor agrícola (LUGONJA *et al.*, 2022). A segurança e governança de dados também geram preocupações. Riscos como ataques cibernéticos, uso indevido de informações sensíveis e a ausência de regulamentações claras sobre propriedade de dados ampliam a desconfiança (ALI *et al.*, 2025; AHMED; SHAKOOR, 2025). A dependência de dispositivos conectados aumenta riscos de ciberataques, especialmente em sistemas de *Blockchain* e sensores (ASSIMAKOPOULOS *et al.*, 2025).

Os sistemas de agricultura inteligente são vulneráveis a ataques cibernéticos, e a proteção de dados sensíveis é uma preocupação crítica para os agricultores. Além disso, questões éticas, como o controle sobre os dados gerados e modelos de IA, ainda não estão bem resolvidas (MUHAMMED *et al.*, 2024). Por fim, a heterogeneidade dos sistemas agrícolas exige soluções customizadas, o que eleva custos e demanda suporte técnico especializado (LUGONJA *et al.*, 2022; MOHAMED *et al.*, 2021; MANDAL *et al.*, 2024).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo, ao investigar sistematicamente a aplicação de Inteligência Artificial (IA) e *Machine Learning* (ML) na Agricultura 4.0, buscou compreender, de maneira integrada, como tais tecnologias vêm contribuindo para a otimização da gestão agrícola. Os resultados obtidos sugerem que, quando aplicadas de forma estratégica e combinadas a outras ferramentas digitais, IA e ML podem melhorar a eficiência operacional, aumentar a produtividade, aprimorar a tomada de decisão baseada em dados e fomentar práticas mais sustentáveis.

Em resposta direta ao objetivo geral da pesquisa, apresentado na introdução, os achados demonstram que as soluções de IA e ML transformam os processos de gestão na Agricultura 4.0 ao integrarem monitoramento em tempo real, automação e análise preditiva, gerando valor em eficiência operacional (por meio da otimização de recursos), decisão estratégica (com suporte a dados assertivos) e sustentabilidade (reduzindo impactos ambientais). Essa transformação, confirmada pela revisão sistemática, reforça a necessidade de uma abordagem integrada para superar os desafios identificados e maximizar os benefícios no contexto agrícola brasileiro.

Essas constatações alinham-se aos objetivos iniciais da pesquisa, confirmando que as soluções digitais analisadas têm potencial para transformar a gestão no campo. Além disso, o estudo contribui para a literatura ao sistematizar diferentes perspectivas teóricas e oferecer *insights* para gestores e agricultores interessados em adotar tecnologias inteligentes.

No entanto, a pesquisa também identificou desafios que limitam a adoção dessas soluções: custos iniciais elevados, infraestrutura digital inadequada, falta de mão de obra qualificada, dificuldades de integração tecnológica e resistência à mudança. Esses obstáculos mostram que a transformação digital no agronegócio não depende apenas da disponibilidade tecnológica, e sim de um ecossistema favorável, incluindo políticas públicas, capacitação, investimentos em conectividade e modelos de negócios inclusivos para produtores de diferentes portes.

Embora a literatura tenha identificado benefícios consistentes, há lacunas de pesquisa a serem exploradas, sobretudo no que diz respeito a estudos empíricos aplicados em realidades agrícolas brasileiras. Os indícios apontam que o potencial transformador da IA e do ML está condicionado a fatores contextuais, como perfil do produtor, estrutura da propriedade, nível de conectividade e capacidade de análise de dados, o que sugere abordagens adaptadas a diferentes cenários.

Cabe ressaltar, entretanto, que os resultados aqui apresentados estão condicionados às bases de dados utilizadas e ao período temporal delimitado, o que configura uma limitação desta pesquisa. Desse modo, os achados refletem a produção científica recente, sem abranger estudos empíricos em maior profundidade, especialmente no cenário brasileiro.

Para futuras pesquisas, propõe-se três direções principais: a realização de estudos de caso comparativos em propriedades brasileiras para testar a viabilidade econômica em diferentes escalas; análises abrangentes de custo-benefício que incorporem dimensões

produtivas, sociais e ambientais e; pesquisas acerca de modelos de negócio inclusivos, como cooperativas tecnológicas, para ampliar o acesso a essas tecnologias.

