



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ECONÔMICAS

PAULO HENRIQUE OLIVEIRA GOULART

**Uma análise sobre os processos de adoção, desafios e oportunidades do Agro 4.0 pelos
produtores brasileiros: cenário atual e perspectivas**

Uberlândia

2025

PAULO HENRIQUE OLIVEIRA GOULART

Uma análise sobre os processos de adoção, desafios e oportunidades do Agro 4.0 pelos produtores brasileiros: cenário atual e perspectivas

Monografia apresentada ao Instituto de Economia e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientadora: Profa. Dra. Sabrina Faria de Queiroz

Uberlândia
2025

PAULO HENRIQUE OLIVEIRA GOULART

Uma análise sobre os processos de adoção, desafios e oportunidades do Agro 4.0 pelos produtores brasileiros: cenário atual e perspectivas

Monografia apresentada ao Instituto de Economia e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Uberlândia - MG, 02 de setembro de 2025.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dra. Sabrina Faria de Queiroz, IERI – UFU/MG (Orientadora)

Prof. Dr. Marcelo Sartorio Loural, IERI – UFU/MG

Prof.^a Dra. Thaís Guimarães Alves Nonato, IERI – UFU/MG

AGRADECIMENTOS

Ao encerrar este ciclo na graduação em Ciências Econômicas pela Universidade Federal de Uberlândia, a sensação que me define é a de profunda gratidão. Esta monografia é o marco de uma jornada que foi muito além da formação técnica; foi um período de intenso amadurecimento, que me preparou não apenas para o mercado de trabalho, mas para os desafios da vida.

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, meus pilares. Por todo o amor, pela estrutura e pelo incentivo incansável que me deram a segurança necessária para chegar até aqui. Sem o apoio incondicional de vocês, este sonho não teria se concretizado. Estendo meu carinho e gratidão ao meu irmão, meus cachorros (spike e Rajado), meus avós, tios e amigos, que contribuíram para minha jornada acadêmica. Vocês foram meu porto seguro.

Um agradecimento especial à minha orientadora, Profa. Dra. Sabrina Faria de Queiroz. Sua orientação segura, paciente e didática foram essenciais. Sou grato por ter tido a oportunidade de aprender com uma profissional excelente em sua área.

Enfim, a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória, o meu muito obrigado.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo analisar os processos de adoção das inovações tecnológicas, particularmente a agricultura digital no setor agrícola brasileiro com foco na melhoria da produtividade e sustentabilidade entre os anos de 2020 e 2023. A pesquisa adota uma abordagem qualitativa com análise bibliográfica sobre os principais avanços tecnológicos no campo como o uso de drones, sensores e sistemas de gestão digital. Através de uma revisão de estudos recentes, busca-se identificar os benefícios e os desafios relacionados à implementação dessas tecnologias, especialmente para pequenos e médios produtores. Os resultados indicam que, embora as inovações digitais ofereçam grande potencial para otimizar os processos agrícolas, a falta de infraestrutura, mão de obra qualificada, altos requerimentos de capital e a resistência de alguns produtores dificultam sua adoção em larga escala. A pesquisa conclui que a agricultura digital pode ser um fator decisivo para a transformação do agronegócio mas, exige políticas públicas voltadas ao apoio à capacitação dos agricultores e ao acesso a tecnologias, para garantir uma transição eficiente e inclusiva.

Palavras-chave: Agro 4.0, agricultura digital, tecnologia no campo, produtividade, sustentabilidade, inovação.

ABSTRACT

This study aims to analyze the impacts of technological innovations, particularly digital agriculture, on the Brazilian agricultural sector, with a focus on improving productivity and sustainability. The research adopts a qualitative approach, with a bibliographic analysis of the main technological advances in the field, such as the use of drones, sensors and digital management systems. Through a review of recent studies, it seeks to identify the benefits and challenges related to the implementation of these technologies, especially for small and medium-sized producers. The results indicate that, although digital innovations offer great potential to optimize agricultural processes, the lack of infrastructure, a shortage of skilled labor, high capital requirements and the resistance of some producers hinder their large-scale adoption. The research concludes that digital agriculture can be a decisive factor for the transformation of agribusiness, but requires public policies aimed at supporting the training of farmers and access to technologies, to ensure an efficient and inclusive transition.

Keywords: Agro 4.0, digital agriculture, technology in the field, productivity, sustainability, innovation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- As quatros etapas e evoluções da agricultura	20
Figura 2 - Potenciais benefícios da transformação digital nas cadeias produtivas agrícolas.	33
Figura 3 - Níveis de incentivos na agricultura brasileira em comparação entre os países selecionados nos anos 1995-2017.....	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Distribuição geográfica dos produtores rurais respondentes (N=504) por região do Brasil, em percentual ocorrido em 2020.....	23
Gráfico 2 - Setor produtivo de atuação dos agricultores respondentes (N=504), em percentual ocorrido em 2020	24
Gráfico 3 - Perfil de experiência profissional dos produtores rurais respondentes (N=504), em percentual ocorrido em 2020	25
Gráfico 4 - Distribuição da área cultivada em hectares para a atividade de Agricultura, segundo os produtores respondentes ocorrido em 2020.....	26
Gráfico 5 - Distribuição da área utilizada em hectares para a atividade de Pecuária, segundo os produtores respondentes ocorrido em 2020	27
Gráfico 6 - Nível de adoção das tecnologias de agricultura digital pelos produtores rurais respondentes (N=504), em percentual ocorrido em 2020	28
Gráfico 7 - Principais finalidades de uso das tecnologias digitais declaradas pelos produtores rurais (N=504), em percentual ocorrido em 2020	29
Gráfico 8 - Formas de acesso às tecnologias digitais reportadas pelos produtores rurais (N=504), em percentual ocorrido em 2020.....	31
Gráfico 9 - Principais barreiras para o acesso e uso de tecnologias digitais, segundo a percepção dos produtores (N=504), em percentual ocorrido em 2020	32
Gráfico 10 - Expectativa futuras das aplicações de tecnologias digitais pelos produtores rurais brasileiros na produção agricultura ocorrido em 2020.....	35
Gráfico 11 - Série histórica de produção de grãos por regiões, em mil toneladas entre 2010/2011-2021-2022	40
Gráfico 12 – Localização geográfica das fazendas/agroindústrias participantes do projeto co-piloto Agro 4.0 no período de 2020	43
Gráfico 13 – Porte das principais fazendas/agroinudtrias envolvidas nos projetos selecionados no período de 2020	44

Gráfico 14 – Nível de adoção tecnologias Agro 4.0 por fazendas/agroindústrias no período de 2020	45
Gráfico 15 – Distribuição das tecnologias 4.0 em uso nos projetos no período de 2020.....	46
Gráfico 16 – Quantidades de projetos por categoria no período de 2020.....	47
Gráfico 17 - Vantagens econômicas (aumento de lucro e redução de custo) associadas à principal tecnologia digital, segundo a percepção dos produtores no período de 2020	54
Gráfico 18 - Análise comparativa da percepção de efeito (%) das categorias tecnológicas sobre o aumento da produtividade e a otimização de insumos no período de 2020.....	55
Gráfico 19 - Análise comparativa da percepção de efeito (%) das categorias tecnológicas sobre o melhor planejamento e a eficiência da mão de obra no período de 2020	56
Gráfico 20 - Análise comparativa da percepção de efeito (%) das categorias tecnológicas sobre a redução do efeito ambiental no período de 2020.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Políticas públicas de apoio à agricultura digital.....	38
Quadro 2 - Ações de apoio à agricultura digital.....	39
Quadro 3 - Variáveis quantitativas analisadas nos projetos-piloto do Programa Agro 4.0....	42
Quadro 4 - Análise de casos selecionados do Programa Agro 4.0: descrição das iniciativas, tecnologias aplicadas e os efeitos na produtividade e sustentabilidade	48
Quadro 5 - Principais gargalos na adoção das tecnologias 4.0 e seus efeitos nos projetos-pilotos do programa Agro 4.0	58

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1 TECNOLOGIA E AGRICULTURA 4.0: UMA ANÁLISE TEÓRICA	14
1.1 Teoria Schumpeteriana e Neoschumpeteriana de inovação	14
1.2 Conceitos do Agro 4.0	19
2 ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA AGRO 4.0 NA PRÁTICA: DESAFIO,OPORTUNIDADE E SUSTENTABILIDADE NO CONTEXTO BRASILEIRO.....	22
2.1 Dualismo tecnológico no campo: desafios e gargalos para a expansão do agro 4.0...	22
2.2 Vetor de transformação: Oportunidades e avanços na agricultura digital no Brasil ..	33
2.3 Governança e estratégias para a democratização do Agro 4.0: O papel das políticas públicas.....	36
3 ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA AGRO 4.0 POR PRODUTORES RURAIS BRASILEIROS: ANÁLISE E RESULTADOS.....	41
3.1 Efeito na produtividade : cruzando resultados de projetos-piloto com a percepção do campo 41	
3.2 Barreiras à escalabilidade: os desafios observados nos projetos-piloto da ABDI.....	57
3.3 Sustentabilidade e Meio Ambiente: A importância das tecnologias Agro 4.0 no campo 59	
4 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS	64

INTRODUÇÃO

A revolução tecnológica nas últimas décadas tem alcançado o setor agrícola, provocando mudanças significativas nos processos produtivos e nas relações de trabalho no campo. A chamada Agricultura 4.0 ou Agro 4.0, caracterizada pela integração de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), big data, inteligência artificial e automação, inseridas no processo que ficou denominado de Industria 4.0, apresenta-se como um caminho promissor para enfrentar desafios estruturais do agronegócio, como a necessidade de aumentar a produtividade com sustentabilidade e eficiência.

Este estudo aborda a adoção do Agro 4.0 pelos produtores rurais brasileiros no inicio de 2020 em diante, analisando o cenário atual que pmarcado por avanços tecnológicos e intensificação do debate sobre sustentabilidade no agronegócio. O tema é de grande relevância, considerando que o Brasil, enquanto um dos maiores exportadores de produtos agrícolas no mundo, depende da modernização de seus métodos para se manter competitivo e responder às crescentes demandas globais por alimentos.

Conceitos centrais como transformação digital, Agricultura 4.0, desafios, barreiras estruturais, produtividade agrícola, agropecuaria e sustentabilidade são fundamentais para compreender o escopo deste estudo. O Agro 4.0 envolve a aplicação de tecnologias avançadas para monitorar, analisar e gerenciar operações no meio rual, promovendo decisões mais assertivas e redução de custos. Esses conceitos dialogam com estudos prévios que exploram a intersecção entre tecnologia e agricultura, destacando a importância de políticas públicas, capacitação técnica e infraestrutura tecnológica para a sua implementação.

Diante disso, a questão central do estudo foi: considerando o elevado potencial de produtividade e sustentabilidade do Agro 4.0, quais são os principais gargalos estruturais, desafios operacionais e oportunidades que determinam sua adoção e expansão no cenário heterogêneo do agronegócio brasileiro?

Logo a relevância desta pesquisa reside na urgência de diagnosticar os gargalos que limitam a adoção do Agro 4.0. Sem a compreensão desses desafios, o avanço tecnológico corre o risco de aprofundar o dualismo no campo, beneficiando apenas uma elite produtiva e comprometendo tanto a competitividade nacional quanto a inclusão da agricultura familiar.

Para responder a essa questão, o objetivo geral foi analisar o cenário de adoção do Agro 4.0 no Brasil, identificando seus desafios e oportunidades. Os objetivos específicos foram: primeiro, mapear a realidade da adoção e suas barreiras; segundo, avaliar seus efeitos na produtividade e sustentabilidade com base em estudos de caso; e terceiro, discutir o papel das políticas públicas nesse processo.

É importante ressaltar, contudo, as limitações deste estudo. A principal delas reside na sua abordagem qualitativa e na dependência de dados secundários, o que impede a geração de evidências empíricas para a aplicação de testes estatísticos e econométricos. Dessa forma, a análise foca no potencial e na percepção dos efeitos, sem quantificar o impacto causal da adoção tecnológica, uma lacuna que é apontada como sugestão para futuras pesquisas na conclusão deste trabalho.

Para atingir os objetivos propostos, o trabalho está estruturado em três capítulos. O primeiro capítulo apresenta o referencial teórico, abordando a teoria da inovação e os conceitos do Agro 4.0. O segundo explora os desafios, as oportunidades e o papel das políticas públicas na adoção tecnológica no contexto brasileiro. Em sequencia no capítulo três, são analisados os resultados práticos da implementação de tecnologias, com base em estudos de caso. Por fim, o ultimo capítulo apresenta as conclusões do estudo, sintetizando os achados e as implicações da pesquisa.

1 TECNOLOGIA E AGRICULTURA 4.0: UMA ANÁLISE TEÓRICA

Este capítulo estabelece o arcabouço teórico para a análise da agricultura 4.0, conectando a dinâmica da inovação com a transformação tecnológica no campo. Inicialmente, a seção 1.1 explora as teorias de inovação Schumpeteriana e neo-Schumpeteriana, abordando conceitos fundamentais como "destruição criativa" e o papel sistêmico da tecnologia no desenvolvimento econômico. Posteriormente, a seção 1.2 define o conceito de Agro 4.0, detalhando sua evolução histórica e as principais tecnologias digitais que o sustentam. O objetivo é construir uma base conceitual sólida para compreender como a inovação impulsiona a modernização do agronegócio.

1.1 Teoria Schumpeteriana e Neoschumpeteriana de inovação

O desenvolvimento econômico e a inovação tecnológica têm caminhado juntos ao longo da história, remodelando a estrutura de mercados e sociedades de maneira significativa. A trajetória desde as revoluções industriais até a era da informação evidencia como inovações disruptivas são fundamentais para o avanço econômico e social. Schumpeter, com sua teoria exposta em "Teoria do Desenvolvimento Econômico", identifica esse fenômeno como um ciclo de "destruição criativa", no qual tecnologias emergentes deslocam as estabelecidas, impulsionando assim o progresso (Schumpeter, 1988). Este conceito ressalta que a inovação é a força motriz por trás das transformações econômicas, mudando mercados, estruturas sociais e profissionais, sendo assim destacada:

[...] a relação entre a inovação, a criação de novos mercados e a ação de empreendedor está claramente descrita por Schumpeter: "É, contudo, o produtor que, via de regra, inicia a mudança econômica, e os consumidores, se necessário, são por ele 'educados'; eles são, por assim dizer, ensinados a desejar novas coisas, ou coisas que diferem de alguma forma daquelas que têm o hábito de consumir". Daí a prescrever a "destruição criadora", ou seja, a substituição de antigos produtos e hábitos de consumir por novos, foi um passo que Schumpeter rapidamente deu ao descrever o processo do desenvolvimento econômico (Schumpeter, 1988, p.10).

Com base na reflexão acima, a ideia de "destruição criativa" proposta por Schumpeter refere-se à substituição de produtos, processos produtivos e práticas antigas por novas, impulsionando o progresso econômico por meio da inovação e da renovação constante. Essa

abordagem ressalta a relevância do empreendedorismo e da capacidade de inovação na dinâmica econômica, destacando como a introdução de novidades e a adaptação dos consumidores a essas mudanças são essenciais para o desenvolvimento econômico. Schumpeter destaca em sua “Teoria do desenvolvimento econômico” a importância das inovações tecnológicas como impulsionadoras do progresso econômico, levando a um aumento do nível de investimento e a períodos de prosperidade econômica. Logo, Schumpeter (1988) estabelece uma correlação entre o surgimento de inovações tecnológicas transformadas em produtos para o mercado e o subsequente aumento do investimento, seguido por períodos de prosperidade econômica. Além disso, ele ressalta que a incorporação dessas inovações nos hábitos de consumo da população é o ponto essencial para o desenvolvimento econômico.

Por outro lado, introduz-se a ideia de "novas combinações" como elemento central do desenvolvimento econômico, diferenciando entre mudanças incrementais e aquelas que representam uma ruptura com o passado (Schumpeter, 1988,p.70-76). São identificadas cinco formas principais através das quais essas novas combinações podem ocorrer: novos produtos, métodos de produção, mercados, fontes de matéria-prima e estruturas organizacionais. Schumpeter destaca que: — "Producir outras coisas, ou as mesmas coisas com método diferente, significa combinar diferentemente esses materiais e forças" — salientando que é o produtor, e não o consumidor, quem frequentemente inicia a mudança econômica, deslocando as práticas estabelecidas em favor de inovações. Esta visão ressalta o dinamismo inerente ao desenvolvimento econômico, onde cada inovação além de desafiar o status quo, também pavimenta o caminho para futuras transformações, reforçando o conceito de desenvolvimento econômico como um fenômeno endógeno e progressivo, que percorre a transformação das teorias da firma sob a influência de mudanças tecnológicas e organizacionais significativas, marcadas por três paradigmas distintos (Tigre, 1998).

Em consequente, partindo agora, para uma perspectiva referente a abordagem neoschumpeteriana para a inovação tecnológica — uma evolução direta das teorias de Schumpeter — coloca em destaque o papel crucial da inovação e da tecnologia como motores do desenvolvimento econômico. Diferentemente de Schumpeter, que focava na figura do empreendedor e no processo de "destruição criativa", os neo-schumpeterianos, entre eles Giovanni Dosi, Chris Freeman, Richard Nelson Sidney Winter, expandem essa visão ao analisar como as estruturas institucionais e os sistemas de inovação interagem e contribuem para a dinâmica de inovação. Além disso, essa escola de pensamento ressalta a importância das políticas governamentais no direcionamento e suporte à inovação tecnológica —

argumentando que a inovação é um processo sistêmico e evolutivo, influenciado por uma rede complexa de atores econômicos e sociais. Portanto, ao invés de ver o desenvolvimento tecnológico como um caminho linear, os neo-schumpeterianos o consideram como o resultado de interações multifacetadas, que promovem a aprendizagem, a experimentação e, consequentemente, a acumulação de conhecimento tecnológico. Essa perspectiva amplia os fundamentos teóricos de Schumpeter e fornece um arcabouço analítico para compreender as variadas trajetórias de inovação tecnológica e seu efeitos no crescimento econômico global, onde Possas (1989), destaca com suas palavras:

[...] o enfoque neo-schumpeteriano não apenas se desdobra em direção à economia da mudança tecnológica, mas constitui nesta última o centro de sua análise, na medida em que, acompanhando Schumpeter, atribui à inovação o papel de principal dinamizador da atividade econômica capitalista (Possas, 1989, p.158).

