

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU
INSTITUTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ECONÔMICAS**

ARTHUR HENRIQUE SILVA ZANUTO

**AGRICULTURA 4.0: DESAFIOS E IMPACTOS DAS NOVAS
TECNOLOGIAS NA AGRICULTURA BRASILEIRA**

**UBERLÂNDIA
2024**

AGRICULTURA 4.0: DESAFIOS E IMPACTOS DAS NOVAS TECNOLOGIAS NA AGRICULTURA BRASILEIRA

ARTHUR HENRIQUE SILVA ZANUTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Economia da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel no Curso de Graduação Ciências Econômicas.

Orientador: Bruno Benzaquem Perosa

**UBERLÂNDIA
2024**

AGRICULTURA 4.0: DESAFIOS E IMPACTOS DAS NOVAS TECNOLOGIAS NA AGRICULTURA BRASILEIRA

ARTHUR HENRIQUE SILVA ZANUTO

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Instituto de Economia da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel no Curso de Graduação Ciências Econômicas.

Orientador: Bruno Benzaquem Perosa

BANCA EXAMINADORA:

Uberlândia, 14 de novembro de 2024.

Prof. Dr. Bruno Benzaquem Perosa

Prof. Dr. Clesio Marcelino de Jesus

Prof. Dr. Marcelo Sartorio Loural

**UBERLÂNDIA
2024**

RESUMO

No mundo globalizado, os avanços tecnológicos são cada vez mais surpreendentes e têm alcançado todas as atividades humanas, gerando benefícios para a indústria, agricultura, educação, saúde, entre outros. No caso específico da agricultura, o uso de tecnologias mais modernas, desde meados da década de 1960, fez com que o Brasil se destacasse na produção e exportação de várias culturas. Portanto, o objetivo da presente pesquisa foi realizar uma análise sobre a Agricultura 4.0, com foco nos impactos e desafios na agricultura brasileira. Nesse contexto, a Agricultura 4.0 é a última palavra em termos de inovações tecnológicas no setor da agricultura, pois combina o uso de diversas ferramentas, buscando um melhor aproveitamento da produtividade agrícola, reduzindo custos operacionais e trazendo benefícios relacionados à sustentabilidade. Porém a despeito de suas vantagens, apresenta alguns desafios a serem superados e o principal deles está relacionado aos investimentos necessários para a incorporação das inovações tecnológicas, bem como o uso adequado delas. O procedimento metodológico utilizado foi a abordagem qualitativa, através de pesquisa bibliográfica em revistas eletrônicas e bancos de dados das Universidades. Concluiu-se que o Brasil, para manter e melhorar a sua posição na exportação de culturas, deve continuar e aprimorar o uso das inovações tecnológicas presentes na Agricultura 4.0 e que, para uma maior efetividade dos seus resultados, é necessária a adoção de políticas públicas para que todos os produtores possam ter acesso às benesses da Agricultura 4.0.

Palavras-chave: Modernização da agricultura. Agricultura 4.0. Produtividade. Competitividade.

ABSTRACT

In a globalized world, technological advancements are increasingly astonishing and have reached all human activities, generating benefits for industry, agriculture, education, healthcare, among others. Specifically in agriculture, the use of more modern technologies since the mid-1960s has made Brazil stand out in the production and export of various crops. Therefore, the aim of this research was to analyze Agriculture 4.0, focusing on its impacts and challenges in Brazilian agriculture. In this context, Agriculture 4.0 represents the latest in technological innovations in the agricultural sector, as it combines the use of various tools, seeking to improve agricultural productivity, reduce operational costs, and provide sustainability-related benefits. However, despite its advantages, it presents some challenges that need to be overcome, the main one being the investments required to incorporate technological innovations and their proper use. The methodological approach used was qualitative, through bibliographic research in electronic journals and university databases. The conclusion is that, for Brazil to maintain and improve its position in crop exports, it must continue and enhance the use of technological innovations present in Agriculture 4.0. Moreover, for greater effectiveness of these results, public policies must be adopted to ensure that all producers have access to the benefits of Agriculture 4.0.

Keywords: Agricultural modernization. Agriculture 4.0. Productivity. Competitiveness.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CNA - Confederação Nacional da Agropecuária

CAP - Confederação da Agricultura e Pecuária

GPS - Sistema de Posicionamento Global

HA - Hectares

IA – Inteligência Artificial

IoT – Internet of Things

P&D – Pesquisa e desenvolvimento

PIB - Produto Interno Bruto

POLOCENTRO - Programa de Desenvolvimento dos Cerrados

PRODECER - Programa de Cooperação Nipo-Brasileira para o Desenvolvimento dos Cerrados

T - Toneladas

TIC - Tecnologia de Informação e Comunicação

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E TABELAS

Quadro 1: Revoluções industriais: contexto histórico.....	17
Quadro 2: Princípios da Indústria 4.0.....	19
Quadro 3: Desafios na Indústria 4.0.....	22
Quadro 4: Revoluções Tecnológicas na Agricultura.....	23
Quadro 5: Clusters tecnológicos da Agricultura 4.0.....	25
Figura 1: Histórico das revoluções industriais.....	18
Figura 2: Pilares da Indústria 4.0.....	20
Gráfico 1: Políticas de Apoio na Agricultura (2011-2021).....	27
Tabela 1: Projeções para agricultura brasileira.....	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. A EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA NA AGRICULTURA.....	11
2.1 Papel das inovações	11
2.2 Processo inovativo na agricultura brasileira.....	13
3. INDÚSTRIA 4.0: EVOLUÇÃO E DESAFIOS.....	16
3.1 Definição e história do termo	16
3.2 Princípios e tecnologia 4.0	19
3.3 Desafios a serem enfrentados.....	21
4. TECNOLOGIA 4.0 NA AGRICULTURA BRASILEIRA	22
4.1 Agricultura 4.0: conceito e benefícios para a agricultura.....	22
4.2 Principais clusters tecnológicos implementados	24
4.3 Investimentos na Agricultura 4.0	26
5. OS IMPACTOS DAS NOVAS TECNOLOGIAS DA AGRICULTURA 4.0	29
5.1 Análise da produtividade das principais culturas	29
5.2 Impactos das novas tecnologias na sustentabilidade e meio ambiente	33
6. CONCLUSÃO.....	36

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o agronegócio desempenha um papel fundamental na economia, pois além de gerar empregos e renda, contribui para o crescimento econômico do país. Segundo dados da Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (Embrapa, 2021), o setor é responsável por um quinto de todos os empregos, 21% da soma de todas as riquezas produzidas no país, 43,2% das exportações brasileiras. Mesmo em épocas de crise econômica, é um dos poucos setores apresenta crescimento positivo ao longo dos anos.

Um dos fatores que explicam essa dinâmica da agricultura empresarial no Brasil guarda relação com a inovação tecnológica. A tecnologia tem sido crucial para a ampliação da capacidade produtiva, da diversificação e da melhoria dos produtos e, conseqüentemente, da competitividade dos produtos agrícolas no mercado doméstico e internacional (Silveira et al., 2005).

Historicamente, a incorporação da tecnologia na agricultura brasileira começou a ser alavancada nos primórdios do século XX, com a chamada Agricultura 1.0 que propiciou o surgimento das primeiras máquinas para o auxílio da adubação, plantio e colheita, substituindo, assim, de forma gradativa a utilização da tração animal nas principais atividades agrícolas.

Em meados do século XX, observou-se o advento da denominada Agricultura 2.0, caracterizada pelo uso intensivo de novas tecnologias lastradas na correção da adubação do solo, otimização do uso de fertilizantes e a substituição da tração animal por máquinas e equipamentos que deram uma nova dinâmica para a agricultura brasileira (Esperidião et al., 2019).

Mais adiante, a partir do final da década de 1960, com todas essas inovações tecnológicas em curso, o Brasil se inseriu na Revolução Verde, processo que colaborou para o desenvolvimento e a consolidação de uma verdadeira revolução na agricultura brasileira. Durante esse período, surgiram diversas novas tecnologias e foram difundidas outras técnicas já utilizadas, tendo destaque a manipulação genética de plantas, a mecanização agrícola e o desenvolvimento de técnicas e equipamentos voltados para irrigação (Silva, 2002).

Continuando esse histórico sobre o uso de tecnologia na agricultura brasileira, verifica-se que a evolução das máquinas e o desenvolvimento *Global Positioning System* (GPS), combinado com a agricultura de precisão, deu início à Agricultura 3.0, processo que marcou a década de 1990 a 2010. A partir de 2010 até os dias de hoje, começou a se estabelecer um novo estágio tecnológico na agricultura brasileira, conhecido como Agricultura 4.0, cuja principal

característica é o desenvolvimento integrado de sistemas agrícolas, buscando otimizar a produção e gerenciar de forma mais efetiva os processos, além de monitorar toda a lavoura.

A literatura mostra que todos esses avanços tecnológicos têm beneficiado os produtores rurais, aumentando a produtividade, melhorando a eficiência e gerando informações mais precisas que auxiliam o produtor na tomada de decisões, na redução dos desperdícios e no aumento da competitividade (Espiridião et al., 2019; Santos, et al., 2022).

Apesar da agricultura brasileira estar vivenciando um novo momento em razão dos avanços tecnológicos trazidos pela Agricultura 4.0, ainda existem diversos desafios a serem enfrentados. Entre eles, destaca-se a precariedade de políticas públicas que incentivem e assegurem a adoção dessas novas tecnologias pelos produtores rurais, além da falta de financiamento adequado para os investimentos necessários.

O objetivo geral deste estudo é fazer uma análise sobre os impactos e desafios inerentes à Agricultura 4.0, com ênfase nos ganhos em produtividade, sustentabilidade, competitividade, além de abordar os desafios e obstáculos na incorporação dessas tecnologias.

Para alcançar o objetivo proposto, buscou-se investigar na literatura especializada os principais *clusters* tecnológicos relacionados à Agricultura 4.0 e suas implicações em termos de inovações tecnológicas e desafios para a agricultura brasileira.

A escolha do tema se justifica por sua relevância social e científica. A agricultura brasileira tem sido referência de modernização e competitividade no comércio internacional. Para manter a sua competitividade e destaque internacional, é necessário incorporar continuamente os novos os avanços tecnológicos que surgem no setor.

Quanto a metodologia adotada na elaboração deste estudo, foram utilizados métodos qualitativos, com base em pesquisas bibliográficas e exploratória relacionadas à temática proposta. Paralelamente, utilizou-se o método de abordagem indutiva, no qual são apresentados dados e fatos sobre a Agricultura 4.0. Quanto ao método do procedimento, adotou-se o monográfico, que consistiu em um estudo mais aprofundado na implementação da agricultura 4.0 na agricultura brasileira. Por fim, o método de análise utilizado foi a interpretação de dados em gráficos e tabelas, que buscam demonstrar a evolução da agricultura brasileira com a introdução das novas tecnologias associadas à Agricultura 4.0, além de discutir estudos de casos bem-sucedidos nessas implementações.

