

**DETERMINANTES DE ADOÇÃO DE TECNOLOGIA DE AGRICULTURA
DIGITAL POR PRODUTORES DE GRÃOS: UMA REVISÃO**
**FACTORS DETERMINING THE ADOPTION OF DIGITAL AGRICULTURE
TECHNOLOGY BY GRAIN PRODUCERS: A REVIEW**

Autor(es): Rodrigo Damasceno¹; Marcelo José Carrer²; Marcela de Mello Brandão Vinholis³; Andrea Lago da Silva²;

Filiação: 1. Mestrando em Engenharia de Produção na Universidade Federal de São Carlos (DEP – UFSCar), São Carlos, SP. 2. Docente no Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos (DEP – UFSCar), São Carlos, SP. 3. Pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste – São Carlos/SP.

E-mail: damascenorodrigo1993@gmail.com; marcelocarrer@dep.ufscar.br; marcela.vinholis@embrapa.br; deialago@ufscar.br.

Grupo de Trabalho (GT): <<12. Impactos socioambientais das novas tecnologias no agronegócio >>

Resumo

Este artigo tem como objetivo identificar as tecnologias de agricultura digital e os principais fatores determinantes para sua adoção na produção de grãos. Para tanto, foi realizada uma Revisão Sistemática de Literatura, resultando em 14 artigos para serem analisados. As tecnologias digitais encontradas foram classificadas em dois grandes grupos: (i) tecnologias digitais de apoio à gestão da propriedade e (ii) tecnologias digitais de apoio à produção no campo. As principais tecnologias de agricultura digital relacionadas à gestão de propriedade identificadas nos estudos revisados foram: Monitoramento da produção, Sensoriamento remoto, e o uso de internet móvel. As tecnologias de agricultura digital relacionadas à produção no campo foram amostragem georreferenciada de solo, aplicação de insumos a taxa variável, sistema de orientação de máquinas, agricultura de tráfego controlado, mecanização (tratores, rebocadores), sistema de plantio em fileiras, controles automáticos (principalmente GPS e barras de luz) e as tecnologias de irrigação com eficiência hídrica (gotejamento). As características da propriedade (tamanho, localização e posse da terra) e do proprietário (idade e anos de escolaridade), assim como a contratação de consultoria foram os principais fatores determinantes da adoção dessas tecnologias identificados nos estudos revisados. Esses resultados são importantes para auxiliar a tomada de decisão dos produtores rurais, criação de novas políticas públicas e também os desenvolvedores de tecnologias. Observou-se ainda que não há estudos sobre os determinantes e impactos da adoção de tecnologias digitais tendo como base microdados de produtores de soja no Brasil, o que indica um gap significativo de pesquisa.

Palavras-chave: Revisão Sistemática de Literatura; grãos; Agricultura 4.0; agricultura de precisão.

Abstract

This paper aims to identify the main digital agriculture technologies and the drivers for their adoption in grain production. To do so, a Systematic Literature Review was carried out, resulting in 14 articles to be analyzed. The main digital agriculture technologies related to property management: yield monitoring, remote sensing, and the use of mobile internet. Digital agriculture technologies related to field production were soil sampling, variable rate input application, machine guidance system, controlled traffic agriculture, mechanization (tractors, tugs), row planting system, automatic controls (GPS and light bars) and water-efficient irrigation technologies. The characteristics of the property (size, location and land ownership) and the owner (age and years of education), as well as the hiring of consultancy were the main factors mapped in this article. These results are important to help rural producers make decisions, create new public policies and also for technology developers. It was also observed that one of the main crops, soybeans, and one of the main producers, Brazil, did not develop studies on this topic.

Key words: Systematic Literature Review; grains; Agriculture 4.0; precision agriculture.

