



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Evolution of precision agriculture: a review

Fernando Antonio Marçal Garcia^{12*}, Maria do Socorro Bezerra de Araujo³, Antonio Celso de Sousa Leite³⁴, Rodolfo Cavalcanti Garcia⁵⁶, Josicleda Domiciano Galvêncio⁷

¹Universidade Federal de Pernambuco, Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Linha de Pesquisa Geoambiental, Rua Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Cidade Universitária, 50740-530, Recife, PE, Brasil, <https://orcid.org/0000-0003-0461-0431>; ²Tribunal de Justiça de Pernambuco, Núcleo de Sustentabilidade Ambiental, Av. Martins de Barros, 593, 5º andar, Santo Antonio, 50010-230, Recife, PE, Brasil, e-mail: fernando.garcia@ufpe.br; ³Universidade Federal de Pernambuco, <https://orcid.org/0000-0002-1843-4814>, ⁴Instituto Federal do Piauí, Professor EBTT, Instituto Federal do Piauí, Campus Teresina Central, Centro, 64000-040, Teresina, PI, Brasil, e-mail: antonio.celso@ufpe.br; ⁵Cesar School, Mestrando em Engenharia de Software, Linha de Pesquisa Sistemas Big Data, Av. Cais do Apolo, 77, Recife Antigo, 50030-220, Recife, PE, Brasil, <https://orcid.org/0009-0001-4830-720X>; ⁶CI&T Company, Estrada Giuseppina Vianelle, 1455, Bloco C – Polo II Alta Tecnologia, 13086-530, Campinas, SP, Brasil, e-mail: rodolfovcgarcia@gmail.com; ⁷Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Ciências Geográficas, Linhas de Pesquisas Geoambientais, Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, Laboratório SERGEO, Rua Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Cidade Universitária, 50740-530, Recife, PE, Brasil, e-mail: josicleda.galvencio@ufpe.br, <https://orcid.org/0000-0001-7367-6587>.

Artigo submetido em 04/06/2024 e aceite em 01/12/2024

ABSTRACT

Population growth implies a global demand for food, imposing the search for greater efficiency in global agricultural production, given the trend of limited natural resources and high environmental impacts. Precision agriculture has been evolving as a promising solution, expanding real-time control and monitoring of the variables involved in the efficient and high-quality development of planting, transportation, storage and business management, based on predictive analyses, supported by statistical methods and business intelligence and artificial intelligence techniques. These tools use the processing of this information to optimize decisions and pricing. However, the adoption of precision agriculture still faces significant barriers, such as high cost, lack of data standardization across the various devices used, technical complexity and the need for training. Public policies to promote it are still insufficient, hindering its widespread use by producers, especially in developing countries. New technologies, such as more secure communication networks, industrial standardization, nanotechnology, biotechnology and deep machine learning algorithms have increased the efficiency in mapping and inferring agricultural variables. Methods such as variable rate application regulate the use of inputs and agrochemicals, helping to minimize the environmental impact resulting from agricultural activity. This article provides a comprehensive analysis of precision agriculture, analyzing its evolution, its usuals components, stakeholders involved in its development, public policies applied, benefits and challenges faced, helping in its understanding and dissemination. It analyzes future trends and advances in research, highlighting its potential to influence more sustainable agricultural practices, helping to reduce the environmental impacts resulting from the advance on biomes that are still preserved.

Keywords: Digital agriculture, agtech, technological innovation, environmental impact, sustainability.

Evolução da agricultura de precisão: uma revisão

RESUMO

O crescimento populacional implica em demanda global por alimentos, impondo a busca de maior eficiência na produção agrícola mundial, diante da tendência de recursos naturais limitados e altos impactos ambientais. A agricultura de precisão vem evoluindo como uma solução promissora, ampliando o controle e monitoramento em tempo real das variáveis envolvidas no desenvolvimento eficiente e de qualidade do plantio, do transporte, estocagem e gestão de negócios, baseada em análises preditivas, suportadas por métodos estatísticos e técnicas de *business intelligence* e inteligência artificial. Estas ferramentas utilizam o tratamento destas informações para otimizar decisões e precificação. Entretanto, a

adoção da agricultura de precisão ainda enfrenta barreiras significativas, como alto custo, falta de padronização de dados nos diversos dispositivos utilizados, complexidade técnica e necessidade de capacitação. Políticas públicas de fomento ainda são insuficientes, dificultando sua ampla utilização pelos produtores, principalmente em países em desenvolvimento. Novas tecnologias, como redes de comunicação mais seguras, padronização industrial, nanotecnologia, biotecnologia e algoritmos de aprendizado profundo de máquina têm aumentado a eficiência no mapeamento e inferência das variáveis agrícolas. Métodos como aplicação em taxa variável regulam uso de insumos e agroquímicos, contribuindo para minimizar impacto ambiental decorrente da atividade agrícola. Neste artigo uma análise abrangente da agricultura de precisão é realizada, analisando sua evolução, seus componentes usuais, atores participantes de seu desenvolvimento, políticas públicas aplicadas, benefícios e desafios enfrentados, auxiliando em sua compreensão e disseminação. Analisa tendências futuras e avanços em pesquisas, destacando seu potencial para influenciar práticas agrícolas mais sustentáveis, colaborando para minoração dos impactos ambientais decorrentes no avanço sobre biomas ainda preservados. Palavras-chave: Agricultura digital, agtech, inovação tecnológica, impacto ambiental, sustentabilidade.

Introdução

Com o crescimento da população mundial nas últimas décadas, vários desafios associados precisam ser enfrentados, dentre eles, a crescente demanda mundial por alimentos (FAO-STAT, 2023; Khose e Mailapalli, 2024). Neste contexto, produtores mundiais de alimentos têm avaliado alternativas, disponibilizadas no mercado, para aumentar a eficiência da produtividade por hectare, para sustentabilidade da atividade. A agricultura de precisão, ou simplesmente AP (Gill e Chawla, 2021) adquiriu relevância por apresentar resultados na melhoria da gestão do negócio (Kim, 2023), monitoramento e otimização de recursos e variáveis envolvidas no processo (Chintakunta et al., 2023; Talaat, 2023), como condições do solo, água e clima, insumos e defensivos agrícolas, custos e previsões de produção, em todas as fases do plantio (colheita, transporte, armazenagem e comercialização). AP faz uso de modernas tecnologias industriais (Bazargani e Deemyad, 2024) e computacionais (Li et al., 2023; Saranya et al., 2023; Krishnababu et al., 2024) para compor sua solução, sem perder a possibilidade de integração com novos recursos e sistemas, inerentes ao negócio (Kumar e Bargavi, 2024; Maurya et al., 2024). Ela demonstra que sua importância para o setor está diretamente ligada à necessidade de modernização das áreas produtivas, especialmente em regiões onde os métodos tradicionais prevalecem, mas carecem de aumento da produção em escala, com minimização de custos e impactos ambientais (Rennings et al., 2024).

Em países desenvolvidos, a adoção de aplicativos de precisão para gerenciamento das culturas tem mostrado benefícios claros em termos de redução de custos operacionais, aumento da produtividade por hectare, além de mitigação de impactos ambientais negativos (Melzer et al., 2023). Entretanto, em países em desenvolvimento, a implementação da AP ocorre em percentuais

menores, concentrada nos grandes produtores, com pequenos e médios produtores, em percentuais menores e variados, dependendo da região agrícola. Estes enfrentam desafios significativos, incluindo altos custos de aquisição, falta de infraestrutura tecnológica, baixa capacitação dos agricultores, adequação de políticas públicas de apoio e escassez de fomento para formação de cadeia de fornecedores (Huang, 2023).

Atualmente, o setor agrícola baseia-se em duas tendências: Competitividade, em termos de produtividade, com qualidade dos produtos a preços competitivos (Ezziyyani et al., 2023; Maurya et al., 2024); e eficiência, expressa na otimização dos custos de produção (Abobatta, 2021; Radhika e Masood, 2022), impactando na redução dos danos ambientais, premissa cada vez mais exigida pelos mercados consumidores como tendência em escala global.

De acordo com Kendall et al. (2022), uma das principais barreiras para a implementação da AP em larga escala é a falta de padronização das tecnologias disponíveis, o que dificulta a integração de diferentes sistemas, aumentando os custos de implementação. Além disso, a carência de infraestrutura tecnológica, como conectividade de internet em áreas rurais, limita a eficiência das soluções baseadas em IoT, big data e aplicativos móveis, restringindo o potencial da AP em contextos de pequenos e médios produtores (Mitchell et al., 2021).

Diversos trabalhos publicados na literatura (Misara et al., 2022; Gawande et al., 2023; Khose e Mailapalli, 2024), tem ressaltado a importância de se avaliar os resultados obtidos com implementação de AP sobre os danos ambientais causados pela atividade agrícola. De maneira geral, o aumento da produtividade agrícola ainda ocorre pela ampliação das áreas de cultivo, impactando biomas diversos, com graves danos ambientais.

Embora as tecnologias de AP estejam avançando rapidamente, há uma lacuna significativa na adoção dessas soluções em nível global. Pequenos e médios agricultores, que representam a maioria dos produtores em muitas regiões, frequentemente não têm interesse na solução, facilidade de acesso ou capacidade financeira para implementar essas tecnologias, devido a barreiras de custos, falta de conhecimento técnico, falta de suporte local, políticas regulatórias e de financiamento inadequadas, dentre outras questões (Mizik, 2023; Nguyen et al., 2023). A centralização do desenvolvimento de AP em grandes produtores acentua as desigualdades no setor agrícola, limitando o potencial de transformação da AP como uma solução global.

Esse cenário tem estimulado os esforços alocados por diversas entidades, visando realização de novas pesquisas e desenvolvimento de bases tecnológicas, com pessoal especializado, visando fortalecer nos mercados produtores mundiais a ampliação da implementação da agricultura de precisão (Gawande et al., 2023).

A proposta central deste trabalho é disponibilizar uma fonte de consulta detalhada, propiciando o conhecimento aprofundado das diversas questões que envolvem a AP, por parte de pesquisadores, especialistas, profissionais e demais atores, envolvidos na disseminação, desenvolvimento e implementação da solução de AP, para que facilite a ampliação da discussão sobre o estado atual da solução nos diversos mercados usuários, demonstrando seu potencial, através dos benefícios disponibilizados, desafios para tropicalização e integração com sistemas legados, as perspectivas futuras, com inovações tecnológicas que estão ou serão incorporadas. Além disso, fornece informações relevantes sobre fatores pouco ainda enfatizados em outros trabalhos de revisão, publicados na literatura, como a questão regulatória, as empresas fabricantes e os diversos tipos de aplicativos, a situação de políticas de fomento e financiamento, ressaltando seu papel para o crescimento da produção agrícola, contribuindo para minoração dos danos ambientais da atividade agrícola.

Este trabalho também procura estimular novas pesquisas para preencher lacunas na literatura, como a falta de estudos que abordem a real contribuição da AP, para a redução da necessidade de expansão de áreas agrícolas, ao tempo que procura responder, através dos diversos

relatos e experimentos narrados nos artigos revisados, se realmente a AP poderá contribuir para aumento da produção mundial, minimizando impactos ambientais.

Por se tratar de uma solução que envolve integração de tecnologias de diversas áreas do conhecimento, a AP deve ser subsidiada de constantes publicações especializadas que contextualizem, de forma transparente e atualizada sua evolução, abstraindo a complexidade de seu desenvolvimento, melhorando a compreensão de seus componentes constituintes, as implicações legais para sua implantação e operação nos mais variados processos produtivos, além de clarificar os ganhos que podem ser obtidos pela otimização de produtividade por hectare plantado, a redução dos custos envolvidos, flexibilidade de roteiro de culturas, e melhor gerenciamento de danos ambientais, aumentando a qualidade nutricional e segurança alimentar aos consumidores, com sustentabilidade ao empreendimento.

Outro foco importante deste estudo é estimular agtechs locais para o desenvolvimento de soluções modulares, de menor complexidade e custos, que sejam mais acessíveis e compreensíveis para pequenos e médios produtores. Essa abordagem modular pode permitir uma adaptação mais rápida e eficaz às diferentes condições regionais, facilitando a entrada da AP em nichos que hoje são plenamente atendidos pelas soluções tradicionais. Pequenos e médios produtores são responsáveis por uma parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa, contaminação por poluentes agrotóxicos, causadores de danos ambientais.

Por fim, o estudo visa demonstrar a necessidade de reformulação de políticas de financiamento e fomento direcionadas a mercados locais, por parte de autoridades e entidades formuladores dessas estratégias, estimulando a criação ou fortalecimento de base tecnológica sólida e promissora, enaltecendo a importância da disseminação dos aplicativos de AP em todos os segmentos agrícolas produtivos, como estratégia de aumento da riqueza para países, uma ferramenta de preservação ambiental, contribuindo para a redução dos impactos negativos da agricultura nos ecossistemas envolvidos. A disseminação e evolução da AP dependem de um esforço conjunto de pesquisadores, agtechs (Singh e Kapoor, 2024), governos e produtores, de forma a transformar a

agricultura em uma atividade mais eficiente, sustentável e inclusiva.

Material e métodos

Para elaboração deste artigo foi realizada ampla busca e análise de artigos de revisão da literatura, em artigos recentes ou similares, ou ainda, tratando sobre os elementos constituintes da solução de agricultura de precisão.

Coleta de dados

Os principais bancos de dados de produções científicas do Brasil e do exterior foram pesquisados, como em periódicos, Capes, Scielo, Google Acadêmico, Elsevier, IEEE – Xplore, Web of Science e Scopus, além de revistas especializadas em agricultura de precisão, agricultura digital. Também foram considerados tópicos relativos a instituições e entidades especializadas em políticas regulatórias e financiamento, fabricantes de componentes e empresas desenvolvedoras da solução de agricultura de precisão (AP), como agtechs (Brini, 2023) e fornecedores de serviços especializados, líderes no mercado, organizações agrícolas internacionais de fomento, tudo parametrizado no período dos últimos quatro anos, nos principais idiomas.

Critérios de seleção das pesquisas

Como premissas da pesquisa, foram adotados como critérios de inclusão: (a) artigos revisados por pares, com bons graus de relevância, que discutiram tecnologias e aplicações de AP; (b) publicações de estudos de caso que explanassem sobre aquisição e implementação de AP, em grandes países produtores agrícolas; (c) pesquisas ou boletins econômicos relacionados ao tema, que versavam sobre os impactos econômicos e ambientais da AP.

Desenvolvimento

Nas aplicações de soluções de agricultura de precisão, são considerados pelas empresas que as elaboram, as chamadas agtechs (Tabela 1), mecanismos e ferramentas estatísticas e computacionais, amplamente consolidadas no mercado. Fatores como complexidade de integração de diversos módulos constituintes, custos envolvidos, inovações decorrentes de pesquisa e inovação tecnológica (Figura 1).

Como critérios de exclusão foram considerados artigos que contivessem fontes de referências fora do parâmetro de buscas, ou promovessem abordagem superficial das soluções de AP.

Diversas expressões foram aplicadas nos atributos de busca das bases de pesquisas citadas: “digital farming”, “agricultura de precisão”, “agricultura 4.0”, “agtech”, “componentes AP”, “produtividade agrícola com agricultura de precisão”, “índices de vegetação”, “IoT na agricultura”, “sensores agrícolas”, “softwares agrícolas”, “soluções móveis agrícolas”, “inteligência artificial agrícola”, “sensoriamento remoto”, “drones agrícolas”, “computação embarcada na agricultura”, “regulamentação agrícola”, “redes sem fio na agricultura”, “financiamento agrícola”, “business intelligence na agrícola”, “big data na agricultura de precisão”, “riscos ambientais agrícolas”, “robótica na agricultura”, “computação distribuída na agricultura”, “blockchain na agricultura”, “selo verde”, “energia verde”, “danos ambientais na agricultura”, “tendências na agricultura”, dentre outras.

Procedimento de análise dados

O refinamento bibliográfico e busca avançada foi organizada utilizando-se a técnica PICO (Sousa et al., 2021). A ferramenta SciMAT (Cobo et al., 2012) foi aplicada para segmentar e classificar os arquivos selecionados pelos elementos da solução de AP. Por fim, as referências foram catalogadas com aplicativo Mendeley (2023). Foram gerados 278 artigos e 57 relatórios técnicos na sistemática acima. Ao final, após análise detalhada, 174 publicações foram selecionadas para produção desta revisão.

Levantamentos mostram que o mercado norte-americano investiu valores superiores a US\$ 2,36 bilhões, distribuídos em desenvolvimento e aperfeiçoamentos dos sistemas aplicativos (CEBDS, 2022), crescendo para US\$ 15,1 bilhões em 2020 (AgFunder,2022).

Os sistemas aplicativos de AP comumente ofertadas pelas diversas agtechs existentes no mercado contemplam módulos variados, como monitoramento remoto, controle de safras e riscos

considerando clima, doenças, produção, armazenamento e logística, rentabilidade (colheita, projeção de preços, mercado, bolsa de valores).

A constante evolução deste tipo de solução é decorrente de uma variedade de avanços tecnológicos alcançados pela indústria. Entre estas inovações importantes estão o aperfeiçoamento do sistema de posicionamento global (GPS), WebGIS, sensoriamento remoto (SR), banco de dados relacionais para grande quantidade de dados (big data), equipamentos robóticos, drones (UAV), sensores inteligentes, técnicas de tratamento de

taxas variáveis (VRT) com métodos de aprendizado de máquina (IA), dispositivos de IoT com sistemas embarcados, previsões e inferência de cenários para tomada de decisão com algoritmos de aprendizado profundo (DL), e mais recentemente, nanotecnologia e biotecnologia para melhoramento de insumos e agroquímicos utilizados.

Comparativamente, os resultados obtidos em produção agrícola utilizando AP é bastante significativo, em relação aos plantios tradicionais.

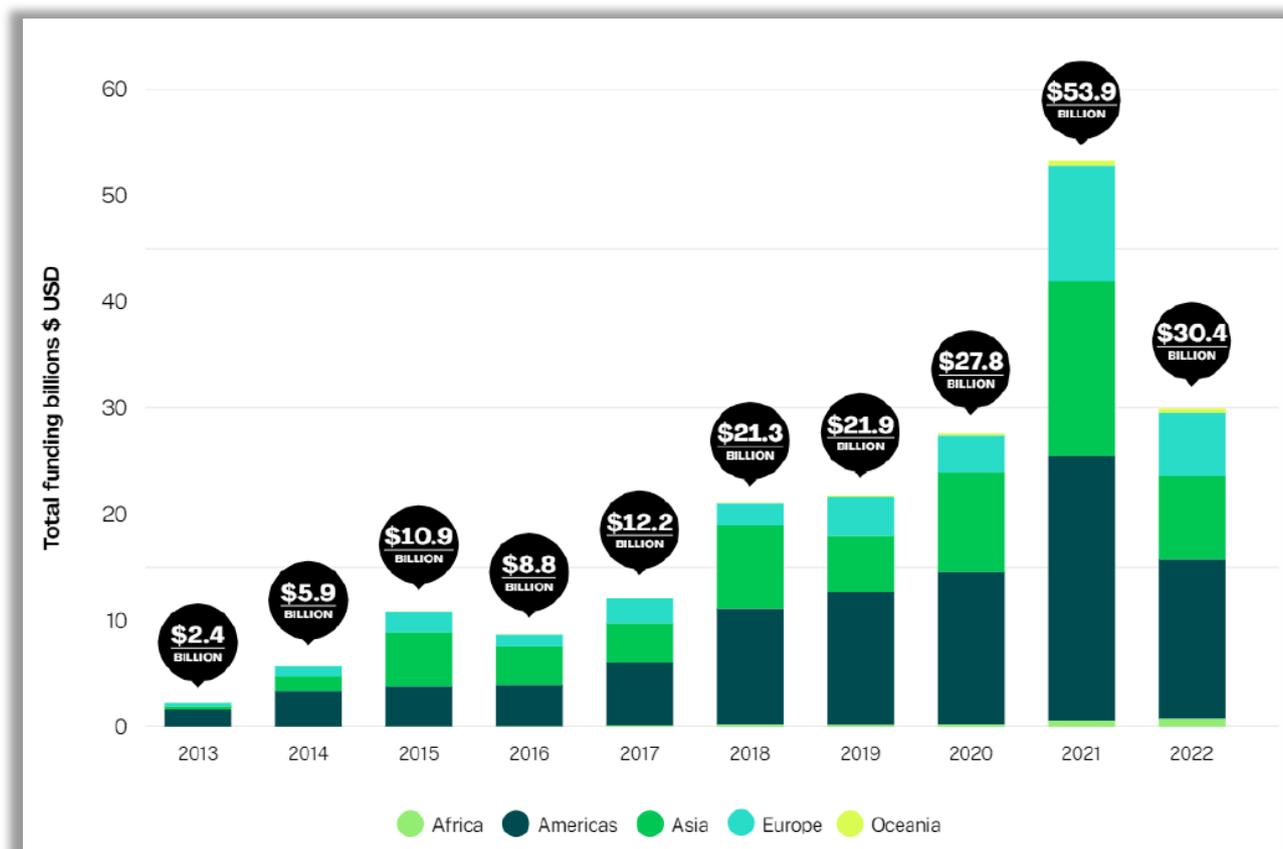


Figura 1: 10 anos de investimento em agtechs por região. Fonte: AgFunder (2022).

Dada a profusão e a complexidade das soluções tecnológicas existentes, esta revisão visa fornecer uma compreensão da estrutura básica da solução de agricultura digital, principais benefícios

Avanços tecnológicos com agricultura de precisão

O emprego de AP envolve o uso integrado de componentes apoiadas em tecnologia da informação e comunicação para coleta, tratamento

e desafios da agricultura de precisão com base em publicações recentes na literatura sobre o assunto.

e alocação de dados; automação robótica de equipamentos para operacionalização do plantio; tecnologia embarcada em sensores, satélites e drones, para tratamento, monitoramento e controle da produção. Estes sistemas aplicativos têm evoluído com incorporação de inovações

tecnológicas (Sott et al., 2021), sendo comumente denominadas de AgroTIC. Em uma revisão bibliográfica realizada por Ragazou et al. (2022), são relatados diversos casos de aumento de produtividade com auxílio de ferramentas de agricultura de precisão. As soluções disponibilizadas geralmente são modulares (Tabela 1), com funcionalidades voltadas para *planejamento do plantio* (análise de solo, água, cultura, clima), *aplicação e monitoramento* (correção do solo, aplicação de insumos, controle de pragas, irrigação setorial, todos a taxas variáveis), *resultados* (previsão de colheita, estimativa de perdas, mapeamento de produtividade, avaliação de qualidade, estocagem), e *previsão de receitas* (controle de custos *online*,

precificação e troca de produtos, em bolsas de produtos, como CBOT – Chicago/EUA, Rosário/Argentina e BM&F – São Paulo/Brasil). Em publicações na literatura, empresas como a Embrapa (2022) apresentam estudos de plantios realizados com AP, onde os resultados de produtividade da soja aumentaram em mais de 13%, atingindo 1,2 tonelada/hectare. Por fim, em outro estudo, da Universidade de Minnesota (U-Minn, 2022), plantações de milho atingiu e soja atingiram, respectivamente, 7,4% e 6,1% de produtividade de tonelada/hectare, utilizando aplicação de fertilizantes a taxa variável (VRT), comparativamente a outros plantios, com práticas agrícolas tradicionais na região.