Através desta menção, Possas (1989) baseia-se esse “enfoque neo-shumperiano” como uma perspectiva dinâmica e abrangente sobre a economia da mudança tecnológica, posicionando a inovação como o motor primário da atividade econômica capitalista. Este enfoque além de ampliar a compreensão dos processos de inovação, realça o papel das interações entre a estrutura industrial e a dinâmica de mercado, ressaltando a importância de fatores institucionais e culturais na moldagem da trajetória tecnológica. Em contraste com visões mais tradicionais, que muitas vezes isolam o fenômeno tecnológico das dinâmicas de mercado, o modelo neo-schumpeteriano integra estas dimensões, proporcionando um quadro mais complexo e interconectado, onde a inovação é vista como resultado de um processo contínuo e interativo, influenciado por um conjunto diversificado de forças econômicas, sociais e políticas (Possas, 1989). Logo este enfoque esclarece os mecanismos através dos quais a inovação impulsiona o crescimento econômico e destaca a necessidade de políticas que fomentem um ambiente propício à inovação e à adaptação tecnológica.

Sendo assim, a abordagem neo-schumpeteriana de Giovanni Dosi, detalhada por Possas (1989), realça uma perspectiva única sobre a economia da mudança tecnológica, centrando-se na concorrência schumpeteriana e suas implicações para a dinâmica industrial. Esta teoria tem uma ênfase maior nas assimetrias tecnológicas e produtivas como determinantes cruciais dos padrões de dinâmica industrial, que são influenciados principalmente pela inovação e sua subsequente difusão. De acordo com Possas (1989), a importância dessa abordagem reside em sua capacidade de explicar como as estruturas de mercado, especialmente em contextos oligopolísticos, são moldadas e continuamente

transformadas pelas forças da inovação tecnológica — uma ideia que desafia os modelos estáticos prevalentes na análise econômica tradicional e aponta para a necessidade de um quadro teórico mais dinâmico e abrangente.

Além disso — continua Possas (1989) — Dosi propõe a noção de "paradigmas tecnológicos", inspirada na teoria dos paradigmas científicos de Thomas Kuhn, para descrever os modelos e padrões que direcionam as pesquisas tecnológicas. Esses paradigmas guiam os esforços de inovação e definem as trajetórias tecnológicas que as indústrias tendem a seguir, as quais são marcadas por uma cumulatividade que pode ampliar as vantagens competitivas das empresas. Neste contexto, os paradigmas tecnológicos atuam como heurísticas, que sugerem quais caminhos explorar e quais evitar, influenciando profundamente tanto a evolução tecnológica quanto a estratégia empresarial. Assim, a contribuição de Dosi, ao transpor essas ideias para o campo econômico, oferece percepções significativas sobre a interação entre inovação tecnológica e desenvolvimento industrial, apresentando uma forma mais integrada e dinâmica de entender como as tecnologias emergem e impactam a economia global (Possas, 1989).

Em consequente, Chris Freeman e seus colegas do SPRU em Sussex propõem uma perspectiva inovadora sobre a economia da mudança tecnológica, destacando-se pela ênfase na interação entre inovação tecnológica e dinâmica industrial. Segundo Possas (1989), essa corrente teórica sublinha a importância das inovações tecnológicas como elementos centrais e dinamizadores da atividade econômica capitalista. A análise de Freeman não se limita a entender a inovação como um fenômeno isolado, mas a integra ao contexto mais amplo das estruturas de mercado e dos processos industriais, focando especialmente na geração e difusão de novas tecnologias. Este enfoque propicia um referencial teórico que desafia os paradigmas econômicos ortodoxos e proporciona pontos determinantes para a compreensão da transformação econômica e institucional impulsionada pelas inovações tecnológicas (Possas, 1989).

Ademais, a abordagem evolucionista de Richard Nelson e Sidney Winter, delineada por Possas (1989), se caminha a uma inovação significativa na análise da dinâmica da inovação tecnológica, contrastando profundamente com os modelos neoclássicos tradicionais. Esta perspectiva — inspirada na visão schumpeteriana de concorrência — se desvia dos pressupostos clássicos de equilíbrio estático e racionalidade maximizadora, em favor de um modelo onde as empresas evoluem através de rotinas e heurísticas, adaptando-se

continuamente a um ambiente de mercado que é dinâmico e imprevisível devido às constantes inovações. Nelson e Winter propõem que a dinâmica econômica se assemelha a um processo biológico evolutivo — onde inovações são análogas a mutações genéticas e as empresas são submetidas à seleção natural pelo mercado (Possas, 1989). Este enquadramento questiona as noções tradicionais sobre decisões empresariais e estruturas de mercado, enriquecendo a compreensão da economia ao integrar a incerteza e a complexidade que caracterizam o verdadeiro processo de inovação, proporcionando uma visão mais realista e dinâmica da atividade econômica.

Dessa forma, podemos observar a esteira das teorias de Schumpeter sobre a "destruição criativa" e das expansões neo-schumpeterianas que enfatizam a interação entre inovação tecnológica e dinâmica industrial, o conceito de inovação assume uma relevância incontestável para a análise das Tecnologias Agro 4.0 no contexto brasileiro. Assim como Schumpeter destacou o papel do empreendedor na introdução de inovações que remodelam mercados e setores inteiros, a adoção das Tecnologias Agro 4.0 pelos produtores rurais brasileiros pode ser vista como um fenômeno similar de transformação econômica e tecnológica no setor agrícola. Os neo-schumpeterianos, por sua vez, oferecem uma questão para entender como as estruturas institucionais e os sistemas de inovação, juntamente com as políticas governamentais, podem apoiar ou obstaculizar essa transição. A aplicação de tecnologias avançadas, como a automação, a inteligência artificial e a análise de big data na agricultura, reflete essas "novas combinações" de recursos e práticas que Schumpeter descrevia, induzindo aumentar a produtividade e a sustentabilidade.

Portanto, ao estudar a adoção das Tecnologias Agro 4.0, é crucial considerar como essas inovações estão sendo integradas no campo, e quais são os principais desafios e facilitadores encontrados pelos produtores rurais, dentro do quadro teórico neo-schumpeteriano que ressalta a importância da inovação tecnológica como motor do desenvolvimento econômico.¹ Sendo assim, vamos compreender melhor no próximo tópico os conceitos do Agro 4.0, para assim, ter uma melhor compreensão detalhada desses determinantes.

¹ Para Bresser-Pereira e Gala (2010), o desenvolvimento econômico é entendido como um processo de mudança estrutural. Ele não se resume apenas ao crescimento, mas envolve a inovação nos setores existentes e, principalmente, a transferência de mão de obra para setores com maior valor adicionado per capita e salários mais elevados, caracterizando-se pela diversificação industrial e pela utilização de tecnologia sofisticada para que o país possa competir e alcançar as nações mais desenvolvidas.

1.2 Conceitos do Agro 4.0

O desenvolvimento da agricultura tem sido uma força motriz essencial na evolução das sociedades humanas, desencadeando a transição de estilos de vida nômades para assentamentos permanentes e fomentando o surgimento de civilizações ao redor de regiões férteis. Esta transformação inicial desencadeou uma série de inovações agrícolas que permitiram a expansão das áreas cultivadas e a diversificação das culturas agrícolas para atender ao crescimento populacional (Dias et al., 2023). Nos tempos modernos, as limitações físicas para a expansão da terra cultivável impulsionaram um foco renovado em maximizar a produtividade nas áreas já disponíveis. Nesse sentido, tecnologias como a digitalização, apresenta-se como uma alternativa prática mais eficiente e menos impactante ao meio ambiente (Massruhá e Leite, 2020).

Dias et, al. (2023) detalha a evolução tecnológica no setor agrícola, descrevendo as fases que marcaram cada período significativo de avanço desde a utilização de animais e técnicas de agricultura de subsistência até o advento de tecnologias digitais e estratégias de automação para aumentar a produtividade e sustentabilidade das culturas. A Agricultura 4.0, em particular, é vista como uma continuação das inovações na área industrial, demonstrando a estreita relação entre os avanços tecnológicos agrícolas e industriais ao longo dos anos. Visto isso, a digitalização do agronegócio, marcada pelo conceito de Agro 4.0, é por sua vez, então, uma evolução natural frente aos avanços tecnológicos observados em diversos setores. Segundo Zambon *et al.* (2019), a trajetória da tecnologia agrícola teve início com práticas rudimentares na Agricultura 1.0, evoluindo para a utilização de maquinário na Agricultura 2.0 e, mais recentemente, a implementação de sistemas de orientação por GPS e agricultura de precisão na Agricultura 3.0. A fase atual, Agro 4.0, representa uma analogia à Indústria 4.0 (**Figura 1**).

Figura 1- As quatros etapas e evoluções da agricultura



Fonte: Adaptado de: Dias et al (2023)

Logo o Agro 4.0 representa uma transição paradigmática para o setor agrícola, alinhada aos preceitos da Indústria 4.0, ao consolidar a integração do uso tecnologias digitais avançadas,² como: Sistemas Ciber-Físicos (CPS), *Big Data Analytics*, Computação em Nuvem, Internet das Coisas (IoT), Internet dos Serviços (IoS), Impressão 3D, Inteligência Artificial, Colheita de Energia e Realidade Aumentada, funcionam de forma sinérgica. Essas inovações atuam de forma sinérgica para unir os mundos físico e digital, permitindo que sistemas inteligentes se comuniquem, analisem grandes volumes de dados e operem de modo autônomo e eficiente. Tal integração reconfigura as práticas de cultivo tradicionais ao promover uma gestão mais precisa e sustentável dos recursos, visando maximizar a produtividade e a resiliência da cadeia produtiva (Furtado et al., 2017; Dias et al., 2023).

A aplicação dessas ferramentas converte dados brutos em decisões estratégicas em tempo real, otimizando desde a gestão de insumos até o monitoramento ambiental, com

² No contexto do Agro 4.0, a utilização de tecnologias avançadas, como máquinas autônomas equipadas com sistemas de navegação por satélite (GNSS) e complementadas por sensores e componentes eletro-hidráulicos, revoluciona o modo de operação no campo. Segundo Dias et al. (2023), essas inovações automatizam e aprimoram a precisão nas atividades agrícolas, como pulverização, semeadura e colheita, minimizando erros e redundâncias no uso de recursos. A integração de robótica no manejo de culturas específicas, como a colheita de frutas e o controle de ervas daninhas, também destaca a evolução na eficiência e na qualidade das operações, reduzindo a necessidade de intervenção manual intensiva e promovendo práticas mais sustentáveis na agricultura (Dias et al., 2023, p. 47). Essas tecnologias não apenas impulsionam a produtividade agrícola, mas também contribuem significativamente para a redução do impacto ambiental das práticas agrícolas convencionais.

potencial para reduzir custos operacionais em até 30% e mitigar riscos climáticos por meio de modelos preditivos. No entanto, o avanço da modernização no campo coexiste com uma acentuada disparidade socioeconômica, na qual grandes propriedades rurais avançam rapidamente na adoção tecnológica, enquanto a agricultura familiar permanece, em grande parte, à margem da revolução digital. Este cenário configura um dos principais desafios para a universalização e o desenvolvimento equitativo do Agro 4.0 no contexto brasileiro (Dias et al., 2023).

Ademais a evolução não se detém no estágio 4.0. A literatura já aponta para a Agricultura 5.0, que se baseia na integração de sistemas autônomos, robótica avançada e inteligência artificial para criar fazendas com maior capacidade de autoaprendizagem e adaptação (Zambon et al., 2019). Enquanto o Agro 4.0 foca na conectividade e na tomada de decisão baseada em dados, o Agro 5.0 projeta um futuro com maior autonomia de máquinas e processos, visando superar as complexidades do setor e consolidar uma produção ainda mais eficiente e resiliente.

Contudo, essa nova fronteira tecnológica expõe ainda mais o paradoxo brasileiro: enquanto o debate global avança para a autonomia da Agricultura 5.0, grande parte do agronegócio nacional ainda enfrenta os desafios basilares para a consolidação do Agro 4.0. Essa defasagem aprofunda o dualismo tecnológico, lacuna essa que será explorada no próximo capítulo

Segue-se então o Capítulo 2, "Adoção de Tecnologias da Agro 4.0 na Prática: Experiências e Desafios no Contexto Brasileiro", que irá explorar, através de estudos de caso e análises específicas, como essas tecnologias estão sendo aplicadas nas fazendas brasileiras e os desafios práticos enfrentados pelos agricultores na incorporação da inovação no seu dia a dia.

2 ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA AGRO 4.0 NA PRÁTICA: DESAFIO,OPORTUNIDADE E SUSTENTABILIDADE NO CONTEXTO BRASILEIRO

Este capítulo analisa a adoção prática das tecnologias do Agro 4.0 no Brasil, abordando seus desafios, oportunidades e o papel da governança. A análise inicia com um diagnóstico do "dualismo tecnológico", expondo as barreiras que limitam a expansão digital no campo. Em seguida, o foco se desloca para o potencial transformador da tecnologia, destacando as oportunidades e os avanços concretos da agricultura digital. Por fim, o capítulo examina as políticas públicas como ferramentas estratégicas para democratizar o acesso e superar as desigualdades existentes.

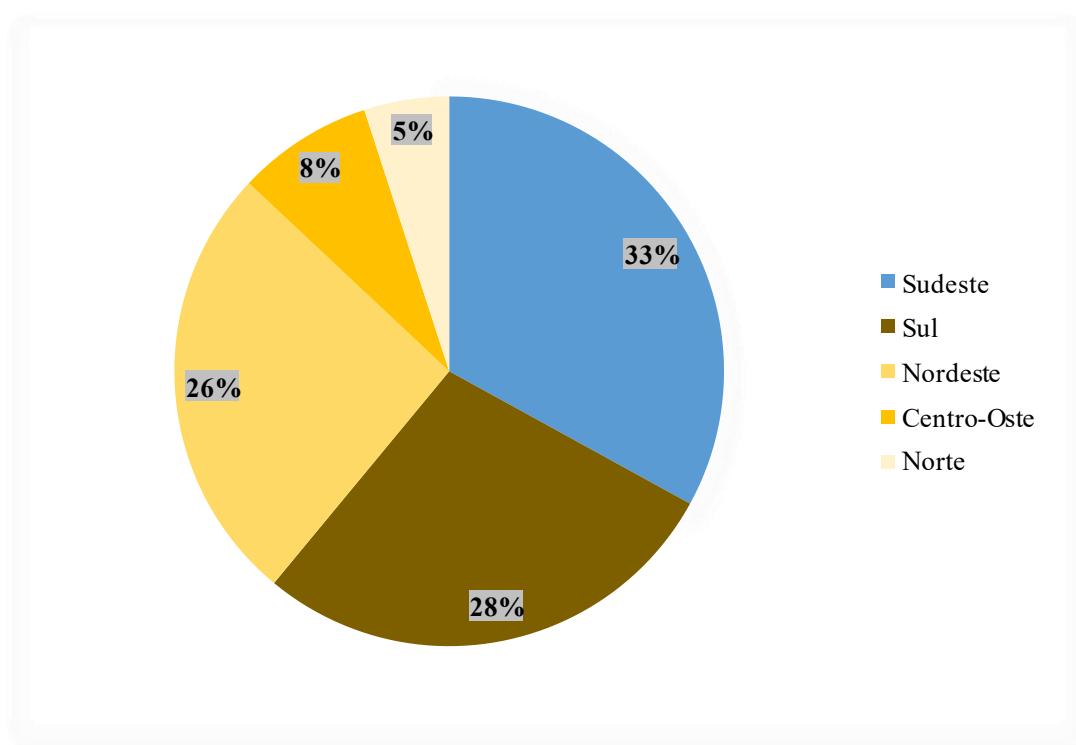
2.1 Dualismo tecnológico no campo: desafios e gargalos para a expansão do agro 4.0

A adoção de tecnologias no agronegócio brasileiro é marcada por uma profunda heterogeneidade estrutural, que reflete e amplifica desigualdades históricas. A modernização do campo não ocorreu de maneira uniforme, resultando em uma acentuada disparidade regional e entre diferentes perfis de produtores. Regiões como Sul, Sudeste e Centro-Oeste concentram o uso de insumos e assistência técnica, enquanto Norte e Nordeste apresentam indicadores de modernização significativamente inferiores (Souza Filho et al., 2011; Delgado, 2005). Essa divisão, herdada de políticas que favoreceram a agricultura patronal, é intensificada por imperfeições de mercado, como o acesso desigual a crédito e assistência, que limitam a capacidade de investimento da agricultura familiar. Consequentemente, produtores de menor escala, que representam a maior parte da mão de obra rural e são fundamentais para a produção de diversas culturas, permanecem em grande parte excluídos da revolução digital, muitos deles operando abaixo da linha da pobreza e sem condições de investir em inovações (Souza et al., 2019; Silva; Santos, 2024).