1. Introdução

O termo agricultura digital tem sido utilizado para descrever um conjunto de tecnologias digitais que possuem as finalidades de coletar, armazenar, integrar, processar e analisar um amplo volume de informações a respeito dos processos de produção, comercialização e organização da propriedade rural (TUMMERS et al., 2019); BARNES et al., 2019a; CARRER et al., 2022). A adoção dessas tecnologias, baseadas em big data, ciência de dados, computação em nuvem, sistemas de armazenamento e processamento de dados, automação dos processos de produção e uso de inteligência artificial, dá suporte para a otimização da alocação e uso dos fatores de produção aumentando, assim, a produtividade, a eficiência e a rentabilidade na produção de produtos agropecuários (CARRER et al., 2022; (MÜHL; DE OLIVEIRA, 2022)).

Outra terminologia bastante utilizada na literatura para descrever um conjunto de tecnologias pautadas na digitalização e otimização dos processos é agricultura de precisão. A agricultura de precisão é definida como uma estratégia de gestão que reúne, processa e analisa dados temporais, espaciais e individuais da propriedade, os combinando com outras informações para apoiar a tomada de decisões de gerenciamento e uso dos recursos da produção agropecuária (BALAFOUTIS et al., 2017; ISPA, 2021). Apesar de muitas vezes os termos “agricultura digital” e “agricultura de precisão” serem empregados como sinônimos, este estudo trata a agricultura de precisão como um subconjunto da agricultura digital.

O desenvolvimento das tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) tem dado suporte para os avanços da agricultura digital. Nesse sentido, estudos empíricos têm analisado o uso de smartphones como uma ferramenta para o acesso as informações coletadas no campo, preços de mercado, acesso a documentos importantes (MA et al., 2020; MICHELS et al., 2020), uso do smartphones para o compartilhamento de informações via aplicativos de mensagens (MENDES et al., 2023), o desenvolvimento de sensores sem fio para o monitoramento do campo e aplicativos utilizados para detecção e diagnóstico de doenças em plantas, cálculo de fertilizantes e observação georreferenciada ((OGUTU et al., 2014); MICHELS et al., 2020).

Ainda no âmbito das tecnologias da agricultura digital, existem outros estudos que analisaram sistemas integrados de informação de gestão agrícola (Farm Management Information System) e de planejamento de recursos empresariais no âmbito da produção rural (CARRER et al., 2015; CARRER et al., 2017; TUMMERS et al., 2019; JUNIOR et al., 2019; DE SOUZA FILHO et al., 2023). Esses estudos detalharam as ferramentas mais utilizadas no processo de coleta e análise de dados.

Existem ainda análises da adoção de tecnologias digitais que são utilizadas para melhorar a aplicação de insumos no processo produtivo, como sistemas de orientação automática (piloto automático) para tratores e colheitadeiras, amostragem de solo com gradação georreferenciada, aplicação de insumos (fertilizantes ou pesticidas) a taxa variada (BARNES et al., 2019a; CARRER et al., 2022; MOZAMBANI et al., 2023; GABRIEL; GANDORFER, 2023) e tecnologias de irrigação por gotejamento (ROSSI et al., 2020). A adoção dessas tecnologias tem sido justificada pela necessidade e adaptação da produção rural para fornecer alimentos para todo o mundo, garantindo a procedência, qualidade, segurança alimentar e ainda preservando o meio ambiente para o cumprimento de acordos internacionais.

Já existem revisões sistemáticas de literatura a respeito da adoção de tecnologias digitais sem especificar a atividade agrícola (SHANG et al., 2021; APARO et al., 2022; MÜHL; DE OLIVEIRA, 2022; MORENO et al., 2024; PAPADOPOULOS et al., 2024); ou específicas para um único tipo de tecnologia, como os sistemas de informação para gestão da propriedade (TUMMERS et al., 2019; GIUA et al., 2020) ou tecnologias de smartphones (APARO et al., 2022), ou em outros elos da cadeia de produção, como armazenagem (GOULART et al., 2024). Entretanto, revisões sistemáticas com o foco na produção de grãos, que é um pilar da economia

agrícola brasileira, e nos fatores determinantes para a adoção de tecnologias digitais não foi encontrada.

