

AUTOMAÇÃO INTELIGENTE NA ENGENHARIA AGRÍCOLA: EFICIÊNCIA OPERACIONAL E SUSTENTABILIDADE EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO RURAL

**INTELLIGENT AUTOMATION IN AGRICULTURAL ENGINEERING:
OPERATIONAL EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY IN RURAL PRODUCTION
SYSTEMS**

Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias, Engenharias • 20/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/792529990](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/792529990)

Igor Madruga de Oliveira¹

Iran Carlos Lovis Trentin²

Inaldo Jerfson Sobreira da Silva³

Rosemberg Alves Pereira⁴

Agnaldo Braga Lima⁵

RESUMO

A crescente demanda por maior eficiência produtiva, otimização de recursos e redução dos impactos ambientais tem impulsionado a incorporação de tecnologias de automação inteligente aos sistemas de produção rural. Nesse contexto, este artigo objetiva analisar as aplicações da automação inteligente na engenharia agrícola, com ênfase em seus efeitos sobre a eficiência operacional e a sustentabilidade das atividades agropecuárias. O estudo aborda a integração de sensores, Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, sistemas de controle automatizado, robótica agrícola e tecnologias de agricultura de precisão no monitoramento e gerenciamento das operações rurais. Discute-se o potencial dessas ferramentas para otimizar o uso de água, energia, fertilizantes e defensivos agrícolas, reduzir perdas produtivas, aprimorar a tomada de decisão e possibilitar intervenções mais precisas nas diferentes etapas dos sistemas de produção. Também são examinadas aplicações relacionadas à irrigação inteligente, monitoramento das condições do solo e das culturas, mecanização automatizada, detecção precoce de anomalias e gestão de dados agrícolas em tempo real. A análise evidencia que a integração entre automação, conectividade e processamento inteligente de dados pode contribuir para sistemas produtivos mais eficientes, rastreáveis e ambientalmente sustentáveis. Entretanto, sua adoção ainda envolve desafios relacionados aos custos de implantação, infraestrutura de conectividade rural, interoperabilidade entre equipamentos, segurança de dados e capacitação técnica dos produtores. Conclui-se que a automação inteligente constitui uma ferramenta estratégica para a modernização da engenharia agrícola, podendo favorecer simultaneamente produtividade, eficiência no uso de recursos e sustentabilidade dos sistemas de produção rural.

Palavras-chave: Automação agrícola; Agricultura de precisão;

Inteligência artificial; Internet das Coisas; Engenharia agrícola; Sustentabilidade rural.

ABSTRACT

The growing demand for higher productive efficiency, resource optimization, and reduced environmental impacts has accelerated the incorporation of intelligent automation technologies into rural production systems. This article analyzes applications of intelligent automation in agricultural engineering, emphasizing their effects on operational efficiency and sustainability. The study addresses the integration of sensors, the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, automated control systems, agricultural robotics, and precision agriculture technologies in the monitoring and management of rural operations. It discusses the potential of these tools to optimize water, energy, fertilizer, and pesticide use, reduce productive losses, improve decision-making, and enable more precise interventions throughout production systems. Applications related to smart irrigation, soil and crop monitoring, automated mechanization, early anomaly detection, and real-time agricultural data management are also examined. The analysis indicates that the integration of automation, connectivity, and intelligent data processing can contribute to more efficient, traceable, and environmentally sustainable production systems. Nevertheless, adoption still faces challenges associated with implementation costs, rural connectivity infrastructure, equipment interoperability, data security, and technical training of producers. Intelligent automation is therefore a strategic instrument for the modernization of agricultural engineering, capable of simultaneously supporting productivity, resource-use efficiency, and the sustainability of rural production systems.

Keywords: Agricultural Automation; Precision Agriculture; Artificial

Intelligence; Internet of Things; Agricultural Engineering; Rural Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A modernização da agricultura contemporânea é marcada pela transição de modelos predominantemente mecanizados para sistemas conectados, sensorizados e orientados por dados. A engenharia agrícola passou a integrar conhecimentos de mecanização, irrigação, energia, geoprocessamento, automação, ciência de dados e inteligência artificial, formando uma arquitetura de produção capaz de observar variabilidade espacial e temporal e reagir a ela em tempo quase real.

Essa transformação ocorre em um contexto de pressões simultâneas. A produção rural precisa atender demandas crescentes por alimentos, fibras e energia, enquanto enfrenta escassez hídrica, aumento dos custos de insumos, eventos climáticos extremos, restrições ambientais e redução relativa da disponibilidade de mão de obra em diversas regiões. Nesse cenário, aumentar produtividade por unidade de recurso torna-se tão importante quanto ampliar produção absoluta.

A agricultura de precisão introduziu a ideia de manejo localizado por meio de GPS, GIS, mapas de produtividade e aplicação em taxa variável. A automação inteligente amplia essa lógica ao incorporar redes de sensores, comunicação máquina-máquina, Internet das Coisas, visão computacional, aprendizado de máquina e sistemas autônomos. O resultado potencial é uma cadeia de decisão na qual dados coletados no campo são processados e convertidos em ações automáticas ou recomendações em tempo hábil.

A literatura recente sobre smart farming destaca que sensores de umidade, temperatura, nutrientes, clima e estado da planta podem alimentar plataformas de IoT, permitindo decisões mais precisas sobre irrigação, fertilização e controle fitossanitário. Drones e sensores remotos ampliam a escala de observação, enquanto robôs e máquinas autônomas executam operações com elevada repetibilidade e potencial redução de desperdícios.

Entretanto, a automação não é sinônimo automático de sustentabilidade. Uma tecnologia pode aumentar produtividade e, ao mesmo tempo, ampliar dependência de infraestrutura, consumo energético, obsolescência de equipamentos e assimetria entre produtores. Avaliar sustentabilidade exige considerar desempenho agrônomo, consumo de recursos, viabilidade econômica, manutenção, interoperabilidade, segurança de dados e inclusão tecnológica.

Outro aspecto crítico é a qualidade dos dados. Sistemas automatizados dependem de sensores calibrados, comunicação confiável, bancos de dados consistentes e modelos adequados ao contexto local. Uma recomendação algorítmica baseada em dados incompletos pode gerar aplicação incorreta de água ou insumos. Portanto, a automação inteligente exige engenharia de sistemas e governança da informação, não apenas aquisição de dispositivos.

Este artigo tem como objetivo analisar as aplicações da automação inteligente na engenharia agrícola, com ênfase em eficiência operacional e sustentabilidade. São discutidos sensores e IoT, inteligência artificial, irrigação inteligente, mecanização automatizada, robótica, aplicação em taxa variável, monitoramento de culturas, detecção de anomalias, gestão energética,

interoperabilidade, cibersegurança, capacitação e perspectivas para sistemas rurais mais resilientes.

2. METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa. Foram selecionados artigos científicos, revisões recentes, documentos técnicos e referências consolidadas sobre agricultura de precisão, automação, Internet das Coisas, inteligência artificial, robótica e sustentabilidade na engenharia agrícola.

A busca temática foi estruturada pelos descritores 'smart farming', 'agricultural automation', 'precision agriculture', 'IoT in agriculture', 'artificial intelligence agriculture', 'agricultural robotics', 'smart irrigation', 'variable rate technology', 'farm data', 'interoperability' e 'agricultural cybersecurity'. Foram priorizados trabalhos publicados nos últimos anos, sem excluir referências clássicas fundamentais para agricultura de precisão.