Para melhor compreensão da lacuna, o estudo composto por pesquisadores e analista da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) em parceria com ao Serviço Brasileiro de Apoio as Micro e Pequenas Empresas (Sebrae), projeto esse denominado como “Inteligencia estratégicas para pequenos negócios rurais: Agregação de valor e tecnologia”. A abordagem metodológica consistiu em uma consulta on-line, via plataforma LimeSurvey,

entre 17 de abril e 2 de junho de 2020. O questionário foi direcionado a dois perfis previamente definidos: "Agricultores" e "Empresários e Prestadores de Serviços". As questões foram elaboradas com base na literatura e validadas por representantes de cada perfil. A pesquisa obteve coletas através de 870 questionários (586 agricultores e 284 empresas prestadoras de serviços), dos 753 preenchidos foram usados cerca de 504 agricultores para a pesquisa, a consulta foi em território nacional, com maior peso no Sul e Suldeste (61%) conforme ilustra (**Gráfico 1**).

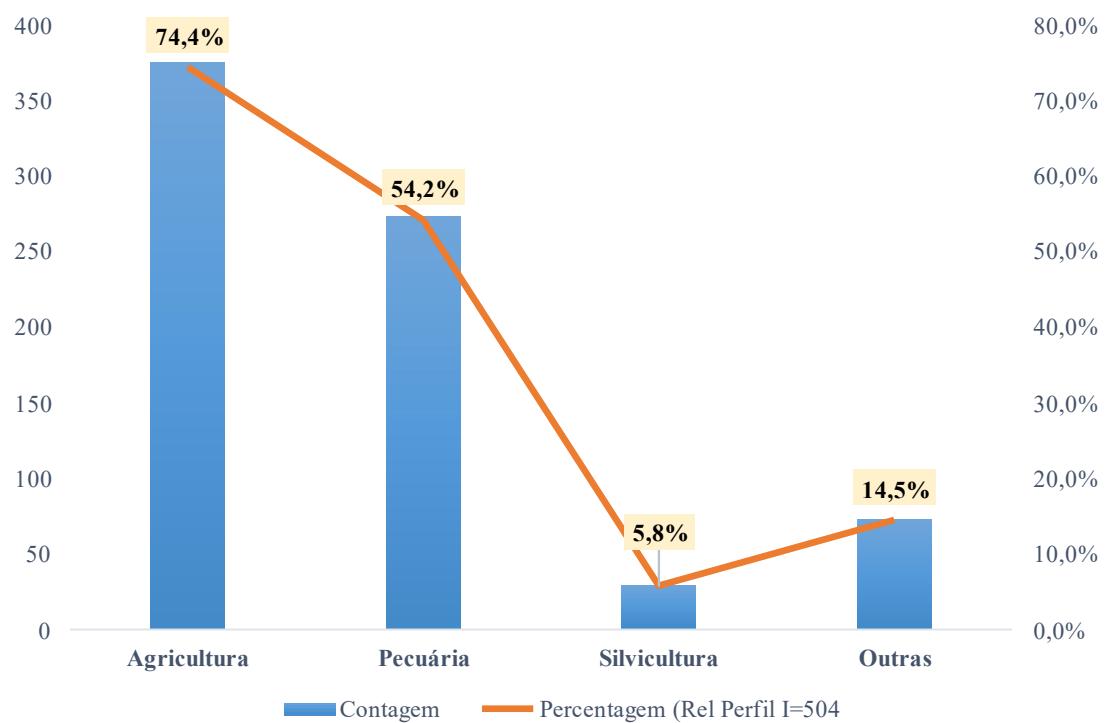
Gráfico 1- Distribuição geográfica dos produtores rurais respondentes (N=504) por região do Brasil, em percentual ocorrido em 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020)

Já análise do perfil produtivo da amostra (**Gráfico 2**) apontada na pesquisa de Bolfe *et al.* (2020). Podemos observar a predominância da agricultura, citada por 74,4% dos respondentes, e uma forte presença da pecuária, com 54,2%. A sobreposição dos percentuais indica que uma parcela significativa dos produtores atua em sistemas integrados.

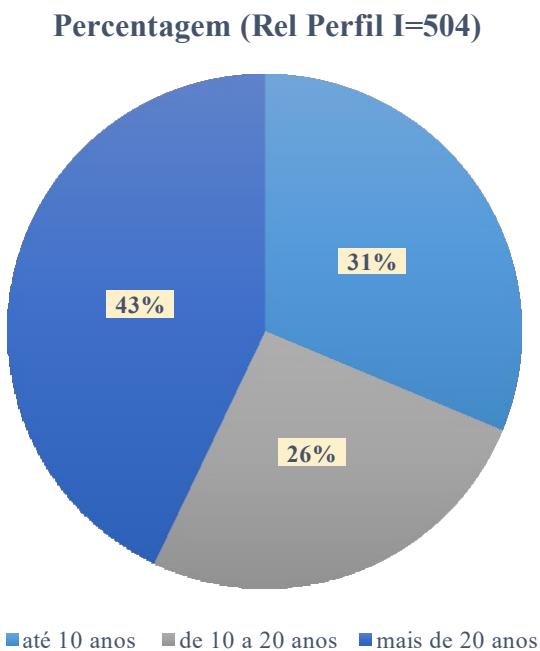
Gráfico 2 - Setor produtivo de atuação dos agricultores respondentes (N=504), em percentual ocorrido em 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020).

No que tange à experiência profissional (**Gráfico 3**) (Bolfe et al., 2020). Podemos concluir que o perfil é majoritariamente sênior: 69% dos produtores declararam possuir mais de 10 anos de profissão, dos quais 43% superam 20 anos de atividade no campo. Esse perfil experiente é um fator relevante que pode influenciar tanto a aversão ao risco quanto a capacidade de investimento em novas tecnologias.

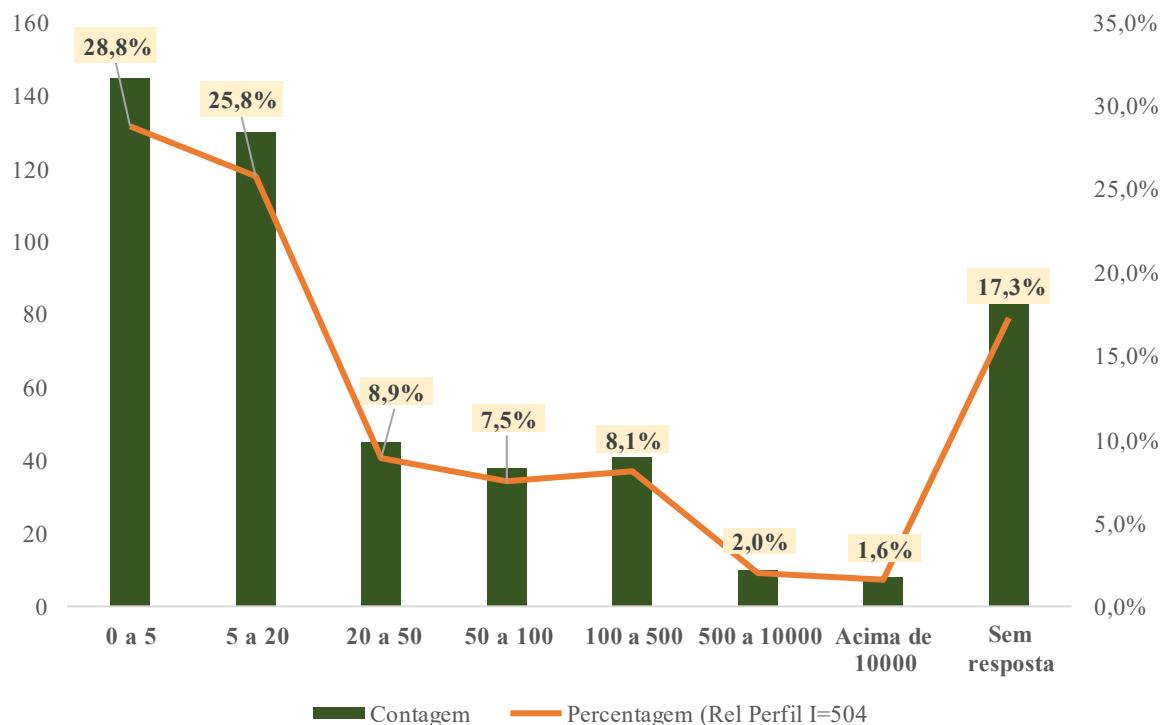
Gráfico 3 - Perfil de experiência profissional dos produtores rurais respondentes (N=504), em percentual ocorrido em 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020).

Para tanto a estratificação por área cultivada (Gráficos 4) evidencia a heterogeneidade estrutural do campo e reforça a tese do dualismo tecnológico. Na agricultura, há uma notável concentração em pequenas propriedades, onde mais da metade (54,6%) opera em áreas de até 20 hectares (Bolfe et al., 2020). Dessa forma fica evidente que esse cenário, aliado ao perfil experiente dos produtores, sugere que a escala de produção pode ser um gargalo econômico para a viabilidade de investimentos em tecnologias de alto custo.

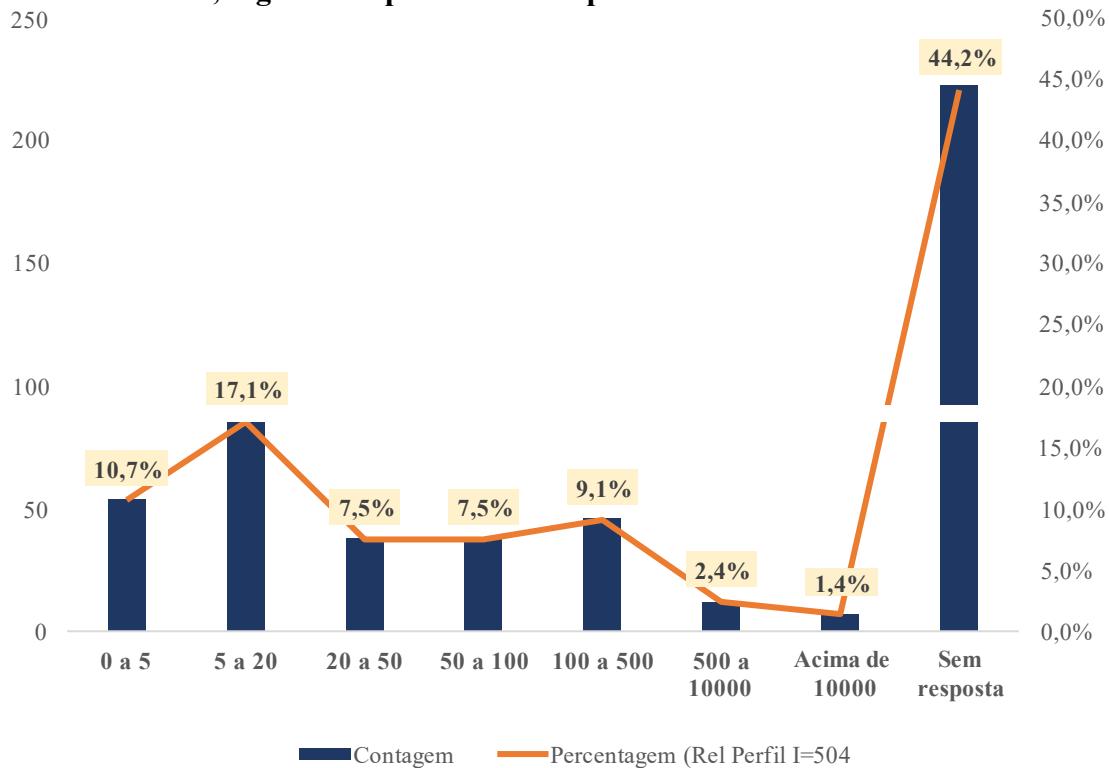
Gráfico 4 - Distribuição da área cultivada em hectares para a atividade de Agricultura, segundo os produtores respondentes ocorrido em 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020).

Já na pecuária (**Gráfico 5**) (Bolfe et al., 2020). Podemos notar uma concentração em faixas menores também é relevante, com 10,7% em áreas de 0 a 5 hectares e 17,1% de 5 a 20 hectares. Contudo, o dado mais expressivo é o alto índice de não resposta (44,2%), dado a da complexidades na declaração da área, como em sistemas de arrendamento ou de uso integrado e não exclusivo da terra.

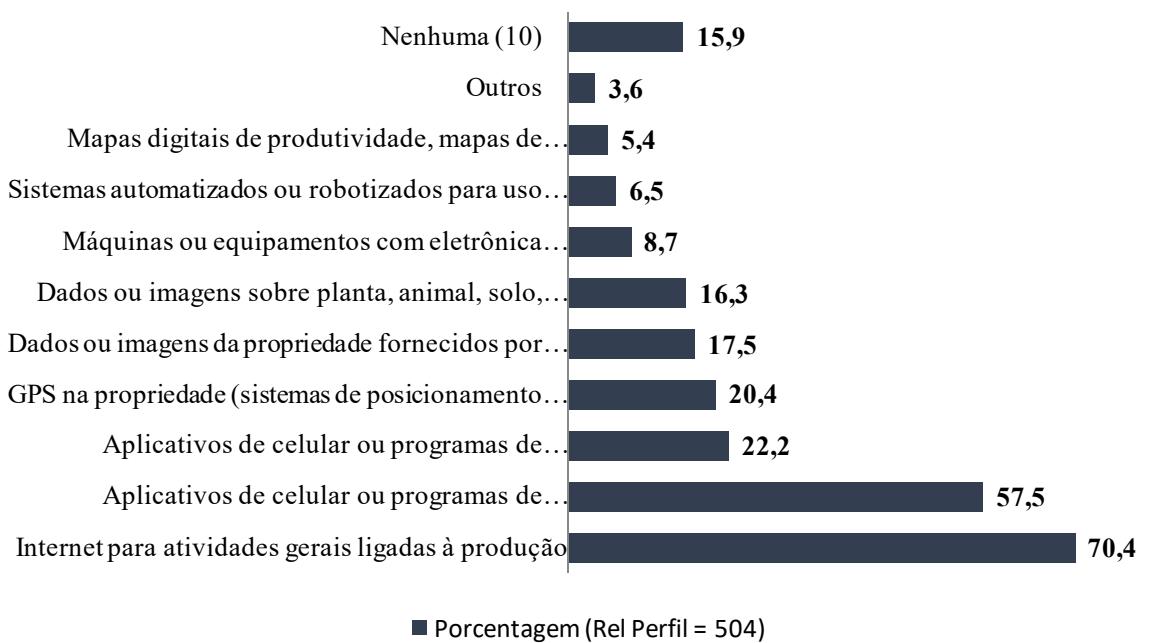
Gráfico 5 - Distribuição da área utilizada em hectares para a atividade de Pecuária, segundo os produtores respondentes ocorrido em 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020).

No tocante a análise da adoção tecnológica (**Gráfico 6**) (Bolfe et al., 2020). Nos revela que, embora 84,1% dos produtores utilizem ao menos uma ferramenta digital, a penetração se concentra em soluções de baixo custo e complexidade, como internet para atividades gerais (70,4%) e aplicativos de comunicação (57,5%). Em contraste, a adesão a tecnologias de capital intensivo, que são o cerne do Agro 4.0 — como sistemas automatizados (6,5%) e máquinas com eletrônica embarcada (8,7%) —, permanece de forma residual. Esse padrão de adoção reflete o perfil do produtor, cuja escala de produção, majoritariamente pequena, pode não justificar tais investimentos.

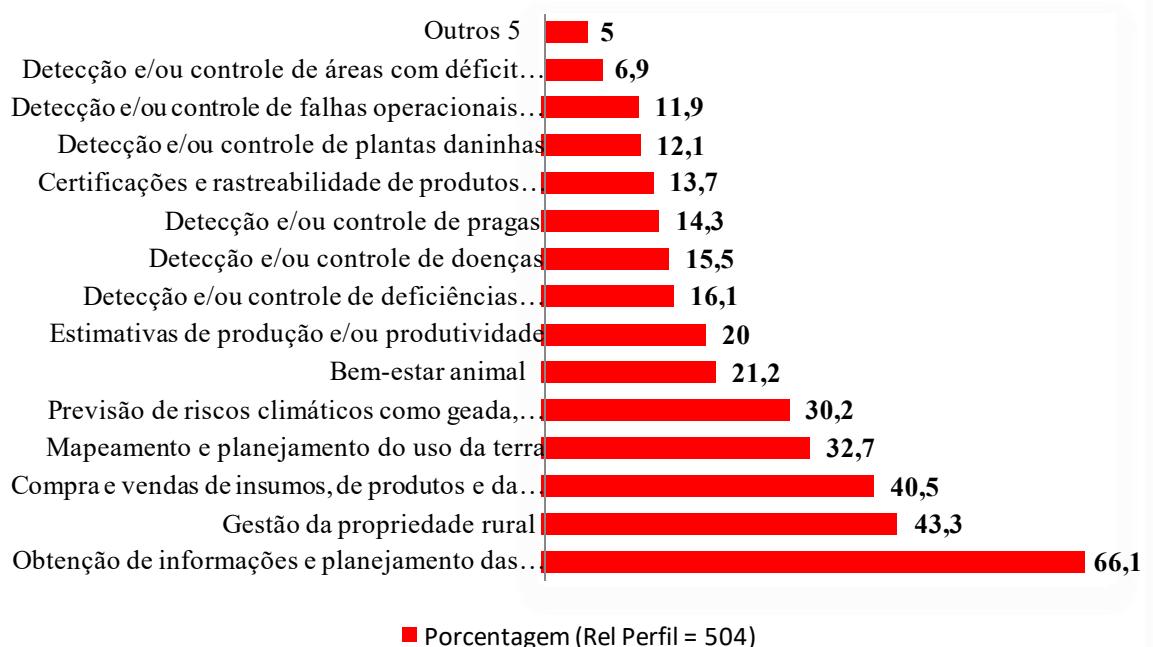
Gráfico 6 - Nível de adoção das tecnologias de agricultura digital pelos produtores rurais respondentes (N=504), em percentual ocorrido em 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020)

Consequentemente, a análise das funções das tecnologias (Gráfico 7) apontada na pesquisa de Bolfe *et al.* (2020), nos revela um padrão de adoção hierárquico que expõe a lacuna entre a promessa e a realidade do Agro 4.0 no Brasil. As funções mais utilizadas são aquelas ligadas à eficiência administrativa, como planejamento (66,1%), gestão da propriedade (43,3%) e comercialização (40,5%). Isso ocorre porque essas tarefas podem ser otimizadas com as tecnologias de mais fácil acesso e menor custo, como internet e aplicativos de comunicação, que já foram adotadas pela maioria.