O trabalho foi estruturado em quatro capítulos, além da introdução e das considerações finais. O primeiro capítulo faz uma abordagem sobre o papel da inovação tecnológica, com foco nos impactos para a agricultura, utilizando os ensinamentos de Schumpeter (1988), cujos

conceitos e teorias forneceram as bases para a compreensão do papel da tecnologia no desenvolvimento econômico. O segundo capítulo busca explicar o que é a Agricultura 4.0, os principais termos associados a esse modelo, assim como seus princípios e desafios. O terceiro capítulo discute a Indústria 4.0 na agricultura brasileira, com ênfase nos investimentos e *clusters* tecnológicos implementados. Por fim, o quarto capítulo faz uma abordagem sobre os impactos da Agricultura 4.0 no que tange a produtividade, sustentabilidade e competitividade.

2. A EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA NA AGRICULTURA

2.1 Papel das inovações

A inovação sempre despertou o interesse dos pesquisadores em razão de seus efeitos no crescimento econômico das nações. Historicamente, esse processo começou a ganhar maior visibilidade com a Revolução Industrial no século XVIII, na Inglaterra. Desde então, a humanidade tem vivenciado inovações constantes, de maneira distintas, alicerçadas no advento de novos produtos, o que é uma das características da sociedade contemporânea.

O tema inovação, nas ciências econômicas, passou a ser discutido com maior intensidade a partir do início do século XX. No modelo capitalista de produção, observa-se que a inovação tem relação direta com o desenvolvimento econômico. Na teoria desenvolvida por Schumpeter, um dos economistas mais importantes da primeira metade do século XX, a inovação é, em suas palavras:

[...] uma invenção é uma ideia, esboço ou modelo para um novo ou melhorado artefato, produto, processo ou sistema. Uma inovação, no sentido econômico, somente se completa quando há uma transação comercial envolvendo uma invenção e assim gerando riqueza (Schumpeter, 1988, p.79).

Pelas considerações acima, pode-se inferir que os termos invenção e inovação apresentam uma relação entre si, já que, para que esta última se efetive, é necessária a invenção e a possibilidade de geração de riquezas.

Schumpeter (1988), foi um dos primeiros a acreditar que as inovações tecnológicas desempenham um papel importantíssimo no desenvolvimento econômico, e sua obra “A teoria do desenvolvimento econômico”, ficou marcada pelo desenvolvimento da teoria do ciclo econômico. De acordo com o seu entendimento, a economia de uma nação, do ponto de vista econômico, sai de um estado de equilíbrio para uma nova dinâmica com o surgimento de alguma inovação tecnológica. Ou seja, esse processo cria uma ruptura no sistema econômico,

alterando padrões de produção e trazendo diferentes vantagens competitivas para as organizações empresariais, o que representa um papel central no desenvolvimento econômico de um país (Silva, et al., 2018).

O processo de inovação, na visão de Schumpeter (1988), é dividida em três fases distintas: a invenção, isto é, a ideia potencialmente aberta para a exploração; a inovação, que diz respeito à exploração comercial; e a difusão, que trata da propagação de novos produtos e processos pelo mercado. Em sua obra, o autor enfatiza as grandes inovações radicais, uma vez que essas apresentam um potencial maior para promover mudanças no sistema econômico, ao passo que as “inovações incrementais são melhorias das inovações radicais” (Silva, et al., 2018, p.04).

A teoria de Schumpeter (1988) ganhou destaque nas Ciências Econômicas ao longo do século XX e início do século XXI, especialmente com o surgimento dos neoschumpeterianos, que fortaleceram suas ideias sobre a importância da inovação para o desenvolvimento econômico contemporâneo. De fato, a visão de Schumpeter (1988) é extremamente atual, considerando os impactos que as novas tecnologias, incluindo as de informação e comunicação, têm ocasionado não apenas para o processo produtivo das organizações, mas também para o modo de vida da sociedade.

Entre os autores neoschumpeterianos, é importante destacar os estudos de Freeman (1987), que cuidou de estabelecer novas categorias de inovação: incremental, radical, mudanças no sistema tecnológico e mudanças no paradigma tecno-econômico.

A inovação incremental ocorre com maior ou menor intensidade, e de forma contínua, em indústrias ou atividade de serviços, sempre com a finalidade de promover melhorias no processo de produção e atender às necessidades de consumo e expectativas dos clientes. Já a inovação radical é definida como eventos descontínuos que têm relação com atividades de pesquisa e desenvolvimento realizadas por empresas, universidades ou laboratórios, e que afetam um ou mais setores da economia, podendo, inclusive, influenciar o comportamento de uma economia. Quanto à terceira categoria de inovação, esta ocorre com mudanças no sistema tecnológico, em que se verifica uma corrida com a ciência aplicada (tecnologia), cujo objetivo é atender às necessidades de consumo de forma mais rápida e precisa, evitando que os produtos se tornem obsoletos. Por fim, a inovação no paradigma tecno-econômico, que se assemelha à terceira fase de inovação, observa a influência do que a sociedade vivencia no momento, impactando fatores como a inflação, impostos, e, enfim, na economia como um todo (Branca et al., 2022).

Além de Freeman, outros autores neoschumpeterianos buscaram, ao longo do tempo, ampliar o conceito e o sentido da inovação tecnológica. Para alguns teóricos, a inovação pode ser considerada como uma atividade complexa e com efeitos significativos para o desenvolvimento econômico, estando associada à descoberta, experimentação, desenvolvimento e adoção de novos produtos ou processos produtivos diferenciados (Dosi et al, 1990).

Na visão de Drucker (2006), criatividade e planejamento por parte dos empreendedores nem sempre são suficientes para que a inovação seja um sucesso. É preciso uma disciplina sistemática rumo à inovação, ou seja, os empresários devem ter um compromisso contínuo com a inovação, seja em instituições privadas ou públicas.

É preciso acrescentar que, para os neoschumpeterianos, a inovação tecnológica de fato resulta em mudanças profundas na economia. Inspirados na teoria de Schumpeter (1988), eles atribuem à inovação o principal papel de incentivador da atividade econômica capitalista (Possas, 1990).

Pelas considerações feitas até o presente momento, constata-se que as inovações tecnológicas são importantes para todos os setores da economia. Mas como este estudo tem como foco a agricultura, é preciso esclarecer que, neste setor, a inovação tecnológica é de suma importância para o desempenho econômico-financeiro do agronegócio, pois:

[...] além de permitir a elevação do trabalho e da produtividade total dos fatores, também estabelece elos a montante e a jusante da agricultura, que tem importante efeito – negativo ou positivo – sobre a sustentabilidade das atividades. (Souza Filho, et al., 2011, p.223)

Esse comentário é preciso, já que a história do processo de modernização da agricultura brasileira evidencia a importância das inovações para a melhoria e competitividade de todo o setor, desde meados da década de 1960 até os dias atuais. A próxima seção trata em maiores detalhes da evolução das inovações no setor agrícola e seus efeitos na economia brasileira.

2.2 Processo inovativo na agricultura brasileira

A agricultura é um dos setores da economia brasileira que, nas últimas cinco décadas, tem experimentado transformações significativas, devido ao processo de inovação tecnológica e modernização, que impactaram a produtividade e competitividade na economia doméstica e internacional.

Historicamente, esse processo teve início no governo militar (1964-1984), mais precisamente a partir de meados da década de 1960, com a introdução de inovações (uso de fertilizantes químicos, irrigação, agrotóxicos, mecanização, uso de sementes geneticamente melhoradas, dentre outros) na agricultura brasileira, sustentadas pela “Revolução Verde”, cujo papel foi promover não apenas a inovação tecnológica na produção de alimentos para a crescente população, mas também aumentar a produtividade e competitividade da agricultura brasileira.

A combinação de altas taxas de investimento, adoção de políticas apropriadas para a época e crédito rural subsidiado, possibilitou uma verdadeira revolução na agricultura brasileira. Essas importantes transformações, iniciadas na década de 1960 e que continuaram nas décadas seguintes, fizeram com que o Brasil deixasse de ser importador de alimentos para se tornar um dos maiores exportadores mundiais de várias culturas. Hoje, o agronegócio representa mais da metade do saldo da balança comercial do país, um terço do Produto Interno Bruto (PIB), além de gerar uma parcela significativa de empregos e renda para a população brasileira (Vieira Filho, Gasques, 2016).

Os resultados atuais da performance da agricultura brasileira estão diretamente relacionados com os esforços de incorporação tecnológica feitos no passado. A Revolução Verde e a criação de órgãos como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) não apenas marcaram, mas foram decisivos na transformação da agricultura e na revolução do campo.

A “revolução verde” que aconteceu no país esteve associada a um conjunto de fatores, os quais influenciaram na construção de um ambiente institucional favorável à inovação e à adaptação de tecnologias. Pesquisas de melhoramento genético foram realizadas para se adaptar a produção ao clima tropical, bem como para ampliação da produtividade agrícola e pecuária. No início da década de 1970, houve a criação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e, conseqüentemente, a expansão da fronteira agrícola para o Cerrado no Centro-Oeste, uma região considerada até então imprópria ao cultivo. Mais recentemente, desde os anos 1990, tem-se verificado a incorporação do Cerrado nordestino à produção. Nos últimos quinze anos, o desenvolvimento de sementes melhoradas que integram ciclos produtivos mais curtos possibilitou o aumento produtivo da “safinha” (ou “segunda safra”) em várias regiões, multiplicando o potencial produtivo do país. A biotecnologia é, portanto, essencial nesse processo, que busca maior produção com utilização mais eficiente dos recursos naturais. (Vieira Filho, Gasques, 2016, p. 16).

Com o objetivo de promover a modernização agrícola no país, foi adotado o modelo da Revolução Verde, criado pelo grupo americano Rockfeller, durante a Segunda Guerra Mundial (1939-45). Esse modelo preconizava o melhoramento da produção e produtividade por meio do

uso de máquinas, equipamentos agrícolas e inovações em todo o processo de cultivo, com foco no melhoramento genético e no uso intensivo de inseticidas e pesticidas para o controle de pragas e doenças. A difusão do modelo da Revolução Verde alcançou diversos países da América Latina, entre eles o Brasil. Os ganhos de rendimento, produtividade e competitividade beneficiaram sobretudo os grandes produtores rurais, de modo que o processo foi excludente.¹

[...] a Revolução Verde permitiu aumentar a produção de alimentos de maneira significativa em vários países, mas pouco contribuiu para salvaguardar e para desenvolver a agricultura camponesa pobre das regiões favorecidas dos países em vias de desenvolvimento (Mazoyer; Roudart, 1998, p.443).

A exclusão dos pequenos produtores rurais foi um fato que ocorreu não apenas no Brasil, mas em todos os países que adotaram o modelo de Revolução Verde para o fomento da agricultura. Esse foi um dos aspectos negativos da modernização, porém, é preciso considerar que as inovações tecnológicas a partir de meados da década de 1960 foram relevantes para substituir métodos tradicionais de produção agrícola e diversificar a produção.

O Estado desempenhou um papel importante nesse processo, ao viabilizar políticas e programas agrícolas para se adequar aos princípios da Revolução Verde. No Brasil, a criação do Crédito Rural pode ser citada como exemplo, assim como programas governamentais como o Programa de Desenvolvimento dos Cerrados (POLOCENTRO) e o Programa de Cooperação Nipo-Brasileira para o Desenvolvimento dos Cerrados (PRODECER).²

A década de 1970 é considerada por muitos o período de “ouro” da modernização agrícola, marcado por grandes investimentos de capital e pela presença marcante do Estado Brasileiro em todo o processo (Silva, 1996). Isso fica ainda mais evidente quando observamos o crescimento da produção e vendas de maquinários no país nesse período. As vendas domésticas de tratores tiveram um salto de cerca de 232,6% entre 1970 e 1979, enquanto a produção nacional de colheitadeiras aumentou em 525% no mesmo período (Amato Neto, 1985).