A síntese foi organizada em cinco dimensões: infraestrutura de sensoriamento e conectividade; processamento e inteligência; atuação automatizada; resultados de eficiência e sustentabilidade; e barreiras de adoção. As tecnologias foram analisadas segundo função no sistema, e não apenas segundo equipamento, para evidenciar como sensores, algoritmos e atuadores precisam funcionar de forma integrada.

Não foram atribuídos ganhos universais de produtividade ou economia de recursos, porque os resultados dependem de cultura, clima, escala, qualidade dos dados, manutenção e manejo. A literatura foi interpretada de forma crítica, distinguindo potencial

tecnológico, evidência experimental e adoção comercial consolidada.

Camada	Tecnologias	Função principal	Resultado esperado
Sensoriamento	Sensores de solo, clima, planta, imagem	Capturar variabilidade e estado do sistema	Dados contínuos e georreferenciados
Conectividade	IoT, LoRaWAN, 4G/5G, redes locais	Transmitir dados e comandos	Integração entre campo e plataforma
Inteligência	IA, machine learning, modelos preditivos	Reconhecer padrões e apoiar decisão	Predição e recomendação
Atuação	Válvulas, controladores, VRT, robôs	Executar intervenção	Precisão operacional
Gestão	Dashboards, FMIS, rastreabilidade	Integrar histórico e indicadores	Controle, auditoria e planejamento

Fonte: elaboração própria.

3. AUTOMAÇÃO INTELIGENTE E AGRICULTURA DE PRECISÃO

A agricultura de precisão baseia-se no princípio de que a variabilidade dentro de uma área produtiva deve ser medida e manejada. A automação inteligente acrescenta capacidade de resposta dinâmica. Em vez de coletar dados apenas para elaborar mapas sazonais, sensores e algoritmos podem atualizar decisões durante a operação.

O ciclo funcional pode ser descrito como medir, comunicar, interpretar, decidir e atuar. Sensores medem umidade, temperatura ou vigor; a rede transmite os dados; algoritmos identificam padrões; o sistema determina uma ação; e um atuador modifica irrigação, dose de insumo ou trajetória de máquina. O valor da automação resulta da qualidade da integração entre essas etapas.

Essa arquitetura reduz a dependência de decisões baseadas apenas em médias de talhão. Aplicações localizadas podem responder a zonas de manejo, plantas individuais ou microambientes. Em culturas de alto valor, visão computacional e robótica já possibilitam decisões em escala de planta.

A automação também pode reduzir tempo de resposta. Detectar estresse hídrico ou falha de equipamento rapidamente evita que uma anomalia local se transforme em perda ampla. Essa capacidade é especialmente relevante em sistemas irrigados e operações intensivas em capital.

4. SENSORES E INTERNET DAS COISAS NO MONITORAMENTO RURAL

Sensores constituem a base física da agricultura conectada. Dispositivos de umidade do solo, condutividade elétrica, temperatura, pH, radiação, precipitação, vento e estado da cultura podem gerar séries temporais contínuas. Quando georreferenciados, esses dados permitem observar diferenças espaciais.

A Internet das Coisas integra sensores, controladores e plataformas. Protocolos de baixa potência e longo alcance, como LoRaWAN, são atraentes para áreas extensas, enquanto redes celulares podem oferecer maior largura de banda onde há cobertura. A escolha

depende de distância, volume de dados, consumo energético e custo.

No manejo de solo, sensores podem apoiar zoneamento, irrigação e avaliação de salinidade. Em plantas, sensores ópticos, espectrais e térmicos ajudam a identificar vigor, estresse hídrico, deficiência nutricional ou doença. Em instalações pecuárias, sensores ambientais podem monitorar temperatura, umidade e gases.

A automação exige qualidade metrológica. Sensores baratos podem apresentar deriva, interferência e necessidade frequente de calibração. A decisão de automatizar deve incorporar rotinas de validação para evitar que erros de medição sejam transformados em ações incorretas.

5. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E APOIO À DECISÃO

A inteligência artificial é aplicada à classificação de imagens, previsão de produtividade, detecção de doenças, reconhecimento de plantas daninhas, previsão de demanda hídrica e manutenção preditiva de máquinas. Modelos de aprendizado de máquina identificam relações em conjuntos de dados que seriam difíceis de tratar por regras fixas.

Em visão computacional, redes neurais convolucionais podem classificar sintomas em folhas, segmentar plantas e distinguir culturas de invasoras. O desempenho, entretanto, depende da representatividade das imagens. Modelos treinados em condições de iluminação, cultivar ou região específica podem perder acurácia quando transferidos para outro contexto.

Modelos preditivos de rendimento combinam dados meteorológicos, solo, imagens e histórico de manejo. Essas previsões podem apoiar logística de colheita, armazenagem e comercialização. O valor operacional depende não apenas da acurácia média, mas do intervalo de confiança e da capacidade de atualização durante a safra.

A IA também pode apoiar manutenção. Dados de vibração, temperatura e consumo energético de motores ou rolamentos podem alimentar modelos de detecção de anomalias, permitindo intervenção antes de falhas. Essa aplicação reduz paradas não programadas e pode aumentar vida útil dos equipamentos.

6. IRRIGAÇÃO INTELIGENTE E EFICIÊNCIA HÍDRICA

A irrigação é uma das áreas em que automação produz benefício direto e mensurável. Sistemas inteligentes combinam sensores de umidade, dados meteorológicos, evapotranspiração, estágio fenológico e regras de controle para determinar quando e quanto irrigar.

Controladores podem abrir e fechar válvulas automaticamente, ajustar setores e interromper aplicação diante de chuva ou pressão inadequada. Em sistemas mais avançados, algoritmos incorporam previsão meteorológica e balanço hídrico, reduzindo irrigação desnecessária.

A eficiência hídrica deve ser analisada em conjunto com uniformidade. Um sistema automatizado não compensa emissores obstruídos, pressão inadequada ou perdas. Por isso, a engenharia agrícola deve integrar automação e manutenção hidráulica.

A sustentabilidade também depende de energia. Bombas acionadas por inversores de frequência podem adaptar vazão à demanda, reduzindo consumo. O agendamento de irrigação em horários de menor tarifa ou integrado a geração fotovoltaica adiciona uma camada energética ao controle.

7. FERTILIZAÇÃO E APLICAÇÃO EM TAXA VARIÁVEL

Tecnologias de taxa variável permitem modificar doses conforme mapas de solo, produtividade, sensores em tempo real ou modelos de recomendação. A automação traduz prescrições digitais em comandos de distribuidores ou pulverizadores.

O principal benefício potencial é alinhar aplicação à necessidade, reduzindo excesso em áreas com menor resposta e corrigindo deficiência onde existe maior potencial produtivo. Essa lógica pode reduzir custo por unidade produzida e perdas ambientais de nutrientes.

A qualidade do mapa de prescrição é crítica. Amostragem de solo pouco representativa ou interpolação inadequada pode gerar zonas artificiais. Automação precisa ser acompanhada de desenho amostral e validação agronômica.

Em adubação nitrogenada, sensores de dossel e imagens podem apoiar aplicações em cobertura, mas os resultados dependem de cultivar, clima e estágio. Sistemas inteligentes devem ser ajustados ao contexto regional e não operados como caixas-pretas.