Gráfico 7 - Principais finalidades de uso das tecnologias digitais declaradas pelos produtores rurais (N=504), em percentual ocorrido em 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020)

O ponto crítico da análise, que expõe a distância entre a promessa e a prática do Agro 4.0, é a baixa adesão a funções que realmente transformam o manejo da produção, como a “Estimativa de produção e/ou produtividade” (20%). Essa função, embora essencial para os ganhos de eficiência, exige um passo tecnológico muito maior em direção a ferramentas mais complexas e de custo elevado — como sensores de campo (16,3%), imagens de drones (17,5%) e mapas de produtividade (5,4%) (Gráfico 6) —, tecnologias que, como vimos, são ainda pouco utilizadas (Bolfe et al., 2020). A justificativa para essa lacuna é econômica e estrutural: o produtor, operando em pequena escala e assumindo o investimento de forma individual, não possui o capital, a segurança no retorno do investimento (ROI) ou, em muitos casos, a infraestrutura de conectividade para dar esse salto.

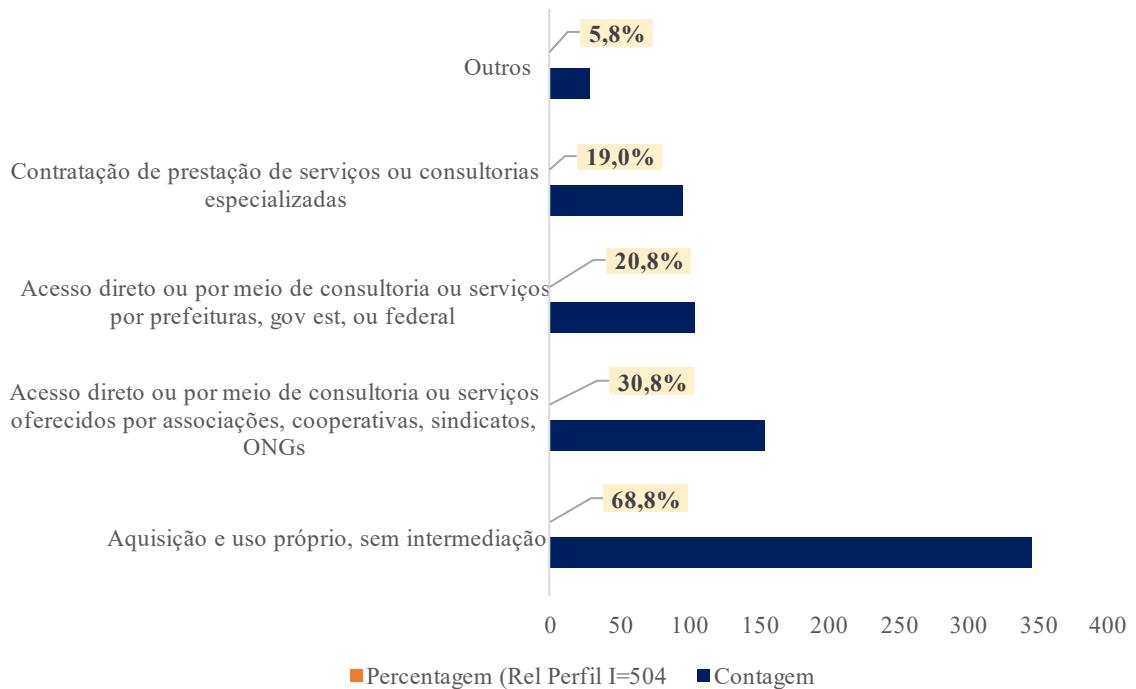
Do ponto de vista teórico, essa realidade ilustra as complexidades do processo de inovação discutidas tanto por Schumpeter quanto pelos neoschumpeterianos (Schumpeter, 1988; Possas, 1989). As tecnologias de precisão, como sensores e drones, representam as “novas combinações” schumpeterianas capazes de gerar a “destruição criativa”, substituindo métodos produtivos tradicionais por práticas radicalmente mais eficientes. Contudo, a análise

dos dados revela que a adoção dessas inovações disruptivas é limitada por barreiras que a abordagem neoschumpeteriana explica como sistêmicas. A falta de capital, de conectividade e de métricas claras de ROI não são apenas obstáculos individuais para o produtor-empreendedor, mas falhas no sistema de inovação agrícola que não oferece o suporte necessário — seja por meio de políticas governamentais, estruturas institucionais ou financeiras — para viabilizar a transição para o novo paradigma tecnológico do Agro 4.0.

Portanto, o que se observa não é só uma modernização lenta das tecnologias do Agro 4.0, mas de uma digitalização administrativa que ainda não se converteu em uma transformação produtiva na produção. Essa dinâmica acaba por consolidar um abismo entre aqueles que podem e os que não podem arcar com os custos altos da agricultura de precisão.

Ademais o modo de acesso às tecnologias (**Gráfico 8**) citada por Bolfe *et al.* (2020), reforça a lógica econômica por trás do padrão de adoção observado. Podemos concluir que a predominância da aquisição para uso próprio e sem intermediação (68,8%) indica que o produtor assume individualmente o risco e o custo do investimento. Esta dinâmica, quando associada ao perfil de produtor de pequena escala, explica a preferência por tecnologias de menor complexidade. O acesso via canais coletivos como cooperativas (30,8%) ou por meio de políticas públicas (20,8%) surge como um mecanismo alternativo, porém secundário, para mitigar as barreiras financeiras individuais.

Gráfico 8 - Formas de acesso às tecnologias digitais reportadas pelos produtores rurais (N=504), em percentual ocorrido em 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020)

De fato a análise das dificuldades para o acesso e uso das tecnologias digitais (**Gráfico 9**) valida empiricamente os desafios estruturais que configuram o dualismo tecnológico no campo brasileiro (Bolfe et al., 2020). Fica notório que o “Valor do investimento” (67%) surge como a principal barreira, um reflexo direto da lógica de aquisição própria e da pequena escala da maioria dos produtores, que enfrentam restrições de capital e dificuldades no acesso a crédito (35%). Em seguida, a falta de infraestrutura de conectividade à internet (48%) se impõe como um gargalo sistêmico, que limita a viabilidade de quase todas as soluções do Agro 4.0. Adicionalmente, a falta de conhecimento sobre as tecnologias (41%) e a carência de capacitação própria (35%) evidenciam uma lacuna de capital humano. Esses fatores, em conjunto, criam um ciclo contínuo: o produtor não investe por não conhecer ou por não ter os recursos, e a falta de infraestrutura e de comprovação de retorno econômico (17%) desincentiva a busca por esse conhecimento, perpetuando a exclusão tecnológica discutida neste trabalho.

Gráfico 9 - Principais barreiras para o acesso e uso de tecnologias digitais, segundo a percepção dos produtores (N=504), em percentual ocorrido em 2020



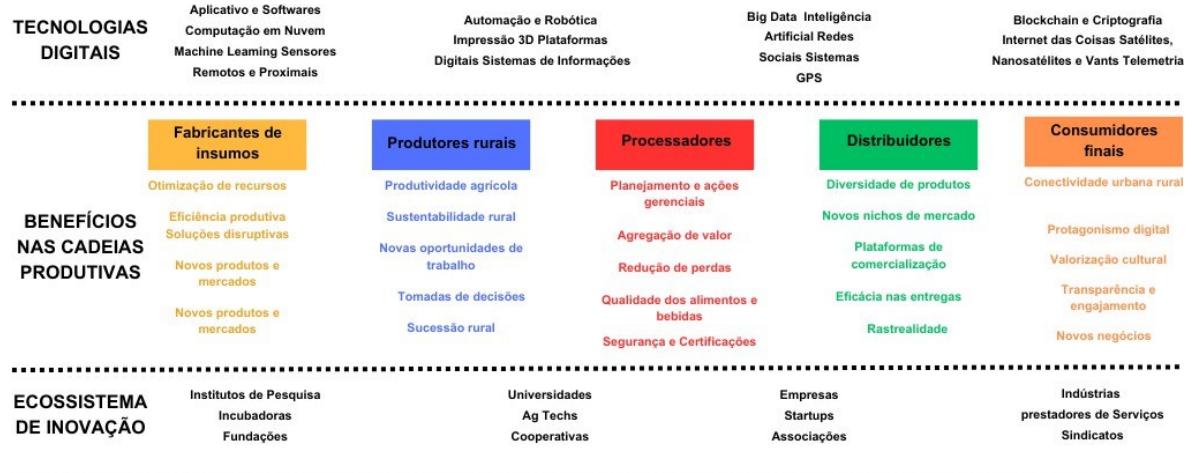
Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020)

Logo, a decisão de adotar uma nova tecnologia é influenciada por uma complexa rede de fatores, que vão do perfil individual do produtor às condições sistêmicas do ambiente de inovação. No nível da propriedade, o capital humano — como escolaridade e experiência —, a aversão ao risco e a capacidade de investimento são cruciais, fazendo com que tecnologias de alto custo sejam menos atrativas para produtores de menor escala (Souza Filho et al., 2011). Nesse contexto, a organização em cooperativas surge como um facilitador para superar desvantagens por meio de investimentos coletivos.

A superação dessas barreiras é fundamental, pois a transformação digital no campo, embora inevitável para a competitividade, aprofunda o dualismo tecnológico existente (Figura 2). A persistência de uma infraestrutura precária, com 74% das áreas agrícolas sem conectividade significativa, e os custos proibitivos de tecnologias como IoT e robótica, perpetuam um cenário onde apenas 27% dos estabelecimentos familiares acessam ferramentas digitais, contra 49% das grandes propriedades (Dias et al., 2023). O enfrentamento dessa desigualdade exige uma combinação de políticas públicas contínuas — como a expansão de redes rurais e programas de educação tecnológica — com parcerias estratégicas entre

cooperativas, startups e universidades, para que ocorrer o vetor de inclusão, garantindo que produtividade e equidade entre a agricultura familiar e patronal (Bolfe; Massruhá, 2020; Dias et al., 2023).

Figura 2 - Potenciais benefícios da transformação digital nas cadeias produtivas agrícolas.



Fonte: Adaptado de: Bolfe e Massruhá (2020).

Apesar dos entraves estruturais detalhados, que configuram um cenário desafiador, o avanço tecnológico não é somente uma fonte de desigualdade, como também um forte vetor de transformação. A seguir, serão analisadas as oportunidades e os avanços concretos que a agricultura digital já proporciona ao campo brasileiro.

2.2 Vtor de transformação: Oportunidades e avanços na agricultura digital no Brasil

Partindo dos desafios apresentados, surgem também oportunidades para integrar a agricultura familiar e os pequenos produtores à era digital do Agro 4.0. A adoção das novas tecnologias configura-se como um vetor estratégico para a modernização sustentável do setor, combinando ganhos econômicos, operacionais e ambientais. A integração de IoT e automação já demonstra resultados práticos, como a redução de até 90% no uso de pesticidas e de 6% em combustível, gerando aumento de lucratividade e eficiência (Zaparolli, 2020). Paralelamente,

a transformação se manifesta na adesão a ferramentas tangíveis, com 68% dos produtores utilizando sensores e plataformas digitais, enquanto a rastreabilidade via blockchain e o sensoriamento avançado abrem acesso a mercados premium, como os de créditos de carbono, reforçando a competitividade global. Embora a escalabilidade dessas inovações ainda esbarre em desafios estruturais — debatido no subtópico anterior — de conectividade e capacitação técnica, o cenário aponta para um futuro em que a sinergia entre dados em tempo real, automação e transparência consolidará o Brasil como referência em uma agropecuária digitalizada e alinhada aos imperativos socioambientais (Bolfe et al., 2020; Mapa, 2021; Zaporolli, 2020)

A expansão do Agro 4.0 no Brasil apresenta oportunidades transformadoras, especialmente no uso integrado de tecnologias digitais para otimizar a gestão de dados e processos agrícolas. Conforme destacado por Dias et al. (2023, p. 117):

A tecnologia vai mudar essa realidade. Ela irá possibilitar que os dados existentes sejam facilmente armazenados e organizados — um exemplo é a plataforma do Pronasolos, que promete mapear os solos de 8,2 milhões de km² até 2048, em escalas detalhadas. Dados de clima, chuvas, incidência de pragas e doenças, índices de produção entre outros poderão ser mapeados da mesma forma. Além das informações que já estamos acostumados, novos dados passarão a ser utilizados, como, por exemplo, as imagens de satélites ou os drones; estes fornecem uma ótima estimativa da quantidade de biomassa da cultura o que pode servir como base para estimativas de produtividade, mapeamento de infestações, orientação de locais a serem investigados etc.

Mediante a isso, essa abordagem, aliada a plataformas como o Pronasolos, que visa mapear solos em escalas detalhadas até 2048, reflete a potencialidade de sistemas baseados em Internet das Coisas (IoT) e Big Data para ampliar a precisão na tomada de decisões. A integração de sensores, drones e imagens orbitais permite monitorar variáveis agronômicas em tempo real e também antecipar riscos como infestações e déficits nutricionais, reduzindo perdas e aumentando a produtividade (Queiroz et al., 2020). Essa sinergia entre ferramentas digitais e análise preditiva está alinhada com as perspectivas da Embrapa (2023), que enfatiza a necessidade de ecossistemas de inovação aberta para consolidar uma agricultura sustentável e digitalizada, com destaque para a automação de processos críticos, como irrigação e controle de pragas (Embrapa, 2021).

Conforme apontando na pesquisa de Bolfe et al. (2020) a análise das expectativas futuras dos produtores revela um ponto crucial para este trabalho: existe uma forte demanda por ferramentas digitais que impactam diretamente a produtividade, embora a adoção atual

para essas funções seja baixa. Enquanto funções administrativas como "Obtenção de informações" (67%) e "Gestão da propriedade rural" (60%) seguem como prioridades, o dado mais significativo é o alto desejo de usar tecnologias para de produção ou produtividade, apontado por 48% dos agricultores (**Gráfico 10**).

Gráfico 10 - Expectativa futuras das aplicações de tecnologias digitais pelos produtores rurais brasileiros na produção agricultura ocorrido em 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020)

Esse anseio contrasta fortemente com o uso atual de apenas 20% para a mesma finalidade (**Gráfico 7**), expondo uma lacuna crítica entre a necessidade de otimizar a produção e a capacidade de realmente fazê-lo. A mesma tendência se aplica a outras funções essenciais para a produtividade, como a "Detecção de deficiências nutricionais" (desejada por 52%, mas usada por apenas 16,1%) e o "Controle de doenças" (desejado por 49%, com um uso de 15,5%). Essa diferença entre a realidade e a aspiração sinaliza que o principal gargalo para o aumento da produtividade no campo não é a falta de interesse, mas sim a dificuldade em acessar as tecnologias de precisão necessárias para transformar dados em colheitas mais eficientes e destravar o pleno potencial do Agro 4.0 no Brasil.

Dessa forma a expansão do Agro 4.0 no Brasil revela um cenário paradoxal, onde o avanço da modernização tecnológica coexiste com profundos entraves estruturais. Por um

lado, a heterogeneidade histórica no quesito assistência técnica deficiente e a precária infraestrutura digital rural perpetuam um ciclo de exclusão, dificultando a difusão de tecnologias como IoT e robótica, especialmente entre pequenos produtores (Souza et al., 2019; Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2021; Silva; Santos, 2024).

Por outro lado, o potencial transformador da integração de sensores, drones e análise preditiva aponta para expressivos ganhos de produtividade, rastreabilidade e sustentabilidade, como ilustram iniciativas como o Pronasolos e o consórcio ConectarAgro (Dias et al., 2023). Contudo, a efetivação desses benefícios e a superação do dualismo tecnológico dependem de uma articulação estratégica que enfrente os altos custos, a descontinuidade de políticas públicas e a carência de capacitação técnica, sendo esta a condição fundamental para que a inovação se converta em um vetor de competitividade e desenvolvimento equitativo, em vez de aprofundar as desigualdades existentes no campo.

Para tanto, no próximo subtópico, será explorado o papel da governança e das políticas públicas como ferramentas estratégicas para superar os desafios apresentados e democratizar os avanços do Agro 4.0 no Brasil.