Tabela 1: Agtechs de soluções de AP – Grandes produtores agrícolas. Fonte: Autores (2023).

Fabricante	País	Características	Funcionalidades ofertadas	Endereço eletrônico
Farm Works	USA	Gestão de plantações, gestão empresarial	Análise de mapas, dados de plantio/colheita, análise de dados coletados (solo, planta)	https://farmworks.com/
AgroSense	USA	Gestão de plantações, gestão empresarial	Análise e gestão de mapas, dados de sensores (solo, planta, plantas), transacionados por de big data e auxiliados por IA	https://www.agleader.com/
SMS	USA	Gestão de plantações, gestão empresarial	Mapas de análise, dados de sensores locais, análise de dados coletados (solo, planta)	https://www.agrosense.com/
AgDNA	USA	Gestão de plantações	Análise de mapas, dados de plantio/colheita	https://agdna.com/
Sentera	USA	Gestão de plantações	Análise e gestão de mapas, dados de sensores (solo, planta, plantas), transacionados por de big data e auxiliados por IA	https://sentera.com/
Farmers Edge	USA	Tomada de decisão, Geração, Plantio, Gestão empresarial	Gestão de insumos, análise de dados coletados (solo, planta), sistema de gestão agrícola de ponta a ponta	https://www.farmedge.ca/
Climate Corporation	USA	Tomada de decisão, Geração, Plantio, Gestão empresarial	Análise de mapas, gestão de insumos, análise de dados coletados, sistema de gestão agrícola, precificação, créditos de carbono	https://climate.com/
Granular Corteva	USA	Tomada de decisão, Geração, Plantio, Gestão empresarial	Análise de mapas, gestão de insumos, análise de dados coletados, sistema de gestão agrícola, logística, precificação, créditos de carbono	https://granular.ag/
Indigo Ag	USA	Tomada de decisão, Geração, Plantio, Gestão empresarial	Análise de mapas, gestão de insumos, análise de dados coletados, sistema de gestão agrícola de ponta a ponta, créditos de carbono	https://www.indigoag.com/

Conservis	USA	Monitoramento de plantio, sistema de gestão agrícola	de	Análise de mapas, gerenciamento de entradas, análise de dados coletados, sistema de gerenciamento agrícola de ponta a ponta	https://www.conserviscorp.com/
Agworld	USA	Monitoramento de plantio, sistema de gestão agrícola	de	Análise de mapas, gestão de insumos, análise de dados coletados, sistema de gestão agrícola de ponta a ponta, módulo de negociação, análise de riscos ao meio ambiente e ecossistemas	https://www.agworld.com/
FarmLogs	USA	Monitoramento de plantio, sistema de gestão agrícola assistido por Inteligência Artificial, equipamentos automatizados		Análise de mapas, gerenciamento de entradas, análise de dados coletados, sistema de gerenciamento agrícola de ponta a ponta	https://m.farms.com/agriculture-apps/crops/farmlogs
Raven	USA	Tomada de decisão, Plantio, Sistema de gestão empresarial assistido por Inteligência Artificial, Equipamentos automatizados		Análise de mapas, gestão de insumos, análise de dados coletados, sistema de gestão agrícola de ponta a ponta, módulo de negociação, análise de riscos ao meio ambiente	https://www.ravenind.com/
The Yield	USA	Monitoramento de plantio, sistema de gestão agrícola	de	Monitoramento de plantio, sistema de gestão agrícola, terceirização de equipamentos	https://www.theyield.com/
Blue River Technology	USA	Monitoramento de plantio, sistema de gestão agrícola	de	Monitoramento de plantio, sistema de gestão agrícola por VRT, IA (Aprendizado de Máquina)	https://www.bluerivertechnology.com/
John Deere	Europa	Equipamentos automatizados, plantação, sistema de gestão agrícola		Equipamentos de campo automatizados, mapas de análise, dados de sensores locais, sistema de gestão agrícola	https://www.deere.com/
Agrivi	Europa	Tomada de decisão, Geração, Plantio, Gestão empresarial		Gestão de insumos, análise de dados coletados (solo, planta, clima, doenças), sistema de gestão agrícola	https://www.agrivi.com/
CropX	Europa	Monitoramento de plantio, gestão	de	Gestão de insumos, análise de dados coletados (solo, planta, clima), sistema de gestão agrícola de ponta a ponta	https://www.cropx.com/
Kubota	Europa	Tomada de decisão, Geração, Plantio, Gestão empresarial		Gestão de insumos, análise de dados coletados (solo, planta, clima), sistema de gestão agrícola de ponta a ponta	https://www.kubota-eu.com/
Farmdok	Europa	Monitoramento de plantio, gestão	de	Gestão de insumos, análise de dados coletados (solo, planta), sistema de gestão agrícola de ponta a ponta	https://www.farmdok.com/
Agroptima	Europa	Plantio, gestão, monitoramento de dispositivos	de	Gestão de insumos, análise de dados coletados (solo, planta), sistema de gestão agrícola de ponta a ponta	https://www.agroptima.com/

Drone Ag	Europa	Plantio, monitoramento de dispositivos	gestão, de	Gestão de insumos, análise de dados coletados (solo, planta) com drones, sistema de gestão agrícola de ponta a ponta	https://www.dron eag.farm/
SenseFly	Europa	Plantio, monitoramento de dispositivos	gestão, de	Gestão de insumos, análise de dados coletados (solo, planta) com drones, análise de mapas, dados de plantio/colheita	https://www.sens efly.com/
Hórus Aeronaves	Brasil	Gestão de plantações		Mapas de análise, uso de drones, dados de sensores locais, dispositivos de monitoramento, previsão logística	https://horusaero naves.com/
AgroSmart	Brasil	Gestão de plantações		Mapas de análise, uso de drones, dados de sensores locais, dispositivos de monitoramento	https://agrosmart. com.br/
Strider Syngenta	Brasil	Tomada de decisão, Geração, Gestão empresarial	Plantio,	Gestão de insumos, análise de dados coletados (solo, planta), sistema de gestão agrícola de ponta a ponta, previsão de custos e vendas	https://www.strid er.ag/
Solinftec	Brasil	Tomada de decisão, Geração, Gestão empresarial	Plantio,	Monitoramento de plantio, gestão de insumos agrícolas, análise de dados coletados, sistema de gestão por IA, robótica, módulo de negociação	https://solinftec.c om/
Smartbreeder	Brasil	Plantio, monitoramento de dispositivos	gestão, de	Análise de mapas, monitoramento de plantio, gerenciamento de insumos agrícolas, análise de sistema de gerenciamento de dados coletados por IA de previsão	https://www.sma rtbreeder.com.br/
Geoinova	Brasil	Gestão de plantações		Análise de mapas, monitoramento de plantio, gerenciamento de insumos agrícolas, análise de dados coletados, sistema de gerenciamento por IA	https://geoinova. com.br/
Agronow	Brasil	Geração de tomada de decisão		Mapas de análise, dados, inteligência artificial, custos e previsão de vendas	https://www.agro now.com.br/
Sintecsys	Brasil	Monitoramento/gerenciamento de incêndio		Mapas de análise, dados, câmeras, inteligência artificial, custos e previsão de vendas	https://brazillab.o rg.br/
Drakkar	Brasil	Tomada de decisão, Geração, Gestão empresarial	Plantio,	Mapas de análise, dados, inteligência artificial, custos e previsão de vendas	https://www.drak kar.com.br/
Agrotools	Brasil	Plantio, gestão empresarial	gestão	Mapas de análise, dados, inteligência artificial, custos e previsão de vendas	https://agrotools. com.br/
Agribolo	Índia	Monitoramento/gerenciamento de incêndio		Mapas de análise, dados, câmeras, inteligência artificial, custos e previsão de vendas	https://www.aibo no.com/aibono
Crofarm	Índia	Tomada de decisão, Geração, Gestão empresarial	Plantio,	Mapas de análise, dados, câmeras, inteligência artificial, custos e previsão de vendas	https://www.crof arm.com/home

Beidahuang K. Seed	China	Plantio, gestão empresarial, sementes de precisão, sistema de gestão assistido por Inteligência Artificial, equipamentos automatizados	Sistemas de plantio assistidos por GPS e VRT (<i>Variable Rate Technology</i>). Análise de dados de solo e clima para recomendações de cultivares. https://beidahuan.com.cn
Meicai	China	Tomada de decisão, Geração, Plantio, Gestão empresarial	Análise de mapas, gerenciamento de entradas, análise de dados coletados, sistema de gerenciamento agrícola de ponta a ponta https://www.meicai.com/

A solução empregada na agricultura de precisão está relacionada ao tipo de cultivo, localização, condições ambientais, entre outros fatores. É importante ressaltar que práticas de agricultura de precisão muitas vezes exigem investimentos significativos em tecnologia e infraestrutura (Sanyaolu e Sadowski, 2024), o que pode aumentar os custos iniciais. Mas os benefícios de longo prazo da agricultura de precisão, incluindo aumento de produtividade e lucratividade, além da qualidade, muitas vezes superam esses custos (Hundal et al., 2023). A decisão do agricultor sobre o que controlar e gerenciar impacta na escolha da solução a ser adotada, tornando-se uma estratégia de negócios. Investimentos em pesquisa e inovação tecnológica implementados no desenvolvimento de soluções de AP direcionam os esforços das agtechs. A variada quantidade de aplicações voltadas para agricultura de precisão disponíveis no mercado, é resultante das diferentes funcionalidades requeridas pelo tipo e região de plantio, incluindo diferentes componentes tecnológicos (monitoramento remoto, controle de safra e riscos considerando clima, doenças, produção, armazenamento e logística) e de gestão do negócio (colheita, projeção de preço de venda e lucratividade, demanda mercado, câmbio).

A oferta de soluções de agricultura de precisão (AP), em franca atualização, está sendo vista por grande parte dos países produtores como uma estratégia empresarial visando expandir o mercado, muitas vezes, associadas a ações promovidas por instituições de pesquisa e desenvolvimento, como associações técnicas (tabela 2).

Por exemplo, o mercado brasileiro inclui um segmento composto de empresas e órgãos governamentais promotores de ações voltadas à implementação de políticas públicas para fomento, regulamentação e amadurecimento de polo

especialista na criação de tais soluções. Este mercado potencial inclui produtores, órgãos públicos, órgão de pesquisas e fabricantes industriais, para um público consumidor potencial em que somente 11% das terras produtivas utilizam soluções de AP (Embrapa, 2022; MAPA, 2022). Visando a promoção e desenvolvimento de aplicativos de AP, o país conta com diversas ações publicadas, apoiadas por diversos grupos de interesse nesse segmento de mercado, conforme demonstrado abaixo (Tabela 2). O ministério brasileiro para agricultura, pecuária e abastecimento (MAPA) tem sido um importante promotor e desenvolvimento de mercado consumidor de soluções de AP, apoiando a criação de grupo de trabalho intitulado “Câmara da Agricultura Digital”, que conta com diversas entidades associadas, dentre agências governamentais, empresas privadas fabricantes e prestadores de serviços, entidades de pesquisas agropecuárias. Para estimular o mercado consumidor nacional a adotar as soluções de AP, o MAPA participou do lançamento do programa “Agro 4.0”, objetivando de estimular a implementação de tecnologias digitais, incluindo soluções de AP pelos agricultores brasileiros. Com este programa, o MAPA procura ofertar mecanismos de assistência financeira e técnica para seus associados. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) tem participado destas ações, subsidiando apoio técnico em pesquisas para o desenvolvimento de tecnologias de soluções AP, adaptadas à realidade agrícola brasileira, com dispositivos como sensores inteligentes, drones adaptados e sistemas modulares de suporte à decisão, testados e validados em diversas regiões produtoras do país.

Um dos maiores produtores mundiais de grãos, grande usuário das soluções de AP, o mercado norte-americano estimula, através da sua entidade governamental para agricultura, o Departamento de Agricultura, USDA (USDA,

2022) governamental, aquisição de soluções de AP por seus produtores nacionais, ofertada por imensa variedade de empresas agtechs. Para tanto, implementou várias políticas e iniciativas, reconhecidas pelo mercado produtor. O Serviço de Conservação de Recursos Naturais (NRCS), vinculado ao USDA, oferta importante linha de crédito financeiro a agricultores que adotem tecnologias com soluções de AP, por meio do programa intitulado “Programa de Incentivo à Qualidade Ambiental – EQIP”. Já a Farm Service Agency (FSA), unidade governamental também vinculada ao USDA, há tempos oferta empréstimos financeiros, em condições diferenciadas, principalmente para pequenos e médios

agricultores, estimulando-os a contratar serviços e tecnologias de AP. Além disso, o USDA promove intensamente parcerias com variadas entidades do setor privado, visando o desenvolvimento de pesquisas e formulação de novas tecnologias de AP. O USDA também tem se associado a empresas do polo tecnológico do Vale do Silício, realizando parcerias, com empresas como a *Blue River Technology*, com objetivo de desenvolver modernos sistemas de pulverização de agroquímicos por drones, auxiliados por dispositivos embarcados de visão computacional e aprendizado de máquina (ML), visando detecção de ervas daninhas em plantios, em tempo real.

Tabela 2: Principais entidades de fomento e regulação para soluções de AP. Fonte: Autores (2023).

Entidade	País	Propósito	Endereço eletrônico
ASBRAAP - Associação Brasileira de Agricultura de Precisão	Brasil	Associação empresarial sem fins lucrativos para o desenvolvimento científico e tecnológico, inovação e divulgação da aplicação de processos, técnicas e tecnologias da agricultura de precisão	https://asbraap.org/
CEBDS - Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável	Brasil	Associação empresarial sem fins lucrativos que reúne os maiores produtores rurais do Brasil, promove o desenvolvimento sustentável, investe em pesquisa e apoia Agtechs na agricultura de precisão.	https://cebds.org/
CBAP - Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão	Brasil	Grupo Executivo de Promoção de Ações de Fomento à Pesquisa em Agricultura de Precisão do Ministério da Agricultura do Governo Brasileiro.	https://www.gov.br/agricultura/pt-br
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	Brasil	Empresa brasileira ligada ao Ministério da Agricultura e Pecuária focada em pesquisa e desenvolvimento de soluções científicas.	https://www.embrapa.br/
Embrapii - Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial	Brasil	Promove a inovação na indústria brasileira, incluindo o setor agrícola, financiando projetos de pesquisa e desenvolvimento em parceria com empresas e instituições de pesquisa.	https://embrapii.org.br/
ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial	Brasil	Entidade sem fins lucrativos que desenvolve projetos industriais brasileiros em parceria com os Ministérios da Agricultura, Economia, Ciência e Tecnologia e empresas de pesquisa industrial.	https://abdi.com.br/projetos/agro-4-0
Programa IA2MCTIC , do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação MCTI	Brasil	Programa de apoio à pesquisa e projetos sobre o uso de inteligência artificial do Softex e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Comunicações.	https://softex.br/ia/mcti/

Finep - Agência de Financiamento de Estudos e Projetos de Brasil	Brasil	Agência governamental que financia a inovação e pesquisa científica e tecnológica no Brasil, com linhas específicas para agronegócio e tecnologias de agricultura de precisão.	http://www.finep.gov.br/
MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento	Brasil	Órgão responsável por regulamentar políticas agrícolas, incluindo a utilização de tecnologias na agricultura de precisão.	https://www.gov.br/agricultura/pt-br
MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação	Brasil	Responsável pelas políticas de ciência e tecnologia, incluindo regulamentações sobre inovação tecnológica no setor agrícola.	https://www.gov.br/mcti/pt-br
ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações	Brasil	Regulamenta o uso de radiofrequências e comunicações, relevantes para dispositivos IoT usados na agricultura de precisão.	https://www.gov.br/anatel/pt-br
SBA - Sociedade Brasileira de Agricultura	Brasil	Associação Brasileira de Automação - Comitê de Soluções em Agricultura de Precisão para o Agronegócio	https://sba.org.br/
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia	Brasil	Agência do Ministério da Agricultura e Pecuária e provedora de informações meteorológicas.	https://portal.inmet.gov.br/
CNA - Instituto Nacional de Meteorologia	Brasil	Desenvolvimento de pesquisas, cursos e financiamento de soluções para agricultura, incluindo agricultura de precisão	https://www.cnabrasil.org.br/
ANA - Agência Nacional de Água e Saneamento Básico	Brasil	Gestão e monitoramento dos recursos hídricos nacionais, provedor de informações e fiscalização.	https://www.gov.br/ana/pt-br
Sebrae - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas	Brasil	Oferece programas de suporte, consultoria e financiamento para micro e pequenas empresas, incluindo startups de agrotecnologia.	https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae
BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social	Brasil	Oferece linhas de crédito e financiamento para projetos inovadores no setor agrícola, apoiando o desenvolvimento de tecnologias de agricultura de precisão.	https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home
StartAgro - Instituição para fomento e financiamento de projetos de agricultura de precisão	Brasil	Plataforma que promove eventos, conteúdo e conexões entre startups do agronegócio, investidores e empresas, fomentando o ecossistema agtech no Brasil.	https://www.startagro.agr.br/
EIT Food - Instituição para a promoção e financiamento de projetos de agricultura de precisão	Europa	Comunidade europeia de inovação que apoia startups e projetos inovadores no setor agroalimentar, incluindo agricultura de precisão, por meio de programas de financiamento e aceleração.	https://www.eitfood.eu/
Horizon Europe - Instituição para a promoção de soluções de agricultura de precisão	Europa	O principal programa de financiamento de pesquisa e inovação da União Europeia, apoiando projetos em agricultura inteligente e tecnologias sustentáveis.	https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-

			calls/horizon-europe.eu
Agri-EPI Centre - Instituição para a promoção de soluções de agricultura de precisão	Reino Unido	Centro de inovação que colabora com empresas e instituições para promover tecnologias avançadas na agricultura, incluindo agricultura de precisão.	https://agri-epicentre.com/
Innovate UK - Empresa de desenvolvimento de soluções em agricultura de precisão	Reino Unido	Agência governamental britânica que financia projetos de inovação, incluindo soluções em agrotecnologia e agricultura de soluções.	https://www.ukri.org/councils/innovate-uk/
Farming-Futures, R&D Fund - Empresa de capital de risco	Reino Unido	Programa governamental que financia pesquisa e desenvolvimento em tecnologias agrícolas inovadoras.	https://iuk.ktn-uk.org/opportunities/farming-futures-rd-fund-climate-smart-farming/
USDA - Departamento de Agricultura do Governo dos Estados Unidos da América	USA	Desenvolvimento de política agrícola pública nos Estados Unidos da América. É ativo em pesquisa e ações para promover agricultura de precisão por meio de sua agência, NIFA.	https://www.usda.gov/
NIFA - Instituto Nacional de Alimentos e Agricultura do USDA	USA	Agência Federal para Alimentos e Agricultura. Realiza atividades de pesquisa, inspeção e promoção de tecnologia, incluindo AP	https://nifa.usda.gov/topics
FFAR - Fundação para Pesquisa em Alimentos e Agricultura	USA	Organização sem fins lucrativos que apoia pesquisas inovadoras em agricultura e alimentos, incluindo agricultura de precisão.	https://foundationffar.org/
AgFunder - Empresa de capital de risco, especializado em agtechs	USA	Plataforma de investimentos que conecta startups de agrotecnologia com investidores, fomentando o desenvolvimento de soluções inovadoras na agricultura.	https://agfunder.com/
The Yield Lab - Venture capital firm	USA	Aceleradora e fundo de investimento focado em startups de agtech, oferecendo capital e mentoria para desenvolver tecnologias agrícolas.	https://www.theyieldlab.com/
Plug and Play AgTech - Empresa de capital de risco	USA	Programa de aceleração que apoia startups de agtech com oportunidades de investimento, networking e colaboração com empresas do setor.	https://www.plugandplaytechcenter.com/industries/agtech
ISPA - Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão	USA	Organização científica sem fins lucrativos que promove o desenvolvimento de pesquisas, congressos e publicações para avançar a agricultura de precisão em todo o mundo.	https://www.ispag.org/icpa
NAL - Biblioteca Agrícola Nacional do USDA	USA	Centro de Ciências Agrárias e Coleções de Pesquisa, incluindo Agricultura de Precisão do Governo Federal dos EUA.	https://www.nal.usda.gov/waic/precision-agriculture
PAFT - Força-Tarefa para Projetos de Agricultura de Precisão	USA	Seu objetivo é promover a adoção de técnicas de agricultura de precisão para melhorar a produtividade das colheitas, reduzir o desperdício e aumentar a sustentabilidade ambiental.	https://www.ams.usda.gov/precision-agriculture-task-force

AUVSI - Associação Internacional para Sistemas de Veículos Não Tripulados	USA	Association for Uncrewed Vehicle Systems International (AUVSI), a maior organização sem fins lucrativos do mundo dedicada ao avanço de soluções técnicas e robótica, representando corporações e profissionais de mais de 60 países envolvidos na indústria, governo e academia.	https://www.auvsi.org/who-auvsi
EPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos	USA	Agência promotora de políticas públicas para uso dos recursos ambientais (ar, solo, ar), monitoramento, fiscalização e provedora de informações. Inclusive para agricultura de precisão	https://www.epa.gov/
NSF - Fundação Nacional de Ciências	USA	Agência federal independente que promove diversas pesquisas, inclusive sobre agricultura de precisão.	https://www.nsf.gov/
FCC - Comissão Federal de Comunicações	USA	Regulamenta as comunicações e o uso do espectro eletromagnético, essencial para dispositivos conectados na agricultura de precisão.	https://www.fcc.gov/
ASABE - Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas e Biológicos	USA	Organização profissional que representa engenheiros, cientistas e outros profissionais que trabalham nas áreas de agricultura, alimentação e sistemas biológicos.	https://www.asabe.org/
Precision Agriculture Task Force - Força-Tarefa para Revisão das Necessidades de Conectividade e Tecnologia da Agricultura de Precisão nos Estados Unidos	USA	Presidida pela FCC (Federal Communications Council) e envolvendo diversas agências federais com jurisdição sob a Lei Federal de Melhoria Agrícola (115-334, 132/2018) nos Estados Unidos da América, foi criada uma força-tarefa para revisar a necessidade de conectividade e tecnologia de agricultura de precisão no país.	https://www.fcc.gov/task-force-reviewing-connectivity-and-technology-needs-precision-agriculture-united-states
European Commission – DG de Agricultura e Desenvolvimento Rural	Europa	Formula políticas agrícolas da UE, incluindo regulamentos sobre tecnologia agrícola e agricultura de precisão.	https://commission.europa.eu/about-european-commission/departments-and-executive-agencies/agriculture-and-rural-development_en
EFSA - Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar	Europa	Fornece aconselhamento científico e regulamenta aspectos relacionados à segurança alimentar, impactando as tecnologias de produção agrícola.	https://www.efsa.europa.eu/em
ENISA - Agência da União Europeia para Cibersegurança	Europa	Trabalha para garantir a segurança cibernética na UE, relevante para a proteção de dados em soluções de agricultura digital.	https://www.enisa.europa.eu/

Componentes da solução de AP

Embora a AP vise um sistema projetado para suportar o ciclo produtivo agrícola, poucas agtechs (Mendes et al., 2022, Singh e Kapoor, 2024) ofertam soluções modulares, contendo todas

as fases do processo produtivo (Figura 2), especialmente no tratamento e monitoramento de variações espaciais e temporais nas condições de cultivo, como o estado da cultura, solo, plantas ou clima (Pasquel et al., 2022; Dos Santos et al., 2023). No atual contexto, a maioria dos produtores

ainda contratam solução de AP para atividades de preparo do solo, análise do solo, regulagem e controle de equipamentos, no plantio e pulverização, com módulos contendo tratamento e análise de dados coletados. Módulos tratando de rotinas de apoio à decisão gerencial, logística, estocagem e precificação são menos contratados, embora em taxas crescentes (Brini, 2023). A integração desses componentes é fator chave para tornar a solução bem-sucedida.