Constata-se, a partir da reflexão crítica desenvolvida, que a Agricultura 4.0 não se restringe a um conjunto de ferramentas tecnológicas, mas configura um novo paradigma de gestão agrícola. A superação dos desafios identificados pressupõe a cooperação entre esferas públicas, privadas e acadêmicas, bem como investimentos direcionados à capacitação e à infraestrutura. Portanto, a plena realização do potencial da IA e do ML na agricultura exigirá uma colaboração entre diferentes setores e uma adaptação às particularidades regionais.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, Rabiya; MARTINEZ, Pablo; AHMAD, Rafiq. The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0. **Smart Agricultural Technology**, v. 2, p. 100042, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042>.
- ALBIERO, Daniel *et al.* Agriculture 4.0: a terminological introduction. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 51, Special Agriculture 4.0, e20207737, 2020. DOI: 10.5935/1806-6690.20200083.
- ALCANTARA, Isabela Romanha de *et al.* Agriculture 4.0: origin and features in the world and Brazil. **Quaestum**, Piracicaba, v. 2, e26750564, 2021. DOI: 10.22167/2675-441X-20210564.
- ALI, Z. *et al.* Artificial Intelligence for Sustainable Agriculture: A Comprehensive Review of AI-Driven Technologies in Crop Production. **Sustainability**, v. 17, n. 5, p. 2281, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su17052281>>.
- ALZUBI, A. A.; GALYNA, K. Artificial Intelligence and Internet of Things for Sustainable Farming and Smart Agriculture. **IEEE Access**, v. 11, p. 78686–78692, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3298215>>.
- AHMAD, Latief; NABI, Firasath. **Agriculture 5.0**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2021. E-book. ISBN 978-1-003-12543-3.
- AHMED, N.; SHAKOOR, N. Advancing agriculture through IoT, Big Data, and AI: A review of smart technologies enabling sustainability. **Smart Agricultural Technology**, v. 10, p. 100848, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100848>>.
- ASSIMAKOPOULOS, F. *et al.* AI and Related Technologies in the Fields of Smart Agriculture: A Review. **Information**, v. 16, n. 2, p. 100, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/info16020100>>.
- AWAIS, M. *et al.* AI and machine learning for soil analysis: an assessment of sustainable agricultural practices. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 10, n. 90, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40643-023-00710-y>>.
- ATES, Melda Güliz; SAHIN, Yıldız. Evaluation of Industry 4.0 applications for agriculture using AHP methodology. **Kocaeli Journal of Science and Engineering**, Kocaeli, v. 4, n. 1, p. 39-45, 2021. DOI: 10.34088/kjose.768344.
- ATTRI, Ishana; AWASTHI, Lalit Kumar; SHARMA, Teek Parval. Machine learning in agriculture: a review of crop management applications. **Multimedia Tools and Applications**, v. 83, p. 12875–12915, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-023-16105-2>.
- BAL, F.; KAYAALP, F. Review of machine learning and deep learning models in agriculture. **International Advanced Researches and Engineering Journal**, v. 5, n. 2, p. 309-323, 2021. DOI: 10.35860/iarej.848458.

BARBOSA, Carlos. Agro 4.0 na prática: o campo na era da transformação digital. **Revista Cultivar**, 19 nov. 2021. Disponível em: <<https://revistacultivar.com.br/artigos/agro-4.0-na-pratica:-o-campo-na-era-da-transformacao-digital>>. Acesso em: 26 mar. 2025.

BERTOGLIO, Oscar; SEHNEM, Simone. Industry 4.0 in the context of agribusiness: a systematic literature review. **Procedia Computer Science**, v. 232, p. 107-116, 2024. DOI: 10.1016/j.procs.2024.01.011.

BISSADU, Kossi Dodzi; SONKO, Salleh; HOSSAIN, Gahangir. Society 5.0 enabled agriculture: drivers, enabling technologies, architectures, opportunities, and challenges. **Information Processing in Agriculture**, v. 12, p. 112–124, 2025. DOI: 10.1016/j.inpa.2024.04.003.