Na década de 1980, houve um arrefecimento da presença do Estado na modernização, e os problemas econômicos dessa época levaram esse período a ser conhecido como a “década

¹ Diversos estudos mostram que a Revolução Verde beneficiou os grandes produtores rurais, dando ensejo a concentração fundiária, a marginalização dos pequenos produtores e ao êxodo rural. A modernização não teria sido efetivada sem a contribuição do capital, porém, isso deu um caráter seletivo e excludente a chamada Revolução Verde.

² Esses programas foram criados para incentivar a produção agrícola no segundo maior bioma do Brasil, ou seja, o Cerrado Brasileiro, abrangendo os Estados de Goiás, Tocantins, Minas Gerais, Mato Grosso, São Paulo, Paraná, Pará etc. Os esforços de interiorizar a agricultura e a sua modernização nessas regiões também foi um dos objetivos principais da modernização da agricultura brasileira.

perdida”, em razão da crise financeira global e de seus impactos sobre a economia mundial e nos países periféricos, como era o caso do Brasil. No entanto, o fraco desempenho da economia brasileira nessa época não impediu que a agricultura continuasse a sua trajetória de modernização, por meio das constantes inovações tecnológicas.

Com a modernização, observou-se a construção de um novo espaço urbano, com a abertura de fronteiras agrícolas e crescimento gradativo e substancial das taxas médias da agricultura, sendo que, a década de 1990 foi decisiva nesse processo, uma vez que a produtividade foi crescente (Gasques, 2016).

3. INDÚSTRIA 4.0: EVOLUÇÃO E DESAFIOS

3.1 Definição e história do termo

Definir o que vem a ser a “Indústria 4.0” não é uma tarefa fácil, visto que os conceitos ainda estão em construção e por se tratar de um fenômeno novo, associado a 4ª Revolução Industrial. As tentativas de conceituar tal termo buscam esclarecer que se trata de uma digitalização avançada do setor manufatureiro, também conhecida como *Smart Factory* ou *CyberPhysical Systems*, que realiza a integração de processos físicos e computacionais (Rodrigues, et al., 2020).

O termo “Indústria 4.0” surgiu pela primeira vez em 2011, na feira de Hannover, e se refere a Quarta Revolução Industrial, estando cada vez mais presente nas organizações, qualquer que seja o seu ramo de atuação.

Segundo Lisinski et al., (2020), a “Indústria 4.0”, pode ser compreendido como um novo conceito de automação industrial, que incorpora as diferentes tecnologias criadas ao longo do tempo e que representa o que há de mais moderno em termos de novas tecnologias: a Inteligência Artificial (IA), o uso da robótica, da rede mundial de computadores (*internet*) e da computação em nuvem. O objetivo principal é promover a digitalização das atividades industriais e, assim, aumentar a confiabilidade das informações, melhorar os processos e aumentar a produtividade.

Alavancada também pelas tecnológicas *Cloud*, *Big Data*, *Analytics*, IoT, realidade aumentada, dentre outros, a Indústria 4.0 representa um marco na história da humanidade e também para a própria Revolução Industrial, uma vez que busca, a partir das novas tecnologias, criar a “Indústria Inteligente”, interligando-a com outras indústrias, mediante a adoção de sistemas de tecnologia da informação e operacional, computação cognitiva e novos processos de fabricação, de modo a possibilitar a transformação digital da fabricação.

Dissertando sobre o tema, Lisbinski et al., (2020) consideram em seu estudo que a Indústria 4.0 utiliza métodos computacionais de alto desempenho, como redes de sensores, conectividade entre dispositivos móveis, métodos e soluções analíticas que conseguem processar grandes volumes de dados e informações relevantes para o processo decisório. Ou seja, dá suporte às decisões presentes e futuras das organizações por meio da tecnologia. Isso também se aplica à Agricultura 4.0, que igualmente incorpora o que há de novo em termos de revolução industrial, buscando melhorar o seu desempenho e produtividade em um mercado cada vez mais competitivo e globalizado.

Assim, apropriando-se dos ensinamentos de Schumpeter (1988), pode-se inferir que a Indústria 4.0 é um fenômeno importantíssimo e atual, que certamente implicará em benefícios significativos para a sociedade e as indústrias, já que também traz a promessa de reduzir custos, a produtividade e, conseqüentemente, a eficiência.

Como está inserida no processo de Quarta Revolução Industrial, é possível deduzir que a Indústria 4.0 é um desdobramento das revoluções industriais anteriores, mas que agora apresenta um novo componente, pois se baseia no desenvolvimento de uma produção totalmente automatizada e inteligente, em que os principais atores corporativos podem se comunicar automaticamente. Em outras palavras, é um novo paradigma³, baseado na digitalização avançada de fábricas, internet e tecnologias orientadas para o futuro (Rodrigues et al., 2020).

Para entender melhor esse processo, o Quadro 1, adaptado de Rodrigues et al. (2020), traz maiores informações sobre as Revoluções Industriais desde o século XVIII até os dias atuais, mostrando que os avanços tecnológicos de hoje têm relação com o passado, mas que representam uma nova forma de se pensar e agir em termos de fabricação, produção, competitividade e eficiência.

Quadro 1: Revoluções industriais: contexto histórico

<p>Primeira Revolução Industrial (século XVIII) - Considerada primeira revolução industrial, foi impulsionada pela construção de ferrovias e deu início da utilização de sistemas de manufatura mecânica movidos por meio de água e vapor. Foi um período marcado pelo impulso da evolução da economia agrária para manufaturas mecanizadas, que com a utilização da mecanização e geração de</p>
--

³ Aqui resta evidenciado o que Schumpeter (1988) entendia sobre o entrelaçamento entre inovações tecnológicas e o advento de novos paradigmas. Com base em seus ensinamentos é notório que as inovações tecnológicas presentes na Indústria 4.0, deve estabelecer novos rumos para a indústria e o desenvolvimento das nações que se engajarem mais rapidamente nesse processo.

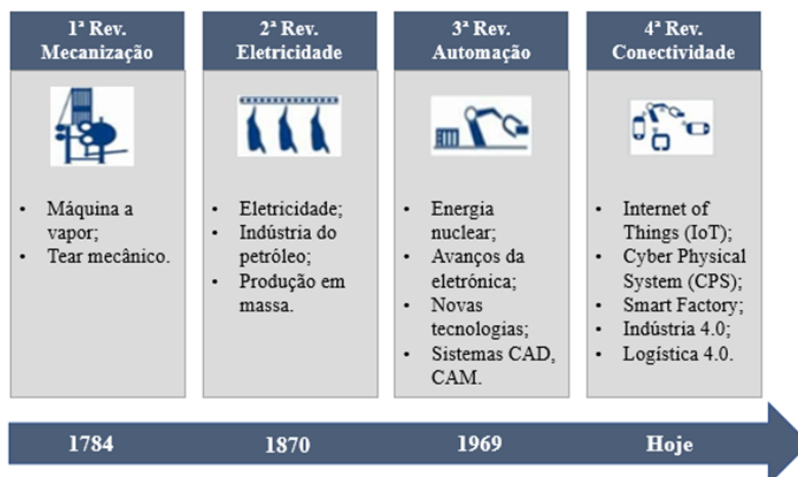
energia mecânica, em 1800, possibilitou a transição do trabalho manual para processos pioneiros de fabricação, principalmente na indústria têxtil
Segunda Revolução Industrial (século XIX) - Foi marcada pela utilização da energia elétrica, que possibilitou a realização da produção em massa e a introdução das linhas de montagem, foi a base das transformações industriais da época.
Terceira Revolução Industrial (século XX) - Foi caracterizada pela digitalização com introdução de microeletrônica e automação, utilizando tecnologias da informação computadores e internet possibilitando a automação da produção. Na manufatura, essas tecnologias facilitaram a produção flexível, onde uma variedade de produtos é fabricada em linhas de produção flexíveis com máquinas programáveis.
Quarta evolução industrial (primórdios do século XXI) - Se caracteriza pelo estreitamento entre o mundo físico e o virtual, através da utilização de sistemas ciber-físicos de forma generalizada vai além de máquinas e sistemas inteligentes conectados; seu escopo é mais amplo abrangendo áreas que vão desde o sequenciamento genético à nanotecnologia, de energia renováveis à computação quântica

Fonte: Adaptado de Rodrigues et al., (2020)

Com base nas informações do Quadro 1, percebe-se que, desde a primeira Revolução Industrial, tem ocorrido um progresso contínuo de inovações tecnológicas em prol da produção em massa e da evolução do modo de produção capitalista. Cada século deu sua contribuição à inovação tecnológica, beneficiando os donos dos meios de produção e a sociedade em geral.

A Figura 1, adaptado de Rodrigues et al. (2020), retrata também a história das revoluções industriais, mostrando o que surgiu em termos de inovação em cada época, sendo que a soma de todas essas revoluções contribuiu para o advento da Quarta Revolução Industrial.

Figura 1: Histórico das revoluções industriais



Fonte: Adaptado de Rodrigues et al., (2020)

Assim, pela análise histórica das revoluções industriais, verifica-se que todas estão interligadas, caracterizando seu aspecto evolutivo. Em cada época, foi estimulado o surgimento de modos específicos de produção, como a produção em massa, habilidade individuais, gestão da qualidade, organização de processo e produtos e, finalmente, o advento das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC's), até o momento atual, que trata da convergência de tecnologias digitais e físicas.

Na literatura, os resultados em relação a evolução industrial, em termos de Revolução Industrial desde o seu advento aos dias atuais, são assim expressos:

São notáveis os ganhos e a evolução da indústria ao longo dos tempos, desde a invenção da máquina a vapor, que proporcionou a substituição do trabalho artesanal pelo industrial até os dias de hoje onde a produção é aliada ao uso de alta tecnologia. As inovações foram surgindo com os tempos e revolucionando os equipamentos, os processos de cadeia de produção e de valor, bem como o aprimoramento e agilidade da comunicação entre os setores. Com isso o mercado se torna cada vez mais exigente e mais competitivo, sempre em busca de novos produtos e novas formas de produção. Com o constante crescimento no âmbito da tecnologia, associado aos processos produtivos, surge o conceito da indústria 4.0, que propõe a integração dos sistemas de automação, os sistemas ciberfísicos, e a internet, para otimização dos processos de produção, os tornando mais inteligentes (Rocha, et al., 2019, p.02)

Obviamente, o avanço tecnológico implica desafios futuros, especialmente para economias emergentes como o Brasil, que precisará investir em sua incorporação nos mais amplos segmentos da economia. Isso será discutido em maiores detalhes na próxima seção, que tratará dos desafios a serem enfrentados em relação à Quarta Revolução Industrial, mais precisamente à Indústria 4.0.

3.2 Princípios e tecnologia 4.0

A Indústria 4.0 é norteada por princípios que estão diretamente relacionados à tecnologia. Os princípios listados no Quadro 2 têm como finalidade influenciar toda a linha de produção e produtividade das organizações, de um modo geral.