Software de aplicação

Alguns fatores-chave no campo influenciam na decisão por adquirir um software aplicativo na solução de AP pelos produtores. Dentre estes, destacam-se a importância da análise das condições de pré-plantio, o monitoramento em quais fases do processo produtivo, além atividades de previsão de colheita, previsão para armazenamento e comercialização (Elahi et al., 2023; Maurya et al., 2024). Da análise realizada na literatura selecionada para este artigo, condições como a rapidez de atualizações e novas versões do aplicativo, novas funcionalidades disponibilizadas, a modularidade da solução, permitindo ao contratante montar o combo de sua aquisição personalizada, adaptáveis às necessidades de cada plantio, são diferenciais considerados na escolha do software aplicativo, e influenciam na estratégia planejada pelos produtores, como por exemplo, possibilidade de antecipar colheita (Figura 3). Dentre os módulos geralmente analisados pelos produtores, destacam-se: Processamento de informações coletadas em campo (Zhao et al., 2021; Qiao et al., 2022; Kganyago et al., 2024),

processamento de imagens (Zhou et al., 2021; Huihui et al., 2023), processos de transferência de dados (Musa et al., 2023), geração de séries preditivas (Govindaraj et al., 2024), integração com dispositivos móveis (Rivera et al., 2023), disponibilidade de informações na nuvem (Wei et al., 2023). Podemos considerar que, de forma geral, as soluções apresentam os seguintes módulos: (a) *coleta e análise de dados* (seleção de sementes, taxas de balanço de nutrientes necessárias do solo e das plantas, pragas, saturação hidráulica do solo, condições ambientais como temperaturas, previsão de chuvas, taxas de evapotranspiração), a partir de sensores, mapas por drones e/ou satélites, estações meteorológicas, dispositivos de campo automatizados, conectados por dispositivos de IoT, por exemplo; (b) *monitoramento do desenvolvimento do plantio*, fornecendo informações sobre diversas variáveis de forma *online* (taxas de irrigação, fertilização, pesticidas), geralmente tratadas e analisadas por aplicativos combinados de algoritmos de aprendizado de máquina, tecnologia de taxa variável, ou VRT, e plataforma de tecnologia GIS ou WebGIS, amparados em grandes volumes de dados armazenados em bancos de dados complexos, ou *big data*; (c) *painéis de modelos de ação ou dashboards* (previsões climática, pragas, saúde de solo e plantas, data colheita, produtividade, trocas produtos, geração créditos de carbono, estocagem, logística e precificação), alimentados em tempo real, com os relatórios gerados a partir das informações analisadas, servindo como ferramenta de suporte à decisão operacional, técnica ou de negócio.

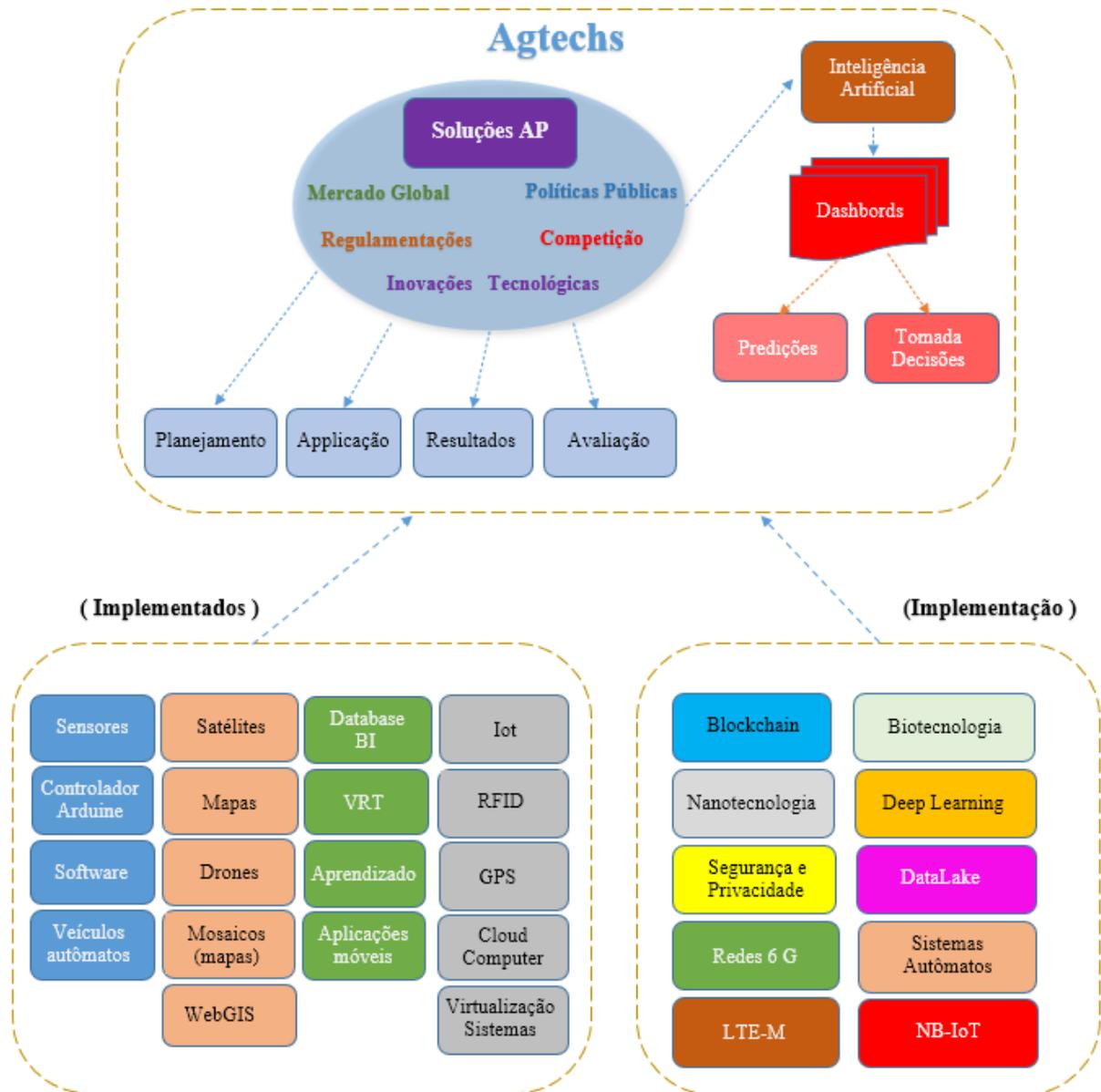


Figura 2: Diagrama de uma solução de agricultura de precisão. Fonte: Autores (2024).

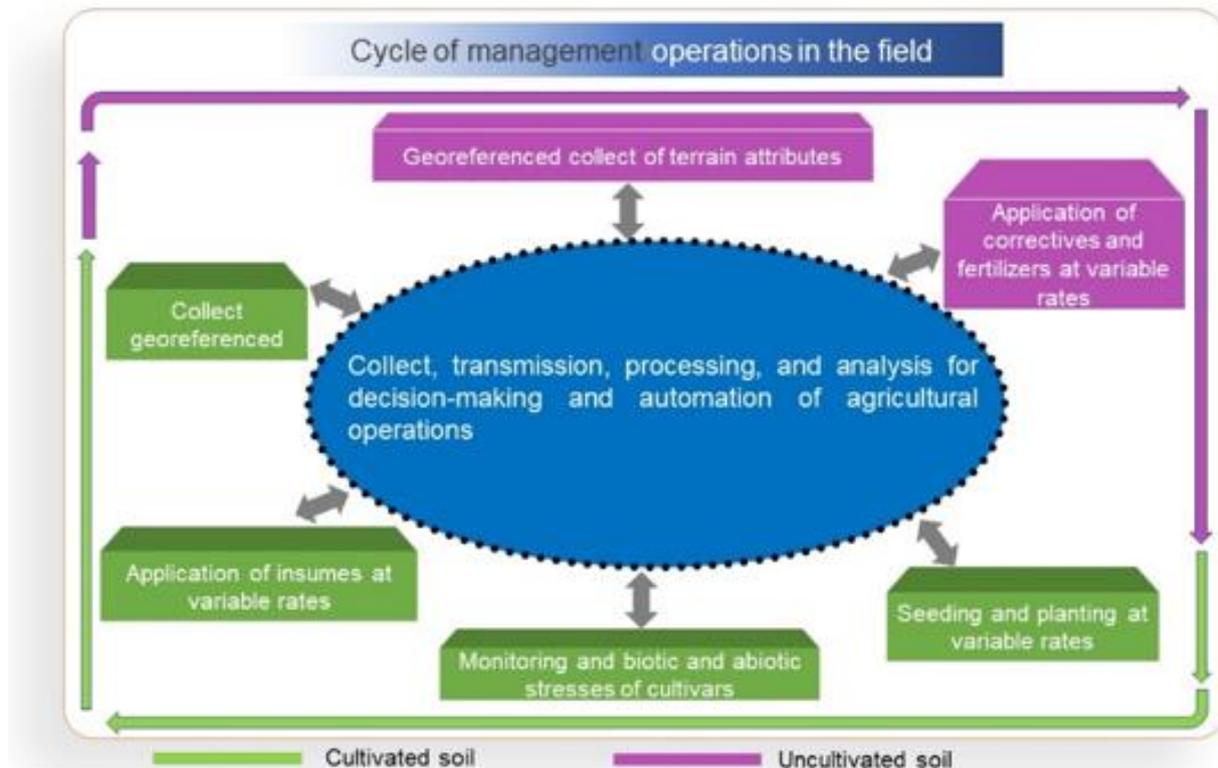


Figura 3: Funcionalidades do software PA. Fonte: Adaptado de Chaim *et al.*, (2014).

A composição dos custos de uma solução AP (hardware e software, instalação/configuração, capacitação e manutenção) ainda é alta, principalmente para mercados de países de baixa renda (Mizik, 2023; Rai e Kunte, 2024). Em geral, os módulos de coleta/processamento de dados e gestão da produção implicam em um custo percentual médio de 30 a 40% do valor total da solução (CEBDS, 2022; MAPA, 2022; Rimpika *et al.*, 2023), sendo um dos motivos das diferentes taxas de penetração da solução de AP em mercados produtores mundiais, como os norte-americano, indiano, brasileiro e asiático. No mercado norte-americano, pequenos e médios produtores têm acesso a essas soluções com menores custos de aquisição, em torno de 20 a 25% (CEBDS, 2022; MAPA, 2022; Sanyaolu e Sadowski, 2024).

Outra funcionalidade importante oferecida por essas soluções é a geração e gerenciamento de enorme conjunto de dados sobre cada ciclo produtivo, não apenas sobre as condições de cultivo e insumos utilizados, mas sobre todas as variáveis envolvidas nos plantios realizados, geralmente suportados por ferramentas de *machine learning* (Elahi *et al.*, 2023; Aashu *et al.*, 2024) e análise de dados com *business intelligence* (Raouhi

et al., 2023). Essas séries históricas alimentam os módulos de predição e suporte à decisão.

Por fim, o software aplicativo é essencial na integração funcional entre os diversos dispositivos de hardware da solução (Ragunath e Devi, 2022; Mukati *et al.*, 2024), como automação de máquinas, sensores e controladores de análise, que possuem software embarcado, em diversos padrões de fábrica.

Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas (IoT) é uma inovação tecnológica que possibilita a comunicação entre diferentes dispositivos instalados no campo e plataformas computacionais, de forma distribuída, em tempo real, desde que possuam o software adequado (Abu *et al.*, 2022; Gonçalves *et al.*, 2022; Hundal *et al.*, 2023; Reda *et al.*, 2023; NitinKamble e Kulkarni, 2024), facilitando a integridade das trocas de dados coletados (Tabela 3), amparados por disponibilidade de uma rede de comunicação no ambiente monitorado (Pasandideh *et al.*, 2022). A correta classificação dos eventos coletados por dispositivos em campo, processados por meio do acesso a bancos de dados de informações, como é

o caso de um sensor na identificação de uma praga (Micheni et al., 2022; Nyéki e Neményi, 2022), é um exemplo cotidiano da importância da tecnologia de IoT nas soluções de AP.

O aprimoramento da tecnologia de IoT está sendo padronizada em suas principais partes: *Dispositivos* (hardware com sensores, atuadores, termostatos, gateways); *Conectividade* (padrões de comunicação como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, RFID); *Processamento de dados* (em nuvem, plataformas de *edge computing* (He, 2024), com tratamento por algoritmos de IA); *Análise e disponibilidade de dados* (tratamento e geração de insights); e *Interface com usuário* (aplicativos Web e móveis, APIs para sistemas).

A integração de dispositivos com IoT de diversos equipamentos e componentes, como novos ambientes de inteligência artificial (Boopathi, 2024), computação em nuvem (Johnraja et al., 2024), bancos de dados interativos multimídia (Bhat e Huang, 2021; Sourav e Emanuel, 2021; Lu et al., 2022), processamento

estratégico de informações (SIP), ou *business intelligence* com aprendizado de máquina profundo (Sanaeifar et al., 2023; Arya et al., 2024), é a espinha dorsal da popularização de uma solução típica de AP, criando uma poderosa ferramenta de processamento de informações para tomada de decisão, essenciais para sua disseminação no *agrobusiness*.

No entanto, ainda existem vários desafios associados à evolução da IoT na agricultura de precisão (Yazdinejad et al., 2021), principalmente nas questões de privacidade e segurança dos dados (Hundal et al., 2023), resultantes da coleta e transporte de dados obtidos das plantações, solo, clima, de tomada de decisão e sensíveis ao negócio, que devem ser protegidos contra ameaças cibernéticas, ou acessos não autorizados (Krishnababu et al., 2024; Ongadi, 2024). Apesar disso, novas pesquisas procuram disponibilizar protocolos de segurança de rede, criptografia e mecanismos de proteção nos dispositivos (Soussi et al., 2024), garantindo medidas aprimoradas para confiabilidade na solução de AP.

Tabela 3: Funcionalidades de IoT nos componentes das soluções de AP. Fonte: Autores (2023).

Fatores	Aplicação	Satélite	Sensores	UAV	Equipamentos Automatizados
Plantio	Eles monitoram a saúde das plantas e detectam pragas com insights abrangentes, complementados por informações detalhadas e coletadas que abrangem o crescimento e a saúde das plantas.	Imagens (Landsat, Sentinel) para analisar a saúde das plantas (índices de vegetação e área foliar (IAF), temperatura do dossel, albedo da superfície, dosagem de água), identificação de pragas e doenças.	Monitoramento do crescimento, biomassa e saúde das plantas usando sensores multiespectrais para NDVI, clorofila, temperatura do dossel, índices de vegetação, umidade foliar, formato da cultura, espessura do caule e altura da planta, nível d'água, transpiração.	Imagens multiespectrais e hiperespectrais capturadas por drones para monitoramento do crescimento e detecção de doenças, pragas e saúde do solo e das plantas.	Tratores e colheitadeiras com sensores integrados para medir o crescimento das culturas em tempo real e ajustar os insumos.

Climáticos	<p>Fornecem informações detalhadas sobre o clima (precipitação, temperatura, umidade, velocidade e direção do vento, radiação solar, pressão barométrica, radiação solar, umidade relativa), sendo cruciais para decisões sobre irrigação, plantio e colheita.</p>	<p>Dados climáticos de satélites (MODIS, Landsat) para análise de padrões climáticos e previsões meteorológicas em larga escala (radiação solar, velocidade e direção do vento, evapotranspiração, humidade, precipitação instantânea, fluxo de calor).</p>	<p>Medição de temperatura, umidade, velocidade do vento, radiação solar, evapotranspiração e outras ocorrências</p>	<p>Sensores climáticos embarcados para monitoramento de microclima local, gestão do plantio em tempo real.</p>	<p>Carregados com instruções de monitoramento, aplicam insumos, defensivos e outros agroquímicos, visando evolução do plantio, com ajustes de irrigação, ventilação e controle de pragas e doenças</p>
Solos	<p>Monitoram a umidade e a fertilidade do solo, permitindo uma gestão mais eficiente dos insumos agrícolas e a aplicação de nutrientes.</p>	<p>Análises de satélite para monitoramento de umidade do solo e detecção de variações na composição do solo.</p>	<p>Sensores de umidade, pH e condutividade elétrica para monitoramento em tempo real da condição do solo.</p>	<p>UAVs equipados com câmeras termográficas para monitorar a variação de temperatura do solo, umidade e transpiração.</p>	<p>Carregados com instruções de monitoramento, aplicam corretivos, fertilizantes, realizam análises de amostras de solo (pH, micro e macronutrientes minerais)</p>
Navegação	<p>Dispositivos de GPS e RFID embarcados interoperam com os diversos componentes em campo, permitindo localização, correção e mudanças de rotas, rastreamento de insumos e coletas, propiciando troca de informações em tempo real.</p>	<p>Confirmação e/ou correção de dados satelitais auxiliados na navegação de dispositivos de GPS, otimizando rotas de veículos autônomos e disposição de sensores em campo.</p>	<p>Dispositivos de GPS embarcados em tratores e veículos automatizados fornecem localização e dados em tempo real para otimização do trajeto.</p>	<p>Imageamento detalhado de variáveis monitoradas e geolocalizadas para otimizar trajetos e reduzir sobreposição de operações.</p>	<p>Localização, ajustes de rotas (dispositivos GPS), em veículos agrícolas autônomos, com roteamento programado, minimizando sobreposição, aumentando eficiência em aplicação de insumos e agrotóxicos, e colheitas.</p>

Big data

Grande quantidade de dados, coletados de diferentes dispositivos de IoT (Bramantoro et al.,

2022; Alahmad et al., 2023) e de bases de dados externas, como USDA (USDA, 2022), requerem técnicas de padronização e armazenamento adequados de alta disponibilidade, visando suportar qualidade das informações processadas por poderosos algoritmos de aprendizado de máquina (Chintakunta et al., 2023), em técnicas de *business intelligence* (Bhat e Huang, 2021) e

tecnologia de taxa variável (Ahmed et al., 2022; He, 2023; Krishnababu et al., 2024), constituindo assim, o principal papel das ferramentas de *big data*, que buscam garantir escalabilidade, disponibilidade e flexibilidade das transações para a solução de AP (Figura 4), em todas as suas etapas (Ding et al., 2023).

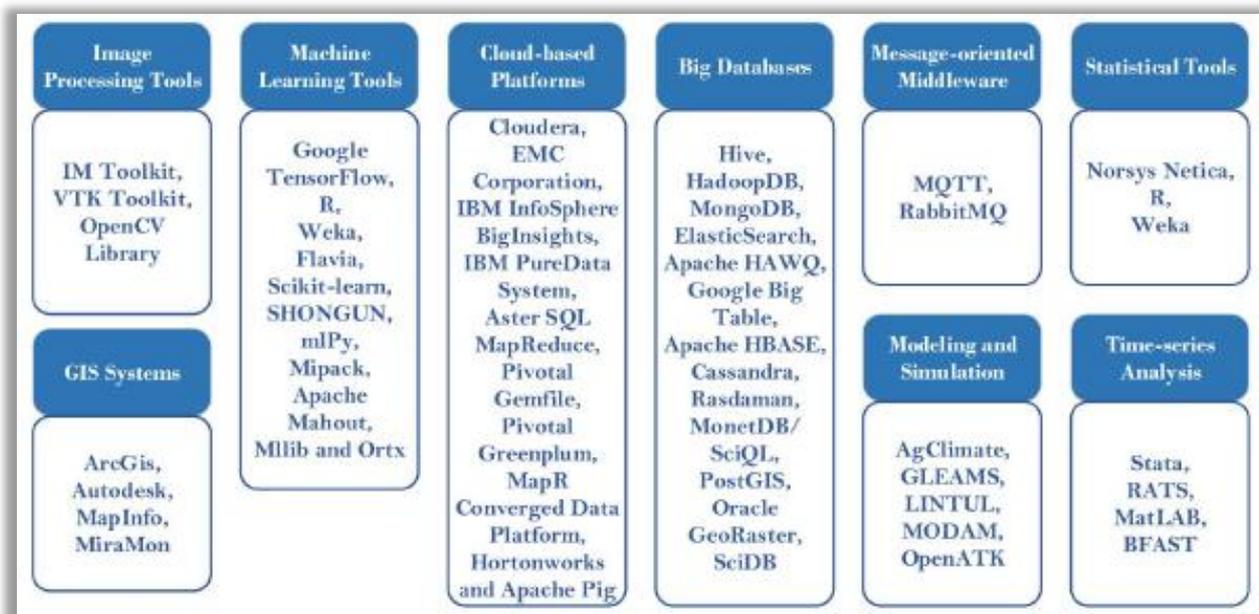


Figura 4: Ferramentas de software empregadas na análise de big data agrícola (Bhat e Huang, 2021).