BOLFE, É. L.; MASSRUHÁ, S. M. F. S. A transformação digital e a sustentabilidade agrícola. **Agroanalysis**, Rio de Janeiro, v. 40, n. 3, p. 32-34, 2020.

BOLFE, É. L. et al. **Tendências em agricultura digital: resultados do levantamento on-line**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. 104 p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/informatica-agropecuaria/busca-de-noticias/-/noticia/51558430/embrapa-sebrae-e-inpe-realizam-levantamento-on-line-sobre-tendencias-em-agricultura-digital>>. Acesso em: 27 jul. 2025.

BORBA, M. C. *et al.* Gestão no meio agrícola com o apoio da inteligência artificial: uma análise da digitalização da agricultura. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 15, n. 3, e9337, 2022. DOI: 10.17765/2176-9168.2022v15n3e9337.

BOTERO-VALENCIA, Juan *et al.* Machine learning in sustainable agriculture: systematic review and research perspectives. **Agriculture**, Basel, v. 15, n. 4, p. 377, 2025. DOI: 10.3390/agriculture15040377.

CEPEA. **PIB do agronegócio brasileiro**. Piracicaba: ESALQ/USP, 9 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.cepea.org.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Acesso em: 11 maio 2025.

CIOFFI, Raffaele *et al.* Artificial intelligence and machine learning applications in smart production: progress, trends, and directions. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 2, p. 492, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12020492>.

COLIZZI, Lucio *et al.* Artificial intelligence and IoT for water saving in agriculture: a systematic review. **Smart Agricultural Technology**, v. 11, p. 101008, 2025. DOI: 10.1016/j.atech.2025.101008.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **Balanço 2024 e perspectivas 2025**. Brasília, 2024. Disponível em: <<https://cnabrasil.org.br/storage/arquivos/pdf/Balanco2024-Perspectivas2025.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2025.

DIAS, Eduardo Mario *et al.* **Agro 4.0: fundamentos, realidades e perspectivas para o Brasil**. Rio de Janeiro: Autografia, 2023. ISBN 978-85-518-5052-7. Disponível em:

<<https://cnabrazil.org.br/storage/arquivos/DCPV/files/Agro4.0-livro.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2025.

ELBEHRI, A.; CHESTNOV, R. (eds.). **Digital agriculture in action – artificial intelligence for agriculture**. Bangkok: FAO; ITU, 2021. DOI: 10.4060/cb7142en.

FACHIN, Ricardo. Agricultura 4.0: revolução tecnológica no campo. **Revista Cultivar**, 25 jun. 2018. Disponível em: <<https://revistacultivar.com.br/artigos/agricultura-4-0-revolucao-tecnologica-no-campo>>. Acesso em: 26 mar. 2025.

FASCIOLO, Benedetta; PANZA, Luigi; LOMBARDI, Franco. Exploring the integration of Industry 4.0 technologies in agriculture: a comprehensive bibliometric review. **Sustainability**, v. 16, n. 20, p. 1-20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16208948>.

FGV. **Cadernos Agronegócio**. Rio de Janeiro: FGV Projetos, ano 14, n. 36, mar. 2019. Disponível em: <<http://www.fgv.br/fgvprojetos>>. Acesso em: 22 mar. 2025.

FGV AGRO. **Inteligência artificial e novas tecnologias aplicadas à excelência e gestão no agronegócio**. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 2025.

GABRIEL FILHO, Oscar. **Inteligência artificial e aprendizagem de máquina: aspectos teóricos e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2023. Disponível em: https://storage.blucher.com.br/book/pdf_preview/PDF_ia.pdf. Acesso em: 22 mar. 2025.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p. 57–73, 2019. DOI: 10.21728/logcion.2019v6n1.p57-73.

GORNI NETO, Fernando. Gestão do agronegócio 4.0. In: GARCIA, Solimar (org.). **Gestão 4.0 em tempos de disrupção**. São Paulo: Blucher, 2020. p. 190-209. DOI: 10.5151/9786555500059-09.

GYAMFI, Emmanuel Kojo *et al.* Agricultural 4.0 leveraging on technological solutions: study for smart farming sector. **University of Cincinnati**, 2024. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2401.00814v1>>. Acesso em: 9 jun. 2025.