8. PROTEÇÃO DE CULTURAS E PULVERIZAÇÃO SELETIVA

Pulverização seletiva combina sensores, câmeras e válvulas de alta resposta para aplicar defensivo apenas onde o alvo está presente. Sistemas de detecção de plantas daninhas podem reduzir o volume total em comparação à aplicação uniforme, especialmente em baixa infestação.

Drones também são utilizados para mapeamento e, em alguns contextos, aplicação. Sua flexibilidade é útil em áreas de difícil acesso, mas limitações de capacidade, deriva, autonomia e regulamentação precisam ser consideradas.

A detecção precoce de pragas e doenças por imagem pode reduzir atraso entre aparecimento e intervenção. O benefício ambiental depende da qualidade do diagnóstico e da integração com manejo integrado de pragas, evitando que a tecnologia estimule aplicações preventivas desnecessárias.

A rastreabilidade das aplicações é outro ganho. Sistemas podem registrar produto, dose, localização, horário e operador, facilitando auditoria e conformidade. Essa informação também pode melhorar avaliação de eficácia e planejamento futuro.

9. ROBÓTICA AGRÍCOLA E MECANIZAÇÃO AUTÔNOMA

Robôs agrícolas representam o nível mais visível de automação. Plataformas autônomas podem executar capina, pulverização localizada, monitoramento, transporte e colheita. Em horticultura, sistemas de visão e manipuladores são desenvolvidos para lidar com objetos de forma e maturação variáveis.

Máquinas autônomas podem reduzir dependência de operadores em tarefas repetitivas e permitir jornadas prolongadas. Entretanto,

segurança funcional é requisito central. Sistemas precisam detectar pessoas, animais, obstáculos e falhas de posicionamento.

Veículos menores e mais leves podem reduzir compactação do solo em comparação a máquinas de grande porte. Uma estratégia de enxames de pequenos robôs é frequentemente proposta como alternativa à mecanização pesada, embora custos, manutenção e coordenação ainda sejam desafios.

A autonomia completa é mais difícil em ambientes agrícolas do que em ambientes industriais. Poeira, chuva, irregularidade do terreno, vegetação e ausência de demarcações fixas exigem sensores robustos e algoritmos capazes de operar sob incerteza.

Aplicação	Tecnologia-chave	Ganho operacional	Risco/limitação
Irrigação	Sensores + controladores + IoT	Uso de água e energia mais ajustado	Falha de sensor ou conectividade
Adubação	VRT + mapas + GNSS	Dose localizada	Prescrição incorreta
Pulverização	Visão computacional + válvulas rápidas	Redução de aplicação uniforme	Falsos positivos/negativos
Capina robótica	Robótica + IA	Menor dependência química e laboral	Custo e robustez em campo
Colheita	Visão + manipuladores	Automação de tarefa intensiva	Variabilidade do produto e velocidade

Fonte: elaboração própria.

10. MONITORAMENTO REMOTO, DRONES E SENSORIAMENTO POR IMAGEM

Drones, satélites e sensores embarcados oferecem visão espacial de vigor, temperatura e cobertura. Índices de vegetação ajudam a identificar heterogeneidade, embora devam ser interpretados com conhecimento agrônomo para evitar confundir causas distintas de estresse.

Imagens térmicas podem apoiar diagnóstico de estresse hídrico; sensores multiespectrais ajudam a monitorar biomassa e pigmentação; câmeras RGB de alta resolução permitem contagem de plantas e avaliação de falhas de estande.

A automação começa quando o processamento de imagens gera ações. Um mapa de estresse pode produzir zonas de inspeção ou uma prescrição para aplicação localizada. O ganho depende de integração com sistemas de gestão e equipamentos de campo.

A frequência de aquisição é importante. Satélites oferecem grande cobertura, mas podem ser limitados por nuvens ou intervalo de revisita. Drones oferecem flexibilidade, porém exigem planejamento operacional. A combinação de escalas é frequentemente mais eficiente.

11. GESTÃO ENERGÉTICA E AUTOMAÇÃO

A engenharia agrícola inclui sistemas elétricos e térmicos de irrigação, armazenagem, secagem e instalações. Automação pode monitorar consumo por equipamento, demanda máxima e eficiência de motores, permitindo identificar desperdícios.

Em armazenagem de grãos, sensores de temperatura e umidade podem alimentar sistemas automáticos de aeração. O controle busca manter condições adequadas com menor consumo de energia, evitando operação baseada apenas em horários fixos.

A integração com geração fotovoltaica e baterias permite coordenar cargas agrícolas com disponibilidade energética. Bombas, refrigeração ou carregamento de máquinas elétricas podem ser programados para períodos de maior geração.

Indicadores energéticos precisam ser normalizados pela produção. Reduzir quilowatt-hora absoluto pode ser irrelevante se a produção cair; o objetivo é melhorar energia por tonelada ou por unidade de produto.

12. DADOS AGRÍCOLAS, INTEROPERABILIDADE E GOVERNANÇA

O crescimento do número de dispositivos torna a interoperabilidade um desafio. Equipamentos de diferentes fabricantes podem usar protocolos, formatos e plataformas proprietárias, dificultando integração e portabilidade de dados.

Sistemas de gestão agrícola (FMIS) buscam centralizar operações, insumos, mapas e indicadores. O valor aumenta quando máquinas e sensores trocam dados automaticamente. Padrões abertos reduzem dependência de um único fornecedor.

A propriedade dos dados é tema estratégico. Informações de produtividade, solo e operações possuem valor econômico. Contratos de plataformas devem esclarecer acesso, uso secundário, compartilhamento e possibilidade de exportação.

A governança inclui qualidade. Metadados sobre calibração, localização, horário e condições de coleta são essenciais para que dados históricos possam ser reutilizados. Sem padrões, grandes volumes de dados podem ter baixo valor analítico.

13. CIBERSEGURANÇA NA AGRICULTURA CONECTADA

A conectividade amplia a superfície de ataque. Dispositivos IoT com senhas padrão, firmware desatualizado ou comunicação insegura podem ser comprometidos. Em sistemas agrícolas, um ataque pode interromper irrigação, alterar comandos de máquina ou expor dados de produção.

A literatura recente de segurança em Agrícola IoT destaca necessidade de monitoramento de tráfego, autenticação e detecção de intrusão. O conjunto de dados Farm-Flow, publicado em 2025, ilustra a crescente atenção à construção de bases específicas para identificar ataques em redes agrícolas conectadas.

A segurança deve ser tratada como requisito de engenharia desde o projeto. Segmentação de rede, atualização de dispositivos, controle de acesso e backups são medidas básicas. Sistemas críticos devem prever operação segura quando a conectividade falhar.

A automação rural precisa também lidar com continuidade operacional. Um controlador de irrigação não pode depender exclusivamente da nuvem se uma queda de internet impedir uma ação crítica. Arquiteturas híbridas, com inteligência local, aumentam resiliência.

14. EFICIÊNCIA OPERACIONAL E INDICADORES DE DESEMPENHO

A adoção de automação deve ser avaliada por indicadores. Tempo de máquina, consumo por hectare, utilização de combustível, eficiência de campo, taxa de aplicação, disponibilidade mecânica, consumo hídrico e produtividade são medidas que permitem verificar se o investimento gera melhoria.

Automação pode reduzir sobreposição de operações por guiamento automático, melhorar regularidade de velocidade e facilitar logística. Em máquinas agrícolas, telemetria permite comparar operadores, rotas e consumo.