Recentemente, com evolução da análise de variáveis espaciais em modelos de IA, os requerimentos de eficiência dos métodos analíticos de *big data* têm aumentado (Bhat e Huang, 2021), adicionando análises granulares das condições agrônômicas (Dumont et al., 2023), facilitando a personalização das práticas agrícolas, de acordo

com as características específicas de cada área da propriedade, facilitando a tomada de decisões mais rápidas e precisas (Siddegowda e Devi, 2021; Elahi et al., 2023), otimizando não apenas a produtividade, mas também a gestão ambiental (Zaman, 2023).

Tecnologia de inteligência artificial

Considerando que a solução de AP envolve o domínio de diversas áreas do conhecimento (Cai et al., 2023; Chintakunta et al., 2023; Ijaz e Wozniak, 2024; Rai e Kunte, 2024), viabilizando a integração e o processamento de grande volume de dados, extraídos de diferentes fontes, com o objetivo de disponibilizar transações para

monitoramento, controle e previsão para tomada de decisões em tempo real, as inovações promovidas pela inteligência artificial estão gradualmente se tornando essenciais, diante das inovações trazidas, incorporando mais robustez e eficiência de previsões, inferências de cenários (Figura 5).

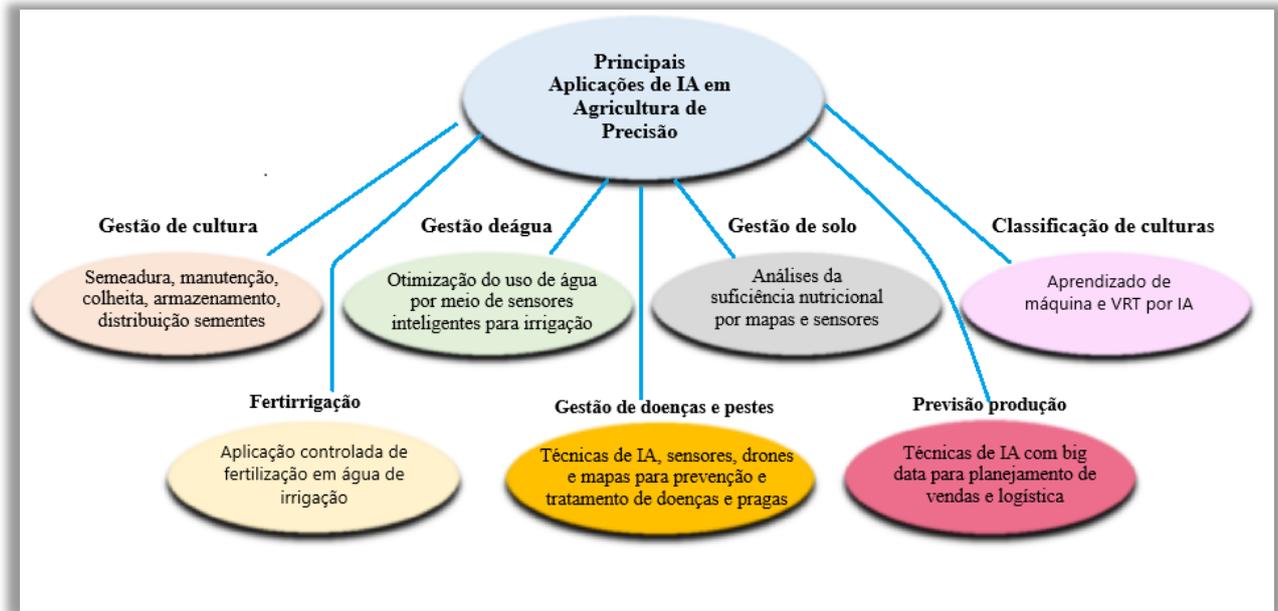


Figura 5: Principais aplicações de IA em solução de AP. Adaptado de Oliveira et al. (2023).

A implementação de ferramentas de inteligência artificial em soluções de AP contribui para melhorar a capacidade de processamento, eficiência, segurança e integração dos dados (Aashu et al., 2024; Sathya et al., 2024). Isso é potencializado pela evolução de dispositivos de campo e sistemas, como bancos de dados, sensores e IoT, pela incorporação de mecanismos como computação de borda (Zhang e Li, 2021; Akhtar et

al., 2021), processamento distribuído (Debauche et al., 2022; Fatima et al., 2024) e computação embarcada (Kumar et al., 2022), que permitem processamento de dados nativos diretamente destes componentes, em vez de depender de servidores centralizados da aplicação de AP, trazendo benefícios como redução de latência, economia de largura de banda e melhoria da segurança no tráfego de dados (Tabela 4).

Tabela 4: Mecanismos de Inteligência Artificial e seus impactos em soluções de AP. Fonte: Autores (2024).

Dispositivos AP	Fatores impactos	IA (modelo de aprendizado)	Algoritmos Específicos	Computação Embarcada	Computação de Borda	Processamento Distribuído	Federated Learning	Website
Sensores	Redução da latência e monitoramento em tempo real de variáveis do solo e clima	ML, DL	Redes Neurais Convolucionais (CNN), Regressão Linear, Árvores de Decisão	Sim	Sim	Sim	Sim	Alahmad et al., 2023, Soussi et al., 2024

Drones	Melhoria na coleta de dados, mapeamento detalhado, monitoramento de culturas	ML, DL	Redes Neurais Convolucionais (CNN), K-means, Support Vector Machines (SVM)	Sim	Sim	Sim	Sim	Sivakumar e Tyj, 2021; Govindaraj et al., 2024
Veículos automatizados	Maior eficiência operacional, redução de custos e otimização de rotas	ML, DL	Redes Neurais Recorrentes (RNN), Reinforcement Learning, Algoritmos Genéticos	Sim	Sim	Sim	Sim	Elahi et al., 2023; Sivasangari et al., 2023
Satélites	Monitoramento em larga escala, análise de clima e topografia	ML, DL	Árvores de Decisão, Random Forest, K-Nearest Neighbors (KNN)	Sim	Sim	Sim	Não	Misara et al., 2022; Fakhar e Khalid, 2023
Dispositivos IoT	Integração de dados em tempo real, otimização de insumos agrícolas	ML, DL	Redes Neurais Convolucionais (CNN), Aprendizado Preditivo, K-means	Sim	Sim	Sim	Sim	Saranya et al., 2023; Krishnababu et al., 2024
Equipamentos de irrigação	Otimização da distribuição de água, economia de recursos	ML, DL	Regressão Linear, Árvores de Decisão, Algoritmos de Reforço	Sim	Sim	Sim	Sim	Verma, 2021; Bramantoro et al., 2022

(*) CNN - Redes Neurais Convolucionais;
 RL - Regressão Linear;
 AD - Árvores de Decisão;
 SVM - Support Vector Machines;
 RNN - Redes Neurais Recorrentes;

RL – Aprendizado por Reforço;
 AG - Algoritmos Genéticos;
 RF - Random Forest;
 KNN - K-Nearest Neighbors;
 AP - Aprendizado Preditivo.

Tecnologia de taxa variável (VRT)

O primeiro componente estatístico de predição utilizado na solução de AP (Fakhar e

Khalid, 2023; He, 2023; Szira et al., 2023), a tecnologia de taxa variável utiliza mapas gerados

pelos soluções de GIS, contendo séries e dados estatísticos armazenados em big data, informações de variáveis diversas, coletadas em tempo real de sensores de campo, de sensoriamento remoto por drones e satélites, georreferenciadas por dispositivos IoT e GPS. Estes mapas de prescrições, como de variabilidade espacial (fertilidade do solo, saúde de plantas) são tratados por técnicas como o método de zonas de manejo, o método baseado em rendimento, o método de interpolação geoespacial, e o método de automação e controle (Ongadi, 2024).

A integração da técnica de taxa variável aos algoritmos de aprendizagem de máquina responde com melhor eficiência, com previsões e inferências mais precisas, incorporando dados de séries temporais, informações frente a novos cenários inesperados, adequação a regulamentações públicas e de novas variáveis, por segmentos selecionados da lavoura, contribuindo para minimização de custos, qualidade e contaminação do ecossistema em seu entorno. Há relatos na literatura, como em Krishnababu et al. (2024), do aumento da produtividade de 20% e eficiência na minimização de custos com redução do uso de agroquímicos e água, entre pequenos produtores na Índia, onde solução de AP com módulos de VRT foram implantadas. As agtechs têm na implementação da tecnologia de VRT como desafios atuais (He, 2023; Mizik, 2023): Os altos custos de implementação para pequenos e médios produtores; a complexidade na formatação de módulos com as técnicas de inteligência artificial; a interoperabilidade dos módulos de VRT com plataformas da solução de AP em sistemas legados, com diversos fabricantes de máquinas agrícolas, sensores, sistemas aplicativos diversos; a necessidade de pessoal especializado para implantação e manutenção do sistema, personalizados à realidade local. O relatório detalhado da *Straits Research* sobre o mercado de agricultura de precisão (Nair, 2023) aponta que, no mercado da América do Norte, as agtechs frequentemente ofertam as funcionalidades de

VRT com geração de mapas de índices de variáveis de solo e plantas baseados em sensoriamento remoto por satélites (*satellite-based VRT*), ou por drones (*drone-based VRT*), onde os investimentos pesquisados junto a grandes clientes produtores, aponta prevalência atual para geração de mapas com drones.

Sensoriamento remoto (SR)

O principal objetivo do SR é a aquisição de informações sobre estado de variáveis, objeto do estudo da absorção e refletância da radiação eletromagnética por objetos na superfície da Terra (Bomoi et al., 2022; Kganyago et al., 2024; Manjunath et al., 2024; Messina e Modica, 2022; Omia et al., 2023; Pande e Moharir, 2023), caracterizado por aplicação de um conjunto de técnicas estatísticas e de reconhecimento de padrões, constituem o core do sensoriamento remoto. Este componente da solução de AP tem evoluído nos últimos anos, principalmente pela expansão das bases de satélites e otimização das técnicas de sensoriamento (Tabela 5), disponibilizadas nos últimos anos, permitindo a geração de informações de diferentes bandas espectrais (Radočaj, Plaščak, & Jurišić, 2023a; Rivera et al., 2023). Recentemente, a associação com ferramentas de análise computacional (Abdelbaki e Udelhoven, 2022; Hashemi-Beni et al., 2022; Li et al., 2023), bem como com aplicação de nova camada nos mapas de prescrição de SIG, oriunda por imageamento por drones (Vishnu et al., 2024) tem otimizado os resultados de remote sensing. O SR é utilizado para gerar mapas de georreferenciamento da área escolhida para plantio, aplicando técnicas geoestatísticas para fornecer variáveis hiperespectrais e temporais, como índices de vegetação, temperatura, umidade, essenciais à análise das características do solo (Figura 6) e das plantas (Lara et al., 2021; Sun et al., 2022; Shukla et al., 2023), caracterizando em importante componente da solução de AP.

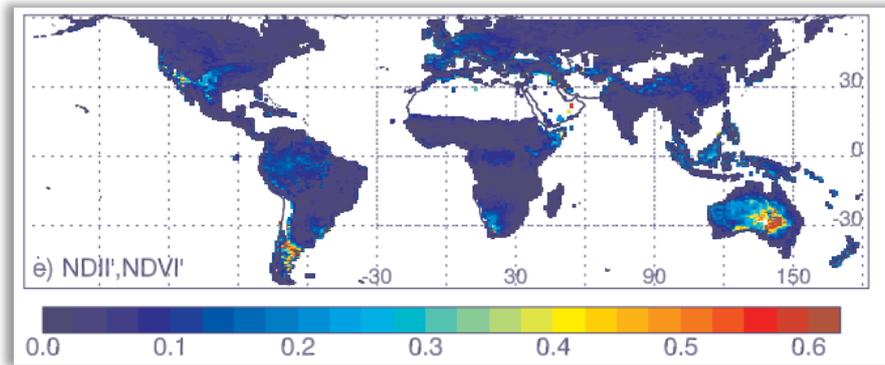


Figura 6: Mapa de condições do solo (Prey e Schmidhalter, 2019).

Tabela 5: Soluções de sensoriamento remoto (SR) para soluções de AP. **Fonte:** Autores (2023).

Plataforma Satelital	Funcionalidades Analíticas	Resolução Espacial	Frequência da Revisita	Aplicações	Endereço eletrônico
Landsat (NASA)	Monitoramento multiespectral (NDVI, estresse hídrico), detecção alterações no solo, mapeamento crescimento plantio	30 metros	16 dias	Análise saúde plantas, uso da água, mudanças solo e vegetação	https://landsat.gsfc.nasa.gov/
Sentinel-2 (ESA)	Imagens multiespectrais, monitoramento saúde da vegetação, detecção pragas e doenças, análise variabilidade do solo	10-60 metros	5 dias	Saúde plantas, análise variabilidade espacial, temporal e evapotranspiração, gestão de irrigação	https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
MODIS (NASA)	Monitoramento climático, variabilidade plantas, solo e águas, detecção estresse hídrico. Mapeamento global	250 - 1.000 Metros	1 Dia	Visualização em larga escala saúde plantas, uso solo e recursos, variabilidade climática	https://modis.gsfc.nasa.gov/
SPOT (ESA)	Visualização detalhada crescimento plantas, uso solo, mapeamento terra e produtividade	1,5 - 6 Metros	2 - 3 Dias	Deteção alterações solo e vegetação, variabilidade climática, índices plantas	https://earth.esa.int/eogateway/missions/spot-1
Terra/Água (MODIS)	Análise temperatura superfície, monitoramento safras, variabilidade hídrica e solo	250 - 1.000 Metros	1 Dia	Análise saúde vegetação, alterações terra, índices vegetação, estresse climático	https://www.umb.edu/spectralmass/terra-aqua-modis/

Drones

A popularização no campo pelos veículos aéreos não tripulados (vants), ou simplesmente, drones (Gokool et al., 2023; Rehman et al., 2023;

Raouhi et al., 2023), incorpora vantagens nas soluções de AP, pois complementa, e em alguns casos, substitui o imageamento de imagens da área de plantio com qualidade de mosaicos gerados, além da análise e tratamento por aplicativos especializados, integrando com sistemas de informações geográficas. Os drones utilizados pela maioria das agtechs nas soluções de AP são de modelos de diversos fabricantes, dimensionados com peso médio de 1 kg, envergadura média de 1 m de diâmetro, possuindo software embarcado de navegação especializada de bordo, integrado com outros dispositivos de auxílio à navegação e transmissão de dados, como GPS, redes wifi, e dispositivos IoT (Tyagi e Pandey, 2024; Gamal et al., 2024), além de autonomia estimada de 1 hora de voo. Estes modelos geralmente são direcionados para o sensoriamento remoto ativo ou passivo, em geração de imagens, de acordo com a finalidade do imageamento (Fakhar e Khalid, 2023). Estes dispositivos móveis aéreos utilizam câmeras multiespectrais (para geração de índices como o NDVI) e hiperespectrais (análises mais detalhadas da variabilidade da vegetação e solo, decorrentes da geração de índices como NDVI, NDWI, SAVI,

EVI, SI, BSI, CI, WRI e RENDVI*), no sensoriamento remoto passivo da radiação refletida por plantas, solos e água (Radočaj, Šiljeg, Marinović, & Jurišić, 2023b; Govi et al., 2024). O SR realizado por drones diferenciam daquele gerado por emissões satelitais, importante para a solução de AP, devido a características destes equipamentos no imageamento (Figura 7), onde drones têm se tornado mais atrativos pelos custos decrescentes de sua aquisição, manutenção e flexibilidade na operacionalização de rotas, comparativamente aos satélites. Além disso, drones evoluem para incorporar outros dispositivos embarcados, permitindo integração com outros componentes da solução AP, como aplicativos produtores de mapas, sistemas SIG (Belcore et al., 2021; Das et al., 2023; Adewusi et al., 2024), além de renderização com inteligência artificial (Raghnunath e Devi, 2022; Fakhar e Khalid, 2023), principalmente em modelos de aprendizado de máquina. Dependendo da finalidade planejada, podem trabalhar em substituição (Rejeb et al., 2022; Shahi et al., 2023), ou complementariedade ao imageamento por satélites (Tabela 6).

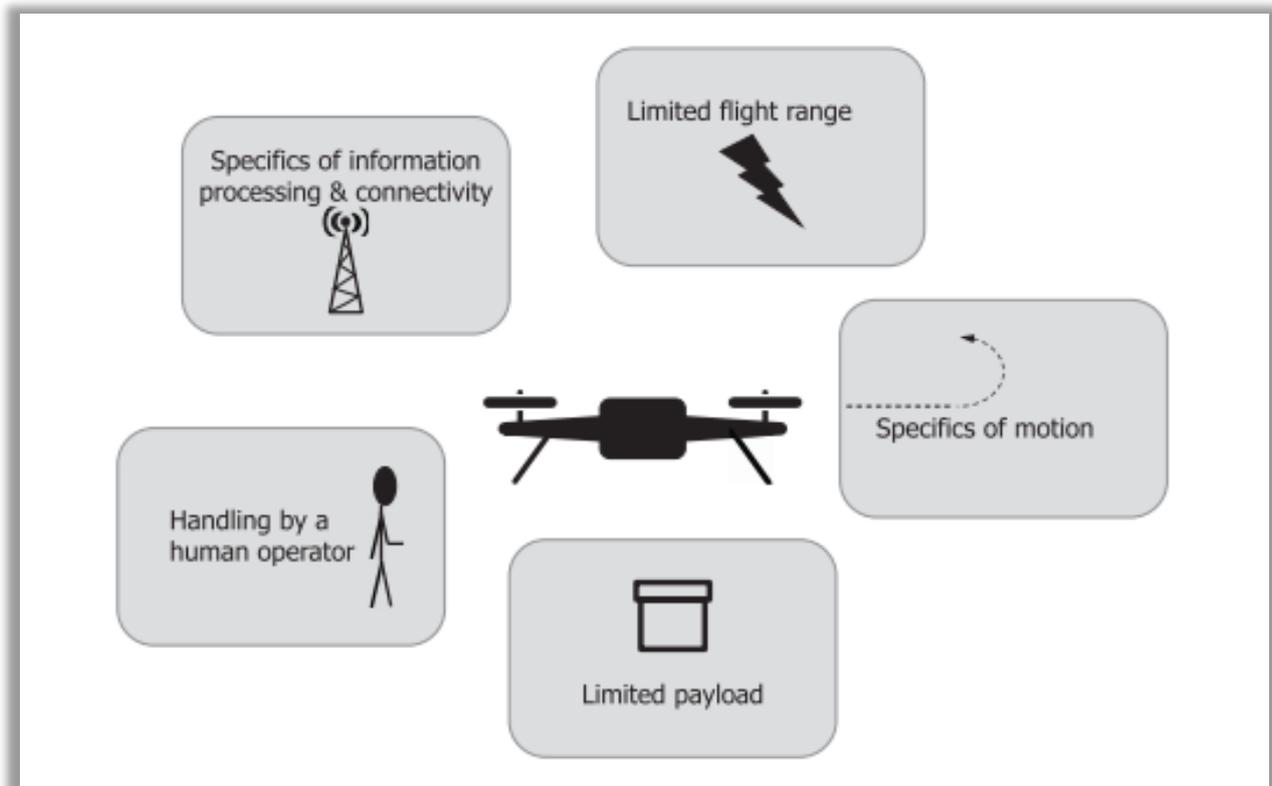


Figura 7: Esquema genérico de voo de drone (Otto et al., 2018).

Entretanto, a utilização de drones ainda enfrenta dificuldades, de acordo com a região, em questões ligadas liberação regulatória burocrática; insuficiência de aplicações de hardware e software especializados para operação; requerer conhecimento especializado para processamento de imagens e integração de dados na solução AP; custo inicial total. Entretanto, pesquisas relatadas na literatura demonstram que seu uso vem crescendo e minimizando essas dificuldades, estimulado por inovações como uso de enxame de

drones; maior autonomia e automatização por navegação; minimização de falhas; prévia análise preditiva embarcada, otimizando os ortomosaicos; aumento da variedade de modelos por novos fabricantes; crescimento de fornecedores da cadeia de serviços; além de propostas de soluções de detecção de tentativas de intrusão por sistemas baseados em inteligência artificial (aprendizado de máquina) e tecnologia blockchain (Wei et al., 2023).

Tabela 6: Sensoriamento remoto por Drones versus Satélites para soluções de AP. Fonte: Autores (2023).