HASSAN, S. I. *et al.* A Systematic Review on Monitoring and Advanced Control Strategies in Smart Agriculture. **IEEE Access**, v. 9, p. 32517–32548, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3057865>>.

KAUFMAN, Dora. **Desmistificando a inteligência artificial**. São Paulo: Autêntica, 2022. E-book. ISBN 978-65-5928-159-6.

KASHYAP, Abhishek *et al.* Artificial intelligence in agriculture: unveiling trends in supply-chain advancements. **Sustainable Futures**, v. 9, p. 100708, 2025. DOI: 10.1016/j.sftr.2025.100708.

KUSKA, M. T.; WAHABZADA, M.; PAULUS, S. AI for crop production – Where can large language models (LLMs) provide substantial value? **Computers and Electronics in**

Agriculture, v. 221, p. 108924, 2024. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108924>>.

LUGONJA, D. *et al.* Smart Agriculture Development and Its Contribution to the Sustainable Digital Transformation of the Agri-Food Sector. **Technical Journal**, v. 16, n. 2, p. 264–267, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.31603/tg-20210914162640>>.

MAFFEZZOLI, F. *et al.* Agriculture 4.0: a systematic literature review on the paradigm, technologies and benefits. **Futures**, v. 142, art. 102998, 2022. DOI: 10.1016/j.futures.2022.102998.

MANSOOR, Sheikh *et al.* Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: trends, challenges and future prospectives. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, 1587869, 2025. DOI: 10.3389/fpls.2025.1587869.

MANDAL, S. *et al.* Adaption of smart applications in agriculture to enhance production. **Smart Agricultural Technology**, v. 7, p. 100431, 2024. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100431>>.

MARKETS AND MARKETS. **Artificial Intelligence in Agriculture Market Size & Growth**. São Francisco, 22 out. 2024. Disponível em:
<<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/ai-in-agriculture-market-159957009.html>>. Acesso em: 6 abr. 2025.

MASSRUHÁ, S. M. F. S. *et al.* **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2020. Cap. 1.

MENDONÇA, Márcio *et al.* Inteligência artificial: fundamentos, conceitos, aplicações e tendências. In: SILVA, Emerson Ravazzi Pires da; GONÇALVES, Janaína Fracaro de Souza; GODOY, Wagner Fontes (org.). **Ciência, tecnologia e inovação: experiências, desafios e perspectivas 3**. Cornélio Procópio: UTFPR, 2023. cap. 4. Disponível em:
<<https://atenaeditora.com.br/catalogo/download-post/75570>>. Acesso em: 29 mar. 2025.

MOHER, D. *et al.* Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses (PRISMA) statement. **Annals of Internal Medicine**, v. 151, n. 4, p. 264–269, 2009. DOI: 10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00135.

MOHAMED, E. S. *et al.* Smart farming for improving agricultural management. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v. 24, p. 971–981, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.08.007>>.

MONTENEGRO, Marcelo; DOLCE, Julia (org.). **Atlas dos agrotóxicos: fatos e dados do uso dessas substâncias na agricultura**. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll, 2024. 68 p. ISBN 978-65-87665-17-7. Disponível em: <<https://br.boell.org/publicacoes>>.

MUHAMMED, D. *et al.* Artificial Intelligence of Things (AIoT) for smart agriculture: A review of architectures, technologies and solutions. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 228, p. 103905, 2024. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103905>>.

MUNZ, J. *et al.* Digital transformation at what cost? **Smart Agricultural Technology**, v. 9, p. 100585, 2024.

NEVES, Fabiano. **Agricultura 4.0 – a produção digital e o novo modelo de negócio agrícola (5º CEDIT)**. Palestra ministrada no 5º Ciclo de Estudos Dados, Informação e Tecnologia (CEDIT), promovido pelo CoDAF – Competências Digitais para Agricultura Familiar, no dia 07 out. 2017, UNESP/Tupã. Disponível em: <https://youtu.be/efgd4yiWACQ>. Acesso em: 30 jul. 2025.

OECD. **The digital transformation of agriculture and food systems**. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **ONU estima que mundo terá 10,3 bilhões de pessoas em meados de 2080**. ONU News, 7 abr. 2025. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2025/04/1847096>. Acesso em: 11 mai. 2025.