O Brasil é um dos principais produtores de grãos no mundo. A CONAB (2024) estimou que a produção brasileira de grãos será de 295,6 milhões toneladas de grãos na safra 2023/24, um volume total muito expressivo, mas 7,6% abaixo em comparação com a safra anterior (2022/2023). Ainda de acordo com CONAB (2024) isso pode ser explicado pelas instabilidades climáticas e outros fatores que reduziram em 7,14% a produtividade média (em kg/ha).

Ao projetar dados de produção e área plantada para os grãos no Brasil, MAPA (2023) estimou um aumento de 75 milhões de toneladas de grãos e 14,8 milhões de hectares entre os anos safra 2022/2023 e 2032/2033. Nesse contexto, a adoção e a difusão de tecnologias digitais pode ser um importante instrumento para aumentar a eficiência no uso dos fatores de produção e a produtividade dos grãos.

Portanto, este artigo tem como objetivo a identificação das principais tecnologias de Agricultura Digital e os determinantes para a sua adoção pelos produtores de grãos. Ademais, pretende-se também a proposição de um modelo analítico que contemple esses conjuntos de variáveis que afetam a adoção de tecnologias da agricultura digital. Para tanto, o artigo está estruturado em cinco capítulos, incluindo esta introdução. O capítulo 2 apresenta a metodologia utilizada para selecionar os artigos e apresentar os resultados e um modelo analítico, ainda em desenvolvimento, que contemple esses conjuntos de variáveis que afetam a adoção de tecnologias da agricultura digital. (capítulo 3). Os capítulos 4 e 5 apresentam, respectivamente, as discussões e considerações finais, incorporando as agendas futuras de pesquisa sobre os diferentes temas apresentados ao longo do artigo.

2. Metodologia

A revisão sistemática de literatura tem como objetivo definir uma rotina de pesquisa para a responder as perguntas de pesquisa de uma forma que seja possível sua replicação, pois os processos devem estar todos descritos (TRANFIELD ET AL., 2003; SNYDER, 2019).

Nesse sentido, as perguntas de pesquisa que norteiam o desenvolvimento da revisão são: (i) Quais são as tecnologias digitais adotadas por produtores de grãos? (ii) Quais são os fatores determinantes da adoção de tecnologias de Agricultura Digital por produtores de grãos?

Portanto, a string de busca foi construída a partir do desmembramento das perguntas de pesquisa e a utilização dos operadores booleanos para a busca nas duas principais bases de dados: Scopus e Web of Science.

Para tanto, foram utilizados sinônimos da palavra determinantes ("determin*" OR "factor*" OR "driver*" OR "enabler*" OR "predictor*"), sinônimos da palavra adoção ("use" OR "adopt*" OR "invest*" OR "diffus*" OR "transf*"). O termo referente às tecnologias de agricultura digital foi desmembrado em duas partes para unir os termos referentes as palavras agricultura e digital e seus sinônimos e o operador booleano de proximidade para que as palavras fossem buscadas no título resumo e palavra chave sem importar a ordem em que fossem encontradas (("digit*" OR "precision" OR "smart" OR "modern" OR "intelligent" OR "automat*" OR "4.0") W/0 ("agri*" OR "farm*" OR "rural" OR "crop*" OR "field crop*")).

O último termo da string contempla os produtores de grãos. A não inclusão de termos genéricos (como grains, cereal, seed) se deve ao fato de, por ser uma revisão que preconizava pelos papers que utilizassem pesquisas de campo e utilização de dados primários, esses termos genéricos poderiam resultar em Papers que estivessem fora do escopo. Sendo assim, foi incluído na string os termos ("cotton" OR "peanut" OR "rice" OR "bean" OR "sesame" OR "sunflower" OR "castor bean" OR "corn" OR "soy" OR "soybean" OR "sorghum" OR "oat" OR "canola" OR "rye" OR "barley" OR "wheat" OR "triticale"), tendo como base a lista de grãos da CONAB (2023). Essas quatro partes foram concatenadas com o operador booleano AND.