Características técnicas	Drones	Satélites
Resolução espacial	Alta	Moderada
Cobertura espacial	Limitada (autonomia Drone)	Ampla (grandes áreas)
Frequência de monitoramento	Alta (sob demanda)	Moderada/baixa (órbitas fixas)
Custo operacional	Moderado (de acordo com funcionalidades/manutenção)	Variável (de acordo com funcionalidades e resolução dados analisados)
Condições meteorológicas	Teto operacional de acordo com ventos e chuvas	Teto operacional de acordo com bloqueio nuvens (de radar especialmente)
Treinamento necessário	Navegação, aplicativos, tratamento de dados	Aplicativos, tratamento dados
Funcionalidade mais utilizadas	<ul style="list-style-type: none"> * Monitoramento em alta resolução de pequenas áreas agrícolas; * Aplicação de insumos como fertilizantes e pesticidas com alta precisão; * Monitoramento de pragas, doenças e saúde das plantas com câmeras multiespectrais; * Criação de mapas NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) para avaliar a saúde da vegetação. 	<ul style="list-style-type: none"> * Monitoramento de grandes áreas agrícolas de uma só vez; * Detecção de variabilidade climática e mudanças em larga escala (como seca ou enchentes); * Uso de imagens multiespectrais e hiperespectrais para análise de saúde das plantas e produtividade; * Análise de índices espectrais, como humidade, temperatura e evapotranspiração.
Aplicativos usuários	* <u>DroneDeploy</u> : Mapeamento de campo em tempo real, análise de produtividade e planejamento espaço;	* <u>Google Earth Engine</u> : Monitoramento global com divers indicadores para análise agrícola;

<p>* <u>Pix4D</u>: Criação de mapas geoespaciais de alta precisão;</p> <p>* <u>DJI Terra</u>: Mapeamento para planejamento e análise agrícola com drones DJI;</p> <p>* <u>PrecisionMapper</u>: Análise de safras, criação de mapas NDVI e outros índices;</p> <p>* <u>QGIS</u>: Processamento de dados e dados multiespectrais, integrando-os com outras camadas de dados geoespaciais;</p> <p>* <u>EEFlux</u>: Processamento dados com Landsat na estimação índices de evapotranspiração e gestão hídrica;</p> <p>* <u>SUPER</u>: Plataforma de monitoramento de variáveis vegetais, como biomassa, nutrição e crescimento plantas;</p> <p>* <u>Power (NASA)</u>: Plataforma da NASA para processamento dados para geração de variáveis meteorológicas, como radiação solar, temperatura, precipitação;</p>	<p>* <u>FieldView</u> (da Climate Corporation): Processamento de dados para monitoramento em tempo real de diversas variáveis nas plantações;</p> <p>* <u>Sentinel Hub</u>: Processamento de dados com uso dos satélites Sentinel e Landsat, fornecendo insights sobre saúde das plantas;</p> <p>* <u>Cropio</u>: Plataforma de gerenciamento agrícola que gera painéis para tomada de decisão no campo;</p> <p>* <u>QGIS</u>: Processamento e visualização de dados com imagens Landsat e Sentinel, para geração de análise geoespacial, criação de mapas NDVI, monitoramento da saúde das culturas e recursos hídricos.</p> <p>* <u>Google Earth Engine</u>: Dados de evapotranspiração e gerenciamento de água, calculados usando o método METIC, disponibilizados.</p> <p>* <u>Landsat 8</u>: Modelagem de variáveis hidrológicas, evapotranspiração e qualidade da água, modeladas com SWAT, permitindo integração com outras ferramentas de SR, como drones.</p> <p>* <u>CERES/MERRA-2/GISS</u>: Geração de modelos de radiação solar e evapotranspiração, analisados pelo MERRA-2, e capazes de integrar com modelos climáticos do GISS. Geralmente usa o método do Modelo Penman-Monteith.</p>
<p>Regulamentação (USA)</p> <p>Legislação regulamentada pela FAA (Federal Aviation Administration, com atenção a Parte 107 para atividades comerciais (altura, locais), exigindo licenciamento de pilotos, além de restrições em áreas próximas a aeroportos.</p>	<p>Legislação normatizada pela NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e o Departamento de Comércio dos EUA, com especificações detalhadas para privacidade e segurança nacional, principalmente para compartilhamento de dados e imagens no território dos EUA e exterior.</p>
<p>Regulamentação (Brasil)</p> <p>Legislação regulamentada pela ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), inclusive com registro no sistema SISANT (altura voos, locais), com registro voo no DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) a áreas próximas a aeroportos.</p>	<p>Legislação supervisionada pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), inclusive com direito de uso de imagens e dados geoespaciais para atividades comerciais sujeitos a leis como lei de proteção de dados e privacidade (LGPD), além de acordos internacionais.</p>

(*) NDVI - Avaliar a saúde da vegetação;

NDWI - Medição de água nas plantas;

PRI – Fotossíntese e metabolismo plantas;

SAVI – Monitorar vegetação em solo exposto;

EVI – Avaliar áreas de vegetação densa;

SI – Avaliar fertilidade e estrutura do solo;

BSI – Avaliar qualidade solo/áreas de solo exposto;

CI – Avaliar correções de fertilidade do solo;

WRI – Monitorar áreas irrigadas/acúmulo de água;

RENDVI – Detecção estresse hídrico (pragas);

Sistemas de Informações Geográficas (WebSIG)

Os chamados sistemas de informação georreferenciados, ou simplesmente WebSIG, são frequentemente usados em aplicações de AP (Pasquel et al., 2022; Hu, 2023; Karada et al., 2023) para fornecer informações precisas sobre variações geoespaciais georreferenciadas, como mapas incluindo imagens de solo, planejamento e dados meteorológicos, resultando em visualização de padrões e tendências em diversas camadas dinamicamente funcionais, (Figura 8), auxiliando a tomada de decisão (Kurniawan et al., 2023). A geração de mapas com nível de precisão está sendo disponibilizada em servidores remotos (computação em nuvem) ou locais, através de sistemas WebGIS, estas informações integradas com outras funcionalidades da solução AP, como por exemplo, a disponibilização de produtos e serviços de sensoriamento remoto com WebGIS por agências norte-americanas (NASA, 2022; USDA, 2022). Este componente da solução AP está associado ao uso conjunto com ferramentas de GPS, sensoriamento remoto (SR), mosaico de

mapas por drones, conexão de IoT, Internet, entre outros.

Os benefícios alcançados com sua implementação, como auxílio na tomada de decisão, com informações em tempo real, permitem analisar e decidir sobre diversas variáveis específicas e sensíveis, permitir o monitoramento da produção, condições ambientais e cultivo. As soluções desenvolvidas pelas agtechs buscam amenizar problemas ainda presentes em sua adoção, como a integração de dados com diferentes formatos e padrões de tratamento de diferentes fontes, questões relacionadas à privacidade e segurança, necessidade de conhecimento técnico para operar essa ferramenta, bem como garantir a conectividade dos diversos elementos constituintes da geração de informações. As novas versões de aplicações de agricultura de precisão já oferecem alternativas como o processamento e a disponibilização das informações do SIG em uma nuvem de dados (Tabela 7).

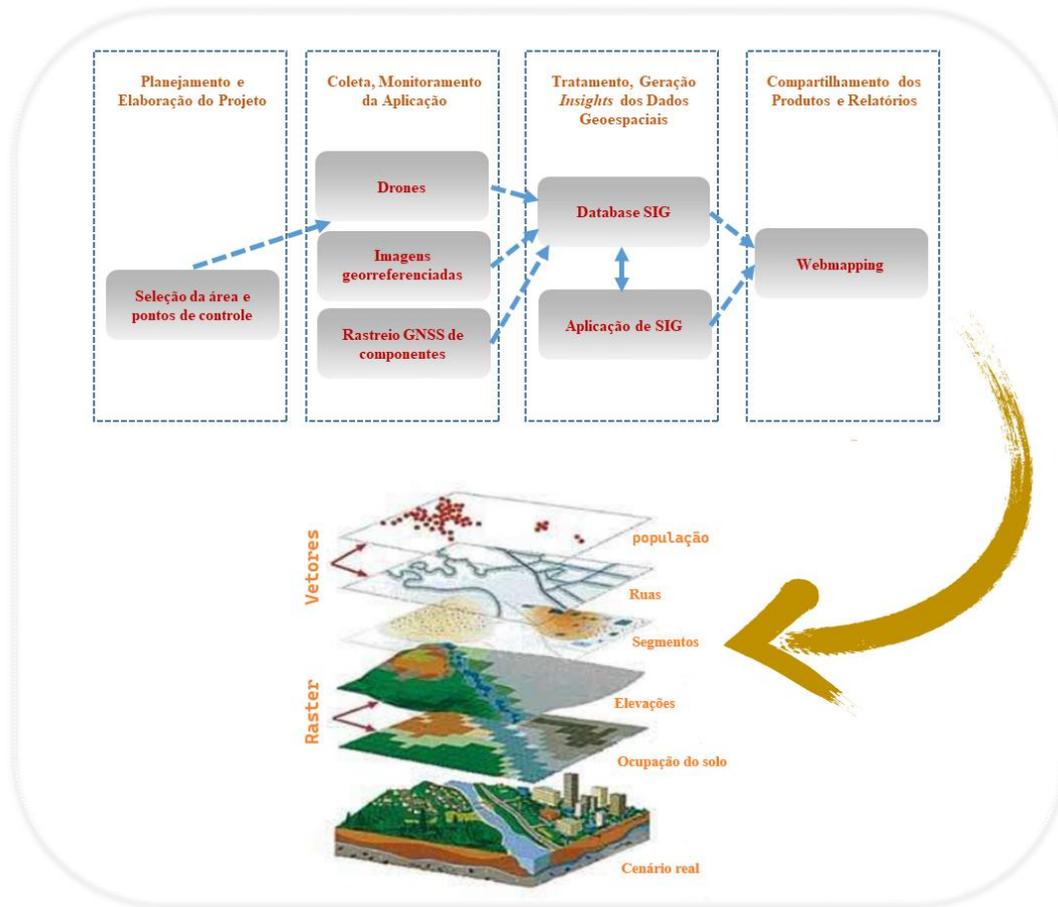


Figura 8: Composição de um SIG em camadas. Fonte: Adaptado de Rocha *et al.* (2015).

Tabela 7: Softwares aplicativos de SIG na agricultura de precisão. Fonte: Autores (2023).

Funcionalidades da Plataforma	GIS	WebGIS
Acesso	Em computadores locais ou redes internas, com exigência de licenças ArcGIS ou QGIS	Aplicação em nuvem ou servidor em rede, com acesso via Web, sem necessidade de software local
Infraestrutura mínima	Requer estações robustas, com alta capacidade de processamento e armazenamento.	Requer estrutura local menos robusta, com processamento e armazenamento remoto
Processamento de dados	Grande volume de dados de forma local, em análises geoespacial, como modelagem 3D	Visualização local do resultado do processamento em servidores remotos, com limitação para análises complexas
Colaboração	Limitada, dados necessitam de compartilhamento entre os diversos usuários da aplicação	Compartilhado, acesso distribuído, em tempo real, com acesso simultâneo de edição de dados por múltiplos usuários da aplicação
Atualização de dados	Sincronização local, e caso dados estejam alocados em máquinas diferentes, requer alto controle de versionamento de dados	Sincronização em tempo real para qualquer atualização realizada pelos usuários da aplicação, garantindo controle de versionamento de dados

Custo estimado	Requer licenças de software aplicativo por estação de uso, considerando ainda, os requisitos mínimos por máquina instalada	Requer licenças de software por servidor, considerando o número de usuários, com requisitos de máquinas locais usuárias menores. Há o custo adicional de assinatura para serviços e hospedagem, caso seja em nuvem.
Interatividade	Permite personalização de análises, relatórios e visões espaciais.	Customizado para personalização de dados, relatórios e visões espaciais, mas excelente poderoso para interações básicas das aplicações compartilhadas
Conectividade	Acesso local, sem exigência de saídas para a Internet	Exigência de saída Web para acesso de ferramentas e dados, principalmente para alocação em nuvem.
Manutenção	Controle local de atualizações de software aplicativo e hardware	Responsabilidade remota no servidor de aplicações por atualizações centralizadas
Segurança de dados	Maior controle por armazenamento local, mas exige cuidado com backups e protocolos de segurança internos	Segurança sob responsabilidade em quem aloca os servidores remotos, ou aplicação em nuvem, exigindo confiança em provedores quanto à integridade dos dados
Utilização na AP	Utilizados por Agtechs nas versões mais antigas de suas soluções, ou por exigência personalizada de clientes, sendo ainda excelente para criação de mapas detalhados de solo, culturas e clima, com análises profundas e personalizadas, principalmente em locais com deficiência de cobertura de redes de Internet	Maioria das soluções ofertadas por Agtechs, principalmente nos mercados com maior infraestrutura e cobertura de redes de Internet, sendo excelente opção para compartilhamento para usuários remotos em qualquer lugar, inclusive, via rede móveis, facilitando a colaboração

Sensores

Esses dispositivos promovem a coleta em tempo real das principais variáveis envolvidas na produção agrícola, como das condições do solo, plantas e clima (Shukla et al., 2023; Musa et al., 2023), através de drones, satélites e dispositivos de IoT, justificando o uso desses mecanismos em campo, por soluções AP (Alahmad et al., 2023; Karunathilake et al., 2023; NitinKamble e Kulkarni. 2024).

Sensores podem trabalhar em conjunto com os atuadores, desempenhando importante papel na coleta e controle de atividades corretivas de variáveis essenciais (Manjunath et al., 2024), por setores do plantio, como umidade do solo, temperatura, pH e situação de nutrientes (Peppi et al., 2023; Soussi et al., 2024), detecção de eventos como pragas (Qiao et a., 2022). Por exemplo, os atuadores controlam dosagem nos sistemas de irrigação, operando de acordo com parâmetros de ajustados por taxas variáveis de aplicação de fertilizantes, ou acionar pulverizadores para

aplicação de pesticidas ou herbicidas, ou ainda, para controle de aspersores de água.

As últimas gerações de sensores utilizados nas soluções de AP, estão sendo empregados com: Sistemas baseados em Arduino com software embarcado, controlados manualmente, ou remotamente; associados com tecnologias VRT, ajustando a dosagem de insumos (Mizik, 2023); com algoritmos de aprendizado de máquina (Li et al., 2023; Omia et al., 2023), para processamento e geração preditiva de informações coletadas, integradas com dispositivos de IoT (Das et al., 2023; Shahi et al., 2023), e big data (Bhat e Huang, 2021; Nyéki e Neményi, 2022), para reconhecimento de padrões e otimização de tomadas de decisões no campo.

De acordo com as funcionalidades e parâmetros requeridos pela aplicação do AP, os sensores podem ser térmicos, ópticos (Pande e Moharir, 2023) ou elétricos (Kim e Lee, 2022), geralmente transmitindo seus dados para um computador, que processa as informações

coletadas via rede sem fio (Huerta et al., 2021; Ragazou et al., 2022). Eles também podem ser remotos, como as características de sensoriamento remoto, ou sem fios (Musa et al., 2023), quando auxiliam na coleta de dados, no processamento de informações, a partir de imagens aéreas (drones ou satélites). Seu uso mais comum é na coleta direta de dados para gerar diagnósticos e decidir sobre a aplicação de insumos, como fertilizantes, reguladores de água e solo, todos em taxas diferentes, definindo a dosagem ideal. Com o

surgimento de novos dispositivos de IoT em soluções de AP, novas opções de sensores e aplicações estão sendo ofertadas (Tabela 8). Segundo Shukla et al. (2023), as perspectivas futuras do uso de sensores na agricultura de precisão apontam para processamento distribuído em soluções embarcadas, disponibilizando informações mais precisas por modelagem preditivas por inteligência artificial, com transferências de dados muito mais rápidas, em baixa latência, pela adoção da tecnologia 5G.

Tabela 8: Sensores e suas funcionalidades na solução de AP. Fonte: Adaptado de Singh et al. (2020).

Sensor	Tecnologia	Funcionalidades	Integração
Sensor de Umidade do Solo	IoT e Sensoriamento Capacitivo	Monitora o nível de umidade do solo em tempo real	Sistemas de irrigação automatizada via IoT
Câmera Multiespectral	Sensoriamento Remoto Passivo	Captura imagens multiespectrais para cálculo de índices vegetativos (NDVI, EVI) e avaliação da saúde da vegetação	Integração com drones, satélites e IA para análise de culturas
Câmera Hiperespectral	Sensoriamento Remoto Passivo/Ativo	Detecta variações espectrais detalhadas da vegetação, solo e água	Integração com drones, IA e GIS para mapeamento e análise preditiva
Câmera RGB	Sensoriamento Remoto Passivo	Captura imagens visíveis para detecção de pragas e monitoramento da colheita	Integração com drones e IA para análise de imagens agrícolas
Sensor de Condutividade Elétrica do Solo	Eletromagnética	Avalia a variabilidade de nutrientes e salinidade do solo	Integração com sistemas de VRT para otimização de fertilizantes
Lidar	Sensoriamento Remoto Ativo (Laser)	Mapeia a topografia do terreno e altura das plantas	Integração com drones e GIS para geração de modelos 3D
Estação Meteorológica	IoT e Sensores Climáticos	Monitora clima, temperatura, umidade, vento e precipitação	Integração com plataformas de previsão meteorológica e controle de irrigação

Sensores de Fertilizante	IoT e NIR	Monitora os níveis de nutrientes no solo e aplica fertilizantes de acordo	Integração com tratores e pulverizadores de taxa variável
Sensor de Nível de Água	Ultrassom e IoT	Monitora os níveis de água em reservatórios e sistemas de irrigação	Integração com sistemas de controle de irrigação automatizada
Sensor de PH do Solo	Eletroquímico e IoT	Mede o nível de acidez do solo em tempo real	Integração com software de gestão de fertilidade do solo
Radar de Abertura Sintética (SAR)	Sensoriamento Remoto Ativo (Micro-ondas)	Captura dados em todas as condições climáticas para monitoramento do solo e culturas	Integração com satélites e plataformas GIS para análise geoespacial

Veículos automatizados autômatos

A produção industrial avança para integração de hardware com alta tecnologia, inclusive nos equipamentos e dispositivos eletrônicos utilizados no agronegócio, como tratores, colheitadeiras, semeadoras e irrigadores. As soluções atuais de AP disponibilizadas pelas agtechs já suportam integração de veículos agrícolas automatizados com os demais componentes (Raghunath e Devi, 2022; Mukati et al., 2024), operados por softwares aplicativos embarcados e outros dispositivos de controle (Chakraborty et al., 2022; Sivasangari et al., 2023), auxiliados em navegação no campo por GPS, redes sem fio, RFID (Vrchota et al., 2022; Ünal et al., 2023), integrando-se a dispositivos de IoT e georreferenciamento por drones ou satélites (Padmanabhan e Megalingam, 2022), para coletar dados em tempo real, minimizando intervenção humana local.

Dentre as vantagens de sua utilização para atividades no campo (preparação solo, plantio, irrigação e colheita e transporte), estão a redução de mão de obra de campo, eficiência e produtividade, através da rapidez e precisão na intervenção segmentada de ocorrências de doenças, pragas, deficiências de solo e plantas, estresse hídrico e colheita e transporte, frente aos diagnósticos e ajustes necessários identificados (Kumari e Bhavanishankar, 2023). Entre as desvantagens e problemas identificados, dada a localização da maioria dos plantios em áreas rurais, estão os custos para aquisição por importação ou manutenção altos, necessidade de pessoal especializado, gerando barreira de utilização para médios e grandes produtores rurais (Shukla et al., 2023). Dentre os desafios encontrados por sua utilização em soluções de AP (Tabela 9), estão a complexidade de integração dos diversos componentes envolvidos, além da dificuldade de financiamentos (Sivasangari et al., 2023; Emmi et al., 2023).

Tabela 9: Principais veículos agrícolas utilizados na solução de AP. Fonte: Autores (2023).

Tipo de Veículo	Finalidade/uso	Componentes de AP Associados	Fabricantes	Custos estimados (Brasil)	Desafios atuais
Tratores Automatizados	Plantio, colheita, pulverização (diversos índices de plantio, solo)	Sensores solo, GPS, RFID, IoT, IA, big data	John Deere, Case IH	US\$ 600k	Necessidade de cobertura de rede eficiente. Com alto custo de manutenção
Colheitadeiras	Colheita autônoma de grãos com reconhecimento inteligente	SR Lidar, Sensores solo, VRT, wifi, IoT, IA, GPS	CLAAS, New Holland	US\$ 300k - \$500k	Alto custo de aquisição
Semeadoras	Semeadura de insumos diversos com precisão	Sensores de plantio, VRT, IoT, IA, GPS	John Deere, Kinze	US\$ 100k - \$200k	Complexidade na calibração dos sensores
Irigadores Automatizados	Distribuição de água com dosagem inteligente	Sensores de umidade, VRT, IA, IoT, GPS	Valmont, Lindsay Corp	US\$ 50k - \$100k	Manutenção regular, falhas de sensores
Capinadores Robóticos	Identificação, remoção de ervas daninhas diversas	Visão computacional, IA, Sensores de solo, GPS	Naïo Technologies	US\$ 50k - \$150k	Dificuldade em condições adversas do solo

Tecnologia de blockchain

A proposta para utilização da tecnologia de blockchain (Gangwani et al., 2023) nas soluções de agricultura de precisão pelas agtechs reflete as funcionalidades já implementadas na indústria (Javaid et al., 2021; Ali-Khusein e Urquhart, 2023). A finalidade principal de seu uso está ligada de suportar aplicações P2P com transações descentralizadas quanto a armazenamento, compartilhamento e tratamento de dados agrícolas, com alta proteção e confiabilidade (Navdeep et al., 2022), facilitando também a implementação de outras tecnologias, como computação em nuvem, virtualização de dados e processamento distribuído, em aplicativos móveis. A sua implementação propiciará a rastreabilidade de forma segura e transparente de dados, facilitando as propostas de financiamento de plantios por diversas entidades do mercado (Figura 9). A tecnologia de blockchain pode também contribuir para minorar desperdícios de produtos na cadeia logística. As agtechs e empresas de pesquisas estudam possibilidade de implementação da

tecnologia em dispositivos embarcados, como nas soluções de IoT e sensores (Padhy et al., 2023), facilitando novas funcionalidades na solução, como contratos inteligentes de compra e venda, precificação e transações de pagamentos de fornecedores e compradores (Pakseresht et al., 2023). Mas com certeza, a incorporação da tecnologia de blockchain irá aumentar a confiabilidade das aplicações de AP na geração dos dados da produção agrícola, como qualidade dos produtos, predições de resultados da produção e segurança alimentar, pelo controle autenticado de insumos e agrotóxicos, além de aumentar segurança para análises com privacidade de dados para sustentabilidade (Adewusi et al., 2024) do setor. Em um artigo de revisão, Pakseresht et al. (2023) analisam 44 artigos, e resumem as principais atividades relacionadas com agricultura empregam a tecnologia blockchain (Figura 8), demonstrando a tendência de desenvolvimento de sistemas voltados para propiciar o rastreamento da produção agrícola.

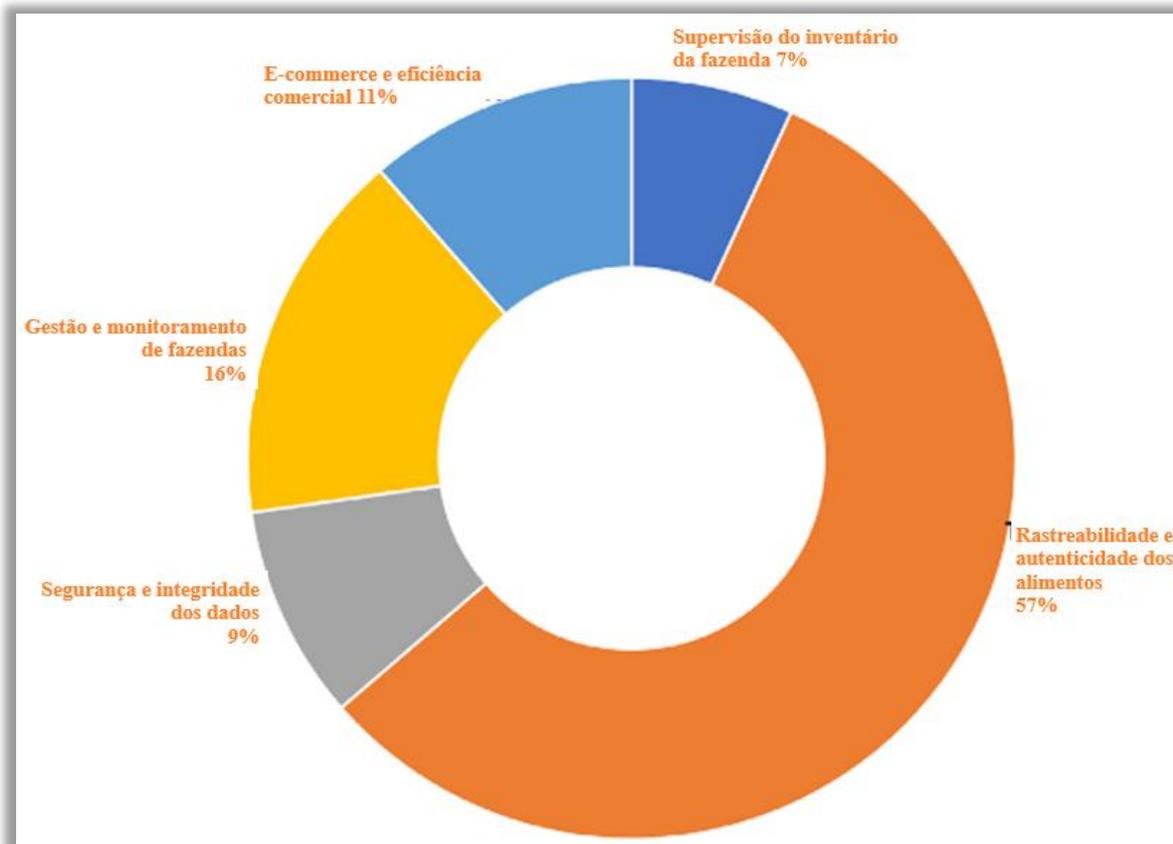


Figura 9: Distribuição de casos de uso de blockchain em agroalimentação. Fonte: Adaptado de Pakseresht et. (2023).