Quadro 2: Princípios da Indústria 4.0

Interoperabilidade	Os sistemas, semelhantes ou não, deverão se comunicar de forma transparente
---------------------------	---

Virtualização	Os processos físicos serão monitorados de forma virtual
Descentralização	Por meio de sistema Ciberfísico, os sistemas deverão tomar decisões próprias
Operação ou Trabalho em Tempo Real	O monitoramento do trabalho é feito em tempo real, o que permite uma reação rápida em caso de desvio
Orientação a Serviços	Os serviços da empresa, através da IoS (Internet, Tecnologia de produção, Personalização etc.) estarão disponíveis para outros participantes, internos e externos
Sistema Modular	Caracterizado pela flexibilidade de adaptação às mudanças de requisitos ou de características do produto

Fonte: Adaptado de Rocha et al., (2019)

Por meio da adoção desses princípios, é possível alcançar não apenas a inovação, presente também na Agricultura 4.0, mas também promover o desenvolvimento de novos produtos ou serviços, além de colher os benefícios associados à essas mudanças tecnológicas. Esses princípios, por sua vez, estão interligados aos dez pilares da Indústria 4.0, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Pilares da Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Rüßmann et al., (2015).

Conforme mostrado na Figura 2, a Indústria 4.0 abrange dez pilares que sustentam a Quarta Revolução Industrial. Para entender melhor o que cada um desses pilares significa, é necessário fazer uma breve explicação sobre eles e seus impactos na indústria.

Nesse sentido, Rüßmann et al., (2015) explicam como cada um desses pilares se relaciona com as tecnologias advindas da Indústria 4.0. Para os autores, a Análise de Dados envolve a coleta, análise e interpretação de um conjunto de informações; a Robótica possibilita a incorporação de robôs inteligentes ao processo produtivo, aumentando a produtividade, reduzindo custos e otimizando a empresa; a Simulação Computacional aproxima o mundo físico do digital e aperfeiçoa a configuração das máquinas; a Integração dos Sistemas traz coesão entre empresas e clientes, assim como maior harmonia entre todos que tem relações com a organização; a Internet das Coisas (IOT) estabelece uma conexão entre redes de objeto físicos, ambientes, veículos, máquinas por meio de dispositivos eletrônicos; a Cibersegurança implica na adoção de métodos mais robustos para proteger os sistemas de ameaças; o *Cloud Computing*, ou computação em nuvem, reduz custos, diminui o tempo de execução das tarefas e aumenta a eficiência por meio de recursos computacionais como armazenamento, banco de dados e servidores; já a Manufatura Aditiva refere-se a estratégias voltadas para a criação de produtos diversificados; a Inteligência Artificial (IA) é a capacidade de aprendizagem das máquinas, de maneira semelhante à inteligência humana; e, por fim, a Digitalização envolve a aplicação de tecnologias digitais que buscam revolucionar os processos de produção, desenvolvimento de produtos ou modelos de negócios e cujo objetivo é o de aprimorar tornar isso mais eficiente.

Em linhas gerais, a transformação digital engloba a criação e execução de estratégias de digitalização, sensoriamento, segurança, coleta, e processamento de dados, com o objetivo de otimizar processos produtivos, melhorar a tomada de decisões, aumentar a eficiência operacional e promover a integração entre sistemas físicos e digitais, impulsionando a inovação e a competitividade das empresas de diferentes setores no ambiente da Indústria 4.0.

3.3 Desafios a serem enfrentados

Sempre que novas tecnologias surgem no mercado, oportunidades e desafios também emergem para as organizações e a sociedade como um todo. As empresas precisam evoluir com o tempo, o que implica não apenas em incorporar as novas tecnologias, para que sempre se mantenha competitivas, mas também superar os desafios associados.

A Alemanha, nação que contribuiu para significativamente para o advento e a evolução da Indústria 4.0, já consolidou, em boa parte, a Quarta Revolução Industrial em seus processos

produtivos. No entanto, em países como o Brasil, ainda existem dificuldades para a sua plena implementação, especialmente em comparação com as economias centrais (ROCHA et al., 2019).

Na Indústria 4.0, os desafios que devem ser superados, especialmente pelos líderes das empresas – e isso também se aplica ao setor agrícola – estão descritos no Quadro 3.

Quadro 3: Desafios na Indústria 4.0

Investimentos - O custo para adquirir as novas tecnologias não é barato, requer investimentos na compra dos insumos tecnológicos e de mão de obra especializada para lidar com a tecnologia
Segurança na manipulação dos dados - A combinação de sistemas físicos e digitais, que integra as indústrias inteligentes, possibilita a intemporalidade em tempo real, porém, traz o risco de ataque expandido ao sistema e isso é um aspecto importantíssimo e que deve ser pensando com cautela pela organização, por isso pessoal qualificado é essencial no manuseio de sistemas interligados e conectados, com é o caso da Indústria 4.0
Mão de obra qualificada - Pessoal com habilidades e competências no são essenciais no manuseio de sistemas interligados e conectados, com é o caso da Indústria 4.0. Significa dizer que os indivíduos precisam de “destreza digital”
Interação e interoperabilidade dos sistemas - Sistemas interligados requer parceiros (fornecedores) que sejam capazes de inovar sempre, especialmente em atualizações ao longo do tempo
Conectividade - Esse é um dos principais elementos presentes na Indústria 4.0. Para que a Quarta Revolução Industrial seja uma realidade, é necessário integrar dados, conectar sistemas, transformar as novas tecnologias em inteligência

Fonte: Adaptado de Rocha et al., (2019).

Para que as empresas possam se integrar à Quarta Revolução Industrial e se manterem competitivas, é necessário pensar na sobrevivência tanto no presente quanto no futuro. Isso não significa apenas incorporar o pacote tecnológico da Indústria 4.0, mas também enfrentar cada um dos desafios apresentados no Quadro 3. Em outras palavras, diante dessas mudanças, torna-se imprescindível a adoção de uma nova mentalidade orientada para o futuro e seus benefícios.

4. TECNOLOGIA 4.0 NA AGRICULTURA BRASILEIRA

4.1 Agricultura 4.0: conceito e benefícios para a agricultura

A Agricultura 4.0 pode ser compreendida como um conjunto de tecnologias direcionadas para a otimização da produção e gestão agrícola em diferentes etapas, com o

objetivo de aprimorar o controle, o monitoramento e a forma de trabalhar do produtor, por meio do uso de tecnologias integradas, como os softwares e outros sistemas de computação.

A Agricultura 4.0 surge como uma analogia a indústria 4.0, também chamada de Quarta Revolução Industrial. Assim, a Agricultura 4.0 consiste na conectividade da rede interna e externa das operações agrícola as e na integração dessas informações em uma mesma plataforma, possibilitando a tomada de decisão em tempo real. [...] utiliza métodos computacionais de alto desempenho, rede de sensores, comunicação máquina para máquina, conectividade entre dispositivos móveis, computação em nuvem, métodos e soluções analíticas que processam grandes volumes de dados e constroem sistemas de suporte à tomada de decisões (Lisbinski et al., 2020, p.422-423)

A Agricultura 4.0 representa a evolução e o resultado da convergência de diversas tecnologias de áreas distintas, sendo, portanto, um fenômeno interdisciplinar ainda incipiente no Brasil, mas que traz a possibilidade de aumentar os índices de produtividade, eficiência no uso dos insumos agrícolas, redução dos custos de mão de obra, maior segurança dos trabalhadores e menor impacto ambiental (Lisbinski et al., 2020)

Em resumo, a Agricultura 4.0 representa uma nova forma de produzir e gerir a produção agrícola digitalmente, com impactos econômicos e sociais importantes, graças a uma nova dinâmica de inovação para as propriedades rurais (Carrusca, 2018).

Da mesma forma que ocorreu com a Revolução Industrial, a Agricultura 4.0 é um desdobramento da evolução tecnológica na agricultura e tem relação direta com a Indústria 4.0. Inclusive, a evolução no setor agrícola segue na mesma trajetória da Indústria 4.0. Nesse contexto, o Quadro 4, elaborado por Lisbinski et al. (2020), busca retratar essa evolução.

Quadro 4: Revoluções Tecnológicas na Agricultura

Agricultura 1.0	Potência animal
Agricultura 2.0	Motor de combustão
Agricultura 3.0	Sistemas de orientação e agricultura de precisão e uso de sinais GPS para uso público
Agricultura 4.0	Interação digital das atividades agrícolas com interações de informações em todos os setores e processos agrícolas

Fonte: Lisbinski et al., (2020)

A exemplo da Indústria 4.0, percebe-se pelas informações do Quadro 4 que a Agricultura 4.0 é um desdobramento da evolução tecnológico no setor agrícola, evoluindo da agricultura mais básica com tração animal para a promoção das atividades agrícolas, para o motor de combustão, a agricultura de precisão e altamente mecanizada até a interação digital e de informações nos processos agrícolas. A cada revolução agrícola, novas técnicas substituíram métodos antigos, promovendo a inovação e impulsionando a produtividade no campo. Essa dinâmica reflete o conceito de destruição criadora, destacado por Schumpeter (1988), em que o progresso surge por meio da substituição contínua do antigo pelo novo, gerando impacto tanto nos processos produtivos quanto nas relações econômicas no setor agrícola.

É preciso esclarecer que, embora a Agricultura 4.0 seja composta por sistemas complexos, a sua operacionalização não é difícil, sendo que a tecnologia possibilita a aplicação de insumos, herbicidas, fungicidas com maior eficiência do que a agricultura tradicional. Com isso e outros benefícios das inovações tecnológicas é possível reduzir os custos e aumentar a produtividade no campo. Ainda, em relação aos benefícios:

Vários são os benefícios proporcionados pela agricultura 4.0, integração de todas as informações em um único local, em uma mesma plataforma, possui um foco estratégico para planejar com antecedência a próxima safra, oferecendo benefícios econômicos e ambientais. O monitoramento do solo permite tomar ações corretivas precoces que evitam a deterioração, erosão e perda de características químicas da terra. A água, os fertilizantes e pesticidas, que são comumente aplicados de maneira uniforme na área cultivada, podem ser aplicados com maior especificidade. Torna-se possível aplicar quantidades mínimas de insumos o que reduz a demanda por recursos naturais e o impacto ambiental com margens para o aumento da produtividade. Chamam a atenção outras inovações como: impressão 3D de alimentos, cultivo de carne, modificação genética e sistemas de irrigação com água do mar. Algumas dessas tecnologias em estágio inicial prometem viabilizar o cultivo de alimentos em áreas áridas ou a utilização de recursos abundantes e limpos como é o caso do sol e da água do mar (Lisbinski et al., 2020, p.425).

Explicado o conceito de Agricultura 4.0, constata-se que, pelas inovações tecnológicas que essa agrega ao setor agrícola, os resultados esperados em termos de benefícios para os produtores incluem maior autonomia, flexibilidade, redução de custos e desperdícios, além do aumento da produtividade e competitividade. (Lisbinski et al., 2020).