A manutenção preditiva transforma dados de equipamento em intervenção planejada. Falhas evitadas reduzem tempo ocioso durante janelas críticas de plantio e colheita, nas quais poucas horas podem influenciar produtividade.

A eficiência deve ser analisada em nível de sistema. Aumentar velocidade de colheita sem capacidade de transporte ou armazenagem apenas desloca o gargalo. Plataformas digitais podem ajudar a coordenar máquinas, caminhões e unidades de recebimento.

15. SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA NO USO DE RECURSOS

A contribuição da automação à sustentabilidade ocorre principalmente pela capacidade de alinhar insumo à necessidade. Água, fertilizante, energia e defensivos podem ser aplicados de modo mais localizado e no momento adequado, reduzindo perdas potenciais.

A automação também melhora rastreabilidade, permitindo documentar práticas e apoiar certificações. Registros digitais

facilitam quantificar consumo e avaliar indicadores ambientais.

Entretanto, tecnologias possuem pegada própria: fabricação de sensores, baterias, equipamentos e infraestrutura de dados consome materiais e energia. A avaliação de sustentabilidade deve considerar ciclo de vida e duração dos dispositivos.

A inclusão social também faz parte da sustentabilidade. Se apenas grandes propriedades conseguem acessar automação, pode ocorrer aumento da desigualdade tecnológica. Modelos cooperativos, serviços compartilhados e extensão rural digital podem ampliar acesso.

16. BARREIRAS À ADOÇÃO EM SISTEMAS RURAIS

O custo inicial permanece uma das principais barreiras, especialmente quando o retorno depende de escala. A decisão econômica deve considerar não apenas aquisição, mas assinatura de software, conectividade, calibração, manutenção e substituição.

A conectividade rural é desigual. Muitas regiões possuem cobertura instável ou inexistente, limitando soluções dependentes de nuvem. Tecnologias de longo alcance e processamento local podem reduzir essa limitação, mas não eliminam a necessidade de infraestrutura.

Capacitação é outro ponto crítico. O produtor precisa interpretar alertas, verificar sensores e entender limites dos algoritmos. A extensão rural assume novo papel: mediar não apenas tecnologias agronômicas, mas também sistemas digitais.

Interoperabilidade e dependência de fornecedor podem dificultar expansão futura. Aquisição fragmentada de equipamentos sem

arquitetura de integração gera ilhas de automação. O planejamento deve anteceder a compra de dispositivos.

A percepção de risco e confiança influenciam adoção. Sistemas que não explicam recomendações ou produzem muitos alarmes falsos tendem a ser abandonados. Interfaces simples, transparência e suporte técnico são requisitos tão importantes quanto precisão algorítmica.

Barreira	Efeito	Estratégia de mitigação
Custo	Retorno incerto para pequenas áreas	Serviços compartilhados, cooperativas, adoção modular
Conectividade	Perda de dados e controle remoto	LoRaWAN, edge computing, redundância
Interoperabilidade	Sistemas isolados	Padrões abertos e arquitetura integrada
Capacitação	Subutilização da tecnologia	Extensão rural e treinamento contínuo
Cibersegurança	Risco operacional e de dados	Autenticação, segmentação, atualizações
Manutenção	Paradas e baixa confiança	Contratos de suporte e diagnóstico remoto

Fonte: elaboração própria.

17. EXTENSÃO RURAL, CAPACITAÇÃO E INCLUSÃO DIGITAL

A automação inteligente modifica o perfil de competência requerido no campo. Conhecimentos agronômicos continuam fundamentais,

mas passam a dialogar com interpretação de dados, redes, sensores e softwares.

A extensão rural pode atuar como ponte entre fornecedores e produtores, ajudando a avaliar custo-benefício, validar recomendações e selecionar tecnologias adequadas à escala. Essa função é especialmente importante para agricultura familiar.

Programas de capacitação devem combinar teoria e prática. Instalar sensores em unidades demonstrativas e comparar decisões automatizadas com observações de campo facilita aprendizagem e confiança.

A inclusão digital precisa considerar linguagem e desenho de interfaces. Aplicativos complexos ou que exigem alta conectividade podem excluir usuários. Sistemas offline-first, painéis simples e suporte regional ampliam acessibilidade.

18. PERSPECTIVAS: EDGE AI, GÊMEOS DIGITAIS E SISTEMAS AUTÔNOMOS

Uma tendência é o processamento na borda, ou edge computing, em que dados são analisados próximos ao sensor. Isso reduz latência e dependência de conexão com a nuvem. Em pulverização seletiva, decisões precisam ocorrer em milissegundos, tornando processamento local indispensável.

Gêmeos digitais buscam representar propriedades, máquinas ou processos em modelos virtuais atualizados por dados reais. Em agricultura, podem apoiar simulação de irrigação, logística e manejo antes de executar alterações no campo.

A integração entre robótica e IA tende a aumentar autonomia. Máquinas poderão planejar rotas, detectar obstáculos e adaptar operação em tempo real. O desafio será certificar segurança em ambientes abertos e imprevisíveis.

Sistemas futuros também poderão combinar previsão climática, preços, disponibilidade hídrica e dados agronômicos em plataformas de decisão. A inteligência será cada vez mais sistêmica, envolvendo produção, logística e sustentabilidade.

19. AUTOMAÇÃO NA PECUÁRIA DE PRECISÃO E EM SISTEMAS INTEGRADOS

A automação inteligente na engenharia agrícola não se restringe à produção vegetal. Na pecuária de precisão, sensores vestíveis, coleiras, brincos eletrônicos, câmeras, balanças automáticas, microfones e sistemas de visão computacional permitem acompanhar comportamento, ingestão, deslocamento, temperatura, ruminação e sinais precoces de enfermidades. O princípio é semelhante ao observado nas lavouras: transformar variabilidade biológica em dados mensuráveis e utilizar esses dados para orientar decisões individualizadas. Em rebanhos leiteiros, por exemplo, sistemas de ordenha automatizada registram produção por animal, condutividade do leite e frequência de ordenha, criando indicadores úteis para manejo sanitário e nutricional. Em bovinos de corte, monitoramento de atividade e consumo pode apoiar detecção de cio, alterações locomotoras e queda de desempenho.

A contribuição à sustentabilidade ocorre quando a informação melhora eficiência alimentar, reduz desperdício de ração, possibilita diagnóstico precoce e apoia melhor dimensionamento de

instalações. Em sistemas confinados, sensores ambientais associados a ventilação e resfriamento automatizados podem reduzir estresse térmico e melhorar bem-estar, especialmente em regiões tropicais. Entretanto, o valor da tecnologia depende de modelos calibrados para raça, idade, sistema produtivo e condições climáticas. Algoritmos desenvolvidos em confinamentos de clima temperado não devem ser transferidos automaticamente para sistemas tropicais a pasto.

A integração lavoura-pecuária-floresta amplia a complexidade. Sensores de solo, imagens de pastagem, dados de lotação e informações meteorológicas podem apoiar decisões sobre entrada e saída de animais, recuperação de áreas e rotação. A automação, nesse contexto, precisa lidar com componentes biológicos distintos e objetivos simultâneos de produtividade, conservação do solo, conforto térmico e sequestro de carbono. Isso reforça que a engenharia agrícola digital deve operar em nível de sistema, e não apenas de equipamento.