Mobile Apps

As aplicações móveis em soluções de AP foram inicialmente introduzidas para disponibilizar versões customizadas da AP, principalmente para o gerenciamento em campo. Dentre as funcionalidades básicas existentes: Interação com sensores, navegação de drones, redes wifi, informações de SR e IoT, diagnósticos por seções do terreno, disponibilizando informações de gerenciamento agrícola; recurso de informações agrícolas; calculadora agrícola; notícias agrícolas; clima; e m-governo (Colucci et al., 2022; Nagy e Lakatos, 2022). Os dispositivos móveis atuais possuem alta capacidade de processamento, permitindo combinar suporte a transações locais, oriundas de sensores do aparelho celular,

facilitando utilização de computação distribuída, com integração dos dados coletados com componentes como big data, realizando armazenamento em nuvem (computação em nuvem) pela aplicação de AP. Além disso, propiciam aumento da conectividade dos diversos componentes da solução, por oferta da cobertura da rede celular. Dentre as principais operações desenvolvidas pelas agtechs, estão (Tabela 10): Cultivo; gerenciamento de fazenda; e sistema de informação. Novas características estão sendo incorporadas, facilitadas por tecnologias como computação em nuvem, computação distribuída, computação de borda e redes celulares 5G (Tomaszewski et al., 2022).

Tabela 10: Aplicações móveis na solução de AP. Fonte: Adaptado de Mendes et al. (2020).

Módulo da solução de AP	Finalidade	Aplicações suportadas
Operações de Cultivo	Proteção e Diagnóstico	* Detecção e diagnóstico de pragas e doenças; * Identificação e tratamento de ervas daninhas; * Diagnóstico do solo e das plantas
	Nutrição e Fertilização	* Monitoramento da nutrição das culturas; * Gestão da pulverização; * Aplicação de fertilizantes.
	Irrigação	* Monitoramento do status hídrico das culturas; * Suporte à decisão de irrigação.
	Crescimento e Gestão do Dossel Vegetal	* Acompanhamento do crescimento do dossel; * Cálculo do Índice de Área Foliar (IAF).
	Colheita	* Estimativa de produtividade; * Indicadores de qualidade.
Gestão da Fazenda	Mapeamento de Campo e Informações do Solo	* Cálculo de localização e área do campo; * Identificação de pontos de coleta de amostras; * Indicadores agrícolas do solo (cor, pH, NPK, conteúdo de carbono).
	Gestão de Máquinas	* Estimativa de custos de máquinas; * Monitoramento em tempo real de trajetórias no campo; * Monitoramento de atividades, produtividade e uso eficiente das máquinas.
	Controle de Atividades da Fazenda	* Gestão de tarefas no campo * Gerenciamento de atividades dos trabalhadores rurais
Sistema de Informação	Informações e Insights	* Dicas e conhecimentos agrícolas; * Informações de mercado; * Notícias relevantes; * Comunicação com especialistas; * Dados climáticos.

Discussão

Os recursos investidos no mercado global para soluções de agricultura de precisão foram estimados em US\$ 5,49 bilhões em 2021, projetado para superar US\$ 19 bilhões até 2030, com CAGR (taxa de crescimento anual composta) de 14,95%

de 2022 (Nair,2023), onde analistas do MarketsandMarkets (2024) projetaram um crescimento de US\$ 81,5 bilhões em 2023, entre os dez maiores mercados produtores agrícolas, indo a US\$ 94,23 bilhões em 2024. Estes números demonstram que a solução de AP tem ganhado reconhecimento, ampliando sua base instalada,

resultado obtido de sua utilização nos mais variados tipos de plantio, em diversas regiões, contribuindo para a produção agrícola mundial (Figura 10). Embora diversos trabalhos de pesquisas apontem que as soluções de AP auxiliem

na produção agrícola, ainda há poucos relatórios abrangentes publicados, detalhando efetivamente a contribuição para a produção mundial, por região/país e cultura, frente a outros métodos de promoção desse crescimento.

País/Área	Evolução (produção em toneladas)		Mudança Absoluta	Mudança Relativa
	2009	2022		
Brasil	50.719.824	109.420.720	↑ 58.700.896	↑ 116%
Índia	16.719.500	33.729.540	↑ 17.010.040	↑ 102%
China (FAO)	164.107.550	277.415.550	↑ 113.308.000	↑ 69%
EUA	331.921.060	348.750.940	↑ 16.829.880	↑ 5%
América do Sul (FAO)	74.608.780	183.039.840	↑ 108.431.060	↑ 145%
Ásia (FAO)	234.263.360	389.892.540	↑ 155.629.180	↑ 66%
África (FAO)	60.750.668	92.800.970	↑ 32.050.302	↑ 53%
América Central (FAO)	23.830.832	30.717.768	↑ 6.886.936	↑ 29%
Europa (FAO)	84.589.620	102.694.190	↑ 18.104.570	↑ 21%
América do Norte	365.964.160	394.432.030	↑ 28.467.870	↑ 8%
Oceania (FAO)	627.736	637.819	↑ 10.083	↑ 2%

Figura 10: Evolução da produção mundial de milho por países e regiões, de 2009 a 2022. Fonte: Adaptado de FAO-STATS (2022).

No mesmo período analisado para a produção mundial de milho (Figura 10), dados históricos da evolução do uso de terra por países produtores mundiais (Figura 11), demonstram que países como China, Brasil e EUA apresentaram crescimento significativo de sua produção agrícola, contrastando proporcionalmente com o aumento da área plantada, sugerindo uso mais eficiente da produtividade por hectare plantado. Coincidentemente, estes países estão entre os que

mais produtores têm investido na utilização das soluções de AP, embora não se possa corroborar essa constatação com dados disponíveis em pesquisas na literatura. Dos relatórios citados acima, é possível evidenciar, corroborado com o relatório da FAO (FAO-STATS, 2022), os países mais desenvolvidos apresentam diferencial competitivo pelo reconhecimento da qualidade de produtos maior produtividade por hectare plantado.

País/Área	Evolução (uso terras em hectares)		Mudança Absoluta	Mudança Relativa
	2009	2022		
Brasil	13.654.715	21.037.668	↑ 7.382.953	↑ 54%
China (FAO)	31.203.368	43.102.264	↑ 11.898.896	↑ 38%
Índia	8.261.600	9.957.950	↑ 1.696.350	↑ 21%
EUA	32.168.810	32.054.280	↓ -114.530	↓ 0%
América do Sul (FAO)	19.606.748	33.325.184	↑ 13.718.436	↑ 70%
África (FAO)	30.301.654	41.770.892	↑ 11.469.238	↑ 38%
Ásia (FAO)	53.481.412	68.207.820	↑ 14.726.408	↑ 28%
Europa (FAO)	13.932.788	17.533.920	↑ 3.601.132	↑ 26%
América Central (FAO)	8.058.159	8.684.168	↑ 626.009	↑ 8%
América do Norte	41.979.704	42.558.610	↓ 578.906	↓ 1%
Oceania (FAO)	90.728	73.583	↑ -17.145	↑ -19%

Figura 11: Evolução do uso de terras para a produção mundial de milho, de 2009 a 2022. Fonte: FAO-STATS (2022).

Este artigo contextualizou a importância das aplicações de agricultura de precisão para a produção mundial de alimentos (Memon et al., 2023; Barbosa-Júnior et al., 2024; Bazargani e Deemyad, 2024; Govindaraj et al., 2024; Maurya et al., 2024; Petrović et al., 2024), ressaltando a importância de sua utilização por produtores nos países desenvolvidos, e percentualmente maior entre os grandes produtores agrícolas no mercado de países em desenvolvimento (Nair et al., 2023), impactando na melhoria da gestão do negócio (Szira et al., 2023), aumento da produtividade (Rimpika et al., 2023), otimização do monitoramento (Nagy e Lakatos, 2022) e gerenciamento das variáveis envolvidas do ciclo de crescimento e colheita da cultura (Upadhyay et al., 2024).

Outro aspecto que o trabalho procurou enfatizar focou na descrição funcional dos principais componentes constituintes da solução (Alahe et al., 2024; Canicatti e Vallone, 2024; Ijaz e Wozniak, 2024; Kumar, Sharma, Kedam, Patel, & Rathnayake, 2024a; Lamb et al., 2022; Lanucara et al., 2024; Muhammed et al., 2024; Padhiary et al., 2024; Raihan, 2024; Sharma e Shivandu, 2024; Vinod et al., 2024; Wang et al., 2024;), atualizando sobre a importância destes elementos, e a necessidade de sua perfeita integração na solução. A revisão apontou que a maioria das publicações selecionadas, está ligada à descrição geral da solução, descrição funcional de seus componentes,

principalmente os mais antigos, que evoluíram com as soluções de AP, como mapas multiespectrais de índices de solo, plantas e recursos hídricos, gerados por sensoriamento remoto, controle e aplicação de insumos por VRT, sensores de campo para métricas, aplicativos de SIG, e sistema de GPS para geolocalização e aeronavegação. Mais recentemente, cresceram publicações com dispositivos de IoT, sistema de informações com *big data*, drones, WebSIG, sensores inteligentes, sistemas automatizados, aplicativos móveis, redes 5 G, métodos de tratamento de dados e geração de informações estratégicas, com aprendizado de máquina (IA). Agora, intensificam-se artigos com preocupação em segurança e privacidade das transações do negócio, através de novos protocolos de comunicação e criptografia (Ongadi, 2024). Assuntos como regulamentações, políticas públicas de financiamento e fomento, atores envolvidos são dispersos, com pouca profundidade ou desatualizados.

Os benefícios citados na maioria dos artigos pesquisados nesta pesquisa focam na produtividade agrícola, gestão do negócio, principalmente relacionados com o controle de custos (preparação solo, aplicação de insumos e agroquímicos, uso de água, e energia); monitoramento (predição de colheita, logística e precificação); segurança e qualidade alimentar dos produtos gerados (detecção doenças e pragas, avaliação de nutrientes de solo e plantas, dosagem

precisa de agrotóxicos), além da sustentabilidade do negócio (época de plantio, roteiro de plantio, rastreabilidade). Outro fato destacado nos artigos é o constante aperfeiçoamento dos componentes da solução de AP, oriundo da diversificação da oferta de sistemas aplicativos por novas agtechs, que propiciará gradual redução de custos, combinada com a evolução de tecnologias decorrentes da indústria, e da ciência da computação, que viabilizarão a implementação da AP em larga escala, com maior modularidade, permitindo otimização das predições e monitoramento, suportados por ferramentas de inteligência artificial, convergindo para o conceito da agricultura 5.0 (Ragazou et al., 2022; Wrzecieńska et al., 2023). O aperfeiçoamento das soluções de AP, mediante redução dos problemas de integração entre componentes, também trará benefícios para os produtores usuários, pois aumentará a modularidade, possibilitando maior personalização ao tipo de cultura e tamanho da produção, concentrando a automação nas fases mais importantes do processo produtivo em uma fazenda. Por fim, o ganho percebido decorrente do aperfeiçoamento dos sistemas aplicativos de AP, com incorporação de requisitos para controlar com mais rigor os danos ambientais, resultante da crescente exigência do conceito de sustentabilidade ambiental (Azlan et al., 2024), pressionando por mais pesquisas em direção de temas como busca substitutivos de agroquímicos (biopesticidas), maior eficiência no uso de agrotóxicos, além do uso de energia limpa, agricultura sustentável, segurança alimentar e rastreabilidade de produtos.

Questões versando sobre problemas e dificuldades relacionadas à solução de AP, inerentes à barreira de ampliação da solução nos diversos mercados mundiais, também foram abordadas. Pesquisas sobre publicações na literatura analisadas, ressaltaram problemas ligados, principalmente, na integração de tecnologias utilizadas na solução de AP, complexidade operacional percebida por fazendeiros, falta de suporte especializado local. Além disso, a falta de soluções personalizadas, aderentes ao seu cenário de produção local, denota que o foco das agtechs (Mendes et al., 2022) e políticas em geral, nos países em desenvolvimento, ainda é voltado para grandes clientes, sem, entretanto, estimular a disponibilização de soluções modulares, gerando indecisão entre pequenos e médios fazendeiros (John et al., 2023), sobre a real possibilidade de retorno sobre investimentos, dado os preços altos de aquisição e manutenção da

solução. Outra questão ressaltada foi a de dificuldades de financiamento, tanto para aquisição da solução e equipamentos, quanto para capacitação de pessoal, quanto para serviços de suporte local especializado, visando sua manutenção, dependendo da região/país.

Como pontos de atenção sobre os desafios atuais para ampla aceitação da agricultura de precisão, duas vertentes foram citadas nesta revisão:

(a) Uma sobre necessidade de melhoria de planos de ações a serem procedidos, visando conscientização de governos e entidades ligadas a seu desenvolvimento, notadamente por nações em desenvolvimento, de forma que estimulem a ampliação de investimento públicos e privados, para amadurecimento e fortalecimento de base tecnológica de pesquisas e desenvolvimento e de serviços, atentando para quão estratégico será intensificar condições de apoio ao crescimento de segmento local especializado, representados por agtechs, programas de capacitação de serviços de IT, linhas de pesquisas em universidades e centros de tecnologia, incremento na diversificação de entidades de apoio aos pequenos e médios produtores, visando minimizar aceitação de seu uso, impactando diretamente no PIB, geração de empregos, e na questão ambiental. China, Índia e países da Europa Oriental são exemplos para esta questão, investindo pesadamente para superar estes desafios (Rimpika et al., 2023);

(b) Outra vertente é observada pela lacuna da competição por mercados consumidores, existente entre grandes países produtores desenvolvidos e em desenvolvimento, quanto à exportação de seus produtos (FAO-STATS, 2022; Nair, 2023), afetando lucratividade, causada nos primeiros, pela rapidez de incorporação das inovações tecnológicas nas soluções de AP (figura 2), promovidas pela variedade de agtechs altamente especializadas, pioneiras no lançamento de novas funcionalidades, advindas da disponibilidade de forte base tecnológica instalada, com políticas agressivas de fomento, minimizando custos, que diferenciam as soluções de AP, afetando a qualidade da gestão do negócio, otimização de recursos e custos, qualidade nutricional e segurança alimentar relacionadas a estes produtos, com maior precisão de projeções e comercialização de produtos. A diminuição desta lacuna para países produtores em desenvolvimento, passa por avaliar e adotar medidas, se for o caso, como nos exemplos da China, Índia e países da

Europa Oriental, buscando diferenciação nos produtos inerentes a estas regiões, com ampla aceitação nos mercados consumidores.

Em relatório publicado em janeiro de 2024 (Figura 12), a *U.S. Government Accountability Office – GAO (2024)*, agência independente norte-americana, vinculada ao Congresso dos EUA, realizou auditorias de políticas públicas executadas com destinação de recursos financeiros públicos,

emitindo o relatório GA-24-105962, onde analisou o emprego de soluções de AP entre os diversos estados norte-americanos. O país é um dos que mais investe no incentivo e utilização das aplicações de AP, mas, como mostrado no estudo, há condições de crescimento de seu mercado, frente aos desafios para sua aceitação, pois somente, em média, 27% dos produtores norte-americanos utilizam solução de AP.

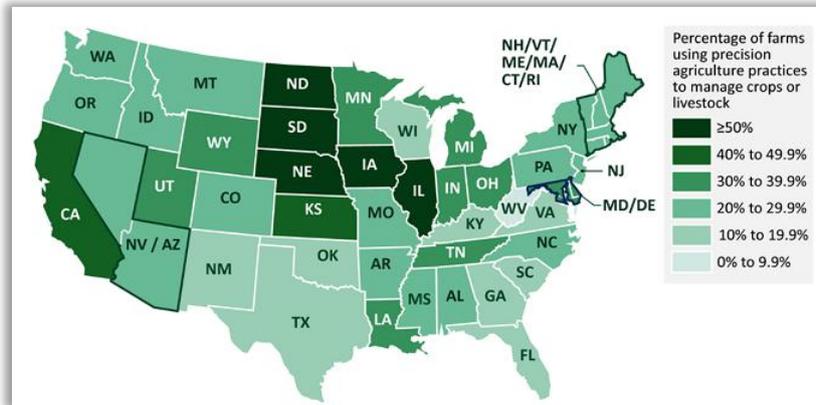


Figura 12: Taxa de penetração das soluções de AP no período de junho/2022 a junho/2023 nos estados norte-americanos (EUA). Fonte: GAO (2024).

O dano ambiental, em virtude do crescimento da atividade agrícola mundial, é tratado na preocupação de mercados consumidores, desenvolvedores da solução e demais atores envolvidos, que passam a incrementar mecanismos voltados para a sustentabilidade dos processos produtivos agrícolas. O uso da tecnologia de VRT, sensores de campo, drones, mapas categorizados de WebSIG, métodos de aprendizados de máquina de IA, dentre outros, buscam a eficientização do uso de água, aplicação dosada de reguladores de solo e plantas, pesticidas e demais agroquímicos (Bwambale et al., 2022; Bodrud-Doza et al., 2023). Ainda que com baixa ocorrência, grandes mercados importadores de alimentos passam a exigir informações creditadas, relacionadas aos impactos ambientais decorrentes da produção destes produtos comercializados. A percepção da sociedade consumidora de alimentos para gravidade do problema pode ser ressaltada em ações como o Simpósio Internacional sobre Segurança e Controle de Alimentos (IAEA, 2024), que está realizando estudos avançados sobre biotecnologia e segurança alimentar, promovido pela AIEA – Agência Internacional de Energia Atômica e FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, com participação de 112 países produtores mundiais, segundo o PR Newswire (2024),

que avaliam, mediante relatórios técnicos diversos, assuntos tratando sobre o emprego crescente de agrotóxicos na produção agrícola mundial (Figura 12). Outra importante ação, por exemplo, é a cooperação técnica EUA-China, através do projeto Clima-Smart, executada pelo grupo CSIS – Centro de Estudos Estratégicos e Internacionais (CSIS, 2024), que desenvolve, dentre outras pesquisas, avaliação e medidas de mitigação dos efeitos de gases do efeito estufa (GEE), decorrentes da atividade agrícola por limpeza de área de plantio, e aplicação de fertilizantes e agroquímicos diversos.

A acreditação dos processos de sustentabilidade ambiental pressiona por novas pesquisas e funcionalidades, que estão gradativamente sendo incorporadas nas soluções de AP, e permitirão implementar futuros mecanismos de auditoria, inspeções e fiscalizações mais efetivas, melhorando a percepção de qualidade nutricional e segurança alimentar dos produtos gerados, abrindo caminho para alternativas, como o uso de energia renovável (Rehman et al., 2024), bioinsumos (Biotec, 2024), e selo verde, visando redução de danos ambientais nos maiores produtores mundiais (Kanwal et al., 2022; Zanin et al., 2022).

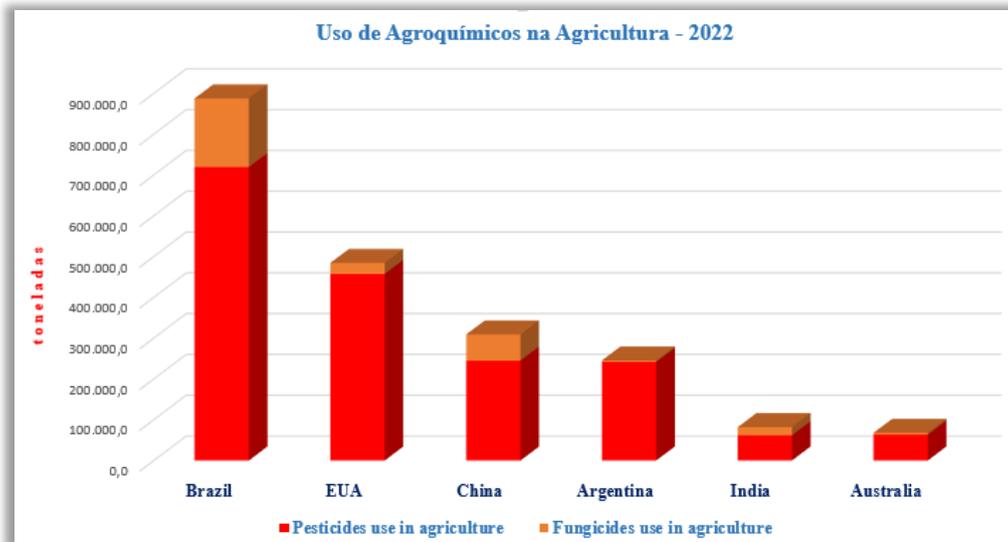


Figura 12: Emprego de agrotóxicos por alguns dos maiores produtores mundiais. Fonte: Adaptado de FAO-STATS (2022).

As perspectivas futuras para soluções de AP são promissoras e apontam, após pesquisas na literatura, para alguns fatores-chave, como:

(a) Agtechs disponibilizarão novas versões de sistemas aplicativos modulares aos projetos de AP, possibilitando a abstração de sua complexidade e minimização de barreira de entrada, principalmente para pequenos e médios produtores, que não contam com suporte local de pessoal especializado para operar e manter estes sistemas;

(b) Tendências de redução de custos iniciais e manutenção, pela oferta de sistemas mais personalizados e flexíveis pelas agtechs, além da ampliação da oferta de crédito e fomento, em termos mundiais, principalmente em países como China, Índia, Brasil e da Europa Central;

(c) Aumento da capacidade de processamento de grandes volumes de dados mediante novas tecnologias, como: Computação em nuvem (*cloud computing*), virtualização de sistemas (*system virtualization*), técnicas de

inteligência artificial com aprendizado de máquina profundo (*deep learning*, Sanaeifar et al., 2023), surgimento de novos protocolos de comunicação, como LTE-M, 6G (Polymeni et al., 2023), e NB-IoT (Soussi et al., 2024), bancos de dados interativos (*datalakes*), que suportarão implementação de novos dispositivos baseados em computação embarcada e distribuída (*edge computing*), como sensores, drones, veículos autômatos de campo, e aparelhos móveis para navegação amigável (*mobile handsets*);

(d) Melhor acurácia na predição de análises e predições do agronegócio, incrementando novas variáveis ao monitoramento e controle do plantio e colheita, pelo melhoramento de insumos com biotecnologia (Gor et al., 2024; Daware et al., 2024), nanotecnologia (Zain et al., 2024; Miguel-Rojas e Pérez-de-Luque, 2024) robotização inteligente (Cheng et al., 2023), que tornarão mais eficientes os procedimentos de identificação de doenças, deficiências de plantas e solo, dosagem de insumos e agrotóxicos (Kumar, Faoq, & Qureshi, 2024b).