4.2 Principais clusters tecnológicos implementados

Com o advento da Agricultura 4.0, novas tecnologias entraram na atividade agrícola, especialmente no agronegócio. Nesse processo de avanço tecnológico sem precedentes, surgiram ferramentas analíticas, como a visão computacional e algoritmos preditivos, além de

tecnoestruturas físicas, entre as quais se destacam a robótica, drones, manufatura 3D e reestruturação da capacidade tecnológica do sistema produtivo e de gestão das atividades agrícolas.

Os *clusters* tecnológicos da Agricultura 4.0 mais impactantes são um conjunto de aplicações tecnológicas que possibilitam a captação de informações da produção, coleta de dados, interpretação das informações e integração delas. Esses *clusters* incluem: *Internet* das coisas (IoT), Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), Inteligência Artificial (IA), *Big Data* e Computação em Nuvem.

Para um melhor entendimento do significado e impactos dessas tecnologias, o Quadro 4 traz informações sobre cada uma dessas ferramentas, ou melhor, clusters tecnológicos da Agricultura 4.0.

Quadro 5: Clusters tecnológicos da Agricultura 4.0

<p>Internet das coisas (IoT) - É considerada uma das mais impactantes e que tem recebido maior atenção da agricultura em termos de investimento. Estima-se que tem potencial para transformar a economia, com estimativas de impactar globalmente o mundo em torno de 4% a 11% do Produto Interno Bruto. No Brasil, as estimativas são de que deva trazer um impacto econômico de 50 a bilhões de dólares para o ano de 2025.</p>
<p>Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) - Possibilita a introdução da informação na agricultura de modo completo, dispondo de sistemas estruturados capaz de conceber, desenvolver e automatizar toda a cadeia produtiva. Proporciona armazenamento de dados sobre clima, solo, pragas e doenças. É capaz de antecipar mudanças climáticas, previsões meteorológicas, previsão de safras, dentre outros.</p>
<p>Inteligência Artificial (IA) - Essa tecnologia tornou-se relevante para a agricultura. Através dela é possível fazer diversas aplicações mediante o uso de robôs, drones, e fazer mapeamento completo de propriedades rurais, fazendo uma análise de diversas informações e contribuindo para identificar áreas de desmatamento, uso excessivos de agrotóxicos e pragas.</p>
<p>Big data - É um sistema inteligente de armazenamento e análise de dados, definido por “5 Vs”, volume, variedade, velocidade, veracidade e valor. O algoritmo utiliza uma quantidade de informações concretas, coletadas em tempo real, sendo aplicado conjuntamente com a agricultura de precisão e tem por finalidade promover um melhor gerenciamento da produção agrícola.</p>
<p>Computação em nuvem - Os dados são gerados em tempo real, com alta definição, as informações são mantidas seguras e com o intuito de aumentar a produção em grande escala, e visa o desenvolvimento agrícola sustentável. O produto, com essa tecnologia tem acesso aos valores do mercado em tempo real.</p>
<p>Rastreamento em tempo real - O uso de drones é um poderoso aliado da agricultura, pois contribui para a redução dos custos dos produtores com aerofotogrametria e possibilita também medidas mais precisas no mapeamento terrestre da propriedade, gerando informações mais precisas e redução dos custos operacionais.</p>

Automação e biotecnologia - Utilização de tratores e outros veículos autônomos em horários alternativos e biotecnologia (biologia celular, melhoramento genético, microbiologia etc.)

Fonte: Silva, Cavichioli (2020)

A adoção de *clusters* tecnológicos já é uma realidade em várias empresas do agronegócio. A John Deere, por exemplo, oferece soluções de monitoramento remoto no campo, permitindo a coleta, o envio e o processamento de diversas informações por meio de *smartphones* conectados pela *Internet* das Coisas (IoT). Já a Startup brasileira ARPAC desenvolve drones e aeronaves remotamente pilotadas para pulverização de lavouras, trazendo um menor consumo de recursos (Ferneda, Ruffoni, 2019). Outro exemplo é a plataforma digital Climate FieldView da Bayer Monsanto, que combina diferentes *clusters* tecnológicos, como Big Data, TICs e IA, possibilitando a integração de diversos dados agronômicos que podem ser visualizados de forma simples através de aplicativos no celular, iPad ou plataforma web (Climate FieldView, 2024).

Assim podemos inferir que a Agricultura 4.0 representa o que há de mais avançado na tecnologia, pois emprega métodos computacionais de alto desempenho, rede de sensores, comunicação de máquina a máquina, conectividade de dispositivos móveis e, enfim, métodos e soluções analíticas que prometem revolucionar a agricultura.

4.3 Investimentos na Agricultura 4.0

Conforme discutido ao longo deste estudo, o setor agrícola tem passado por uma transformação sem precedentes, através de incentivos econômicos e empresas cada vez mais especializadas, que vêm adotando tecnologias inovadoras, as quais trazem a promessa de revolucionar o campo, amentando o nível de produtividade agrícola, rentabilidade, competitividade e reduzindo custos.

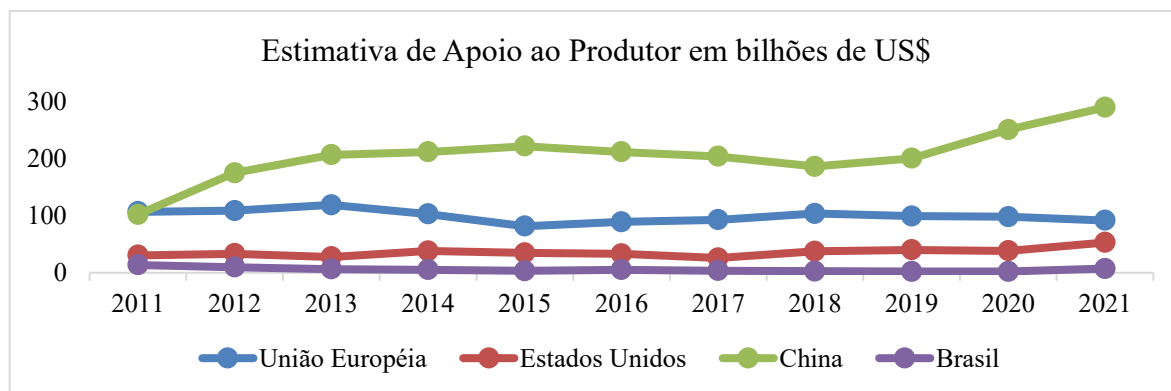
Adicionalmente a todas as vantagens associadas à Agricultura 4.0, existe o desafio dos investimentos necessários para a aquisição do “pacote tecnológico” e treinamento de mão de obra qualificada para operar essas novas ferramentas. Se, de um lado existe a necessidade de adoção dos pilares e princípios da Agricultura 4.0, de outro, tem-se a questão dos recursos necessários para que os produtores possam modernizar suas atividades nos moldes propostos por esse novo modelo agrícola.

Atualmente, os agricultores têm à disposição equipamentos de alta performance e tecnologia que os ajudam a produzir mais, com maior eficiência e menos tempo. No entanto, apesar de o Brasil possuir um enorme potencial para o desenvolvimento agrícola, o acesso às

tecnologias da Agricultura 4.0 ainda é limitado, especialmente para pequenos agricultores e para a agricultura familiar (Esperidião et al., 2019).

Em termos de estímulo e incentivo à agricultura, a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) monitor e avalia a evolução das políticas agrícolas por meio de uma série de indicadores nominais. Dentre eles, destaca-se a Estimativa de Apoio ao Produtor, ou *Producer Support Estimate* (PSE), que analisa os incentivos diretos e indiretos repassados aos produtores rurais (OCDE, 2023). O Brasil, no entanto, não ocupa uma posição de grande destaque quando comparado com outros grandes *players* da agricultura mundial, conforme demonstrado no Gráfico 1.

Gráfico 1: Políticas de Apoio na Agricultura (2011-2021)



Fonte: Elaboração própria (2024), base de dados OCDE (out./2024)

Pode ser observado pelo gráfico 1, com dados de 2011 a 2021, que os produtores brasileiros receberam, em 2021, 7,4 bilhões de dólares da receita total, no nível da fazenda, em apoio à agricultura. Vale ressaltar ainda que, durante o mesmo período, a China recebeu 289,2 bilhões de dólares, a União Europeia 91,4 bilhões e Estados Unidos tiveram recebimentos médios de 53 bilhões do PSE.

Embora os níveis de incentivos financeiros governamentais no Brasil não sejam tão expressivos quanto em outros grandes players do setor agrícola, o país mantém uma alta competitividade na atividade agrícola. Além disso, o aparato governamental tem desempenhado um papel importante, especialmente no que se refere a investimentos em P&D e à transferência de tecnologia para o campo, destacando-se a atuação da Embrapa.

As grandes empresas agrícolas estão na vanguarda da adoção de novas tecnologias, trazendo inovações que aumentam a eficiência e produtividade, mesmo diante de cenários desfavoráveis. Segundo a Inovativa Brasil (2018), a tecnologia chegou ao campo e vem contribuindo para os resultados positivos da produção agrícola no Brasil. Já a Esalqtec (2018),

destaca que essas tecnologias, conhecidas como “As AgTechs” ou “AgroTechs”, têm como objetivo melhorar o desempenho de toda a cadeia produtiva do agronegócio.

Desde 2012, grandes empresas como Bayer Monsanto e BASF expandiram suas estratégias de aquisição de empresas voltadas para a digitalização do campo. Um exemplo disso é a aquisição, em 2013, pela Monsanto, da *The Climate Corporation*, empresa especializada em *Big Data*, por cerca de 930 milhões de dólares (Forbes, 2013). O objetivo é coletar, monitorar e analisar informações do campo, criando um banco de dados de fácil acesso, por meio de aplicativos, para os agricultores.

Um dos principais produtos dessa transformação digital é a Plataforma de Dados *Climate FieldView*, utilizada pela Bayer, que monitora mais de 28 milhões de hectares. Durante a Agrishow 2024, a maior feira agrícola nacional realizada em Ribeirão Preto – SP, a Bayer apresentou o Agri-Copilot, uma inovação desenvolvida em parceria com a Microsoft, comparada a um "ChatGPT do Agro". Além disso, foram apresentados os resultados recentes das soluções digitais viabilizados a partir de *Climate FieldView*, como é o caso do Bayer VAlora Milho, uma solução digital que personaliza recomendações para o cultivo de milho, como a prescrição de densidade de sementes e recomendação de nitrogênio.

A Syngenta também tem feito grandes investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D), aplicando cerca de US\$ 1,4 bilhão por ano em busca de soluções tecnológicas para a proteção de lavouras contra pragas e doenças. A empresa adotou um movimento de incorporação de startups, seguido de uma verticalização dos negócios da inovação com a Syngenta Digital (ONDÉI, 2023). Em 2024, durante a Cúpula Mundial de Inovação AgriTech, a Syngenta anunciou o lançamento do Cropwise AI, um sistema de Inteligência Artificial Generativa (GenAI) desenvolvido para aumentar a eficiência de consultores agrônômicos e produtores no manejo de culturas (Syngenta, 2024).

As principais empresas mundiais de maquinário agrícolas, como John Deere, CNH Industrial, Kubota e AGCO, também estão investindo fortemente em tecnologias da Indústria 4.0. Grande parte dos investimentos é focada em robótica, com o desenvolvimento de máquinas autônomas, como tratores sem piloto. Em 2015, a CNH ingressou na plataforma *Big Data* por meio de parcerias com a *Climate Corporation* e a BASF. Já a John Deere firmou parcerias com grandes players do setor de grãos e pesticidas, integrando seus hardwares com dados químicos e softwares das grandes empresas do setor (Mooney, Grupo Etc, 2019).