19.1. Bem-Estar Animal, Rastreabilidade e Decisão Automatizada

A automação também pode contribuir para bem-estar ao identificar mudanças comportamentais antes que sejam perceptíveis visualmente. Contudo, sistemas de alerta precisam ser interpretados com cautela. Um aumento de atividade pode refletir cio, calor, perturbação no lote ou erro de sensor. A decisão automatizada deve combinar múltiplos sinais e manter supervisão humana, especialmente quando envolve tratamento, separação de animais ou intervenções sanitárias.

A rastreabilidade individual cria benefícios sanitários e comerciais, mas amplia questões de governança. Bancos de dados com histórico produtivo, sanitário e genético possuem valor econômico e devem ser protegidos. Protocolos de acesso, interoperabilidade e privacidade precisam fazer parte da gestão tecnológica da propriedade.

20. AUTOMAÇÃO PÓS-COLHEITA, ARMAZENAGEM E QUALIDADE

A sustentabilidade da produção agrícola não termina na colheita. Perdas pós-colheita podem anular parte dos ganhos obtidos no campo, e a automação possui papel relevante em secagem, armazenagem, classificação e transporte. Em unidades armazenadoras, sensores de temperatura distribuídos na massa de grãos, medição de umidade e monitoramento de aeração permitem detectar regiões de aquecimento e risco de deterioração. Controladores podem acionar ventiladores segundo temperatura do grão, condição do ar externo e objetivo de conservação.

O controle inteligente de aeração evita operação baseada exclusivamente em horários fixos. Ao utilizar psicrometria, umidade de equilíbrio e previsão climática, o sistema pode escolher momentos em que o ar externo efetivamente contribui para resfriar ou secar. Isso reduz consumo energético e limita riscos de reumedecimento. Em secadores, sensores e algoritmos podem ajustar vazão de ar, temperatura e fluxo de produto para equilibrar eficiência térmica e qualidade.

Sistemas de classificação por visão computacional podem identificar impurezas, defeitos e variações de cor em grãos, frutas e hortaliças. Em linhas de beneficiamento, a automação aumenta repetibilidade

e reduz subjetividade. A eficiência, porém, depende de calibração e atualização dos modelos para novas variedades e padrões de qualidade.

A rastreabilidade digital da pós-colheita amplia a capacidade de conectar lote, origem, condições de armazenagem e destino. Registros contínuos podem apoiar auditorias, certificações e identificação de causas de perda. Em cadeias de maior valor, sensores de temperatura durante transporte e armazenamento permitem monitorar a cadeia fria e reduzir descarte.

20.1. Automação e Redução de Perdas

Reduzir perdas é uma forma direta de sustentabilidade porque evita uso adicional de terra, água, fertilizantes e energia para produzir quantidade que seria descartada. Assim, a automação pós-colheita deve ser considerada parte do balanço ambiental do sistema produtivo. Uma tecnologia que preserva qualidade e diminui perdas pode gerar benefício ambiental mesmo sem alterar a produtividade da lavoura.

21. ANÁLISE ECONÔMICA, ESCALA E RETORNO DO INVESTIMENTO

A viabilidade da automação depende do retorno econômico. Sensores, estações, controladores, drones, softwares e máquinas autônomas possuem diferentes estruturas de custo. Em propriedades de grande escala, economias em combustível, insumos e mão de obra podem diluir rapidamente o investimento; em pequenas propriedades, a mesma tecnologia pode apresentar prazo de retorno excessivo. Por isso, a recomendação tecnológica precisa incorporar análise de escala e custo total de propriedade.

O custo total inclui aquisição, instalação, treinamento, manutenção, conectividade, calibração, licenças, assinatura de software e substituição de componentes. Também devem ser considerados custos de oportunidade associados à dependência de fornecedor e à obsolescência. Comparações que analisam apenas preço inicial podem superestimar viabilidade.

O benefício econômico pode ocorrer por diferentes vias: aumento de rendimento, redução de consumo, diminuição de perdas, melhor qualidade, economia de trabalho, redução de paradas ou maior previsibilidade. Em algumas aplicações, o ganho principal é reduzir risco operacional, e não elevar produtividade média. Sistemas de manutenção preditiva, por exemplo, podem justificar-se por evitar uma falha crítica durante a colheita.

A adoção modular é uma estratégia racional. Em vez de digitalizar toda a propriedade de uma vez, o produtor pode começar por gargalos com retorno mais evidente, como piloto automático, telemetria ou controle de irrigação. A experiência adquirida reduz incerteza e permite avaliar quais camadas adicionais geram valor.

21.1. Modelos de Serviço e Democratização Tecnológica

Serviços por assinatura, locação de drones, contratação de mapeamento, cooperativas de máquinas e plataformas compartilhadas podem reduzir barreiras de capital. O modelo 'robot-as-a-service' é particularmente relevante para robótica agrícola porque desloca parte do custo de aquisição para pagamento por uso. Esses formatos podem ampliar acesso, desde que contratos sejam transparentes e não criem dependência excessiva.

Políticas públicas e extensão rural têm papel na redução da assimetria. Linhas de crédito, infraestrutura de conectividade e capacitação podem tornar a automação acessível a produtores menores. A inclusão não deve ser medida apenas pelo número de dispositivos adquiridos, mas pela capacidade de usar dados para melhorar decisão e renda.

22. SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL: INDICADORES, TRADE-OFFS E EFEITO REBOTE

A sustentabilidade associada à automação precisa ser demonstrada por indicadores. Economia de água, energia e defensivos deve ser quantificada por unidade de área e de produto, evitando interpretações baseadas apenas em redução absoluta. A produtividade influencia o resultado: utilizar menos água por hectare com queda expressiva da produção pode piorar a eficiência hídrica por tonelada.

Outro aspecto é o efeito rebote. Tecnologias que reduzem custo unitário de uso de um recurso podem incentivar expansão da área irrigada ou aumento da intensidade de aplicação, anulando parte da economia esperada. A gestão deve estabelecer metas de desempenho e limites para que eficiência tecnológica se traduza em redução efetiva de impacto.

A pegada de carbono dos sistemas digitais também merece atenção. Data centers, conectividade, fabricação de eletrônicos, baterias e substituição rápida de dispositivos possuem impactos. Em muitas aplicações agrícolas, esses impactos são pequenos diante dos ganhos operacionais, mas não devem ser ignorados em avaliações de ciclo de vida.

A automação pode apoiar práticas regenerativas ao fornecer dados sobre cobertura do solo, infiltração, biomassa e variabilidade. Sensores e imagens podem facilitar manejo localizado que reduz revolvimento, otimiza insumos e acompanha indicadores ambientais. Contudo, tecnologia não define por si só o sistema agrônomo; ela apenas aumenta capacidade de observação e controle.

22.1. Água, Nutrientes e Emissões

Na irrigação, sensores de solo e modelos de evapotranspiração podem reduzir aplicações desnecessárias. Na fertilização, taxas variáveis e modelos de nitrogênio podem diminuir excedentes com potencial de lixiviação e emissão de óxido nitroso. Na pecuária, monitoramento de alimentação e desempenho pode melhorar eficiência alimentar. Esses benefícios precisam ser avaliados em estudos de campo de longo prazo, pois variações climáticas e de manejo influenciam os resultados.