Conclusão

Sistemas aplicativos de agricultura de precisão (AP) nos diversos temas tratados nesta revisão mostraram que a ferramenta está em evolução, com potencial significativo para contribuir para o aumento da produção mundial de alimentos, ao tempo que melhora a mitigação de seus impactos ambientais negativos.

Com a análise detalhada dos principais componentes de uma solução típica de agricultura de precisão, baseada em pesquisas na literatura de textos de revisão, os diversos problemas, desafios e benefícios, demonstram o potencial para aumentar sua taxa de penetração, principalmente em países em desenvolvimento, foram discutidos. O direcionamento das principais tendências requeridas para solução, também foi esclarecido, mostrando lacunas ainda não preenchidas, que podem ser atendidas por sua evolução tecnológica, pela disponibilidade de infraestrutura e por ações governamentais e privadas, visando diminuir a barreira de altos custos de implementação, principalmente para pequenos e médios produtores.

A revisão também ressaltou que, mesmo com maior utilização pelos países produtores mais desenvolvidos, além dos vultuosos valores financeiros investidos no desenvolvimento de soluções de AP, sua taxa de penetração média é baixa, em termos mundiais, havendo necessidade de readequação ou aperfeiçoamento das políticas de financiamento existentes para desenvolvedores (agtechs) e clientes, com aumento de ações de fomento de polos de capacitação e formação de profissionais e pesquisadores locais.

Este trabalho também aponta para a necessidade de mais pesquisas voltadas à personalização das soluções de AP, de forma a torná-las mais acessíveis e funcionais, em diferentes contextos geográficos e econômicos. Isto pode ser atingido com a inovação em tecnologias como IA, IoT e biotecnologia, que prometem transformar o setor agrícola, contribuindo não apenas para aumento da produtividade por hectare plantado, retardando a expansão de áreas plantadas sob diversos biomas. Também podem auxiliar para a segurança alimentar global, culminando na mitigação de seus efeitos para as mudanças climáticas. Em última análise, a solução AP pode desempenhar um papel crucial na agricultura sustentável, com sua evolução para o conceito de agricultura digital 5.0, devendo ser considerada prioridade estratégica em políticas agrícolas ao redor do mundo, combinada, ou alternativamente a outras medidas de contenção de danos ambientais.

Espera-se, com os temas aqui discutidos, contribuir para a pesquisa futura, que pode se concentrar em integrar essas tecnologias emergentes, a problemática social em torno da implantação deste tipo de solução, a criação de mecanismos para avaliação de seus impactos na economia, no meio ambiente, de forma a capacitar países produtores agrícolas, principalmente os em desenvolvimento, crescimento de sua riqueza, maior disponibilidade de alimentos, com processos sustentáveis.

Referências

- Aashu, Rajwar, K., Pant, M., & Deep, K. (2024). Application of Machine Learning in Agriculture: Recent Trends and Future Research Avenues (No. arXiv:2405.17465). arXiv. <http://arxiv.org/abs/2405.17465>.
- Abdelbaki, A., & Udelhoven, T. (2022). A Review of Hybrid Approaches for Quantitative Assessment of Crop Traits Using Optical Remote Sensing: Research Trends and Future Directions. *Remote Sensing*, 14(15), Artigo 15. <https://doi.org/10.3390/rs14153515>.
- Abobatta, W. F. (2021). Precision Agriculture: A New Tool for Development. Em S. M. Abd El-Kader & B. M. Mohammad El-Basioni (Orgs.), *Advances in Environmental Engineering and Green Technologies* (p. 23–45). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5000-7.ch002>
- Abu, N. S., Bukhari, W. M., Ong, C. H., Kassim, A. M., Izzuddin, T. A., Sukhaimie, M. N., Norasikin, M. A., & Rasid, A. F. A. (2022). Internet of Things Applications in Precision Agriculture: A Review. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 3(3), Artigo 3. <https://doi.org/10.18196/jrc.v3i3.14159>
- Adewusi, Onyeka Franca Asuzu, Temidayo Olorunsogo, Temidayo Olorunsogo, Ejuma Adaga, & Donald Obinna Daraojimba. (2024). AI in precision agriculture: A review of technologies for sustainable farming

practices. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 1, 2276–2285. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0314>

AgFunder. (2022). 10 Years of AgriFoodTech (and AgFunder!) | A Celebration and Potted History. <https://AgFundernews.com/>. Disponível em: <https://agfunder.com/research/10-years-agrifoodtech-and-agfunder-celebration-and-potted-history/>. Acesso em: 13 jan. 2022.

Ahmed, A., Hamza, S., Tahir, M. N., Saleem, S. R., & Ahmed, R. (2022). A Performance Comparison of Variable Rate Technologies for Spot-Specific and Uniform Spraying for Citrus Orchard. *The 1st International Precision Agriculture Pakistan Conference 2022 (PAPC 2022)*—Change the Culture of Agriculture, 21. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022023021>

Akhtar, M. N., Shaikh, A. J., Khan, A., Awais, H., Bakar, E. A., & Othman, A. R. (2021). Smart Sensing with Edge Computing in Precision Agriculture for Soil Assessment and Heavy Metal Monitoring: A Review. *Agriculture*, 11(6), Artigo 6. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060475>

Alahe, M. A., Wi, L., Chang, Y., Gummi, S. R., Kermeshi, J., & Yang, K. (2024). Cybersecurity in smart agriculture: Threat types, current status and future trends. *Computers and Electronics in Agriculture Journal*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109401>

Alahmad, T., Neményi, M., & Nyéki, A. (2023). Applying IoT Sensors and Big Data to Improve Precision Crop Production: A Review. *Agronomy*, 13(10), Artigo 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102603>

Arya, N., Sharma, A., & Vajpayee, A. (2024). Crop Disease Identification Using Deep Learning Techniques. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, 946–952. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24MAR885>

Azlan, Z. H. Z., Junaini, S. N., Bolhassan, N. A., Whai, R., & Arip, M. A. (2024). Harvesting

a sustainable future: An overview of smart agriculture's role in social, economic and environmental sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140338>

Barbosa-Júnior, M. R., Rodrigues, B. R. de A., Carreira, V. dos S., Brito Filho, A. L., & Shiratsuchi, L. S. (2024). Precision agriculture in the United States: A comprehensive meta-review inspiring further research innovation and adoption. *Computers and Electronics in Agriculture*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108993>

Bazargani, K., & Deemyad, T. (2024). Automation's impact on agriculture: Opportunities, challenges and economic effects. *Robotics*, 13(2), 33. <https://doi.org/10.3390/robotics13020033>

Belcore, E., Angeli, S., Colucci, E., Musci, M. A., & Aicardi, I. (2021). Precision agriculture workflow from data collection to data management using FOSS tools: An application in northern Italy vineyard. *International Journal of Geo-Information*, 10. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040236>.

Bhat, S. A., & Huang, N.-F. (2021). Big data and AI revolution in precision agriculture: Survey and challenges. *IEEE Access*, 9, 110209–110222. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3102227>.

Biotec. (2020). The National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (Biotec). Disponível em: <https://www.biotec.or.th/home/en/overview-en/>. Acesso em: 13 ago. 2024.

BNDES - BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO. (2022). Programas de financiamento do Governo Federal do Brasil. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/>. Acesso em: 21 jun. 2022.

Bodrud-Doza, M., Yang, W., Miranda, R. de Q., Martins, A., DeVries, B., & Fraser, E. D. G. (2023). Towards implementing precision conservation practices in agricultural watersheds: A review of the use and prospects of spatial decision support systems 4801

- and tools. *Science of the Total Environment*, 905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167118>
- Bomoi, M. I., Nawi, N. M., Abd Aziz, S., & Mohd Kassim, M. S. (2022). Sensing technologies for measuring grain loss during harvest in paddy field: A review. *AgriEngineering*, 4(1), 292–310. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4010020>
- Boopathi, S. (2024). Sustainable development using IoT and AI techniques for water utilization in agriculture. IGI Global, <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-1722-8.ch012>
- Bramantoro, A., Suhaili, W. S., & Siau, N. Z. (2022). Precision agriculture through weather forecasting. 2022 International Conference on Digital Transformation and Intelligence (ICIDI), IEEE Journal. <https://doi.org/10.1109/icdi57181.2022.10007299>
- Brini, M. (2023). AgTech adoption by farm's segment and production phase. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/370004655_AgTech_adoption_by_farm's_segment_and_production_phase_Digital_agriculture_and_farming_phases#fullTextFileContent
- Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>
- Canicatti, M., & Vallone, M. (2024). Drones in vegetable crops: A systematic literature review. *Agricultural Technology*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100396>
- CEBDS - Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. (2021). *Sistemas agroalimentares*. CEBDS. Disponível em: <https://cebds.org/camara-tematica/sistemas-agroalimentares/>. Acesso em: 14 jun. 2022
- Chaim, A., Neto, J. C., Queirós, L. R., & Junior, A. L. (2014). *AgroTIC em agricultura de precisão e automação agrícola*, capítulo 10. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1040539>. Acesso em: 21 jul. 2022
- Chakraborty, S., Elangovan, D., Govindarajan, P. L., ELnaggar, M. F., Alrashed, M. M., & Kamel, S. (2022). A comprehensive review of path planning for agricultural ground robots. *Sustainability*, 14(15), 9156. <https://doi.org/10.3390/su14159156>
- Cheng, C., Fu, J., Su, H., & Ren, L. (2023). Recent Advancements in Agriculture Robots: Benefits and Challenges. *Machines*, 11(1), 48. <https://doi.org/10.3390/machines11010048>
- Chintakunta, A. N., Koganti, S., Nuthakki, Y., & Kolluru, S. (2023). Deep learning and sustainability in agriculture: A systematic review. *International Journal of Computer Science & Mobile Computing*, 12(8), 150-164. <https://doi.org/10.47760/ijcsmc.2023.v12i08.017>
- Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2012). SciMAT: A new science mapping analysis software tool. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 63(8), 1609-1630. <https://doi.org/10.1002/asi.22688>
- Colucci, G., Botta, A., Tagliavini, L., Cavallone, P., Baglieri, L., & Quaglia, G. (2022). Kinematic modeling and motion planning of the mobile manipulator Agri.Q for precision agriculture. *Machines*, 10(5), 321. <https://doi.org/10.3390/machines10050321>
- Das, P., Kumar, A., Nath, N., Mishra, L., & Gautam, V. (2023). Application of drone technology in precision agriculture: Enhancing efficiency and sustainability. Em *Book, Advances in Land and Water Resources Management Concept and Application* (p. 113-124). https://www.researchgate.net/publication/373833447_application_of_drone_technology_in_precision_agriculture_enhancing_efficiency_and_sustainability
- Daware, V., Mondal, K., & Khandagale, S. (2024). Precision agriculture and biotechnology. 4802

- ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/378343059_precision_agriculture_and_biotechnology
- Debauche, O., Mahmoudi, S., Manneback, P., & Lebeau, R. (2022). Cloud and distributed architectures for data management in agriculture 4.0: Review and future trends. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 1319-1578.
<https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.09.015>
- Dos Santos, R. P., Fachada, N., Beko, M., & Leithardt, V. R. Q. (2023). A rapid review on the use of free and open-source technologies and software applied to precision agriculture practices. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 12(2), 28.
<https://doi.org/10.3390/jsan12020028>
- Dumont, M., Brun, G., Oger, O., Taugourdeau, O., Boukcim, H., Taylor, J. A., & Tisseyre, B. (2023). A novel approach for field sampling optimization incorporating a generic operational cost constraint. *Conference Proceedings*. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-947-3_68
- Elahi, M., Afolaranmi, S. O., Lastra, J. L. M., & Garcia, J. A. P. (2023). A comprehensive literature review of the applications of AI techniques through the lifecycle of industrial equipments. *Discover Artificial Intelligence Journal*, 3, 3-43.
<https://doi.org/10.1007/s44163-023-00089-x>
- Embrapa - Embrapa Meio Ambiente. (2022). *Agricultura e efeito estufa*. Disponível em: <https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/index.php3?sec=agrog::85>. Acesso em: 13 jun. 2022
- Emmi, L., Fernandez, R., & Guerrero, J. M. (2023). Editorial: Robotics for smart farms. *Frontiers in Robotics and AI*, 9, 1113440.
<https://doi.org/10.3389/frobt.2022.1113440>
- Ezziyyani, M., Hamdache, A., Cherrat, L., Laksiby, I., Ezziyyani, M., Alilou, H., Mauri, J., Chaik, A., & Gilabert, C. E. (2023). Contribution to the development of a technological platform for analysis in precision agriculture for the biovigilance of cryptogamic diseases in strawberry (*Fragaria × ananassa*). *Conference Paper*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35248-5_57
- Fakhar, M. I., & Khalid, M. N. (2023). Satellites to agricultural fields: The role of remote sensing in precision agriculture. *Biological and Agricultural Sciences Research Journal*, 2(14).
<https://doi.org/10.54112/basrj.v2023i1.14>
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). Disponível em: <https://www.fao.org/home/en>. Acesso em: 05 nov. 2023
- FAO-STAT, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *FAOSTAT [Statistical Data]: Major Commodities Importers*. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/major_commodities_imports. Acesso em: 21 jun. 2023
- Fatima, S. A., Nasim, S. F., & Ahmed, S. (2024). Enhancing agricultural operations: Big data analytics using distributed and parallel computing. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25771.21281>
- Gamal, M., Elhamahmy, M., Taha, S., & Elmahdy, H. (2024). Improving intrusion detection using LSTM-RNN to protect drones' networks. *Egyptian Informatics Journal*, 2024(100501).
<https://doi.org/10.1016/j.eij.2024.100501>
- Gangwani, P., Pons, A., Joshi, S., Upadhyay, H., & Lagos, L. (2023). Integration of data science and IoT with blockchain for industry 4.0. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 978-981-19-8730-4, 6.
https://doi.org/10.1007/978-981-19-8730-4_6
- GAO - U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE (2024). *Precision agriculture: Benefits and challenges for the adoption and use of technology*. Disponível em: <https://www.gao.gov/products/gao-24-105962>. Acesso em: 09 ago. 2024
- Gawande, V., Saikanth, D. R. K., Sumithra, B. S., Aravind, S. A., Swamy, G. N., & Chowdhury, M. (2023). Potential of

precision farming technologies for eco-friendly agriculture. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(19), 3528. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i193528>

- Gill, R., & Chawla, P. (2021). A review on various techniques to transform traditional farming to precision agriculture. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 2(2), 131–135. <https://turcomat.org/index.php/turkbilmat/article/view/690>
- Gokool, S., Mahomed, M., Kunz, R., Clulow, A., Sibanda, M., Naiken, V., Chetty, K., & Mabhaudhi, T. (2023). Crop monitoring in smallholder farms using unmanned aerial vehicles to facilitate precision agriculture practices: A scoping review and bibliometric analysis. *Sustainability*, 15(4), Artigo 4. <https://doi.org/10.3390/su15043557>
- Gonçalves, P., Pedreiras, P., & Monteiro, A. (2022). Foreword to the special issue on advanced IoT technologies in agriculture. *Applied Sciences*, 12(19). <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/19/10102>
- Govi, D., Pappalardo, S., De Marchi, M., & Meggio, F. (2024). From space to field: Combining satellite UAV and agronomic data in an open-source methodology for the validation of NDVI maps in precision viticulture. *Remote Sensing*, 16, 735. <https://doi.org/10.3390/rs16050735>
- Hashemi-Beni, L., Gebrehiwot, A., Karimodini, A., Shahbazi, A., & Dorbu, F. (2022). Deep convolutional neural networks for weeds and crops discrimination from UAS imagery. *Frontiers in Remote Sensing*, 3, 755939. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.755939>
- He, L. (2023). Variable rate technologies for precision agriculture. Em Zhang Q. (eds) *Encyclopedia of Digital Agricultural Technologies*. Springer Cham https://doi.org/10.1007/978-3-030-89123-7_34-3
- He, Q. (2024). Edge computing-oriented smart agricultural supply chain mechanisms with auction and fuzzy neural networks. *Journal of Cloud Computing*, 13. <https://doi.org/10.1186/s13677-024-00626-8>
- Huerta, M. K., García-Cedeño, A., Guillermo, J. C., & Clotet, R. (2021). Wireless sensor networks applied to precision agriculture: A worldwide literature review with emphasis on Latin America. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2020.3044235>
- Huihui, Y., Daoliang, L., & Yingyi, C. (2023). A state-of-the-art review of image motion deblurring techniques in precision agriculture. *Heliyon*, 9(6), e17332. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17332>
- Hundal, G. S., Laux, C. M., Buckmaster, D., Sutton, M. J., & Langemeier, M. (2023). Exploring barriers to the adoption of Internet of Things-based precision agriculture practices. *Journal of Agriculture*, 13(163). <https://doi.org/10.3390/agriculture13010163>
- Ijaz, M. F., & Wozniak, M. (2024). Recent advances in big data, machine, and deep learning for precision agriculture. *Frontiers Media SA*. <https://doi.org/10.3389/978-2-8325-4495-2>
- Javaid, M., Haleen, A., Singh, R. P., Khan, S., & Suman, R. (2021). Blockchain technology applications for Industry 4.0: A literature-based review. *Blockchain: Research and Applications Journal*, 2(4). <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2021.100027>
- John, D., Hussin, N., Shahibi, M. S., Ahmad, M., Hashim, H., & Ametefe, D. S. (2023). A systematic review on the factors governing precision agriculture adoption among small-scale farmers. *Outlook on Agriculture*, 52(4), 469–485. <https://doi.org/10.1177/00307270231205640>
- Johnraja, J., Leelipushpam, P., Shirley, C., & Princess, J. (2024). Impact of cloud computing on the future of smart farming. *Em Futuristic Trends in Physical Sciences* (pp. 391–420). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51195-0_18

- Karada, M. S., Bajpai, R., Singh, M., Singh, A. K., Agnihotri, D., & Singh, B. K. (2023). A review on advances in agriculture and agroforestry with GPS and GIS. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(6), 150–160. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i62849>.
- Karunathilake, E. M. B. M., Le, A. T., Heo, S., Chung, Y. S., & Mansoor, S. (2023). The path to smart farming: Innovations and opportunities in precision agriculture. *Agriculture* MDPI. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081593>.
- Kendall, H., Clark, B., Li, W., Jin, S., Jones, G. D., Chen, J., Taylor, J., Li, Z., & Frewer, L. J. (2022). Precision agriculture technology adoption: A qualitative study of small-scale commercial “family farms” located in the North China Plain. *Precision Agriculture*, 23(1), 319–351. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09839-2>.
- Kganyago, M., Adjorlolo, C., Mhangara, P., & Tsoeleng, L. (2024). Optical remote sensing of crop biophysical and biochemical parameters: An overview of advances in sensor technologies and machine learning algorithms for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218, 108730. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108730>.
- Kim, M.-Y., & Lee, K. H. (2022). Electrochemical sensors for sustainable precision agriculture—A review. *Frontiers in Chemistry*, 10, 848320. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.848320>.
- Kim, W.-S. (2023). Data-driven agricultural innovation technology for digital agriculture. *Applied Science Journal*, 13. <https://doi.org/10.3390/app132011163>.
- Krishnababu, M. E., Rama Devi, B., Soni, A., Panigrahi, C. K., Sudeepthi, B., Rathi, A., & Shukla, A. (2024). A review on precision agriculture navigating the future of farming with AI and IoT. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(2), 336–349. <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2024/v10i2291>.
- Kumar, I., & Bargavi, D. S. (2024). The role of data science in precision agriculture. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 6. <https://doi.org/10.56726/IRJMETS50263>.
- Kumar, M., Sinha, A. K., & Kumar, N. (2022). Literature review of smart and precision agriculture by applying IoT module. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 10(IX). <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.46688>.
- Kumar, R., Farooq, M., & Qureshi, M. (2024b). Advancing precision agriculture through artificial intelligence: Exploring the future of cultivation. *Em Capítulo 10* (pp. 151–165). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-24001-0.00010-5>.
- Kumar, V., Sharma, K. V., Kedam, N., Patel, A., Kate, T. R., & Rathnayake, U. (2024a). A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies. *Agricultural Technology*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100487>.
- Kumari, A., & Bhavanishankar, K. (2023). Precision agriculture. *International Journal of Computing Algorithm*, 12(1). <https://doi.org/10.20894/IJCOA.101.012.001.004>.
- Kurniawan, D., Indah, D. R., & Sari, P. (2023). Geo-informatics for the future: A systematic literature review on the role of WebGIS in infrastructure planning and development. *Indonesian Journal of Computer Science*. <https://doi.org/10.33022/ijcs.v12i3.3228>.
- Lamb, J. R., Araújo, E. C., Bazzi, C. L., & Maggi, M. F. (2022). Sampling in precision agriculture: A software for navigation in field activities. *Sustainable Computing: Informatics and Systems Journal*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100804>.
- Lanucara, S., Praticò, S., Pioggia, G., Di Fazio, S., & Modica, G. (2024). Web-based spatial decision support system for precision agriculture: A tool for delineating dynamic management unit zones (MUZs).