Tabela 1. Critérios de Inclusão e exclusão da RSL

Itens	Inclusão	Exclusão
Idioma	Inglês	Outros idiomas
Tipo de documento	Artigos revisados por pares	Literatura cinza e outros tipos (publicados em congresso, capítulo de livros)
Amostra	Utilização de dados a nível da propriedade rural	Revisão de literatura (artigos teóricos) e utilização de dados agregados
Objeto	Produtores de grãos	Outros elos da cadeia de produção e outras culturas
Abordagem	Análise dos fatores que influenciaram a adoção de uma determinada tecnologia de agricultura digital (ótica do produtor rural)	Análise da intenção de uso de tecnologias pelos produtores rurais (ótica da tecnologia a ser desenvolvida)
Escopo	Tecnologias de Agricultura Digital – pacotes de tecnologias de informação e comunicação que utilizam ferramentas (IoT, data Science) que coletam, armazenam e transmitem informações relevantes para a produção agrícola (BALAFOUTIS et al., 2017; CARRER et al., 2022)	Outras Práticas e tecnologias, como Climate Smart Agriculture

Fonte: Elaboração do autor

Os critérios relativos a idioma e tipo de documento, apresentado na Tabela 1, já foram aplicados nos filtros das próprias bases de dados consultadas (Web of Science e Scopus). A pesquisa em ambas as bases de dados foi realizada em 16 de novembro de 2023. Nessa etapa, foram encontrados 612 artigos na Scopus e 649 na Web of Science.

Esses arquivos foram inseridos no Parsifal para a identificação e exclusão de 393 artigos duplicados e, posteriormente, a realização do 1º filtro, que é a leitura do título, resumo e palavras-chave. Nessa etapa foram excluídos 828 artigos e, conseqüentemente, 40 artigos foram baixados na íntegra para a realização da próxima etapa. De acordo com os itens da Tabela 1, nesta etapa as exclusões foram realizadas, principalmente, pelos itens amostra, objeto e abordagem.

Na próxima etapa do protocolo, o 2º filtro, 6 artigos foram excluídos em função da amostra (utilização de dados secundários) e 1 (um) pelo fato do paper completo estar disponível apenas em português (apenas título, resumo e palavras-chave tinham a tradução para o inglês).

Ainda nesta etapa, 19 foram excluídos pelo item escopo (não apresentavam tecnologias de agricultura digital, mas sim climate smart Technologies).

A Figura 1 apresenta o protocolo PRISMA (Liberati et al., 2009; Moher et al., 2009) como uma síntese dos principais passos para a definição dos artigos selecionados para a análise descritiva e conteúdo.