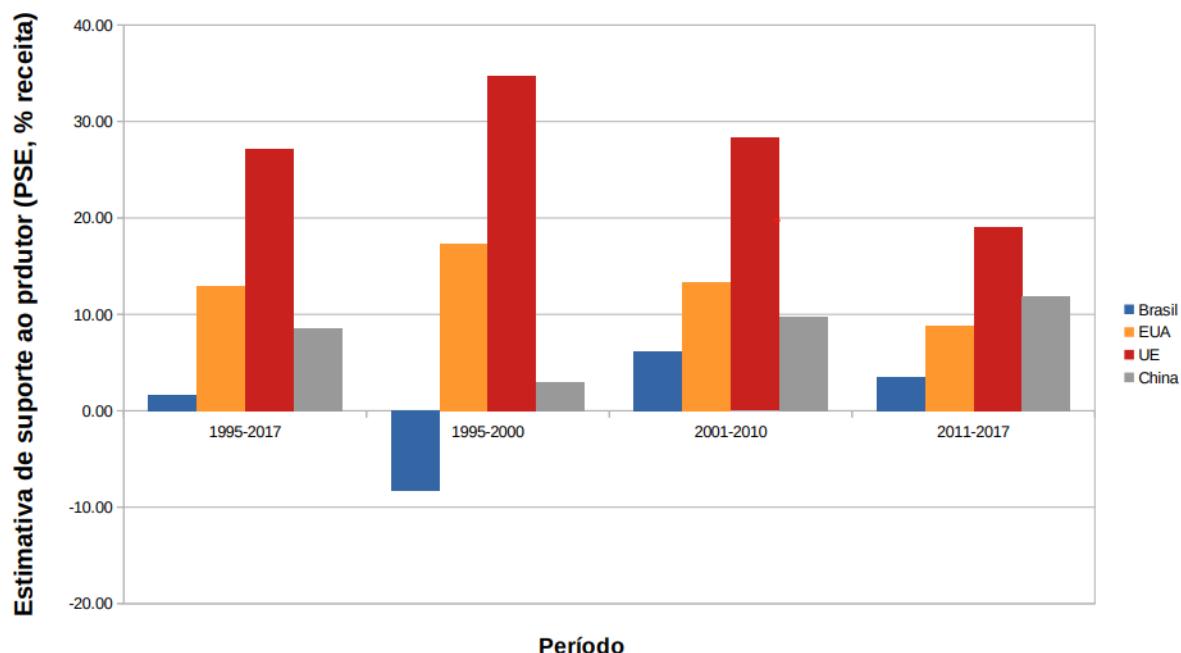
2.3 Governança e estratégias para a democratização do Agro 4.0: O papel das políticas públicas

As estruturações das políticas públicas para inovação no campo brasileiro teve início na década de 1970, com a criação da Embrapa, sendo fortalecida nos anos 1990 pelo Sistema Nacional de Pesquisa Agropecuária (SNPA). Um marco específico para a era digital foi a fundação da Embrapa Informática Agropecuária em 1985, que se consolidou como um ator central no fomento à inovação em TI para o agronegócio. Conforme analisam Souza e Bidarra (2022), essas ações estabeleceram uma base institucional para a geração e transferência de tecnologias que contribuíram para o desenvolvimento do setor produtivo nacional.

A transição da Agricultura 2.0, herdeira da Revolução Verde, para a Agricultura 4.0, evidencia o papel determinante das políticas públicas para orientar a inovação tecnológica no campo. No entanto, a capacidade do Brasil em sustentar essa modernização demonstra uma clara inconsistência, especialmente no que tange aos incentivos diretos ao produtor (Massruhá et al., 2020).

Uma análise dos níveis de apoio governamental revela essa fragilidade: enquanto os produtores da União Europeia e dos EUA recebem, respectivamente, 27,2% e 13,0% de suas receitas como suporte, o produtor brasileiro conta com apenas 1,6% (Massruhá, 2019) (Figura 3). Este cenário comprova que a alta competitividade do agronegócio nacional é alcançada com um benefício significativamente inferior, colocando o produtor em uma posição de maior vulnerabilidade e desvantagem no mercado global.

Figura 3 - Níveis de incentivos na agricultura brasileira em comparação entre os países selecionados nos anos 1995-2017



Fonte: Adaptado de: Massruhá (2019); dados: OECD; elaboração: G. Martha (Embrapa Informática Agropecuária).

Porém com a ascensão do Agro 4.0, o arcabouço jurídico se modernizou para direcionar os novos desafios, com a criação do fundo setorial CT-Agronegócio, do Marco Legal da Ciência e Tecnologia para estimular parcerias, e da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) para regular o uso das informações. Mais recentemente, o Plano Nacional de Internet das Coisas (IoT.BR), que teve origem na Câmara do Agro 4.0, e a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão e Digital (CBAPD) foram instituídas para expandir a conectividade e difundir as novas tecnologias no país (Quadro 1) (Souza; Bidarra, 2022).

Quadro 1 - Políticas públicas de apoio à agricultura digital

Desenvolvimento da política pública	Ano	Marco legal	Objetivo
CT-Agronegócio	2001	Lei Federal nº 10.332/2001 (Brasil, 2001)	Estimular investimentos e estruturar o financiamento para o desenvolvimento tecnológico do agronegócio.
Marco Legal da Ciência, Tecnologia e Inovação	2016	Lei Federal nº 13.243/2016 (Brasil, 2016a)	Fomentar atividades científicas e tecnológicas como vetores de desenvolvimento econômico e social.
Lei Geral de Proteção de Dados	2018	Lei Federal nº 13.709/2018 (Brasil, 2018)	Proteger os direitos à liberdade, à privacidade e ao livre desenvolvimento da personalidade de cada pessoa.
Plano Nacional de Internet das Coisas (IoT.BR)	2019	Decreto Federal nº 9.854/2019 (Brasil, 2019b)	Impulsionar o desenvolvimento sustentável da sociedade brasileira por meio da implementação da IoT.
Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão e Digital	2009	Decreto Federal nº 10.052/2019 (Brasil, 2019a)	Promover a agricultura de precisão e digital como ferramenta para o desenvolvimento agropecuário e a sustentabilidade socioambiental do país.

Adaptado de: Souza e Bidarra (2022)

Diversas políticas públicas foram projetadas para contribuição na agricultura digital, com destaque para o plano de ação estratégico do BNDES, que elegeu o setor rural como área prioritária para investimentos em Internet das Coisas (IoT). Esta iniciativa, desenvolvida com parceiros como a Embrapa, busca usar a IoT como ferramenta para melhorar a gestão e promover o desenvolvimento sustentável do agronegócio (Massruhá, 2019). De forma complementar, a Câmara do Agro 4.0 (2019), liderada pelo Mapa e MCTIC, foi criada para expandir a conectividade rural, enquanto o Programa Ater Digital (2020), da Secretaria de Agricultura Familiar (SAF), visa fortalecer a assistência técnica e o acesso à inovação por meio das TICs (Souza; Bidarra, 2022).

Para induzir essas estratégias em ações práticas, o Programa Agro 4.0 se sobressai como uma iniciativa central de avanço. Coordenado pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), o programa operacionalizou um investimento de R\$ 4,8 milhões para o acompanhamento de 14 projetos-piloto (**Quadro 2**) (ABDI, 2020).

Quadro 2 - Ações de apoio à agricultura digital

Ação	Ano	Execução	Objetivo relacionado à agricultura digital
BNDES IoT	Piloto 2017	BNDES	Diagnosticar o cenário e propor um plano de ação para a implementação da IoT no Brasil.
Câmara do Agro 4.0	2019	Mapa e MCTIC	Expandir a internet no campo e promover a aquisição de tecnologias e serviços inovadores.
Programa Ater Digital	2020	SAF ³	Fortalecer e ampliar a assistência técnica rural com uma governança inovadora e o uso de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs).
Programa Agro 4.0	2020	ABDI ⁴ , Mapa, ME ⁵ e MCTIC	Fomentar a inovação no agronegócio com 14 projetos-piloto para a adoção e difusão de tecnologias digitais.

Fonte: Adaptado de: Souza e Bidarra (2022)

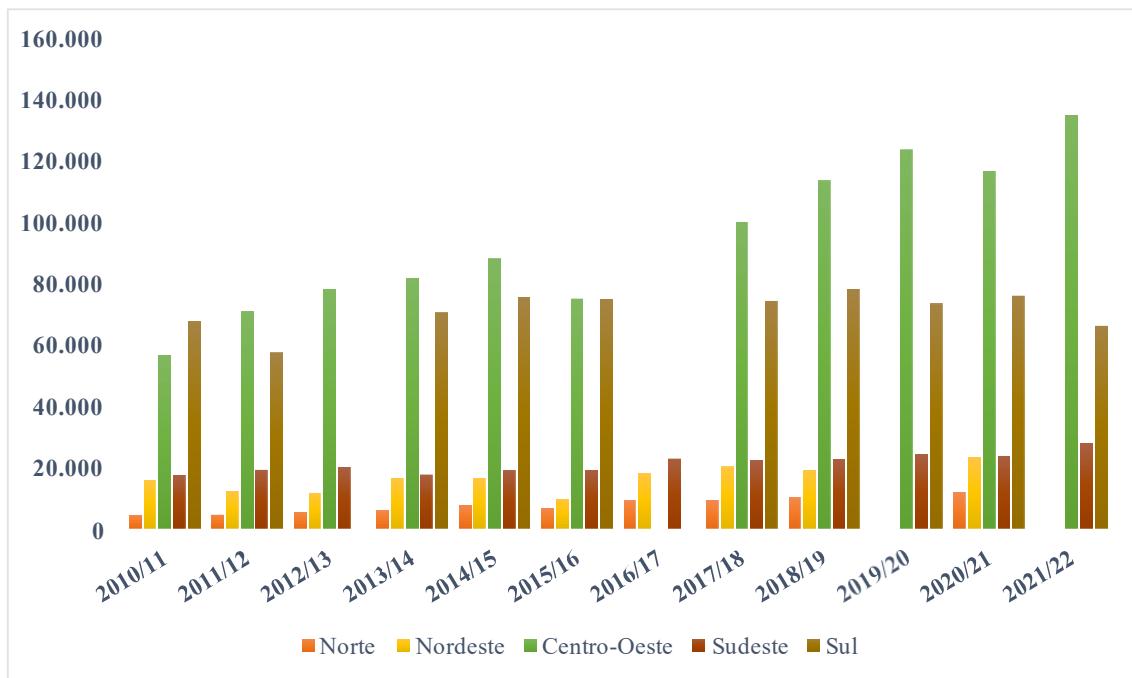
Uma das justificativas para a expansão da produção de grãos na região Centro-Oeste de 2017 a 2022 (Gráfico 11) se da ao direcionamento estratégico dessas políticas para a região, que impulsionada pela sua infraestrutura, se sobressaiu das demais regiões. Dessa forma as ações como os projetos-piloto do BNDES e da Câmara do Agro 4.0 — com maior alocação de recursos para as regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste — e os editais regionais do Programa Agro 4.0 — com recursos direcionados mais para região Centro-Oeste e Sudeste — alcançaram investimento significativo que estimulou a adoção de novas tecnologias e, consequentemente, impulsionando os ganhos de produtividade e expansão. (ABDI, 2020; Massruhá, 2019; Souza; Bidarra, 2022).

³ Secretaria de Agricultura Familiar e Cooperativismo.

⁴ Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial.

⁵ Ministério da Economia.

Gráfico 11 - Série histórica de produção de grãos por regiões, em mil toneladas entre 2010/2011-2021-2022



Fonte: Adpatado de: Tocantins (2022)

Portanto, a análise revela a construção de um arcabouço institucional e jurídico para fomentar a agricultura digital no Brasil. No entanto, a eficácia dessas políticas é desafiada pela baixa alocação de incentivos diretos em comparação com concorrentes globais e pela necessidade de ações direcionadas para reduzir as desigualdades regionais.

Dessa forma, avançamos agora para o capítulo 3, no qual serão analisados em detalhe os resultados concretos obtidos pelos 14 projetos-piloto do Programa Agro 4.0 e correlacionar com a pesquisa da Embrapa/Sebrae, mapeando lições aprendidas e analisar o nível de adoção das tecnologias no campo brasileiro.

3 ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA AGRO 4.0 POR PRODUTORES RURAIS BRASILEIROS: ANÁLISE E RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo analisar os resultados e efeitos práticos da adoção de tecnologias do Agro 4.0 no Brasil. A primeira seção avalia o efeito na produtividade, cruzando os ganhos quantitativos observados nos projetos-piloto do Programa Agro 4.0 com a percepção em larga escala de produtores rurais, conforme a pesquisa Embrapa/Sebrae. Em seguida, a segunda seção aprofunda a análise das barreiras à escalabilidade, detalhando os gargalos de conectividade, custo e capacitação que emergiram durante a execução desses projetos. Por fim, a terceira seção aborda a dimensão da sustentabilidade, demonstrando o papel fundamental das tecnologias na redução do efeito ambiental e na otimização de recursos naturais no campo

3.1 Efeito na produtividade : cruzando resultados de projetos-piloto com a percepção do campo

Este subcapítulo tem como objetivo analisar os resultados e nível do grau/efeito da adoção das tecnologias do Agro 4.0 no Brasil, focando em produtividade. Para construir um panorama completo, a análise será desenvolvida em duas frentes complementares: os resultados quantitativos de projetos-piloto e a percepção em larga escala dos produtores.

Primeiramente, serão detalhados os efeitos observados nos 14 projetos-piloto do Programa Agro 4.0 iniciativa coordenada pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI). A análise foca em demonstrar como a adoção de soluções de Internet das Coisas (IoT), sensoriamento e inteligência artificial foi operacionalizada por produtores brasileiros.

Esses casos práticos demonstram o potencial da tecnologia em ambientes controlados, com resultados expressivos tanto no âmbito de lucratividade, produtividade quanto sustentabilidade. (ABDI, 2020). Em um segundo momento, esses dados serão contrastados com a percepção de 504 produtores rurais, conforme a pesquisa da Embrapa/Sebrae (Bolfe et al., 2020), para validar como os ganhos são sentidos na realidade mais ampla do campo. A partir desses casos, serão evidenciados os desafios operacionais, a escalabilidade das soluções e seu potencial de replicação no agronegócio nacional.

Para avaliar os efeitos da adoção de tecnologias 4.0 nos projetos-piloto do Programa Agro 4.0, foram definidas variáveis quantitativas relacionadas à eficiência operacional, à sustentabilidade e à viabilidade econômica, conforme apresentado no abaixo (ABDI, 2020).

Quadro 3 - Variáveis quantitativas analisadas nos projetos-piloto do Programa Agro 4.0

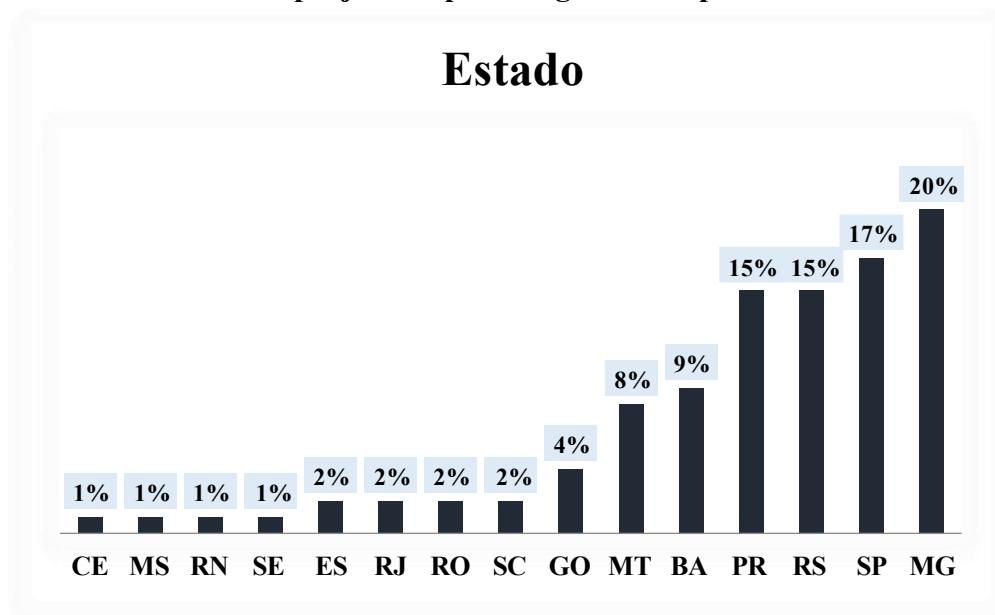
Variável	Unidade	Definição resumida	Justificativa
Produtividade	$\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	Produção obtida por área (quilogramas por hectare) ou por ciclo (unidades).	Mensurar ganhos de eficiência produtiva antes e depois da implantação das tecnologias.
Consumo de insumos – água	$\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$	Volume de água utilizado em irrigação ou outros processos (metros cúbicos por hectare).	Avaliar redução de custos e efeitos ambiental do uso racional de recursos hídricos.
Consumo de insumos – energia	$\text{kWh}\cdot\text{ha}^{-1}$	Energia elétrica consumida em sistemas de bombeamento, sensoriamento e automação (kWh por ha).	Verificar economia gerada pela adoção de soluções de baixo consumo energético.
Emissões de CO₂	$\text{t}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{ano}^{-1}$	Emissões diretas e indiretas de dióxido de carbono por ano (toneladas).	Quantificar o efeito das tecnologias sobre a pegada de carbono e a sustentabilidade
Categoria tecnológica	–	Classificação dos projetos em Insumos; Produção e colheita; Processamento; Integração de cadeia.	Identificar onde concentram-se os investimentos e os efeitos práticos das tecnologias 4.0.

Fonte: ABDI (2020).

Logo, esse conjunto de variáveis permitiu articular de forma integrada: o ponto onde as soluções foram aplicadas, ao cruzar os dados de produtividade e insumos com a localização geográfica das fazendas e agroindústrias; o quanto se avançou na adoção, por meio do nível de maturidade digital alcançado em cada grupo de participantes; e o como as tecnologias surtiram efeito diretamente a produtividade, a redução de custos e os ganhos em sustentabilidade.

A distribuição geográfica das 14 fazendas e agroindústrias participantes, ilustrada no (Gráfico 12), evidencia forte concentração em Minas Gerais (20 %) e São Paulo (17 %), seguidos por Rio Grande do Sul (15 %) e Paraná (15 %). Essa predominância nas regiões Sudeste e Sul pode ser explicada pela maior densidade de centros de pesquisa, universidades e incentivos estaduais à inovação, além da existência de cadeias produtivas consolidadas que facilitam a difusão de novas tecnologias (ABDI, 2020). Em contrapartida, percebe-se baixa representatividade das regiões Norte e Nordeste (ambas com apenas 1 % cada), possivelmente em função de limitações de infraestrutura — sobretudo conectividade — e menor oferta de programas de extensão rural nessas áreas.