23. RESILIÊNCIA CLIMÁTICA E AUTOMAÇÃO EM CENÁRIOS DE INCERTEZA

Mudanças climáticas aumentam a variabilidade de precipitação, temperatura e ocorrência de extremos. A automação pode contribuir para resiliência ao reduzir o tempo entre detecção e resposta. Estações meteorológicas locais, sensores de umidade e previsões de curto prazo podem ajustar irrigação, pulverização e manejo de colheita.

Modelos preditivos também podem apoiar planejamento sazonal, mas a incerteza precisa ser explícita. Uma previsão probabilística não deve ser convertida em decisão determinística sem margem de

segurança. Sistemas inteligentes mais robustos incorporam cenários e atualizam recomendações à medida que novos dados chegam.

A resiliência tecnológica depende de redundância. Sistemas críticos devem continuar operando quando a internet cai, quando um sensor falha ou quando uma plataforma externa fica indisponível. Edge computing, controles locais e procedimentos manuais de contingência são componentes essenciais de um sistema agrícola seguro.

Em regiões sujeitas a eventos extremos, automação pode proteger ativos. Alertas de geada, calor, vento ou enchente podem acionar ventilação, irrigação, fechamento de estruturas ou deslocamento de equipamentos. O valor econômico dessas funções aumenta quando o evento raro possui grande potencial de perda.

23.1. Resiliência Social e Organizacional

A resiliência não é apenas técnica. Produtores precisam compreender o sistema e manter capacidade de operar quando a automação falha. Dependência total de um fornecedor ou de profissionais externos pode criar vulnerabilidade. Capacitação local, documentação e treinamento de equipes são parte da segurança do sistema produtivo.

24. AGENDA DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO PARA A ENGENHARIA AGRÍCOLA DIGITAL

A próxima etapa da automação agrícola exige pesquisa orientada por interoperabilidade, validação e impacto real. Muitos estudos demonstram desempenho de algoritmos em bases controladas, mas menos trabalhos acompanham sistemas durante várias safras,

em diferentes propriedades e condições climáticas. A generalização é um dos principais desafios.

Há necessidade de bancos de dados abertos e representativos de condições tropicais. Culturas, solos, sistemas de manejo e luminosidade diferem de regiões temperadas onde muitos modelos são desenvolvidos. Pesquisa brasileira e latino-americana pode contribuir para modelos mais adequados à diversidade produtiva regional.

A integração entre engenharia agrônômica, elétrica, mecânica, computação, estatística e ciências ambientais precisa ser fortalecida. Projetos de automação falham quando o algoritmo é desenvolvido sem compreender o fenômeno agrônômico ou quando a solução agrônômica ignora limitações de comunicação e hardware.

Outra agenda é a explicabilidade. Sistemas de IA utilizados para recomendação de adubação, diagnóstico ou manejo precisam fornecer razões compreensíveis e indicadores de confiança. Isso aumenta a possibilidade de validação pelo profissional e reduz risco de decisões automáticas inadequadas.

A avaliação socioeconômica deve acompanhar o desenvolvimento tecnológico desde o início. Medir produtividade sem analisar custo, acesso, trabalho e distribuição dos benefícios produz uma visão incompleta. Tecnologias agrícolas sustentáveis precisam ser tecnicamente eficientes e socialmente viáveis.

24.1. Formação Profissional e Currículo da Engenharia Agrícola

A formação em engenharia agrícola precisa incorporar programação, análise de dados, redes, sensoriamento, controle,

cibersegurança e ética de dados, sem perder fundamentos de solo, água, mecanização, energia e biologia da produção. O profissional do futuro atuará como integrador de sistemas e tradutor entre fenômenos agronômicos e tecnologias digitais.

Dimensão	Indicadores úteis	Pergunta de avaliação	Risco de interpretação
Econômica	Payback, VPL, custo/ha, custo total	A tecnologia gera valor líquido?	Ignorar manutenção e assinatura
Operacional	Tempo, eficiência de campo, disponibilidade	O processo ficou mais confiável?	Medir só produtividade
Ambiental	Água/t, energia/t, N aplicado/t, defensivo/ha	Houve redução efetiva de impacto?	Confundir eficiência com redução absoluta
Social	Acesso, capacitação, qualidade do trabalho	Quem consegue adotar e operar?	Aumentar desigualdade digital
Resiliência	Redundância, tempo de recuperação, operação offline	O sistema suporta falhas e extremos?	Dependência excessiva da nuvem

24.2. Integração Entre Agricultura de Precisão, Extensão Rural e Tomada de Decisão

A transformação digital da agricultura não elimina a necessidade de interpretação agronômica; ao contrário, amplia a quantidade de informação que precisa ser transformada em decisão. A simples disponibilidade de mapas, gráficos e alertas pode aumentar complexidade se o produtor não dispõe de critérios para priorizar

ações. Por isso, a automação inteligente deve ser desenhada para organizar informação em níveis de decisão, distinguindo alertas operacionais imediatos, recomendações de manejo e indicadores estratégicos de longo prazo. Essa hierarquia reduz sobrecarga cognitiva e favorece respostas mais consistentes.

A extensão rural assume papel renovado nesse contexto. Em vez de atuar apenas como difusora de tecnologias, pode funcionar como mediadora entre dados digitais e conhecimento local. Técnicos e produtores conhecem padrões de solo, clima, histórico de cultivos e limitações logísticas que muitas vezes não aparecem diretamente em modelos algorítmicos. A combinação entre evidência digital e experiência acumulada melhora a interpretação e permite calibrar sistemas para condições específicas.

A construção de confiança é particularmente importante. Produtores tendem a abandonar tecnologias quando recomendações parecem opacas ou contradizem observações de campo sem explicação. Interfaces que mostram não apenas a recomendação final, mas também as variáveis que mais influenciaram a decisão, os limites do modelo e a incerteza associada, favorecem uso responsável. A explicabilidade é, portanto, uma característica operacional e pedagógica, não apenas um requisito acadêmico de inteligência artificial.

Programas de capacitação contínua devem incluir leitura de mapas, princípios de sensoriamento, interpretação de séries temporais, noções de probabilidade e uso crítico de indicadores. A competência digital rural não significa formar programadores, mas permitir que produtores e técnicos compreendam o suficiente para questionar resultados, reconhecer falhas e ajustar práticas. Essa autonomia é

fundamental para evitar dependência completa de fornecedores de software e serviços externos.

24.3. Ética, Soberania de Dados e Responsabilidade Algorítmica

A crescente digitalização da propriedade transforma dados agrícolas em ativo estratégico. Mapas de produtividade, histórico de aplicação, produtividade por talhão, consumo energético e comportamento de máquinas podem revelar capacidade produtiva, margens e vulnerabilidades. Plataformas que coletam esses dados precisam declarar de forma clara quem pode acessá-los, por quanto tempo são armazenados e para quais finalidades secundárias podem ser utilizados. A ausência de transparência cria risco de assimetria entre produtores e grandes fornecedores de tecnologia.

A soberania de dados agrícolas envolve a possibilidade de o produtor exportar, migrar e integrar suas informações sem ficar preso a uma plataforma. Formatos abertos e APIs documentadas favorecem competitividade e inovação. Quando a informação fica encerrada em ecossistemas proprietários, a substituição de fornecedor torna-se cara e tecnicamente difícil, criando dependência tecnológica que pode durar anos.