PAVINATO, Aurélio. Agribusiness: challenges and opportunities in 2025. **Revista Cultivar**, 25 fev. 2025. Disponível em: <https://revistacultivar.com/articles/agribusiness-challenges-and-opportunities-in-2025>. Acesso em: 1 ago. 2025.

PEREIRA, Carlos D. Q.; DUTRA, Julio A. A. **O agronegócio 4.0: tecnologia como alternativa para aumentar produtividade e rendimento**. Jales: Fatec, 2022. Disponível em: https://www.fatecjales.edu.br/revista-agro/images/artigos/1a_edicao/volume10-2/agronegocio-4-0.pdf. Acesso em: 25 mar. 2025.

PICCOLO, E. A. *et al.* A inteligência artificial aplicada no agronegócio: uma revisão bibliográfica. **Contemporânea**, v. 4, n. 6, p. 1-19, 2024. DOI: 10.56083/RCV4N6-026.

PICALHO, E. N. M. F.; BARBOSA, C. C. M.; MEIRELLES, F. S. Aprimorando estratégias de busca: operadores booleanos na recuperação da informação científica. **Revista Informação em Pauta**, v. 8, n. 2, p. 210-226, 2023.

PRANCKUTĖ, Raminta. Web of Science (WoS) and Scopus: the titans of bibliographic information in today's academic world. **Publications**, Basel, v. 9, n. 1, p. 1–27, 2021. DOI: 10.3390/publications9010012.

PWC. **Sizing the prize: what's the real value of AI for your business and how can you capitalise?** Londres, 2017. Disponível em: <https://www.pwc.com/gx/en/issues/analytics/assets/pwc-ai-analysis-sizing-the-prize-report.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2025.

QUEIROZ, D. M. D. *et al.* (orgs.). **Agricultura digital**. 2. ed. atual. e ampl. São Paulo: Oficina de Textos, 2022. ISBN 978-65-86235-37-1.

RUSSELL, Stuart; NORVIG, Peter. **Inteligência artificial: uma abordagem moderna**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

SAATH, Kleverton Clovis de Oliveira; FACHINELLO, Arlei Luiz. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia**

Rural, v. 56, n. 2, p. 195-212, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201>.

SEBRAE. **A inteligência artificial (IA) já chegou ao agronegócio**. Brasília, nov. 2021. Disponível em: <https://polosebraeagro.sebrae.com.br/wp-content/uploads/2023/03/11_2021.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2025.

SHEPHERD, M. *et al.* Data-driven agriculture: pathways toward the agriculture of decision. **Agricultural Systems**, v. 167, p. 1-8, 2018.

SILVA, Janaína Cabral da. **Ensaio sobre investimento direto estrangeiro: determinantes e efeitos sobre a indústria brasileira**. 2020. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. DOI: 10.14393/ufu.te.2020.177.

SILVA, Leonardo França da *et al.* Agricultura 4.0 – inovação, conceito e aplicações. **Meio ambiente: agricultura, desarrollo y sustentabilidad**, cap. 1, 2023.

SORDI, V. F.; VAZ, S. C. Os principais desafios para a popularização de práticas inovadoras de agricultura inteligente. **Revista Desenvolvimento em Questão**, ano 19, n. 54, p. 204-217, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.21527/2237-6453.2020.54.204-217>.

SPONCHIONI, G. *et al.* The 4.0 revolution in agriculture: a multi-perspective definition. XXIV Summer School “Francesco Turco” – **Industrial Systems Engineering**, p. 143-149, 2019.

TRABELSI, M. *et al.* Unleashing the value of artificial intelligence in the agri-food sector: where are we? **British Food Journal**, v. 125, n. 13, p. 482-515, 2023. DOI: 10.1108/BFJ-11-2022-1014.

VIJAYAKUMAR, V. *et al.* Smart spraying technologies for precision weed management: A review. **Smart Agricultural Technology**, v. 6, p. 100337, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100337>>.

YOUSAF, A. *et al.* Artificial intelligence-based decision support systems in smart agriculture: Bibliometric analysis for operational insights and future directions. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, p. 1053921, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1053921>>.