Gráfico 12 – Localização geográfica das fazendas/agroindústrias participantes do projeto co-piloto Agro 4.0 no período de 2020

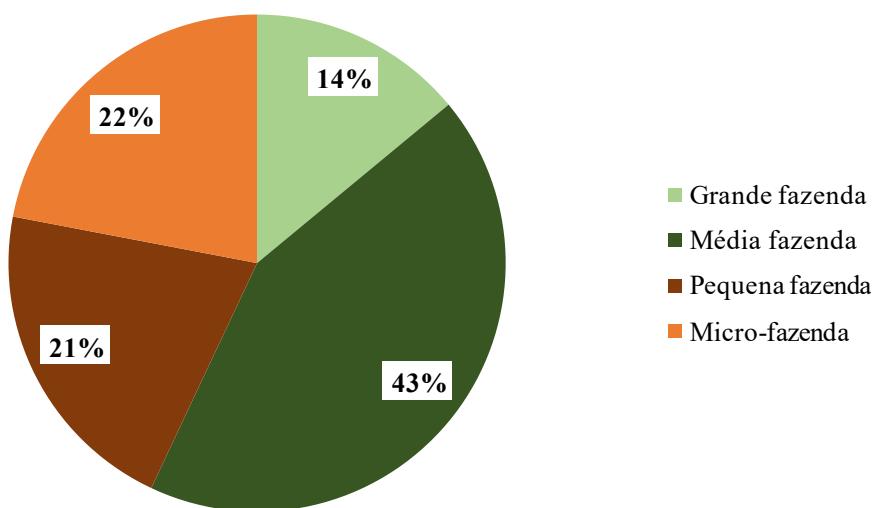


Fonte: Adaptado de ABDI (2020).

Ao associar esses dados às variáveis de adoção tecnológica, confirma-se que a proximidade a polos de inovação não facilita o acesso a recursos financeiros e capacitação técnica, e também reduz barreiras logísticas e de suporte pós-implantação. Consequentemente, os projetos localizados em MG e SP demonstraram níveis mais elevados de maturidade digital e maiores retornos preliminares em produtividade e sustentabilidade.

Já o (Gráfico 13) revela que 43% das propriedades participantes são médias, seguidas por microfazendas (22%), pequenas (21%) e grandes (14%). A predominância de médias e pequenas (64% combinados) indica um cenário onde a capacidade de investimento em tecnologias varia significativamente: enquanto grandes propriedades (14%) adotam soluções complexas, como IoT integrada e *big data*, devido a recursos técnicos e financeiros, 43% das médias focam em otimizações parciais (ex.: geolocalização), e microfazendas (22%) limitam-se a tecnologias básicas, como sensores de solo, por restrições orçamentárias (ABDI, 2020). Essa estratificação reforça a correlação entre porte econômico e maturidade tecnológica, exigindo políticas que viabilizem acesso diferenciado a crédito e capacitação para reduzir disparidades.

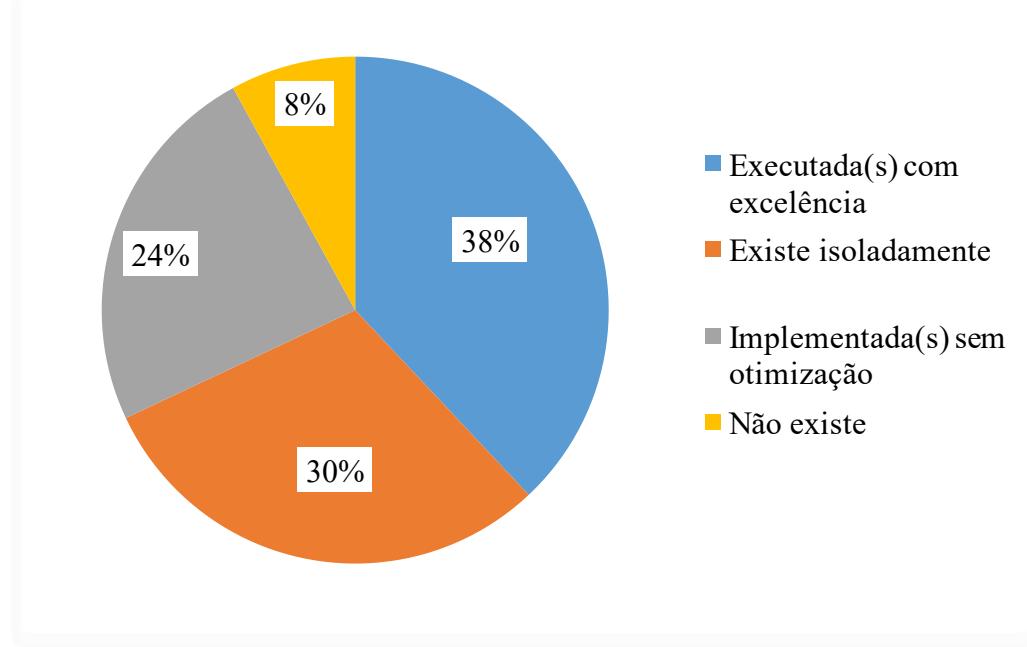
Gráfico 13 – Porte das principais fazendas/agroinudtrias envolvidas nos projetos selecionados no período de 2020



Fonte: Adaptado de ABDI (2020).

O **(Gráfico 14)** apresenta a distribuição dos níveis de adoção de tecnologias Agro 4.0 entre fazendas e agroindústrias participantes do Programa Agro 4.0, classificadas em quatro categorias: existe (presença pontual de tecnologias, sem integração; 8%), existe isoladamente (tecnologias aplicadas em setores específicos, sem conexão sistêmica; 30%), implementação sem otimização (uso parcial, com lacunas na gestão de dados; 24%) e executados com excelência (adoção plena e integrada, com resultados mensuráveis; 38%). Essa estratificação evidencia um cenário heterogêneo, onde apenas 3 em cada 10 propriedades atingiram maturidade digital, conforme métricas da ABDI (2020).

Gráfico 14 – Nível de adoção tecnologias Agro 4.0 por fazendas/agroindústrias no período de 2020



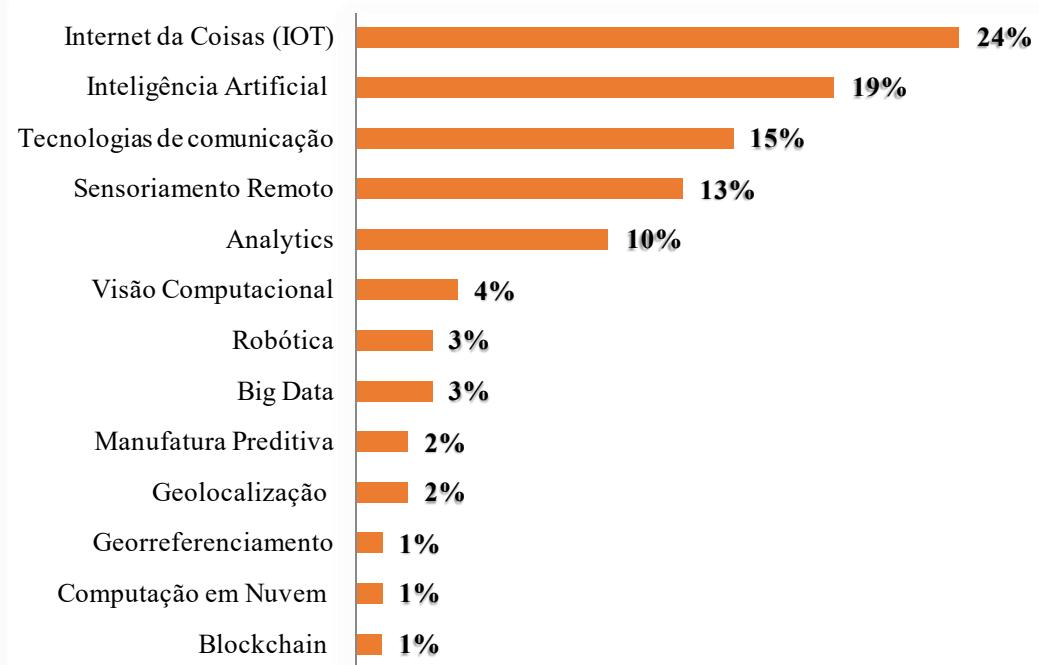
Fonte: Adaptado de ABDI (2020).

A análise da distribuição das tecnologias 4.0 nos 14 projetos-piloto **(Gráfico 15)** revela três grupos distintos de adoção. Internet das Coisas (IoT), e Inteligência Artificial e tecnologia de comunicação aparecem como as mais frequentes, com (24%,19%,15%) respectivamente de participação cada, refletindo a prioridade dada ao monitoramento em tempo real e ao processamento inteligente de dados. Em seguida, Sensoriamento Remoto 13% e Data Analytics concentra (10 %) das aplicações, demonstrando a necessidade de agregar valor às informações coletadas por meio de análises estatísticas e preditivas. Já Visão

Computacional, Robótica, Geolocalização e registram apenas (9%) contabilizadas, evidenciando que soluções de maior complexidade e custo ainda são empregadas em nichos específicos, geralmente para tarefas que exigem automação avançada ou mapeamento de alta precisão (ABDI, 2020).

Esse padrão de adoção espelha diretamente os resultados da fase de diagnóstico, em que produtores identificaram como urgentes o aumento da visibilidade sobre variáveis críticas (umidade, uso de insumos, comportamento de plantas e animais) e a necessidade de transformar esses dados em insights acionáveis. Assim, optou-se inicialmente por tecnologias que ofereçam um “retorno rápido” em termos de eficiência operacional, deixando soluções mais especializadas — como robôs agrícolas e sistemas avançados de georreferenciamento — para etapas posteriores de maturidade do projeto.

Gráfico 15 – Distribuição das tecnologias 4.0 em uso nos projetos no período de 2020

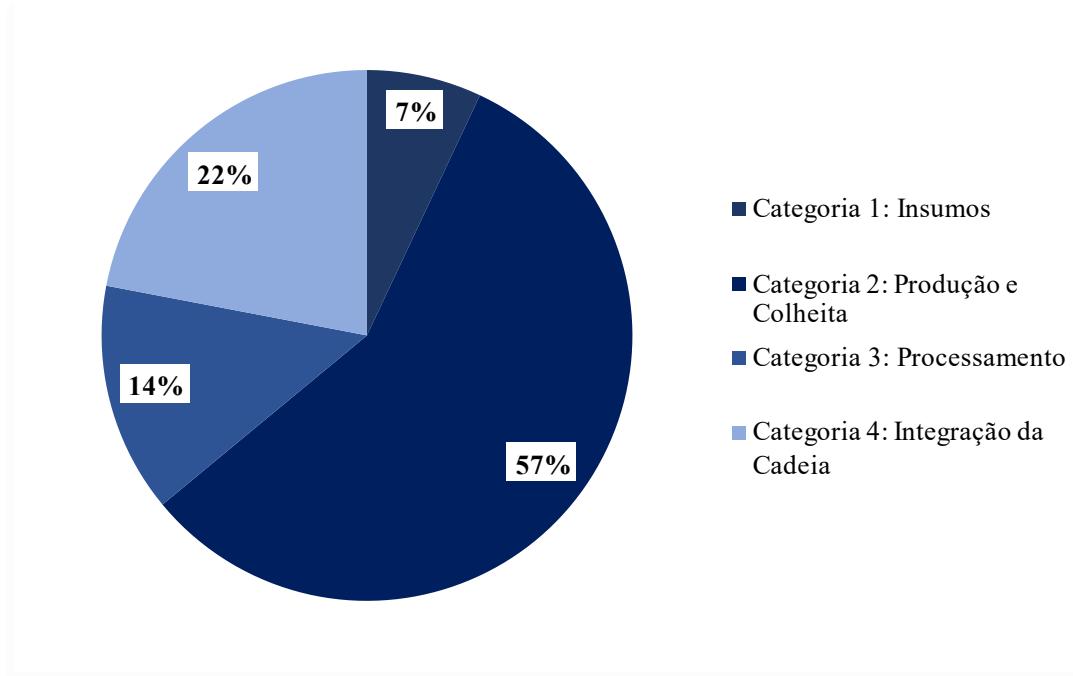


Fonte: Adaptado de ABDI (2020).

Já o (Gráfico 16) demonstra a concentração de projetos do Programa Agro 4.0 por categoria, onde a produção e colheita lideram com 57% (ABDI, 2020). A categoria integração

da cadeia (22%) destaca-se pela busca de rastreabilidade e redução de desperdícios, enquanto o processamento (14%) enfrenta barreiras econômicas, como investimentos médios de R\$ 500 mil por unidade, inviáveis para 68% das pequenas agroindústrias. E por fim a categoria insumos (7%) , onde o foco em otimizar recursos como água e agroquímicos.

Gráfico 16 – Quantidades de projetos por categoria no período de 2020



Fonte: Adaptado de ABDI (2020).

A partir dessa distribuição por categoria, torna-se possível compreender como as decisões de adoção tecnológica se materializaram em práticas concretas no campo. Para tanto serão apresentados os principais projetos-piloto selecionados pelo Programa Agro 4.0, com destaque para as soluções aplicadas, os contextos regionais e os resultados quantitativos obtidos em cada caso.

Para aprofundar a compreensão dos efeitos práticos das tecnologias adotadas nos 14 projetos-pilotos, foram selecionados somente 6 afim de obter uma melhor precição no quesito de maturidade em ganhos de produtividade e sustentabilidade (**Quadro 4**) apresentando, de forma sintetizada, as principais soluções implementadas, suas respectivas descrições, as tecnologias 4.0 envolvidas, os estados de aplicação e os resultados parciais observados. Esse panorama permite identificar padrões, outliers e potenciais de replicabilidade, articulando os dados qualitativos e quantitativos discutidos nas seções anteriores.

Quadro 4 - Análise de casos selecionados do Programa Agro 4.0: descrição das iniciativas, tecnologias aplicadas e os efeitos na produtividade e sustentabilidade no período de 2020

(continua)

Nome da iniciativa	Descrição	Tecnologia(s) 4.0 envolvida(s)	Estado de aplicação	Alguns resultados (estudo de caso)
Pulverização inteligente	A solução emprega sensores acoplados aos pulverizadores que detectam plantas vivas e aplicam o produto apenas sobre elas.	<ul style="list-style-type: none"> Sensoriamento remoto 	GO - Fazenda de milho/soja	<ol style="list-style-type: none"> Redução de 70% no uso de herbicidas em geral. Redução de 20% no uso de desfolhante na cultura da soja Redução de 30% no uso de inseticida na cultura do milho
Irrigação inteligente	A proposta de solução integra sensores de campo, alimentados por energia fotovoltaica, para a medição da umidade do solo. Os dados coletados são transmitidos por comunicação via radiofrequência para uma plataforma web, que permite a análise e a configuração de configurações específicas para o tipo de solo e a cultura. Com base nessas alterações, o sistema oferece uma gestão personalizada, identificando a capacidade de retenção hídrica e as demandas de cada cultivo para melhorar a saúde dos solos e das plantas.	<ul style="list-style-type: none"> Internet das Coisas/ Sensoriamento Remoto Inteligência Artificial e/ ou Visão Computacional Data Analytics 	BA - Fazenda de milho/soja	<ol style="list-style-type: none"> Redução da quantidade de irrigação/pivô/talhão (case do projeto: potencial real de 20%) Redução do gasto com energia/pivô/talhão (case do projeto: potencial real de 30%) Redução de gasto com água/pivô/talhão (case do projeto: potencial real de 30%)

(continua)

Nome da iniciativa	Descrição	Tecnologia(s) 4.0 envolvida(s)	Estado de aplicação	Alguns resultados (estudo de caso)
Ponto ótimo de abate/Plataforma de inteligência de mercado para maximização de lucro de produtores e frigorífico	<p>A solução proposta é estruturada em três pilares de inteligência:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Inteligência de algoritmos, que avalia a performance animal, econômica e ambiental, promovendo a otimização desses indicadores; 2. Inteligência de mercado, baseada em análises especializadas do comportamento do mercado e na identificação de oportunidades de comercialização; 3. Inteligência Artificial, que utiliza predição de peso e crescimento, além de um sistema autônomo de câmeras inteligentes para estimar o acabamento de gordura e detectar hematomas nas carcaças. <p>Embora desenvolvida primariamente para aplicação em sistemas de confinamento, a solução também é adaptável a sistemas de pastagem.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Internet das Coisas/ Sensoriamento Remoto • Inteligência Artificial e/ ou Visão Computacional • Data Analytics 	M S - Fazenda de criação de gado de corte e outros estados	<p>7. Aumento de quase 30% de lucratividade.</p> <p>8. Tempo de confinamento: -24,44%. (o que diminui custos com alimentação e manejo).</p> <p>9. Aumento de 5,45% no ganho de arroba por cabeça, otimizando o ciclo produtivo.</p>

(continua)

Nome da iniciativa	Descrição	Tecnologia(s) 4.0 envolvida(s)	Estado de aplicação	Alguns resultados (estudo de caso)
Monitamento de Câmara de Produção de Bioinsumo	<p>A solução proposta fundamenta-se na utilização de equipamentos projetados para ambientes controlados, incorporando câmaras com isolamento térmico e sistemas de controle preciso de variáveis como temperatura, umidade, fotoperíodo, níveis de CO₂, circulação e renovação de ar, além de reservatórios de água. A solução integra um sistema remoto baseado em nuvem, que permite o ajuste dos controladores e o monitoramento contínuo de todos os sensores, com emissão de alertas para situações críticas, como porta aberta, temperatura elevada, umidade inadequada, falta de água ou níveis excessivos de CO₂, entre outros. Esse sistema possibilita ajustes em tempo real de forma online. A solução visa estabelecer uma integração de hardwares e softwares dedicados à gestão eficiente da produção em ambientes controlados.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Internet das Coisas/ Sensoriamento Remoto 	<p>PR - Fazenda de criação de insetos (defensivos biológicos)</p>	<p>10. Aumento da capacidade populacional por câmara, incremento de 150% 11. Ganhos de produção de ovos por fêmea com aumento de 100%. 12. Redução da mortalidade na criação de macrobiológicos de 20% 13. Redução de 50% no uso de inseticida químico pela Semegrão com liberação de biodefensivo.</p>