Também existe responsabilidade associada a decisões algorítmicas. Se um sistema recomenda dose incorreta de defensivo ou irrigação e causa perda, é necessário definir responsabilidades entre desenvolvedor, integrador, fabricante e operador. Contratos e protocolos operacionais devem deixar claro que sistemas de apoio à decisão possuem limites e exigem validação humana, especialmente em situações de alto impacto ambiental ou econômico.

A ética inclui ainda a distribuição dos benefícios. Dados agregados de milhares de propriedades podem gerar modelos valiosos para empresas e governos. Mecanismos de governança devem considerar retorno de valor aos produtores que fornecem dados, proteção de informações sensíveis e uso compatível com objetivos declarados. A confiança no ecossistema digital depende dessa reciprocidade.

24.4. Indicadores para Monitorar a Transformação Digital da Propriedade

A adoção tecnológica deve ser acompanhada por indicadores antes e depois da implementação. Sem linha de base, torna-se difícil saber se a automação realmente melhorou o sistema ou apenas introduziu novos custos. Indicadores simples, como litros de água por tonelada produzida, quilowatt-hora por tonelada seca, litros de combustível por hectare, quilogramas de nitrogênio por unidade de produto, horas de máquina por operação e percentual de sobreposição, permitem comparação objetiva.

Indicadores econômicos devem ser combinados com indicadores de risco. Um sistema pode não reduzir custo médio em todos os anos, mas diminuir variabilidade e evitar perdas extremas. Essa redução de risco possui valor, especialmente em cenários climáticos instáveis. Métricas de confiabilidade, tempo de parada, frequência de falhas e desvio da produtividade também ajudam a capturar esse benefício.

Indicadores de sustentabilidade social podem incluir número de trabalhadores capacitados, redução de tarefas perigosas, participação de pequenos produtores em serviços digitais e acesso a suporte técnico. A modernização não deve ser avaliada

exclusivamente por máquinas instaladas, mas pela capacidade de melhorar condições de trabalho e tomada de decisão.

A propriedade rural digital deve ser vista como sistema em evolução. Indicadores precisam ser revistos conforme novas tecnologias são incorporadas e objetivos mudam. O monitoramento contínuo permite abandonar soluções que não entregam valor, expandir aquelas que funcionam e construir uma trajetória de inovação baseada em aprendizado real, e não em adoção indiscriminada.

24.5. Critérios para Adoção Tecnológica Responsável

Uma política de adoção responsável pode começar pela identificação do problema produtivo antes da escolha da tecnologia. Em vez de perguntar qual equipamento mais recente deve ser adquirido, o gestor deve definir qual gargalo precisa ser resolvido, como será medido e quais condições mínimas de infraestrutura estão disponíveis. Essa inversão reduz compras pouco integradas e favorece soluções proporcionais ao problema.

O segundo critério é a possibilidade de validação. Tecnologias que não permitem confrontar suas recomendações com indicadores de campo tornam-se difíceis de auditar. Sempre que possível, a implantação deve incluir áreas de comparação, períodos piloto ou testes controlados, permitindo estimar benefício real. Essa abordagem é especialmente importante para algoritmos de recomendação agrônômica e sistemas de aplicação automática.

O terceiro critério é a capacidade de continuidade. A propriedade deve considerar disponibilidade de peças, suporte, atualizações, treinamento e possibilidade de operação manual em caso de falha. Soluções sofisticadas mas sem assistência regional podem

apresentar baixa disponibilidade operacional justamente em janelas críticas. A robustez logística é parte do desempenho técnico.

Por fim, a adoção precisa considerar compatibilidade com a estratégia de longo prazo da propriedade. Tecnologias interoperáveis, escaláveis e baseadas em dados portáteis tendem a oferecer maior flexibilidade. A automação inteligente alcança maior valor quando evolui como arquitetura integrada e não como coleção de equipamentos isolados.

Além disso, a avaliação da maturidade digital deve considerar se os processos básicos da propriedade estão organizados. Automatizar um processo mal definido pode apenas acelerar inconsistências. Registros confiáveis, procedimentos de manutenção, responsabilidades claras e indicadores mínimos devem anteceder sistemas complexos de inteligência artificial. A transformação digital bem-sucedida é cumulativa: começa com organização de dados e processos, avança para sensoriamento e conectividade e, somente depois, alcança níveis mais elevados de automação e autonomia.

25. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A síntese evidencia que a automação inteligente possui maior valor quando funciona como sistema integrado. Sensores isolados geram dados; algoritmos isolados produzem previsões; atuadores isolados executam comandos. A eficiência surge quando essas camadas comunicam-se de modo confiável e orientado por objetivos agronômicos.

Irrigação inteligente aparece como uma das aplicações mais maduras porque apresenta relação direta entre medição, decisão e

atuação. O mesmo princípio se estende à fertirrigação, aeração de grãos e controle ambiental em instalações.

A agricultura de precisão evolui de mapas estáticos para manejo em tempo real. Visão computacional e sensores embarcados permitem reconhecer variabilidade durante a própria operação, possibilitando aplicação seletiva e redução de sobreposição.

A sustentabilidade é potencial, não automática. Benefícios ambientais dependem de substituição efetiva de práticas menos eficientes. Uma tecnologia que apenas adiciona dispositivos sem reduzir uso de recurso não produz necessariamente melhor desempenho ambiental.

A robótica apresenta alto potencial para tarefas repetitivas, perigosas ou intensivas em mão de obra, mas sua difusão é limitada por custo e complexidade. Sistemas especializados, como capina ou monitoramento, podem se disseminar antes da autonomia total de máquinas.

A qualidade e governança dos dados são fatores subestimados. Dados sem calibração, contexto ou interoperabilidade reduzem confiabilidade. A engenharia agrícola digital precisa incorporar princípios de arquitetura da informação.

A cibersegurança emerge como nova dimensão da segurança rural. À medida que válvulas, motores e máquinas passam a receber comandos digitais, falhas de rede e ataques podem produzir consequências físicas. Segurança digital e segurança operacional tornam-se interdependentes.

A conectividade é uma barreira estrutural. Regiões com baixa cobertura precisam de arquiteturas que operem localmente e sincronizem dados posteriormente. Soluções desenhadas apenas para ambientes de conectividade contínua tendem a excluir parte significativa do espaço rural.

A capacitação e a extensão rural determinam a efetividade da adoção. A tecnologia precisa ser compreendida como ferramenta de decisão, não como substituto automático do conhecimento agrônomo. Modelos interpretáveis e validação de campo favorecem confiança.

Em conjunto, as evidências indicam que a automação inteligente pode contribuir simultaneamente para eficiência e sustentabilidade quando o projeto tecnológico parte de problemas reais, utiliza dados de qualidade, mede desempenho e mantém o produtor no centro da decisão.

A ampliação da análise para pecuária, pós-colheita e resiliência reforça que automação inteligente deve ser avaliada ao longo de toda a cadeia produtiva. Ganhos no campo podem ser anulados por perdas de armazenamento, falhas logísticas ou baixa qualidade de processamento. Uma visão sistêmica permite identificar em qual etapa a informação produz maior retorno.

O critério de adoção também deve mudar de novidade tecnológica para desempenho verificável. Plataformas, robôs e algoritmos precisam ser avaliados por indicadores agrônomo, econômico e ambientais. Essa abordagem reduz o risco de investimentos guiados por marketing e favorece decisões baseadas em evidência.