Embora as grandes empresas estejam na vanguarda da digitalização do campo, pequenos agricultores e a agricultura familiar ainda encontram dificuldades no acesso às

tecnologias 4.0. Para que o Brasil se destaque no cenário global de agricultura de precisão, é fundamental ampliar o suporte financeiro, melhorar o acesso às tecnologias e desenvolver políticas públicas que promovam uma inclusão mais ampla no uso dessas novas ferramentas. Somente assim será possível maximizar o potencial do setor, promovendo não apenas uma maior eficiência produtiva, mas também sustentabilidade ambiental e redução das desigualdades no campo.

5. OS IMPACTOS DAS NOVAS TECNOLOGIAS DA AGRICULTURA 4.0

5.1 Análise da produtividade das principais culturas

A evolução tecnológica ao longo dos anos sempre trouxe grandes impactos sobre a produtividade na agricultura brasileira, como demonstrado, por exemplo, pela Revolução Verde. Sob o paradigma da mais recente fronteira tecnológica e sob a influência da Indústria 4.0, os benefícios tendem a se ampliar ainda mais, com a implementação de tecnologias como estufas inteligentes, controle de irrigação, monitoramento remoto das condições climáticas, fertilização por meio de drones, sistemas inteligentes de classificação de colheitas e definição de preços, além da possibilidade de diagnóstico automatizado de pragas e doenças, entre outros avanços (Viola, Mendes, 2022).

Em linhas gerais, esse tipo de agricultura representa não apenas um aumento no desenvolvimento econômico, mas também a mitigação de problemas sociais, como a necessidade crescente por mais alimentos, frente ao crescimento populacional e à maior demanda por alimentos de qualidade.

Alguns estudos, ao analisar o desempenho do setor agrícola no âmbito da Agricultura 4.0, chamam a atenção para a uma questão social muito importante: a escassez de alimentos e a fome que afetam diversos países, sobretudo as nações mais pobres e periféricas (Viola, Mendes, 2022). A falta de alimentos nos países periféricos tem várias causas, porém a principal delas está relacionada ao crescimento exponencial da população e à má distribuição do que já é produzido, sendo a maior parte da produção destinada para as grandes nações. Estima-se que, para o ano de 2050, a população mundial poderá atingir 9,8 bilhões de pessoas (Silva, Cavichioli, 2020). O aumento da população, também conhecido por “fantasma malthusiano”, exerce uma grande pressão sobre o setor agrícola quanto a necessidade de aumentar a produção para atender à demanda atual e futura. Nesse sentido, o caminho para atingir o objetivo de aumento de produtividade das culturas no mundo e no Brasil é através do uso intensivo de tecnologia e da transformação digital.

Diante desse cenário de crescimento da demanda por consumo de alimentos compõe-se em uma expansão da produção em áreas ocupadas oriundas da agricultura e pecuária. Com a proporção do aumento da produtividade, a tecnologia é imprescindível para aprimorar, otimizar e rentabilizar a produtividade no campo, como a maximização da utilização dos recursos naturais, por exemplo, menor consumo de água na irrigação ou insumos na adubação do solo (Silva, Cavichioli, 2020, p.03).

O Brasil está alocado como um grande ator no crescimento da produção agropecuária mundial. Desse modo, é preciso apontar neste trabalho, como projeta a OCDE e FAO (2020), de que forma o Brasil continuará sendo um grande produtor e exportador sem precisar expandir para novas áreas, mas sim, valendo-se das tecnologias já existentes e outras novas que devem avançar nos próximos anos, principalmente aquelas relacionadas à transformação digital e à Agricultura 4.0. A tabela 1 apresenta a projeção brasileira, segundo a OCDE e FAO (2020), de alguns dos principais produtos cultivados e comercializados pelo Brasil, como algodão, milho e soja.

Tabela 1: Projeções para agricultura brasileira

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Algodão									
Produção (1 mil t)	2502	2580	2650	2715	2780	2849	2931	3015	3096
Área Colhida (1 mil t)	1475	1500	1520	1537	1552	1569	1592	1615	1638
Produtividade (t/ha)	1,7	1,72	1,74	1,77	1,79	1,82	1,84	1,87	1,89
Milho									
Produção (1 mil t)	97260	99276	101325	103415	105468	107505	109582	111654	113762
Área Colhida (1 mil t)	17451	17491	17533	17577	17519	17655	17695	17735	17777
Produtividade (t/ha)	5,57	5,68	5,78	5,88	5,99	6,09	6,19	6,3	6,4
Soja									
Produção (1 mil t)	124566	126704	128764	130729	132620	134677	136572	138393	140157
Área Colhida (1 mil t)	37310	37661	37989	38284	38549	38845	39101	39329	39532
Produtividade (t/ha)	3,34	3,36	3,39	3,41	3,44	3,47	3,49	3,52	3,55

Fonte: OCDE e FAO (2020).

A projeção da OCDE e FAO (2020) indica um crescimento de 27,5% para a produção de algodão, atingindo mais de 3 milhões de toneladas em 2029. Em relação ao milho, pode-se notar uma projeção de crescimento de 19%, com produção superior a 113 milhões de toneladas.

A produção de soja brasileira é a maior do mundo, segundo dados da FAOSTAT. A produção mundial em 2019 foi de 330 milhões de toneladas, com o Brasil sendo responsável por 35% da produção total, seguido pelos Estados Unidos com 30% e Argentina com 17%. Espera-se que a produção mundial aumente cerca de 12% ao longo da década e que a produção

brasileira aumente 14,3%, projetando-se para 2029 uma produção de mais de 140 mil toneladas segundo dados da OCDE e FAO (2020).

Nesse cenário, o Brasil é uma nação que se destaca na produção de várias culturas no mundo, em razão de suas vantagens comparativas⁴ e do esforço rumo à modernização da agricultura. O país é líder na produção mundial de soja, café, açúcar, suco de laranja, carne de frango, entre outras culturas básicas. Ou seja, já alcançou um papel importante nas exportações de algumas culturas e alimentos, o que reitera a necessidade de continuar na liderança desses e de outros alimentos no futuro, uma vez que essa liderança é reflexo de políticas e avanços tecnológicos adotados no passado.

Assim, investir na Agricultura 4.0 é uma estratégia viável para o aumento da produtividade e competitividade das principais culturas de exportação. O Brasil, por suas dimensões geográficas e pelo diferencial de clima, tem potencial para aumentar a sua produtividade através da Agricultura 4.0. Na verdade, investimentos em tecnologia já são um padrão na agricultura brasileira desde a adoção do modelo da “Revolução Verde”, cujo objetivo é impulsionar o agronegócio a nível nacional e internacional.

O Brasil está investindo em grande escala em recursos para pesquisas e avanço tecnológico, tendo objetivo de aumentar a produção de alimentos. Em especial as commodities que engloba maiores produtores, e neste ínterim obteve um grande benefício por conta do uso das tecnologias no campo. Segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) com dados de 2017, a produtividade do milho em 2006 era em torno de 3.572 kg/há. Em 2017 atingiu 5.582 kg/há. Já o arroz alcançou um salto de 60%, sendo de 6.441 kg/há para 4.010 kg/há. O feijão teve um acréscimo de 46%, e o algodão, 30%. (Silva, Cavichioli, 2020, p.04).

O Brasil, a exemplo de outras nações, busca autossuficiência alimentar, e isso é um desafio que passa, necessariamente, pelas inovações tecnológicas. Promover a expansão da produção e do rendimento agrícola tornou-se uma questão essencial para que o aumento da produtividade seja alcançado e para que as perdas nas lavouras sejam mínimas. Nesse sentido, é com a Agricultura 4.0 que as culturas produzidas no Brasil alcançarão maior produtividade (Adami, 2021).

⁴ Segundo dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA), o Brasil é atualmente o maior exportador de carnes bovina e de frango, soja em grão, suco de laranja, café e está entre os maiores produtores mundiais de culturas como o algodão, milho, frutas e carne suína. Além da dimensão geográfica e da diversidade de clima do país, políticas de incentivo a modernização da agricultura contribuíram para que o país alcançasse esse patamar, bem como os investimentos em inovações tecnológicas que resultaram em uma maior produtividade no campo.

A título de exemplificação, podemos observar os resultados da pesquisa conduzida por Santos et al., (2023), e que mostra os efeitos da utilização da Agricultura 4.0 em uma empresa que atua no agronegócio brasileiro. Essa empresa desenvolveu um projeto com a finalidade de adotar os princípios e as inovações tecnológicas da Agricultura 4.0 e os resultados obtidos confirmam as evidências científicas observadas em outros estudos.

[...] houve ganho de agilidade e eficiência operacional e redução de custos para a Usina São Martinho com a utilização dos pilares da Agricultura 4.0 aliando tecnologias de informação e automatização, tecnologia de ponta nos processos logísticos e operacionais nas usinas do grupo, através de plataformas modernas, de alta performance e escalabilidade, com sistemas de transmissão e sensoriamento, software com elementos de planejamento, otimização, integração de dados e interfaces, monitoramento, operações em tempo real, auxiliando a tomada de decisões e direcionando processos de controle para operadores, deslocamentos, suporte à navegação, rastreabilidade de matéria prima e integração com os sistemas de apoio sincronizada, planejada, com relatórios alertas. Portanto, este estudo de caso, aponta que há ganhos para a usina na utilização destes novos recursos e aprimoramento de suas técnicas, mostrando que a tecnologia atual inova as ações na indústria e no campo, despertando interesse na área e prezando por evitar desperdícios e aumentar a segurança dos funcionários. (Santos et al., 2023, p.10).

Os ganhos de produtividade também estão presentes na fazenda Alvorada, localizada no município de Tupaciguara, em Minas Gerais, e considerada uma das fazendas mais tecnológicas do Brasil. A adoção da Agricultura 4.0, a partir de 2008, possibilitou um crescimento da média de sacas de soja por hectare de 55 para 75 no sequeiro e de 64 para 84,5 sacas na área irrigada nos últimos 13 anos. Não houve aumento da área plantada, mas investimentos no pacote tecnológico proposto pela Agricultura 4.0. Quando o proprietário da Fazenda Alvorada optou por fazer um processo de transição da agricultura convencional para a digital, observou-se que essa mudança foi extremamente benéfica, já que a agricultura digital trouxe maior eficiência na gestão, operação e análise de riscos, aumentando a produtividade em torno de 40%, bem como a redução dos custos de produção. Com o uso da plataforma digital, é possível analisar todas as etapas, que vão desde o plantio a colheita, planejar melhor mudanças na lavoura e corrigir desperdícios (Canal Rural, 2021).

A utilização de agricultura de precisão, por meio da implementação do sistema de conectividade rural SolinfNet, tem transformado o processo produtivo do grupo Terra Santa Agro, um dos grandes produtores de soja, milho e algodão do país. Segundo dados fornecidos pelo diretor de operações da Terra Santa, na fazenda em que a tecnologia foi implementada, houve uma economia de combustível de cerca de 6% devido à melhor definição das rotas dos tratores, pulverizadores e colheitadeiras. Além disso, após quatro anos de adoção do sistema, o

grupo registrou um aumento de produtividade de 26% na soja e 20% no algodão em pluma, medidos em sacas por hectare (Revista Fapesp, 2020).