(continua)

Nome da iniciativa	Descrição	Tecnologia(s) 4.0 envolvida(s)	Estado de aplicação	Alguns resultados (estudo de caso)
Automação, controle e gestão do plantio de cana-de-açúcar	<p>A solução desenvolvida consiste na automação de plantadoras de cana-de-açúcar, substituindo a operação manual por sistemas automatizados para alimentação e dosagem de mudas. O sistema conta com controle de fluxo em taxa fixa para até quatro tipos de insumos, sensores para detecção de falhas, câmeras integradas com monitores, caixas de controle com chicotes elétricos e um computador de bordo com antena. A parametrização é ajustada conforme as especificidades operacionais da unidade produtiva. A solução inclui ainda uma plataforma web em nuvem, que permite o acompanhamento geolocalizado das atividades, o monitoramento em tempo real do implemento e o processamento dos dados no próprio equipamento. Essa plataforma fornece relatórios georreferenciados e históricos de ocorrências, como falhas e paradas, auxiliando na gestão e na tomada de decisões.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Internet das Coisas/ Sensoriamento Remoto • Geolocalização • <i>Data Analytics</i> 	M G - Fazenda de cana-de-açúcar	14. Economia média R\$ 287,19 por hectare considerando (mudas, hectares plantados, viagens economizadas, dias trabalhados e redução de falhas)

Nome da iniciativa	Descrição	Tecnologia(s) 4.0 envolvida(s)	Estado de aplicação	Alguns resultados (estudo de caso)
Avicultura inteligente (Monitoramento de aves de corte)	<p>A solução visa oferecer monitoramento contínuo da produção em aviários, possibilitando o acionamento imediato de profissionais para intervir em situações que comprometam as condições ideais do ambiente produtivo. Além disso, busca otimizar os parâmetros para a produção de aves de corte, promovendo melhorias contínuas na qualidade e na rentabilidade tanto para o produtor quanto para a cooperativa. O sistema também permite identificar correlações entre doenças nas aves, condições ambientais, homogeneidade de peso e qualidade do produto.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Internet das Coisas e/ou Sensoriamento Remoto • Inteligência Artificial e/ ou Visão Computacional • Data Analytics/Big Data 	PR - Cooperativa	<p>15. Aumento na acurácia de pesagem (case do projeto: 40%).</p> <p>16. Redução nas mortalidades (60% dos aviários)</p> <p>17. Acurácia de 98,84% para predição de abate.</p> <p>18. 92% de assertividade do algoritmo para indicação de probabilidade de incidência de aerossaculite.</p>

Fonte: Adaptação: ABDI (2020).

Mediante ao exposto acima a análise dos projetos-piloto revela que as iniciativas de pulverização inteligente e irrigação Inteligente se destacaram pela eficiência no uso de insumos: a primeira alcançou (70%) de redução no uso de herbicidas em Goiás, enquanto a segunda demonstrou (30%) de economia de água e energia na Bahia (ABDI, 2020). O projeto de monitoramento de câmara de produção de bioinsumos, no Paraná, surgiu como um caso excepcional, com (150%) de aumento na capacidade produtiva e (50%) de redução no uso de químicos. Em paralelo, outros casos demonstram ganhos diretos na lucratividade, como o aumento de quase (30%) no resultado do ponto ótimo de abate em mato grosso do sul, reforçando o potencial do Agro 4.0 para otimização de recursos.

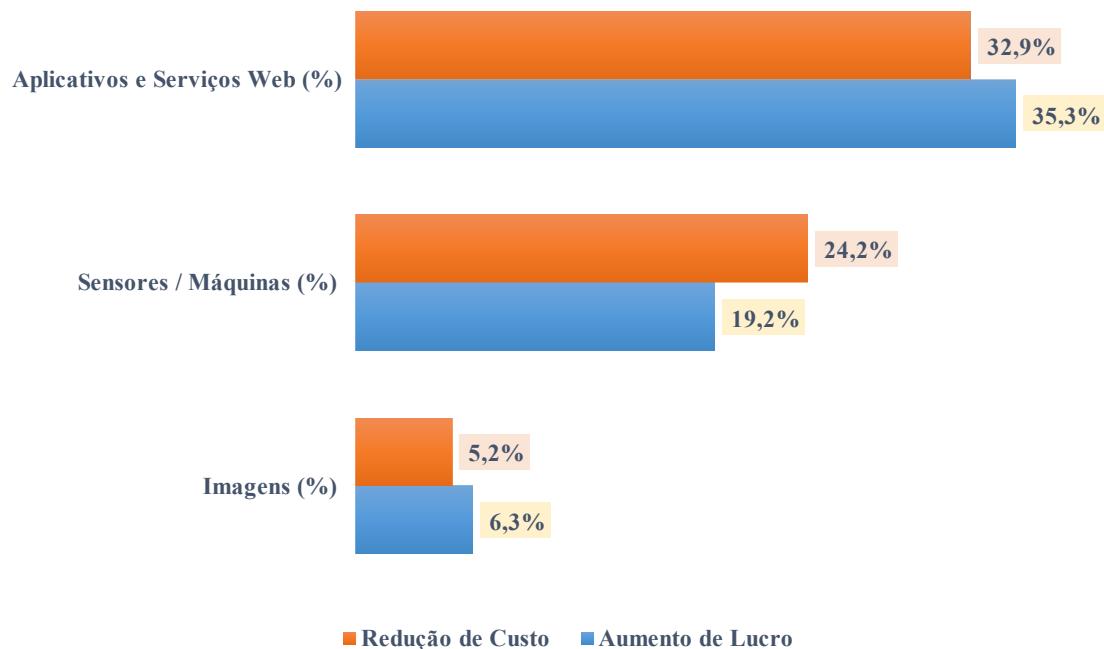
Enquanto os projetos-piloto da ABDI demonstram o potencial quantitativo da tecnologia em ambientes controlados, é fundamental validar se esses ganhos se refletem na percepção mais ampla dos produtores no dia a dia. Para isso, analisamos a seguir os dados da pesquisa Embrapa/Sebrae (Bolfe et al., 2020) — já explorado no capítulo anterior no que tange aos desafios e expectativas—, na qual as categorias de tecnologia são percebidas como mais impactantes para a economia e a operação da fazenda.

Uma análise da percepção sobre as vantagens econômicas (Gráfico 17) revela a predominância dos aplicativos e serviços web⁶, indicados como a categoria principal tanto para o aumento do lucro (35,3%) quanto para a redução de custos (32,9%). Do ponto de vista econômico, esse resultado é consistente, pois essas ferramentas de baixo custo de entrada impactam diretamente a gestão do negócio, otimizando decisões de compra e venda e melhorando o planejamento financeiro. Em um segundo plano, sensores e máquinas⁷ destacam-se pela capacidade de redução de custos (24,2%) , um reflexo direto da eficiência operacional e da redução do desperdício de insumos que a agricultura de precisão proporciona (Bolfe et al., 2020).

⁶ Compreende a camada de software e gestão do Agro 4.0, englobando aplicativos de celular e programas de computador para gestão da propriedade, planejamento de atividades, comunicação e plataformas de transporte. Suas aplicações visam otimizar a eficiência administrativa e estratégica do negócio agrícola. No Agro 4.0, atua como uma interface central que integra os dados gerados por imagens e sensores, transformando-os em informações açãoáveis para a tomada de decisão do produtor (Bolfe et al., 2020).

⁷ Esta categoria engloba o hardware de campo do Agro 4.0, incluindo sensores instalados no solo, na planta ou em animais, além de máquinas e equipamentos com eletrônica embarcada (ex: piloto automático, telemetria, aplicação à taxa variável) e sistemas robotizados. Suas aplicações são focadas na automação de operações e na agricultura de precisão, otimizando o uso de insumos e o monitoramento em tempo real. No ecossistema do Agro 4.0, representam os componentes que coletam dados primários e executam as decisões de manejo com precisão no campo (Bolfe et al., 2020).

Gráfico 17 - Vantagens econômicas (aumento de lucro e redução de custo) associadas à principal tecnologia digital, segundo a percepção dos produtores no período de 2020

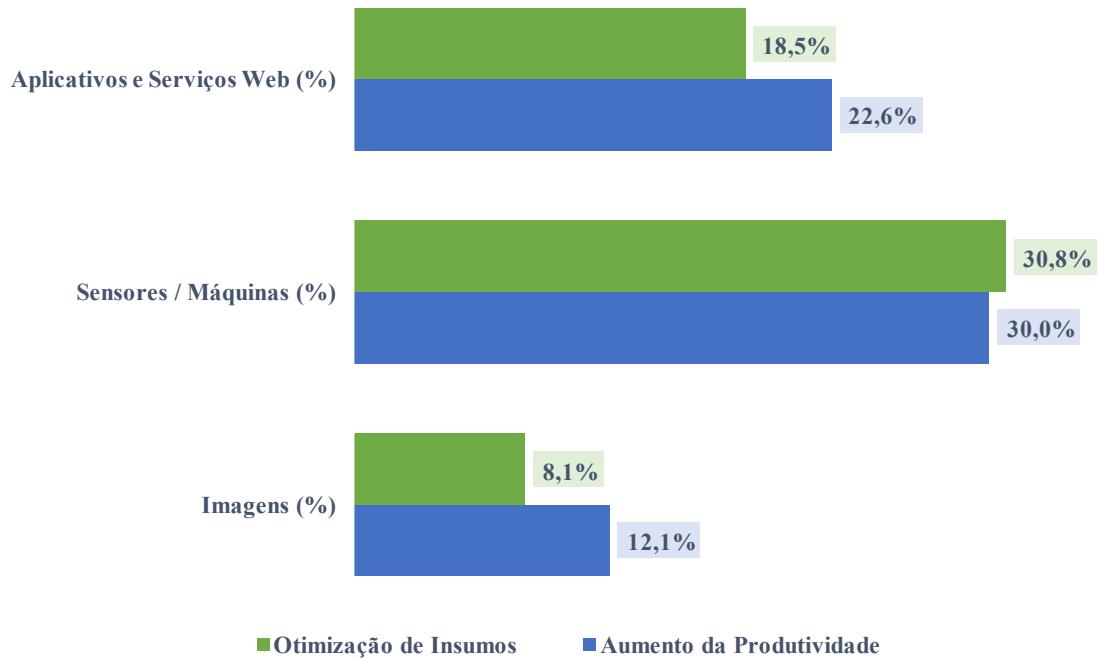


Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020)

No que tange sob efeito na eficiência da produção (**Gráfico 18**) fica evidente o protagonismo da categoria de sensores e máquinas. Estes são percebidos pelos produtores como os principais responsáveis tanto pelo aumento da produtividade (30%) quanto pela otimização de insumos (30,8%). Isso se justifica pois são as tecnologias que executam a agricultura de precisão no campo, viabilizando a lógica de "produzir mais com menos" através da aplicação localizada de recursos e da redução de desperdícios. Essa percepção larga em escala valida os resultados de alto efeito vistos nos projetos-piloto da ABDI, como a pulverização e a irrigação inteligente, que são intensivos no uso desses equipamentos. Já a percepção de efeito direto mais baixa das imagens⁸ (12,1% e 8,1%, respectivamente) é consistente com seu papel de diagnóstico: elas fornecem o "mapa" que aponta um problema, mas o ganho econômico final é creditado à máquina que realiza a ação corretiva com precisão (Bolfe et al., 2020).

⁸ Essa categoria consulta as tecnologias de sensoriamento remoto obtidas por satélites, drones/VANTs ou aviões, que utilizam diversos tipos de sensores para capturar dados visuais do trabalho. Suas principais aplicações incluem o monitoramento de áreas, o mapeamento da variabilidade espacial e a detecção de anomalias como estresse hídrico, estratégico e doenças. No contexto do Agro 4.0, as imagens funcionam como uma ferramenta de diagnóstico em larga escala, fornece uma visão detalhada que alimenta os sistemas de tomada de decisão.

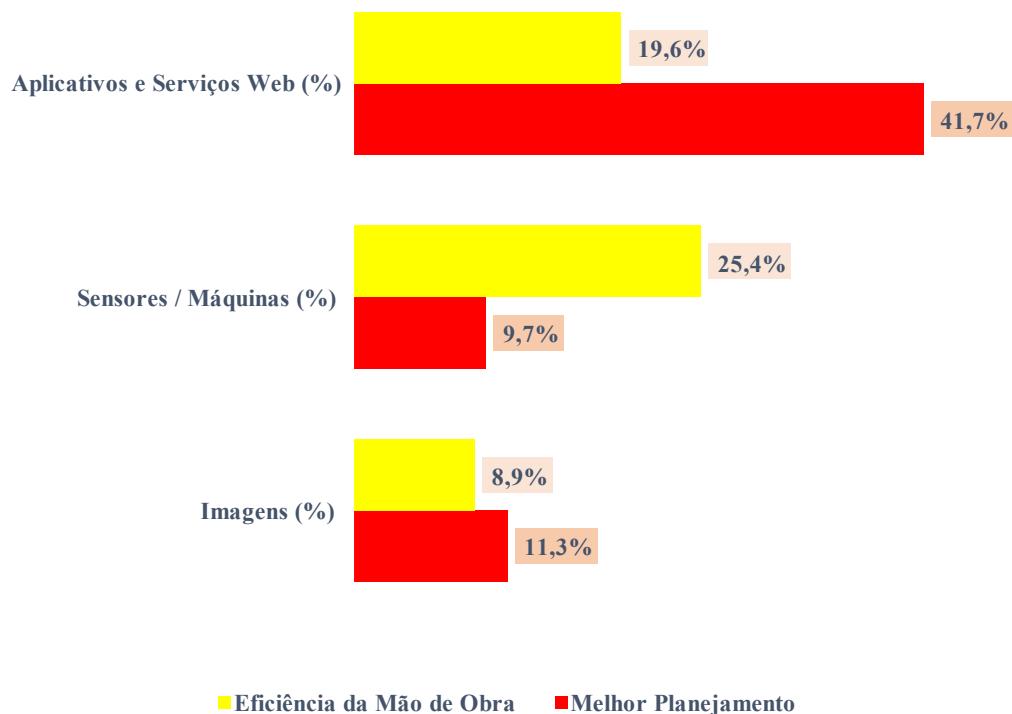
Gráfico 18 - Análise comparativa da percepção de efeito (%) das categorias tecnológicas sobre o aumento da produtividade e a otimização de insumos no período de 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020)

Para tanto já a análise do efeito na gestão (**Gráfico 19**) evidencia a hegemonia dos aplicativos e serviços web como a principal ferramenta para o melhor planejamento das atividades (41,7%). Este dado reforça o papel dessas tecnologias como o centro de gestão da propriedade, otimizando a alocação de recursos e o tempo de forma estratégica. Já no quesito eficiência da mão de obra , a percepção se divide: sensores e náquinas (25,4%) são valorizados por automatizar tarefas e reduzir o esforço físico, enquanto os aplicativos e serviços web (19,6%) são valorizados ao otimizar a comunicação e a organização das equipes no campo (Bolfe et al., 2020).

Gráfico 19 - Análise comparativa da percepção de efeito (%) das categorias tecnológicas sobre o melhor planejamento e a eficiência da mão de obra no período de 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020)

Em suma, a análise cruzada dos projetos-piloto da ABDI com a percepção em larga escala da pesquisa Embrapa/Sebrae oferece um paronama completo (Bolfe et al., 2020; ABDI, 2020). Os casos da ABDI demonstram o potencial das tecnologias de precisão, com ganhos quantitativos expressivos em produtividade e sustentabilidade no manejo da mão de obra. Por outro lado, a pesquisa da Embrapa/Sebrae com os produtores valida esses benefícios e revela que, na prática atual, o maior efeito econômico é percebido através de ferramentas de gestão e planejamento, como aplicativos e serviços web. Fica evidente que a importância do Agro 4.0 reside em sua dupla capacidade: revolucionar tanto a eficiência operacional no campo quanto a inteligência estratégica do negócio agrícola.

Confirmado a inovação como força motriz que remodela processos produtivos e estruturas organizacionais, impulsionando o desenvolvimento econômico setorial (Schumpeter, 1988; Possas, 1989).

3.2 Barreiras à escalabilidade: os desafios observados nos projetos-piloto da ABDI

Conforme detalhado na análise de percepção do capítulo anterior, a difusão do Agro 4.0 enfrentou barreiras estruturais significativas em larga escala. O que a análise dos projetos-piloto da ABDI demonstra de forma clara é que esses mesmos desafios — custo de investimento, a precariedade da conectividade e a carência de capital humano — persistem e se tornam ainda mais evidentes na prática. Longe de serem um obstáculo apenas para a adoção em massa, esses gargalos se manifestaram como entraves críticos mesmo em um ambiente de crescimento, provando que são o principal fator que separa de fato o potencial da tecnologia de sua replicação em larga escala.

Os resultados dos projetos piloto, não foram isentos de dificuldades. As questões práticas da implementação explorou gargalos técnicos e econômicos observados durante a execução dos projetos ocorridos em três dimensões: a infraestrutura de conectividade — na qual a maior parte dos pilotos depende de redes celulares (2G/3G/4G), de banda limitada, ou de soluções via satélite, de elevado custo — os recursos financeiros, frequentemente apontados pelos produtores como barreira à aquisição de módulos de IoT e sistemas robóticos, que demandam investimentos significativos; e a capacitação técnica, já que operadores relataram necessidade de treinamento adicional para operar sensores avançados e interpretar dados de inteligência artificial (ABDI, 2020) (**Quadro 5**).