- Agricultural Technology, 8. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100444>
- Lara, L. M., Gebler, L., Leite Júnior, M. J., & Soares, A. L. (2021). Precision agriculture trends in fruit growing from 2016 to 2020. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 43(2), e-096. <https://doi.org/10.1590/0100-29452021096>.
- Li, J., Chen, D., Qi, X., Li, Z., Huang, Y., Morris, D., & Tan, X. (2023). Label-efficient learning in agriculture: A comprehensive review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 215, 108412. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108412>.
- Lu, L., Tian, G., & Hatzenbuehler, P. (2022). How agricultural economists are using big data: A review. *China Agricultural Economic Review*, 14(3), 494–508. <https://doi.org/10.1108/CAER-09-2021-0167>.
- Manjunath, N., Bharatkumar, S. S., Spoorthi, R. B., Chinmayi, N. J., & Tejashwini, C. (2024). Survey on optimal crop prediction using soil and weather analysis. *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*, 352–355. <https://doi.org/10.48175/IJAR SCT-18154>.
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Governo Federal do Brasil. (2022). Agricultura digital e de precisão. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1>. Acesso em: 13 jul. 2022.
- Maurya, D. K., Maurya, S. K., Kumar, M., Chaubey, C., Gupta, D., Patel, K. K., Mehta, A. K., & Yadav, R. (2024). A review on precision agriculture: An evolution and prospect for the future. *International Journal of Plant & Soil Science*, 36(5), 363–374. <https://doi.org/10.9734/ijps/2024/v36i54534>.
- Melzer, M., Schulze, L., & Becker, A. (2023). Commercial farm management information systems: A demand-oriented analysis of functions in practical use. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100203>
- Memon, K., Umrani, F. A., Baqai, A., & Syed, Z. S. (2023). A review based on comparative analysis of techniques used in precision agriculture. 2023 4th International Conference on Computing Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), 1–7. <https://doi.org/10.1109/iCoMET57998.2023.10099182>.
- Mendeley. (2021). Search | Mendeley [Bibliographic reference manager]. Elsevier Company. Disponível em: <https://www.mendeley.com/search/>. Acesso em: 13 jun. 2023.
- Mendes, J., Bueno, L., Oliveira, A., & Gerolamo, M. (2022). Agriculture startups (AgTechs): A bibliometric study. *International Journal of Professional Business Review*, 7, 1–18. <https://doi.org/10.26668/businessreview/2022.v7i2.312>.
- Mendes, J., Pinho, T., Santos, F. N., Sousa, J., Peres, E., Cunha, J. B., Cunha, M., & Morais, R. (2020). Smartphone applications targeting precision agriculture practices—A systematic review. *Agronomy Journal*, 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060855>
- Messina, G., & Modica, G. (2022). Twenty years of remote sensing applications targeting landscape analysis and environmental issues in olive growing: A review. *Remote Sensing*, 14(21), 5430. <https://doi.org/10.3390/rs14215430>.
- Micheni, E., Machii, J., & Murumba, J. (2022). Internet of things, big data analytics, and deep learning for sustainable precision agriculture. 2022 IST-Africa Conference (IST-Africa), 1–12. <https://doi.org/10.23919/IST-Africa56635.2022.9845510>.
- Miguel-Rojas, C., & Pérez-de-Luque, A. (2023). Nanobiosensors and nanoformulations in agriculture: New advances and challenges for sustainable agriculture. *Environmental Technology & Innovation*, 7. <https://doi.org/10.1042/ETLS20230070>.
- Misara, R., Verma, D., Mishra, N., Rai, S. K., & Mishra, S. (2022). Twenty-two years of precision agriculture: A bibliometric review. *Precision Agriculture*, 23(6), Artigo 6. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09969-1>.

- Mitchell, S., Weersink, A., & Bannon, N. (2021). Adoption barriers for precision agriculture technologies in Canadian crop production. *Canadian Journal of Plant Science*, 101(3), 412–416. <https://doi.org/10.1139/cjps-2020-0234>.
- Mizik, T. (2023). How can precision farming work on a small scale? A systematic literature review. *Precision Agriculture*, 24, 384–406. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09934-y>
- Muhammed, D., Ahvar, E., Ahvar, S., Trocan, M., Montpetit, M.-J., & Ehsani, R. (2024). Artificial intelligence of things (AIoT) for smart agriculture: A review of architectures, technologies, and solutions. *Journal of Network and Computer Applications*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103905>.
- Mukati, E. N., Thakur, M. S., Rege, M. P., & Chourasiya, E. A. (2024). Leveraging 5G Drone Technology for Enhanced Agricultural Automation. 8(3), 347–352. www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd64894.pdf.
- Musa, P., Sugeru, H., & Wibowo, E. P. (2023). Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review of NPK Sensor Implementations. *Sensors*, 24(1), 51. <https://doi.org/10.3390/s24010051>
- Nagy, S., & Lakatos, V. (2022). The meaning of ICT tools and the control of one in agriculture, with special respect for one for mobile software and applications. *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok*, 17(1–2), 93–108. <https://doi.org/10.14232/jtgf.2022.1-2.93-108>
- NASA - National Aeronautics and Space Administration (2022). WebGIS public - Disponível em: <https://www.nasa.gov/>. Acesso em: 12 jun. 2022.
- Navdeep, Siwach, V., Sehrawat, H., & Dahiya, O. (2022). Hybrid Blockchain Security Mechanism for protection of data related to Precision Agriculture. 2022 10th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO), 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICRITO56286.2022.9964757>
- Nguyen, L. L. H., Halibas, A., & Quang Nguyen, T. (2023). Determinants of precision agriculture technology adoption in developing countries: A review. *Journal of Crop Improvement*, 37(1), 1–24. <https://doi.org/10.1080/15427528.2022.2080784>
- NitinKamble, N., & Kulkarni, D. A. (2024). INTERNET OF THINGS (IOT) AND SMART WORLD. Em Dr. A. K. Singh, Dr. S. Chapi, Dr. H. K. Pandey, & Mrs. V. Sridhar (Orgs.), *Futuristic Trends in Physical Sciences Volume 3 Book 1 (First, p. 232–265)*. Iterative International Publishers, Selfypage Developers Pvt Ltd. <https://doi.org/10.58532/V3BKPS1CH13>
- Nyéki, A., & Neményi, M. (2022). Crop Yield Prediction in Precision Agriculture. *Agronomy*, 12(10), 2460. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102460>
- Oliveira, M. C., Amaral, P. V., Oliveira, S. F., & Oliveira, J. R. (2023). Improving water efficiency in agriculture using IoT-based systems: A case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 108. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10875-7>.
- Omia, E., Bae, H., Park, E., & Kim, M. S. (2023). Remote Sensing in Field Crop Monitoring: A Comprehensive Review of Sensor Systems, Data Analyses and Recent Advances. *Remote Sensor*. <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/2/354>
- Ongadi, P. A. (2024). A comprehensive examination of security and privacy in precision agriculture technologies. *GSC Advanced Research and Reviews*, 18(1), 336–363. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.18.1.0026>
- Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, 72(4), 411–458. <https://doi.org/10.1002/net.21818>
- Padhiary, M., Saha, D., Kumar, R., & Sethi, L. N. (2024). Enhancing precision agriculture: A comprehensive review of machine learning and AI vision applications in all-terrain

- vehicle for farm automation. 8. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100483>
- Padhy, S., Alowaidi, M., Dash, S., Alshehri, M., Malla, P. P., Routray, & S., Alhumyani, H. (2023). AgriSecure: A Fog Computing-Based Security Framework for Agriculture 4.0 via Blockchain. *Processes*, 11(3), 757. <https://doi.org/10.3390/pr11030757>.
- Padmanabhan, A. A., & Megalingam, R. K. (2022). Autonomous Agricultural Farming Robot for Automatic Ploughing in a Closed Field. 2022 IEEE 19th India Council International Conference (INDICON), 1–6. <https://doi.org/10.1109/INDICON56171.2022.10040212>.
- Pakseresht, A., Yavari, A., Kaliji, S. A., & Hakelius, K. (2023). The intersection of blockchain technology and circular economy in the agri-food sector. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 260–274. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.002>.
- Pande, C. B., & Moharir, K. N. (2023). Application of Hyperspectral Remote Sensing Role in Precision Farming and Sustainable Agriculture Under Climate Change: A Review. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19059-9_21.
- Pasandideh, F., Da Costa, J. P. J., Kunst, R., Islam, N., Hardjawana, W., & Pignaton De Freitas, E. (2022). A Review of Flying Ad Hoc Networks: Key Characteristics, Applications, and Wireless Technologies. *Remote Sensing*, 14(18), 4459. <https://doi.org/10.3390/rs14184459>.
- Pasquel, D., Roux, S., Richetti, J., Cammarano, D., Tisseyre, B., & Taylor, J. A. (2022). A review of methods to evaluate crop model performance at multiple and changing spatial scales. *Precision Agriculture*, 23(4), Artigo 4. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09885-4>.
- Peppi, L. M., Zauli, M., Manfrini, L., Grappadelli, L. C., Marchi, L. D., & Traverso, P. A. (2023). Low-cost, high-resolution and no-manning distributed sensing system for the continuous monitoring of fruit growth in precision farming. *Acta IMEKO*, 12(2), Artigo 2. <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v12i2.1342>.
- Petrović, B., Bumbálek, R., Zoubek, T., Kuneš, R., & Smutný, L. (2024). Application of precision agriculture technologies in Central Europe-review. 15. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101048>.
- Polymeni, S., Plastras, S., Skoutas, D. N., Kormentzas, G., & Skianis, C. (2023). The Impact of 6G-IoT Technologies on the Development of Agriculture 5.0: A Review. *Electronics*, 12(12), 2651. <https://doi.org/10.3390/electronics12122651>.
- PR Newswire, U. G. (2024). Precision Farming and Biotech Innovations Drive Agricultural Growth and Global Food Security. Disponível em: <https://www.prnewswire.com/news-releases/precision-farming-and-biotech-innovations-drive-agricultural-growth-and-global-food-security-302159598.html>. Acesso em: 28 ago. 2024.
- Prey, L., & Schmidhalter, U. (2019). Simulation of satellite reflectance data using high-frequency ground based hyperspectral canopy measurements for in-season estimation of grain yield and grain nitrogen status in winter wheat. 149, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.023>.
- Qiao, Y., Valente, J., Su, D., Zhang, Z., & He, D. (2022). Editorial: AI, sensors and robotics in plant phenotyping and precision agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1064219. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1064219>.
- Radhika, A., & Masood, Dr. M. S. (2022). Crop Yield Prediction by Integrating Et-DP Dimensionality Reduction and ABP-XGBOOST Technique. *Journal of Internet Services and Information Security*, 12(4), 177–196. <https://doi.org/10.58346/JISIS.2022.I4.013>.
- Radočaj, D., Plaščak, I., & Jurišić, M. (2023a). Global Navigation Satellite Systems as State-of-the-Art Solutions in Precision Agriculture: A Review of Studies Indexed in the Web of Science. *Agriculture*, 13(7), Artigo 7. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071417>.
- Radočaj, D., Šiljeg, A., Marinović, R., & Jurišić, M. (2023b). State of Major Vegetation Indices in Precision Agriculture Studies Indexed in Web of Science: A Review. *Agriculture*, 13(3), Artigo 3.

<https://doi.org/10.3390/agriculture1303070>

7

- Ragazou, K., Garefalakis, A., Zafeiriou, E., & Passas, I. (2022). Agriculture 5.0: A New Strategic Management Mode for a Cut Cost and an Energy Efficient Agriculture Sector. *Energies*, 15(9), 3113. <https://doi.org/10.3390/en15093113>.
- Raghunath, S., & Devi, K. S. (2022). IOT IN PRECISION FARMING FOR A SUSTAINABLE FUTURE. 13(10), 728–764. <https://doi.org/10.47750/pnr.2022.13.S10.078>.
- Rai, N., Pandey, S. K., & Tiwari, K. (2023). Advancements in deep learning techniques for disease detection in precision agriculture: A comprehensive review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106364. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106364>.
- Raihan, A. (2024). A Systematic Review of Geographic Information Systems (GIS) in Agriculture for Evidence-Based Decision Making and Sustainability. <https://doi.org/10.56556/gssr.v3i1.636>
- Raouhi, E. M., Lachgar, M., Hrimech, H., & Kartit, A. (2023). Unmanned Aerial Vehicle-based Applications in Smart Farming: A Systematic Review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(6). <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.01406123>.
- Reda, M., Refaai, A., Dattu, V. S., Gireesh, N., Dixit, N., & Sandeep, C. H. (2023). Retracted: Application of IoT-Based Drones in Precision Agriculture for Pest Control. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023(1), 1–1. <https://doi.org/10.1155/2023/9763026>.
- Rehman, A. U., Alamoudi, Y., Khalid, H. M., Morchid, A., Muyeen, S. M., & Abdelaziz, A. Y. (2024). Smart agriculture technology: An integrated framework of renewable energy resources, IoT-based energy management, and precision robotics. 9. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100132>.
- Rehman, U., Iqbal, T., Hussain, S., Cheema, M. J. M., Iqbal, F., & Basit, A., (2023). Drone and Robotics Roadmap for Agriculture Crops in Pakistan: A Review. *Environmental Sciences Proceeding Journal*, p. 23-39. <https://doi.org/10.3390/envirosciproc2022023039>.
- Rejeb, A., Abdollahi, A., Rejeb, K., & Treiblmaier, H. (2022). Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107017>.
- Rennings, M., Baaden, P., Block, C., John, M., & Bröring, S. (2024). Assessing emerging sustainability-oriented technologies: The case of precision agriculture. *Scientometrics*, 129(6), 2969–2998. <https://doi.org/10.1007/s11192-024-05022-2>.
- Rimpika, Anushi, Manasa, S., Anusha K. N., Sharma, S., Thakur, A., Shilpa, & Sood, A. (2023). An Overview of Precision Farming. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(12), 441–456. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i123701>.
- Rivera, G., Porras, R., Florencia, R., & Sánchez-Solís, J. P. (2023). LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: A review of recent advances. *Computers and Electronics in Agriculture*, 207, 107737. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107737>.
- Sanaeifar, A., Guindo, M. L., Bakhshipour, A., Fazayeli, H., Li, X., & Yang, C. (2023). Advancing precision agriculture: The potential of deep learning for cereal plant head detection. 209. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107875>.
- Sanyaolu, M., & Sadowski, A. (2024). The Role of Precision Agriculture Technologies in Enhancing Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 16(15), 6668. <https://doi.org/10.3390/su16156668>.
- Saranya, T., Deisy, C., Sridevi, S., & Anbananthen, K. S. M. (2023). A comparative study of deep learning and Internet of Things for precision agriculture. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 122, 106034. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106034>.

- Sathya, D., Thangamani, R. B., & Balaji, S., (2024). The Revolution of Edge Computing in Smart Farming. *Intelligent Robots and Drones for Precision Agriculture Book*, Springer Link, p.351-389, https://doi.org/10.1007/978-3-031-51195-0_17.
- Shahi, T. B., Xu, C.-Y., Neupane, A., Guo, W., Shahi, T. B., Xu, C.-Y., Neupane, A., & Guo, W. (2023). Machine learning methods for precision agriculture with UAV imagery: A review. *Electronic Research Archive*, 30(era-30-12-218), Artigo era-30-12-218. <https://doi.org/10.3934/era.2022218>.
- Sharma, K., & Shivandu, S. K. (2024). Integrating artificial intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture. 5. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2024.100292>
- Shukla, B. K., Maurya, N., & Sharma, M. (2023). Advancements in Sensor-Based Technologies for Precision Agriculture: An Exploration of Interoperability, Analytics and Deployment Strategies. *ECSA 2023*, 22. <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16051>.
- Siddegowda, C.J., & Devi, A.J., (2021). A Study on the Role of Precision Agriculture in Agro-Industry. *International Journal of Applied Engineering and Management Letters*, ISSN: 2581-7000, vol. 5, n. 2, <https://doi.org/10.47992/IJAEM.L.2581.7000.0103>.
- Singh, N., Kapoor, S. (2024). Agtech platforms: Complementors and value propositions. *Technology Analysis & Strategic Management*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/09537325.2024.2306636>.
- Singh, R., Aernouts, M., De Meyer, M., Weyn, M., & Berkvens, R. (2020). Leveraging LoRaWAN Technology for Precision Agriculture in Greenhouses. *Sensors*, 20(7), 1827. <https://doi.org/10.3390/s20071827>.
- Sivakumar, M., & Tyj, N. M. (2021). A Literature Survey of Unmanned Aerial Vehicle Usage for Civil Applications. <https://www.scielo.br/j/jatm/a/vnWkfk66h5VvsRhn6CxjLKx/?lang=en>.
- Sivasangari, A., Teja, A. K., S, G., Ajitha, P., Gomathi, R. M., & Vignesh. (2023). Revolutionizing Agriculture: Developing Autonomous Robots for Precise Farming. *2023 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 1461–1468. <https://doi.org/10.1109/ICICT57646.2023.10134507>.
- Sott, M. K., Nascimento, L. D. S., Foguesatto, C. R., Furstenau, L. B., Faccin, K., Zawislak, P. A., Mellado, B., Kong, J. D., & Bragazzi, N. L. (2021). A Bibliometric Network Analysis of Recent Publications on Digital Agriculture to Depict Strategic Themes and Evolution Structure. *Sensors*, 21(23), 7889. <https://doi.org/10.3390/s21237889>.
- Sourav, A. I., & Emanuel, A. W. R. (2021). Recent Trends of Big Data in Precision Agriculture: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1096(1), 012081. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1096/1/012081>.
- Sousa, A. S. de, Oliveira, G. S. de, & Alves, L. H. (2021). A Pesquisa Bibliográfica: Princípios E Fundamentos. *Cadernos da FUCAMP*, 20(43), Artigo 43. <https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/cadernos/article/view/2336>.
- Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trincherro, D., & Fossa, M. (2024). Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, 24(8), 2647. <https://doi.org/10.3390/s24082647>.
- Sun, C., Zhou, J., Ma, Y., Xu, Y., Pan, B., & Zhang, Z. (2022). Frontiers | A review of remote sensing for potato traits characterization in precision agriculture. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.871859>
- Szira, Z., Varga, E., Csegódi, T. L., & Milics, G. (2023). The Benefits, Challenges and Legal Regulation of Precision Farming in the European Union. *EU Agrarian Law*, 12(1), 1–7. <https://doi.org/10.2478/eual-2023-0001>.
- Talaat, F. M. (2023). Crop yield prediction algorithm (CYPA) in precision agriculture based on IoT techniques and climate changes. *Neural Computing and Applications*, 35(23), 17281–17292. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08619-5>.

- Tomaszewski, L., Kołakowski, R., & Zagórdá, M., (2022). Application of Mobile Networks (5G and beyond) in Precision Agriculture. In: Maglogiannis, I., Iliadis, L., Macintyre, J., Cortez, P. (eds) Artificial Intelligence Applications and Innovations. AIAI 2022 IFIP WG 12.5 International Workshops. AIAI 2022. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 652. Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-031-08341-9_7.
- Tyagi, R., & Pandey, P. C. (2024). Applications of drones in precision agriculture: Future of smart and sustainable farming (p. 429–453). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91068-2.00003-5>.
- U-Minn, Tallaksen, J., & Minneapolis Star, T. (2022). Project Manager Information. <https://www.precisionfarmingdealer.com/articles/4952-umn-unveils-plans-for-220-million-precision-ag-research-complex>. <https://www.minnesotalumni.org/stories/measured-growth>.
- Ünal, İ., Kabaş, Ö., Eceoğlu, O., & Moiceanu, G. (2023). Adaptive Multi-Robot Communication System and Collision Avoidance Algorithm for Precision Agriculture. *Applied Sciences*, 13(15), 8602. <https://doi.org/10.3390/app13158602>.
- Upadhyay, A., Zhang, Y., Koparan, C., Rai, N., Howatt, K., & Bajwa, S. (2024). Advances in ground robotic technologies for site-specific weed management in precision agriculture: A review. 224. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109363>.
- USDA, U.S. Department of Agriculture, (2022) – Agricultural Research Service. List of government entities in research and resources for broadband access in the United States. - Disponível em: <https://fdc.nal.usda.gov/>. Acesso em: 12 jun. 2022.
- Verma, A. (2021). SVM, CNN and VGG16 Classifiers of Artificial Intelligence Used for the Detection of Diseases of Rice Crop: A Review. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5157-1_71.
- Vinod, C. S. S., Anand, H. S., & Albaaji, G. F. (2024). Precision farming for sustainability: An agricultural intelligence model. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169924007774>. Vol.226. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109386>
- Vishnu, M., Rajesh, G. M., Damor, J. S., Pandey, S. K., Kumar, P., & Singh, B. (2024). Remote Sensing and Geographic Information Systems for Precision Agriculture: A Review. *International Journal of Environment and Climate Change*. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i23945>.
- Vrchota, J., Pech, M., & Švepešová, I. (2022). Precision Agriculture Technologies for Crop and Livestock Production in the Czech Republic. *Agriculture*, 12(8), 1080. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081080>.
- Wang, X.-H., Wen, Y.-H., Li, P.-Y., Li, Y.-X., Qin, H.-Y., Zhao, J.-X., Zhai, X.-J., Yang, W.-C., & Wu, L.-D. (2024). Flexible sensors for precision agriculture: A mini review. 180, 117946. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117946>.
- Wei, Z., Ning, F., Jiang, K., Wang, Y., Bi, Z., Duan, Q., Zhang, J., & Li, R. (2024). CatBoost-based Intrusion Detection Method for the Physical Layer of Smart Agriculture. *ITM Web of Conferences*, 60, 00009. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20246000009>.
- Wrzecińska, M., Czerniawska-Piątkowska, E., Kowalewska, I., Kowalczyk, A., Mylostyvyi, R., & Stefaniak, W. (2023). Agriculture in the face of new digitization technologies. *UKRAINIAN BLACK SEA REGION AGRARIAN SCIENCE*, 27(3), 9–17. <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/3.2023.09>.
- Yazdinejad, A., Zolfaghari, B., Azmoodeh, A., Dehghantanha, A., Karimipour, H., Fraser, E., Green, A. G., Russell, C., & Duncan, E. (2021). A Review on Security of Smart Farming and Precision Agriculture: Security Aspects, Attacks, Threats and Countermeasures. *Applied Sciences*, 11(16), 7518. <https://doi.org/10.3390/app11167518>.
- Zain, M., Ma, H., Rahman, S. U., Nuruzzaman, Md., Chaudhary, S., Azeem, I., Mehmood,

- F., Duan, A., & Sun, C. (2024). Nanotechnology in precision agriculture: Advancing towards sustainable crop production. 206. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108244>.
- Zaman, Q. U., (2023). Chapter 1 - Precision agriculture technology: a pathway toward sustainable agriculture. Precision Agriculture Journal, Elsevier, Evolution, Insights and Emerging Trends, p.1-17, <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18953-1.00013-1>.
- Zanin, A. R. A. (2022). Reduction of pesticide application via real-time precision spraying. Sci Rep 12, 5638 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09607-w>.
- Zhao, W., Li, T., Qi, B., Nie, Q., & Runge, T. (2021). Terrain Analytics for Precision Agriculture with Automated Vehicle Sensors and Data Fusion. Sustainability, 13(5), 2905. <https://doi.org/10.3390/su13052905>.
- Zhou, Z., Majeed, Y., Diverres Naranjo, G., & Gambacorta, E. M. T. (2021). Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications. Computers and Electronics in Agriculture, 182, 106019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106019>.