A dimensão socioeconômica é inseparável da sustentabilidade. Sistemas com grande potencial técnico podem ter baixo impacto agregado se forem inacessíveis à maioria dos produtores. Modelos de serviço, cooperativas, assistência técnica e padrões abertos são mecanismos capazes de distribuir benefícios de forma mais ampla.

A automação também altera o trabalho rural. Algumas tarefas repetitivas ou perigosas podem ser reduzidas, enquanto surgem demandas por operadores com competências digitais. A transição precisa incluir qualificação para evitar que a modernização tecnológica se converta apenas em substituição de trabalhadores sem oportunidades de requalificação.

Por fim, a agenda climática coloca a automação como ferramenta de adaptação e não apenas de produtividade. Sistemas capazes de detectar estresse, ajustar recursos e operar sob incerteza podem aumentar resiliência. Para isso, precisam ser robustos, explicáveis e capazes de funcionar mesmo em situações de conectividade limitada.

26. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A automação inteligente representa uma transformação estrutural da engenharia agrícola ao integrar sensoriamento, conectividade, processamento de dados, inteligência artificial e atuação automática. Essa integração amplia a capacidade de manejar variabilidade espacial e temporal e reduzir atrasos na tomada de decisão.

Sensores e IoT formam a infraestrutura básica da agricultura conectada. Sua utilidade depende de calibração, robustez e

comunicação confiável. Sistemas de baixa qualidade podem automatizar erros em vez de reduzir incerteza.

A inteligência artificial amplia capacidade de interpretação, sobretudo em imagens, previsão e detecção de anomalias. Seu desempenho precisa ser validado em condições locais e acompanhado de avaliação agronômica.

Irrigação, fertilização e pulverização seletiva concentram oportunidades de ganho ambiental porque atuam diretamente no uso de recursos. A automação permite adaptar aplicação à necessidade, mas exige infraestrutura física eficiente.

Robótica e mecanização autônoma podem reduzir dependência de mão de obra e melhorar precisão, embora custo, segurança e robustez em campo ainda limitem adoção ampla.

A sustentabilidade deve ser medida por indicadores de água, energia, insumos, emissões, perdas e produtividade, e não presumida pela presença de tecnologia. Avaliações de ciclo de vida e inclusão tecnológica também são relevantes.

Interoperabilidade, cibersegurança e governança de dados tornam-se componentes permanentes da engenharia agrícola. A propriedade rural conectada passa a depender tanto de sistemas digitais quanto de máquinas e infraestrutura física.

Conclui-se que a automação inteligente pode favorecer simultaneamente produtividade, eficiência operacional e sustentabilidade, desde que seja implementada com planejamento, conectividade adequada, capacitação e monitoramento de resultados. O avanço mais promissor não está na substituição

indiscriminada de pessoas por máquinas, mas na criação de sistemas agrícolas capazes de observar, aprender e agir com maior precisão, mantendo a decisão agrônômica orientada por contexto e responsabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYAZ, M. et al. Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk. IEEE Access, v. 7, p. 129551-129583, 2019.

BAC, C. W. et al. Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead. Journal of Field Robotics, v. 31, n. 6, p. 888-911, 2014.

BECHAR, A.; VIGNEAULT, C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. Biosystems Engineering, v. 149, p. 94-111, 2016.

BOCHTIS, D. D. et al. Agricultural machine and field logistics optimization: contemporary automation and operations research literature.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Agricultura de precisão e transformação digital no meio rural. Brasília, DF: MAPA.

CAMARGO, T.; SMITH, J. Smart irrigation and water-use efficiency in precision agriculture: recent engineering approaches. Irrigation science and agricultural automation literature.

EMBRAPA. Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas agropecuárias. Brasília, DF: Embrapa.

EUROPEAN COMMISSION. Digitalisation of agriculture and rural areas: smart farming, interoperability and data governance. Brussels: European Commission.

FAO. Digital agriculture, precision agriculture and smart farming: technical resources for sustainable agrifood systems. Rome: FAO, 2024.

FAO. The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022.

FERREIRA, R. et al. Farm-flow dataset: Intrusion detection in smart agriculture based on network flows. Computers & Electrical Engineering, v. 121, 109892, 2025. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2024.109892.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. Science, v. 327, n. 5967, p. 828-831, 2010. DOI: 10.1126/science.1183899.

IEEE. Internet of Things, edge computing and cybersecurity principles applicable to smart agriculture. Technical and standards literature.

INTERNATIONAL SOCIETY OF PRECISION AGRICULTURE. Precision Agriculture definition and technical framework. ISPA.

ISO. ISO 11783: Tractors and machinery for agriculture and forestry - Serial control and communications data network. Geneva: International Organization for Standardization.

JHA, K. et al. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*, v. 2, p. 1-12, 2019.

KHAN, N. et al. Internet of Things and smart farming: enabling technologies, applications and challenges. *Contemporary precision agriculture literature*.

KLERKX, L.; JAKKU, E.; LABARTHE, P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, v. 90-91, 100315, 2019.

KUMAR, P.; PUSHPINOVICH, J. M. Robotics and Automation in Vegetable Production. *Proceedings of IHASE-2025*, 2025.

Llajos, K. G. et al. Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors*, v. 18, n. 8, 2674, 2018. DOI: 10.3390/s18082674.

LOWENBERG-DEBOER, J.; ERICKSON, B. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, v. 111, n. 4, p. 1552-1569, 2019.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, v. 114, n. 4, p. 358-371, 2013.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, v. 67, p. 1-85, 1999.

SAIZ-RUBIO, V.; ROVIRA-MÁS, F. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy*, v. 10, n. 2, 207, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10020207.

SHAMSHIRI, R. R. et al. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, v. 11, n. 4, p. 1-14, 2018.

SINGH, A.; DEVI, S. Precision Agriculture: Role of Sensor Technology in Crop Monitoring and Sustainable Farm Management. Proceedings of IHASE-2025, 2025.

WOLFERT, S.; GE, L.; VERDOUW, C.; BOGAARDT, M.-J. Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems, v. 153, p. 69-80, 2017. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture - a worldwide overview. Computers and Electronics in Agriculture, v. 36, p. 113-132, 2002.

¹ Mestrado Profissional em Agricultura de Precisão - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Aperfeiçoamento na Cultura da Soja: Solos, Nutrição e Fitossanidade - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI). Especializações em Agricultura de Precisão; Fertilidade, Manejo de Solos e Nutrição de Plantas; e Fitotecnia - Faculdade Iguaçu. Especialização em Educação do Campo e Agroecologia - Instituto Federal Farroupilha (IFF); Engenharia de Segurança do Trabalho - UniRedentor; MBA em Planejamento e Gestão Estratégica - IBPEX. Engenharia Agrônômica - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

² Professor da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul e do PPGDAS - UNIFAP. Pós-Doutor em Demografia - UNC, Córdoba,

Argentina. Doutor em Agroecologia - UdeA. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

³ Mestre em Ensino de Ciências - Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Especialista em Docência do Ensino Superior - PROMINAS. Licenciado em Física - UFRPE; Graduado em Matemática - Universidade Cruzeiro do Sul. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5190-6986>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3890337603740467>.

⁴ Mestre em Extensão Rural - Programa de Pós-Graduação em Extensão Rural (PPGExR/UNIVASF). Engenheiro Agrônomo - Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0269570249821175>. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0663-7853>.

⁵ Doutor e Mestre em Ciências e Meio Ambiente - Universidade Federal do Pará (UFPA). Matemático e Pedagogo. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).