Grandes corporações que atuam no agronegócio também possuem um interesse muito grande na Agricultura 4.0. A empresa Bayer, uma grande multinacional que é líder em insumos agrícolas, também tem dedicado atenção especial ao desenvolvimento de pesquisas de inovação digital na agricultura, implementando iniciativas inovadoras para aprimorar a eficiência da produção agrícola. Um exemplo disso é o Bayer Valora Milho, que otimiza a produtividade de cada talhão de milho, e demonstrou na safra de inverno de 2023 que 70% dos produtores que adotaram o programa tiveram aumento na produtividade, com um ganho médio de 4% nos casos bem-sucedidos (Silva, 2024).

Além disso, a plataforma de agricultura digital *Climate FieldView* da Bayer, tem auxiliado diversos produtores através da conectividade de dados no campo e *Big Data*. Analisando a sojicultura, os produtores que utilizam a plataforma colhem, em média, 7 sacas de soja a mais por hectare do que a média nacional. Como exemplo desse sucesso também em outras culturas, pode-se observar o caso de produtores que, utilizando a tecnologia, conseguiram aumentar em 10% a densidade populacional no plantio de milho, resultando em um aumento de 11 sacas a mais de milho (Bayer, 2024).

A Syngenta, uma das líderes em inovação no setor, desenvolveu um sistema de IA Generativa, que auxilia os produtores nas tomadas de decisão a partir de dados, otimizando o rendimento das culturas e melhorando a sustentabilidade. Através da utilização dos modelos de recomendação, a empresa projeta um aumento nos rendimentos dos produtores de até 5% (Syngenta, 2024).

Há ainda outros exemplos que mostram o quão é vantajoso o uso da Agricultura 4.0 na melhoria da produtividade e performance da agricultura e da agroindústria como um todo. E existem ainda diversas outras vantagens que vão além da melhoria da produtividade, já que as inovações tecnológicas presentes nesse modelo de agricultura são sustentáveis e causam menos impactos ambientais.

5.2 Impactos das novas tecnologias na sustentabilidade e meio ambiente

Novas tecnologias serão preponderantes para impulsionar ganhos de produtividade, atuando de forma complementar e avançada em relação às tecnologias já existentes, podendo ser fundamentais para alavancar tanto a produtividade no campo quanto auxiliar em questões sustentáveis. A Agricultura 4.0, também conhecida como agricultura digital ou *smart farming*,

apresenta-se como algo promissor neste sentido ao combinar tecnologias digitais, produtividade e soluções sustentáveis (Villafuerte et al., 2018).

Existem várias tecnologias já em uso que procuram enfatizar o efeito da “economia” da terra, buscando aumentar a produção por meio da produtividade agrícola, tanto da terra quanto dos demais fatores de produção. Entre as práticas produtivas mais consolidadas vale destacar o plantio direto, agricultura de precisão e o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), as quais, apesar de não serem largamente disseminadas, vêm gerando impactos positivos onde são aplicadas (Viola, Mendes, 2022).

Como visto em vários momentos deste estudo, a agricultura passou por diversas transformações ao longo dos anos. A necessidade de produção em larga escala e redução de custos impulsionou a evolução das técnicas e práticas agrícolas. Entretanto, esse aumento expressivo na produção não considerou os impactos que poderiam ser causados ao meio ambiente. À medida que as áreas agrícolas se expandem, há uma tendência de consumirmos cada vez mais nossos recursos naturais, devastando vastas áreas florestais e poluindo o ar, o solo e a água.

Para enfrentar esse cenário, o Plano de Agricultura de Baixo Carbono (ABC) criado em 2010, tem como objetivo promover ações voltadas à adoção de tecnologias de produção sustentáveis, visando à redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE) no setor agropecuário e tornar este um ambiente mais sustentável. O Plano ABC tem como meta reduzir entre 133,9 e 162,1 Mt CO₂e e as emissões do setor agropecuário através de práticas sustentáveis e sistemas produtivos de baixo carbono (Viola, Mendes, 2022):

[...] o agronegócio responde por parcela expressiva das emissões de GEE. Desde 2010, as emissões brasileiras são aproximadamente 2 Gt CO₂e anuais, sendo que em 2019 os três principais vetores foram: mudança no uso da terra e florestas, ou seja, desmatamento (968 Mt CO₂e), agropecuária (598 Mt CO₂e), e energia (413 Mt CO₂e) (SEEG, 2019). As Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) propostas pelo Brasil no Acordo de Paris almejam reduzir o total de emissões para 1.3 Gt CO₂e até 2025, e para 1.2 Gt CO₂e até 2030, sendo consideradas de ambição média. Nos NDCs, a agropecuária e o uso da terra e florestas (AFOLU) representam o cerne da estratégia brasileira de descarbonização, ao passo que as iniciativas para os demais setores são vagas (Köberle et al., 2020).

Diversas tecnologias já estão sendo adotadas no setor de agronegócio com o intuito de se alcançar as metas estabelecidas para redução de emissões e degradação ao meio ambiente a

partir de resíduos. Entre essas tecnologias estão o uso a utilização de aplicativos para conectar e controlar parâmetros socioambientais via *big data* e *cloud computing*, o emprego de redes neurais para cálculo das áreas ótimas de cultivo e previsão produtiva, o monitoramento por satélite e a visualização computacionais de lavouras e rebanhos, além da implementação de sistemas de irrigação inteligente (Viola, Mendes, 2022).

Um exemplo disso é a Agrosmart, uma empresa que oferece uma plataforma tecnológica que consolida milhões de pontos de dados de sensores de campo e satélites, aplicando *machine learning* e outras tecnologias de inteligência artificial para melhorar o desempenho agrícola. Através dos dados fornecidos pela plataforma, os produtores podem se tornar mais eficientes, reduzindo o tempo de trabalho e o consumo de água e energia, ao mesmo tempo em que aumentam a produtividade (Cook; O’Neil, 2020).

Além disso, a utilização dessas novas tecnologias pode fazer com que a economia alcance uma economia de cerca de 30% nos insumos produtivos, com um aumento na produção de 20% (Lisbinski et al., 2020). Como podemos observar, essas medidas buscam reduzir as emissões do setor, porém sem limitar a produtividade. Entre 2009 e 2050, espera-se que o consumo global de alimentos crescerá 70%, exigindo do setor agrícola por maior produção, e, por consequência, aumentando suas emissões (Pivoto et al., 2018).

O conflito aparente entre os interesses econômicos e ecológicos surge, em grande parte, devido a falhas da economia de mercado, que ignora os custos ambientais associados à produção, conhecidos como externalidades negativas. O modelo de produção agrícola que surgiu com a Revolução Verde, focado na monocultura, traz evidentes benefícios econômicos, pois promove a produção e a especialização em larga escala, o que resulta em uma vantagem competitiva no mercado e impulsiona uma robusta indústria de insumos agrícolas.

Entretanto, se as externalidades negativas desse modelo fossem consideradas, sua viabilidade econômica para os agricultores e os países produtores seria reduzida. Infelizmente, os custos ambientais e sociais decorrentes desse modelo terão que ser suportados por todos, especialmente pelas próximas gerações.

Para que se consiga expandir a produção sem abrir novas áreas para o desmatamento, é essencial melhorar a produtividade nas regiões já desmatadas. Por essa razão, diversos estudiosos apoiam um modelo de preservação ambiental que se fundamenta na intensificação tecnológica das terras agrícolas e na salvaguarda das áreas naturais que ainda restam (Tilman et al., 2011). Contudo, pesquisas indicam que a efetividade desse modelo de preservação está atrelada à qualidade da intensificação tecnológica (Baulcombe et al., 2009).

Assim, é essencial reavaliar o modelo de avanço tecnológico que está sendo implementado na agricultura brasileira. A evolução tecnológica deve ser baseada em princípios ecológicos, considerando não somente a produtividade e o retorno financeiro imediato, mas também uma perspectiva integrada e sistêmica da produção agrícola em seu ambiente, com o objetivo de otimizar e garantir a sustentabilidade a longo prazo.

6. CONCLUSÃO

A agricultura no Brasil, historicamente, desempenha um papel vital na economia do país, sendo impulsionada por avanços tecnológicos que permitiram o aumento significativo da eficiência produtiva e sua inserção de destaque mundialmente. Com a chegada das tecnologias advindas da Indústria 4.0 e o aumento da pressão por “produtos verdes”, torna-se necessário alinhar o aumento da competitividade na agricultura internacional junto ao desenvolvimento sustentável do setor.

No que diz respeito à produção, podemos observar que a adoção de tecnologias ligadas, principalmente, a *big data*, sensores, sistemas integrados de monitoramento e inteligência artificial, tem levado a uma redução de custos e uma eficiência operacional para os produtores que as implementaram.

Além disso, as inovações têm um impacto significativo na sustentabilidade do setor, por meio de tecnologias voltadas para o melhor monitoramento e conectividade entre os produtores e a lavoura. Essas soluções buscam reduzir desperdícios e emissões na agricultura, promovendo práticas mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

No entanto, um ponto crucial revelado é que, apesar dos avanços, a adoção da Agricultura 4.0 ainda não é uma realidade uniforme para todos os produtores. Embora as grandes empresas do agronegócio liderem o processo de digitalização no campo, os pequenos agricultores e a agricultura familiar enfrentam grandes desafios para adoção dessas tecnologias, como a falta de recursos financeiros e o acesso limitado à tecnologia. Para superar essas barreiras, é necessário o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes que promovam a inclusão digital no campo e o acesso às inovações tecnológicas por todos os segmentos da agricultura.

Por fim, podemos observar que a incorporação das tecnologias da Indústria 4.0 é essencial para garantir o desenvolvimento sustentável e a competitividade do agronegócio brasileiro. Porém, o sucesso dessa transformação depende do equilíbrio entre o investimento em tecnologia, o apoio governamental e a capacitação de mão de obra, especialmente para os pequenos produtores, garantindo que todos possam se beneficiar dessas inovações. Somente

com essa abordagem inclusiva será possível explorar todo o potencial do setor e consolidar o Brasil como uma referência mundial em inovação agrícola.

Futuros estudos podem explorar ainda mais as formas de adaptação e expansão das tecnologias da Indústria 4.0 para diferentes regiões e perfis de produtores, investigando de forma mais quantitativa os impactos da implementação das novas tecnologias na produtividade e sustentabilidade do agronegócio brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, A. **Segurança alimentar e o papel do Brasil na oferta mundial de alimentos**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniaoe-cepea/seguranca-alimentar-e-o-papel-do-brasil-na-oferta-mundial-de-alimentos.aspx>>. Acesso em: 25 mai. 2024.

AMATO NETO, João. A indústria de máquinas agrícolas no Brasil: origens e evolução. **Revista de Administração de Empresas**, v. 25, p. 57-69, 1985.

BAULCOMBE, D. et al. **Reaping the benefits**: science and the sustainable intensification of global agriculture. London: The Royal Society, 2009.