Quadro 5 - Principais gargalos na adoção das tecnologias 4.0 e seus efeitos nos projetos-pilotos do programa Agro 4.0

Gargalo identificado	Descrição resumida	Efeitos nos projetos	Exemplo de case afetado
Falta de infraestrutura de conectividade	Cobertura de rede móvel limitada (2G/3G/4G), banda restrita em rádio e satélite de alto custo, inviabilizando soluções que dependem de comunicação constante.	Dificulta operação de sensores IoT e sensoriamento remoto em tempo real; atrasa coleta de dados e compromete ajustes automáticos.	Irrigação Inteligente (BA): utilização de comunicação via rádio-frequência para transmissão de dados de umidade do solo, com limitações de banda.
Limitações financeiras dos produtores	Elevado custo inicial percebido; dificuldade de acesso a linhas de crédito ou financiamentos específicos para tecnologias 4.0.	Adoção parcial ou escalonada; projetos em pequenas propriedades foram postergados ou executados em escala reduzida.	Automação de plantio de cana-de-açúcar (MG): reportou economia média de R\$ 287,19 por hectare, evidenciando necessidade de investimentos iniciais.
Dificuldade na mensuração do retorno (ROI)	Falta de métricas claras e de modelos de custo-benefício que demonstrem prazos e magnitudes de retorno financeiro.	Produtores hesitaram em avançar da fase piloto para a escala; atrasos na decisão de continuidade mesmo após resultados positivos.	Pulverização Inteligente (GO): registrou redução de 70 % no uso de herbicidas, mas sem modelo padronizado de payback.
Capacitação técnica insuficiente	Operadores e colaboradores sem treinamento adequado para operar e interpretar sistemas digitais complexos (IoT, IA, análises em nuvem).	Subutilização das ferramentas instaladas; falhas na calibração de sensores e no uso de dashboards analíticos.	Avicultura Inteligente (PR): empregou modelos de IA para predição de mortalidade com 92 % de assertividade, exigindo interpretação de dados.

Fonte: ABDI (2020)

Sendo assim conforme exposto na tabela acima, esses gargalos não atuam de forma isolada, mas frequentemente se combinam, criando ciclos de limitação que comprometem a adoção plena das tecnologias 4.0 no agronegócio. Em muitos projetos, a falta de conectividade, agravada pela escassez de recursos financeiros, impediu que propriedades localizadas em regiões remotas evoluíssem da fase piloto para a escala, uma vez que a ausência de dados em tempo real dificulta decisões estratégicas e investimentos adicionais (ABDI, 2020). Do mesmo modo, a coexistência de lacunas na capacitação técnica e resistência cultural retardou a incorporação de ferramentas de gestão digital, mesmo quando as soluções tecnológicas já estavam disponíveis. Além disso, a dificuldade em mensurar o retorno sobre o investimento, somada à complexidade das soluções, intensificou a hesitação dos produtores, especialmente as fazendas de menor porte, em ampliar ou replicar as iniciativas. Ademais, é válido destacar que os gargalos de infraestrutura e financeiros são particularmente críticos para produtores de pequeno porte, enquanto os desafios relacionados à qualificação da mão de obra e à resistência a mudanças culturais se manifestaram em propriedades de todos os tamanhos.

Na seção seguinte, discutiremos o nível de grau de importância das tecnologias da Agricultura 4.0 na sustentabilidade.

3.3 Sustentabilidade e Meio Ambiente: A importância das tecnologias Agro 4.0 no campo

A relação entre desenvolvimento agrícola e sustentabilidade no Brasil é marcada por um paradoxo histórico: a necessidade de expandir a produção para atender à crescente demanda global, sem, contudo, perpetuar o modelo de degradação ambiental associado às práticas tradicionais (Mueller, 2004; IPEA, 2012). Nesse contexto, o Agro 4.0 surge como uma solução teórica e prática, pois a incorporação de tecnologias como inteligência artificial e Internet das Coisas (IoT) permite mitigar os efeitos da escala produtiva. Essa abordagem corrobora a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets, que sugere ser possível dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental por meio de inovações que elevam a

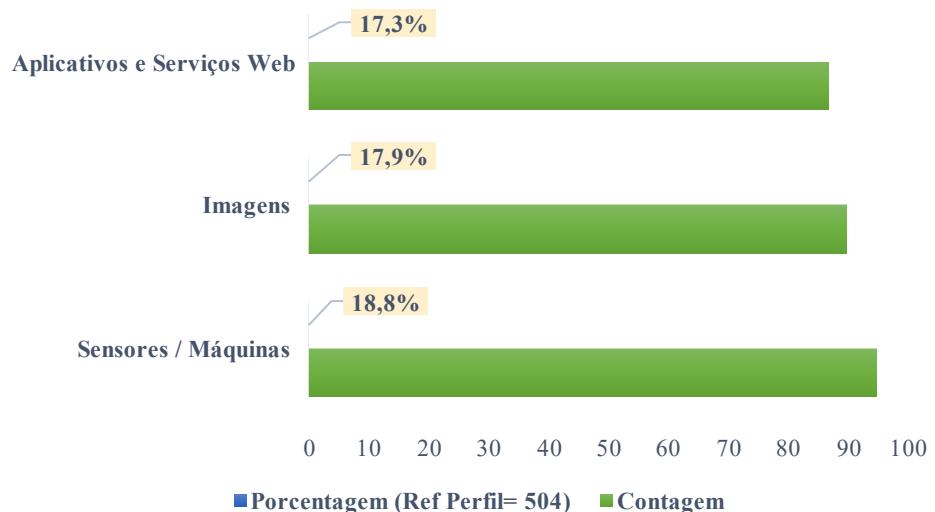
eficiência no uso de recursos, desde que políticas adequadas incentivem essa transição (Mueller, 2004).

Na prática, os projetos-piloto do Programa Agro 4.0, coordenado pela ABDI, demonstram ganhos de sustentabilidade tangíveis. A iniciativa de Pulverização Inteligente, por exemplo, emprega sensores acoplados aos pulverizadores para detectar plantas vivas e aplicar defensivos apenas sobre elas, alcançando resultados expressivos como a redução de 70% no uso de herbicidas em geral, 30% em inseticidas na cultura do milho e 20% em desfolhantes na soja. Em paralelo, o projeto de Irrigação Inteligente demonstrou 30% de economia de água e energia (ABDI, 2020). Tais resultados são avaliados por métricas de sustentabilidade, como as da metodologia Ambitec-TICs da Embrapa, que valorizam a conservação de recursos hídricos e a eficiência energética (Pinto et al., 2020; Dias et al., 2023). Essa otimização de recursos além de reduzir os custos operacionais também fortalece a competitividade do setor em mercados que valorizam a sustentabilidade, transformando-a em um ativo econômico (Buainain; Cavalcante; Consoline, 2021).

Adicionalmente, os projetos demonstram que a sustentabilidade no Agro 4.0 se manifesta em diferentes frentes. A substituição de insumos é exemplificada pelo projeto de Monitoramento de Bioinsumos, que viabilizou uma redução de 50% no uso de inseticidas químicos. Já a eficiência de recursos é comprovada pela Irrigação Inteligente, que, baseada em sensores, alcançou uma economia de até 30% em água e energia, ilustrando os múltiplos caminhos da tecnologia para uma produção mais resiliente (ABDI, 2020).

Consolidando a sustentabilidade como um pilar estratégico para o campo brasileiro, na pesquisa da Embrapa/Sebrae, as categorias “Sensores/Máquinas” (18,8%) e “Imagens” (17,9%) (Gráfico 20) foram as mais avaliadas pelos produtores como responsáveis pela redução do efeito ambiental. Isso valida diretamente os resultados de casos como a “Pulverização Inteligente” e a “Irrigação Inteligente”, que são intensivos no uso exatamente dessas tecnologias, demonstrando que o potencial de sustentabilidade distribuído nos pilotos é uma vantagem reconhecida e valorizada pelo campo.

Gráfico 20 - Análise comparativa da percepção de efeito (%) das categorias tecnológicas sobre a redução do efeito ambiental no período de 2020



Fonte: Adaptado de: Bolfe et al. (2020)

Fica evidente, portanto, que as tecnologias do Agro 4.0 oferecem uma resposta direta ao paradoxo histórico da agricultura. Ao viabilizarem uma gestão baseada em dados, permitem a intensificação da produção de forma mais precisa, econômica e com menor efeito ambiental, consolidando a sustentabilidade como um pilar estratégico para o campo brasileiro.

4 CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou a importância estratégica da Agricultura 4.0 para o agronegócio brasileiro. Ao integrar IoT, big data, inteligência artificial e outras tecnologias digitais, o Agro 4.0 emerge como mecanismo indispensável para elevar a produtividade e promover práticas mais sustentáveis, alinhando-se às demandas globais por segurança alimentar e preservação ambiental. A análise foi construída em duas frentes complementares: foram cruzadas os resultados quantitativos de 14 projetos-piloto do Programa Agro 4.0 (ABDI) com a percepção em larga escala de 504 produtores rurais, conforme pesquisa da Embrapa/Sebrae. Essa abordagem permitiu identificar os ganhos potenciais e compreender as barreiras estruturais que limitam sua adoção plena.

O objetivo geral de analisar o cenário das adoções das novas tecnologias da Agricultura 4.0 foi eficaz, a pesquisa da Embrapa/Sebrae revelou uma realidade atual do campo, onde a ampliação se concentra em ferramentas de gestão e os principais entraves são o alto custo de investimento (citado por 67,1% dos produtores) e as falhas de conectividade (47,8%). A pesquisa validou, portanto, a tese central: existe uma lacuna significativa entre o potencial da tecnologia e sua aplicação em massa, causada por barreiras estruturais. Já os objetivos específicos de analisar a influência das tecnologias na produtividade e sustentabilidade foi plenamente atendido. Por um lado, os projetos-piloto da ABDI comprovaram o potencial tecnológico, com ganhos expressivos como a redução de até 70% no uso de herbicidas e por um aumento médio de 10% a 30% na produtividade.

Diante deste diagnóstico, a superação dos desafios para democratizar os avanços do Agro 4.0 torna-se imperativa, exigindo a articulação de políticas públicas focadas na expansão da conectividade rural, na criação de linhas de crédito específicas para pequenas e médias propriedades, e no desenvolvimento de programas continuados de capacitação técnica.

Para futuras pesquisas, sugere-se aprofundar esta análise com o desenvolvimento de um modelo econômico que quantifique o impacto de cada tecnologia na produtividade e no retorno sobre o investimento, utilizando um painel de dados para estimar a lucratividade incremental e explorar heterogeneidades regionais com técnicas de *machine learning*.

Em síntese, este trabalho reafirmou que o Agro 4.0 é uma condição essencial para a competitividade e sustentabilidade do agronegócio brasileiro. Embora tenha exposto

limitações — como a amostra restrita aos 14 projetos-piloto e a dependência de dados secundários —, a pesquisa ofereceu um diagnóstico sólido dos ganhos tangíveis e das barreiras a serem superadas.

Logo a massificação das tecnologias do Agro 4.0 representa uma via estratégica para o fortalecimento da economia brasileira. O agronegócio de larga escala já demonstra avanços significativos na adoção dessas inovações, o que se traduz em ganhos de produtividade que impulsionam a capacidade de exportação do país. Esse movimento é fundamental, pois contribui diretamente para um maior superávit na balança comercial e para a consolidação do Produto Interno Bruto (PIB), do qual o setor representa uma parcela expressiva. Contudo, para que a transformação digital seja completa e sustentável, é imperativo que as políticas públicas olhem também para o outro pilar da produção nacional.

Nesse sentido, o investimento financeiro direto na agricultura familiar e nos pequenos produtores é um ponto crucial. Responsáveis por abastecer grande parte do mercado interno, esses produtores, com o devido apoio, podem superar o uso de ferramentas digitais apenas para fins administrativos e incorporar tecnologias avançadas diretamente na cadeia produtiva. Tal avanço resultaria em um aumento expressivo de eficiência e produtividade, com o potencial de reduzir os custos dos alimentos para o consumidor final e, consequentemente, ampliar o poder de compra da população. Espera-se, portanto, que este estudo contribua para a formulação de políticas públicas que reconheçam essa dupla oportunidade, garantindo que nenhum produtor fique à margem desta revolução digital.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Resultados e Análises dos Projetos-Piloto do Programa Agro 4.0.** Brasília, DF: ABDI, 2020.

BOLFE, E. L.; JORGE, L. A. C.; SANCHES, I.; COSTA, C. C. DA; LUCHIARI JR., A.; VICTÓRIA, D.; INAMASU, R.; GREGO, C.; FERREIRA, V.; RAMIREZ, A. **Agricultura digital no Brasil: tendências, desafios e oportunidades:** resultados de pesquisa online. Campinas: Embrapa, 2020.

BOLFE, E.; MASSRUHÁ, S. A transformação digital e a sustentabilidade agrícola. **Agroanalysis**, mar. 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Potencialidades e desafios do Agro 4.0:** GT III “Cadeias Produtivas e Desenvolvimento de Fornecedores” Câmara do Agro 4.0 (MAPA/MCTI). Brasília: MAPA/ACES, 2021.

BRESSER-PEREIRA, Luiz Carlos; GALA, Paulo. Macroeconomia estruturalista do desenvolvimento. **Revista de Economia Política**, v. 30, n. 4, p. 663-686, out./dez. 2010.

BUAINAIN, A. M.; CAVALCANTE, P.; CONSOLINE, L. **Estado atual da agricultura digital no Brasil:** inclusão dos agricultores familiares e pequenos produtores rurais. Santiago: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), 2021. (Documentos de Projetos, LC/TS.2021/61).

DELGADO, G. C. A questão agrária no Brasil, 1950-2003. In: RAMOS FILHO, L. O.; ALY JÚNIOR, O. (Org.). **Questão Agrária no Brasil:** perspectiva histórica e configuração atual. São Paulo: INCRA, 2005. p. 49-62.

DIAS, E. M.; DOURADO NETO, D.; SCOTON, M. L. R. P. D.; OLIVEIRA, D. H. de; SANTOS, I. M. G. L. dos; MENEZES, J. H. V. (org.). **Agro 4.0:** fundamentos, realidades e perspectivas para o Brasil. Rio de Janeiro: Autografia, 2023.

EMBRAPA. **Câmara Agro 4.0 define plano de ações prioritárias.** 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/63320612/camara-agro-40-define-plano-de-acoes-prioritarias>. Acesso em: 06 fev. 2025.

EMBRAPA. **Trajetória da agricultura brasileira.** 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>. Acesso em: 29 jan. 2025.

FURTADO, J.; PINHEIRO, H.; URIAS, E.; MUÑOZ, D. **Indústria 4.0: a quarta revolução industrial e os desafios para a indústria e para o desenvolvimento brasileiro.** São Paulo: Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial (IEDI), 2017.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Desenvolvimento sustentável, economia verde e a Rio+20:** relatório de pesquisa. Brasília, DF: IPEA, 2012.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Projeções do Agronegócio — Brasil 2020/21 a 2030/31.** Brasília, DF: MAPA, 2021.

MASSRUHÁ, S. M. F. S. **Agricultura Digital (Agro 4.0):** da biotecnologia ao Big Data, à agricultura sustentável e inteligente. 2019.

MASSRUHÁ, S. M. F. S. et al. **Agricultura digital:** pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; EVANGELISTA, S. R. M. A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S. et al. (Ed.). **Agricultura digital:** pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. Cap. 1, p. 20–45.

MUELLER, C. C. **Os economistas e as inter-relações entre o sistema econômico e o meio-ambiente.** Brasília, DF: Departamento de Economia, UnB, 2004.

- PINTO, D. M. et al. **Ambitec-TICs**: Avaliação de impactos de tecnologias de informação e comunicação aplicadas à agropecuária. Campinas: Embrapa Territorial, 2020.
- POSSAS, M. L. **Em direção a um paradigma microdinâmico**: a abordagem neoschumpeteriana. Campinas: Instituto de Economia, UNICAMP, 1989.
- QUEIROZ, D. M. de; COELHO, A. L. de F.; VALENTE, D. S. M.; SCHUELLER, J. K. Sensors applied to Digital Agriculture: A review. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 51, n. 5 (Special), e20207751, 2020.
- SCHUMPETER, J. A. **A teoria do desenvolvimento econômico**: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico. Tradução de Maria Sílvia Possas. São Paulo: Nova Cultural, 1988.
- SILVA, B. H. de O.; SANTOS, B. S. dos. Agricultura digital: desafio da conectividade no campo para o desenvolvimento da agricultura familiar. **Revista Mirante**, Anápolis, v. 17, n. 2, p. 140-163, jun. 2024.
- SOUZA FILHO, H. M. de; BUAINAIN, A. M.; SILVEIRA, J. M. F. J. da; VINHOLIS, M. de M. Condicionantes da adoção de inovações tecnológicas na agricultura. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 28, n. 1, p. 223-255, jan./abr. 2011.
- SOUZA, M. P. R. de; BIDARRA, Z. S. Política pública de apoio à agricultura digital. **Revista de Política Agrícola**, ano XXXI, n. 2, p. 18-32, abr./maio/jun. 2022.
- SOUZA, P. M. de; FORNAZIER, A.; SOUZA, H. M. de; PONCIANO, N. J. Diferenças regionais de tecnologia na agricultura familiar no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 57, n. 4, p. 594-617, 2019.
- TIGRE, P. B. Inovação e teorias da firma em três paradigmas. **Revista de Economia Contemporânea**, Rio de Janeiro, n. 3, p. 67-95, jan./jun. 1998.
- TOCANTINS. Secretaria do Planejamento e Orçamento. **Série Histórica da Safra de Grãos**. Palmas: SEPLAN/GEFINS, 2022.

ZAMBON, I.; CECCHINI, M.; EGIDI, G.; SAPORITO, M. G.; COLANTONI, A. Revolution 4.0: Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs. **Processes**, v. 7, n. 1, p. 36, 2019.

ZAPAROLLI, D. Inovação no campo. **Revista Pesquisa FAPESP**, ed. 287, jan. 2020.