BAYER. **Agricultor aumenta produtividade de milho em 11 sacas por hectare com uso de *Climate FieldView***. Disponível em: <<https://www.bayer.com.br/pt/midia/agricultor-aumenta-produtividade-milho-11-sacas-hectare-uso-climate-fieldview>>. Acesso em: 26 out. 2024

BAYER. **Climate FieldView apresenta evolução de soluções digitais em prol da agricultura regenerativa na Agrishow 2024**, São Paulo 29 abr. de 2024. Disponível em <<https://www.bayer.com.br/pt/midia/climate-fieldview-apresenta-evolucao-solucoes-digitais-prol-agricultura-agrishow-2024>>. Acesso em: 05 de out. de 2024.

BRANCA, S.C.A.V.; PEREIRA, L.A.; SILVA, S.R.; NOGAS, C. **Abordagem sobre Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) sob a ótica do desenvolvimento de inovação aberta**. Revista Americana de Empreendedorismo e Inovação, v.4, n.2, jul/2022, p.44-55.

BRASIL. **National Plan for Low Carbon Emission in Agriculture (ABC Plan)**. 2018. Disponível em: <<http://redd.mma.gov.br/en/legal-and-public-policy-framework/national-plan-for-low-carbon-emission-in-agriculture-abc-plan>>. Acesso em: 18 out. 2024.

CANAL RURAL, **Tecnologia e conectividade aumentam em até 40% a produtividade de fazenda mineira**. Disponível em: <<https://www.canalrural.com.br/agricultura/soja/tecnologia-conectividade-produtividade-fazenda-mineira/>>. Acesso em: 20 out. 2024.

CARRUSCA, M. **Agricultura 4.0: O Mundo Digital Revoluciona o Campo**. Revista Prodemge. Belo Horizonte, ano 15, n. 20, p. 6-17, dez. 2018.

COOK, P.; O'NEILL, F. Artificial Intelligence in Agribusiness is Growing in Emerging Markets. **Banco Mundial**, 2020. Disponível em: <<https://documents1.worldbank.org/curated/en/198451596436781534/pdf/Artificial-Intelligence-in-Agribusiness-is-Growing-in-Emerging-Markets.pdf>> Acesso: 14 out. 2024.

CLIMATE FIELDVIEW. Climate FieldView™. Disponível em: <https://climatefieldview.com.br>. Acesso em: 17 nov. 2024.

DOSI, G.; PAVITT, K. & SOETE, L. **The economics of technical change and international trade**. London: Harvester Wheatsheaf, 1990.

DRUKER, P.F. **Inovação e Espírito Empreendedor**. 1ª. Edição. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2008.

EMBRAPA. **A agricultura brasileira**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/vii-plano-diretor/a-agricultura-brasileira>> Acesso em: 05 de out. 2024

ESALQTEC. AgTech: **Conheça as 13 principais startups brasileiras que estão mudando o agronegócio no Brasil e no mundo 2018**. Disponível em: <<https://tecnologianocampo.com.br/agtech/>>. Acesso em 05 out. 2024.

ESPERIDIÃO, T.L.; SANTOS, T.C.; AMARANTE, M.S. **Agricultura 4.0: Software de gerenciamento de produção**. Revista Pesquisa Ação, v.5, n.4, p.122-131, 2019.

FACHIN, R. **Agricultura 4.0: revolução tecnológica no campo**. Disponível em: <<https://revistacultivar.com.br/artigos/agricultura-4-0-revolucao-tecnologica-no-campo>>.

FERNEDA, R.; RUFFONI, J. TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E AGRONEGÓCIO: uma reflexão para um conjunto de firmas do Rio Grande do Sul. **Anais do IV Encontro Nacional de Economia Industrial e Inovação: Inovação, Produtividade e os Desafios do Crescimento, São Paulo**, v. 6, p. 1320-1338, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QD>>.

FORBES. **Monsanto Buys Climate Corp for \$930 Million**. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/bruceupbin/2013/10/02/monsanto-buys-climate-corp-for-930-million/>>. Acesso em: 07 de out. 2024.

GASQUES, J. G. et al. **Produtividade da agricultura brasileira: a hipótese da desaceleração**. In: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. (Org.) Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade. Brasília: IPEA, p. 143-164, 2016,

GOVERNO FEDERAL. **Plano de Agricultura de Baixo Carbono**, Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais> >. Acesso em: 04 de out. de 2024

KLEIN, B. C. ET AL. Low carbon biofuels and the New Brazilian National Biofuel Policy (RenovaBio): A case study for sugarcane mills and integrated sugarcane-microalgae biorefineries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 115, 109365, 2019.

LISBINSKI, F.C., MUHL, D.D.; OLIVEIRA, L.; CORONEL, D.A. Perspectivas e desafios da Agricultura 4.0 para o setor agrícola. **VIII Simpósio da Ciência no Agronegócio**, 2020, Porto Alegre, 05 e 06 novembro.

MAZOYER, MARCEL; ROUDART, LAURENCE. **História das agriculturas do mundo: do neolítico à crise contemporânea**. Lisboa: Instituto Piaget, 1998.

MOONEY, Pat; GRUPO, E. T. C. **La insostenible agricultura 4.0. Digitalización y poder corporativo en la cadena alimentaria**, 2019. Disponível em: < <https://bit.ly/3ep6Rxx>>. Acesso em: 06 de out. de 2024

NITAHARA, A. **Censo agropecuário: Brasil tem 5 milhões de estabelecimentos rurais**. Disponível em: < <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-10/censo-agropecuario-brasil-tem-5-milhoes-de-estabelecimentos-rurais>>. Acesso em: 22 mai. 2024.

OECD. **Agricultural Outlook 2020-2029**. Paris: OECD Publishing; Rome: FAO, 2020

OECD/FAO. **Organisation for Economic Cooperation and Development and Food and Agriculture Organization of the United Nations - OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032**. Paris: Publicação OECD, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>. Acesso em: 05 out. 2024.

O GLOBO. **População mundial chegará a 10,3 bilhões até 2080, mas cairá mais do que o esperado depois, diz ONU**. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/mundo/noticia/2024/07/12/populacao-mundial-chegaara-a-103-bilhoes-ate-2080-mas-caira-mais-do-que-o-esperado-depois-diz-onu.ghtml>>. Acesso em: 14 out. 2024.

ONDÉI, Vera. "A era da inovabilidade." Forbes Brasil, 5 jan. 2023. Disponível em: <<https://forbes.com.br/forbesagro/2023/01/a-era-da-inovabilidade/>>. Acesso em: 29 out. 2024.

PIVOTO, D. et al. Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. **Information Processing in Agriculture**, v.5, n.1, pp.21-32, 2018

POSSAS, ML. **Em direção a um paradigma microdinâmico: a abordagem neoschumpeteriana**, p.157-177, 1990.

REVISTA PESQUISA FAPESP. Agricultura 4.0: Ferramentas digitais aumentam a produtividade e reduzem custos no campo. **Revista Pesquisa Fapesp**, São Paulo, 24 ago. 2020. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/agricultura-4-0/>>. Acesso em: 28 out. 2024.

ROCHA, A.T.; TEIXEIRA, L.A.; SOUZA, F.L. de.; NAZARÉ, T.B. **Os desafios da Indústria 4.0 no Brasil**.

RODRIGUES, T.V.; FERNANDES, C.H.; SANJULIÃO, L.K.A.F. **Abordagens conceituais da Indústria 4.0**. Disponível em: <https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/anais/arquivos/10192020_141056_5f8dca8080e80.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2024.

RÜßMANN, Michael et al. **Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries**. Boston Consulting Group, v. 9, 2015.

SAHA, S. ET AL. **14 Bioplastics and Biofuel: Is it the Way in Future Development for End Users?** In: *Plastics to Energy: Fuel, Chemicals, and Sustainability Implications*, p. 365-376, 2018.

SAMBUICHI, R.H.R.; OLIVEIRA, M.A.; SILVA, A.P.M.; LUEDEMAN, G. **A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios**. IPEA, Texto para discussão, Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, A.B.A.; FAZION, C.B.; MEORE, G.P. **Inovação: um estudo sobre a evolução do conceito de Schumpeter**. Revista Puc, v.5, n.1, 2011.

SANTOS, E.A.; FERREIRA, G.B.; FERREIRA, G.; **Agricultura 4.0: estudo de sobre a eficiência da indústria 4.0 aplicada ao agronegócio**. Ciência e Tecnologia, v.15, n.1, 2023.

SANTOS, E.R et al., **Indústria 4.0 no agronegócio: análise da implementação no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) Universidade Anhembí Morumbi, 2022.

SCHUMPETER, J.A. **A teoria do desenvolvimento econômico**. São Paulo: Nova Cultural, 1988.

SILVA, A. **Em parceria com mais de 600 produtores, Bayer testa e desenvolve modelos de negócio para o agro**. Disponível em: <<https://www.canaonline.com.br/conteudo/em-parceria-com-mais-de-600-produtores-bayer-testa-e-desenvolve-novos-modelos-de-negocio-para-o-agro-.html>>. Acesso em: 18 out. 2024.

SILVA, G.J. **O Novo rural brasileiro**. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Economia, Campinas, 2002.

SILVA, G.J. Uma década perversa: as políticas agrícolas e agrárias nos anos 80. In: GRAZIANO DA SILVA, José. **A nova dinâmica da agricultura brasileira**. Campinas: UNICAMP: IE, 1996. p. 107-153.

SILVA, J. M. P.; CAVICHIOLI.; F. A. **O uso da agricultura 4.0 como perspectiva do aumento da produtividade no campo**. Revista Interface Tecnológica, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 616–629, 2020.

SILVA JÚNIOR, A.H.; RODRIGUES, E.F.; SIMÃO, L.; LOURENÇO, L.A.; OLIVEIRA, CES. **Agricultura 4.0: uma visão geral das inovações tecnológicas no aumento da produtividade agrícola**. Congresso Internacional de Agroindústria, 10 a 11 de Junho, Sociedade 5.0: Educação, Ciência, Tecnologia e amor. Recife. V Cointer PDVAgro 2020.

SOUZA FILHO, H.M de.; BUAINAIR, AM.; SILVEIRA, J.M.F.; VINHOLIS, M.M.B. **Condicionantes da adoção de inovações tecnológicas na agricultura**. Cadernos de Ciência e Tecnologia, Brasília, v.28, n.01, p. 223-255, 2011.

SYNGENTA. **Inteligência Artificial da Syngenta ajuda os produtores a aumentarem a produtividade em até 5% e transforma o manejo agrônomo**. Disponível em: <<https://www.syngenta.com.br/inteligencia-artificial-da-syngenta-ajuda-os-produtores-aumentarem-produtividade-em-ate-5-e>>. Acesso em: 29 out. 2024.

TILMAN, D. et al. **Global food demand and the sustainable intensification of agriculture**. PNAS, v. 108, n. 50, p. 20.260-20.264, 2011.

VILLAFUERTE, A. et al. **Agricultura 4.0: estudos de inovação disruptiva no agronegócio brasileiro**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECHNOLOGICAL INNOVATION, 9., Aracaju, 2018. Anais... Aracaju: Isti; Simtec, 2018.

VIOLA, E.; MENDES, V. **Agricultura 4.0: mudanças climáticas no Brasil**. Ambiente, Sociedade, 25, 2022.