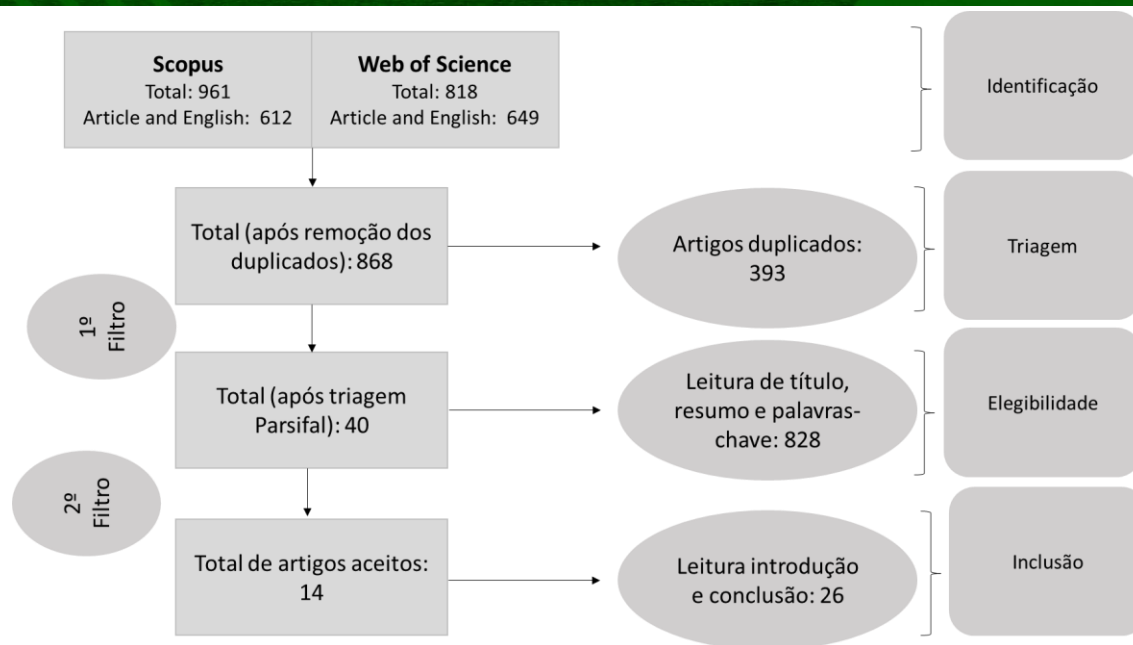


Figura 1. Protocolo PRISMA

Fonte: Elaboração do autor

3. Resultados

Este capítulo está dividido em duas partes: a primeira refere-se a análise de conteúdo dos 14 artigos selecionados, em relação a distribuição ao longo do tempo, dos países e das culturas em que as pesquisas foram realizadas. A segunda parte dos resultados contempla a identificação das principais tecnologias de agricultura digital e os seus respectivos determinantes para a adoção.

3.1. Análise Descritiva

A Figura 2 mostra os países em que os estudos foram realizados, com o destaque para os Estados Unidos, com 50% do total analisado. Já a Figura 3 apresenta o tipo de cultura que as pesquisas foram realizadas. Se não há uma menção explícita a cultura, optou-se por descrever como “crop farmers”, já que o paper em questão (Paustian & Theuvsen, 2017) tem como objetivo principal destacar custos de adoção das tecnologias digitais e não especificamente a análise de uma cultura.

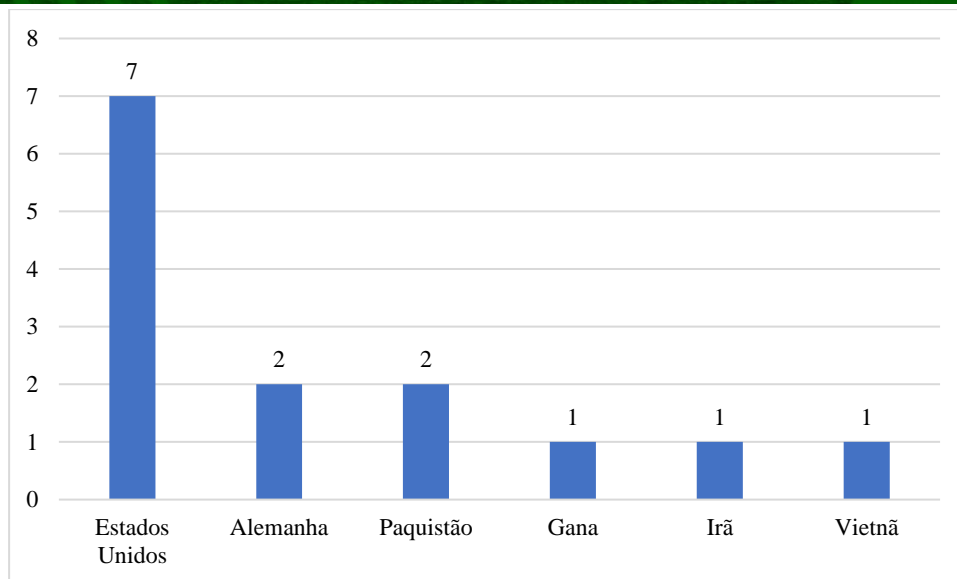


Figura 2. Distribuição dos artigos em relação aos países

Fonte: Elaboração do autor

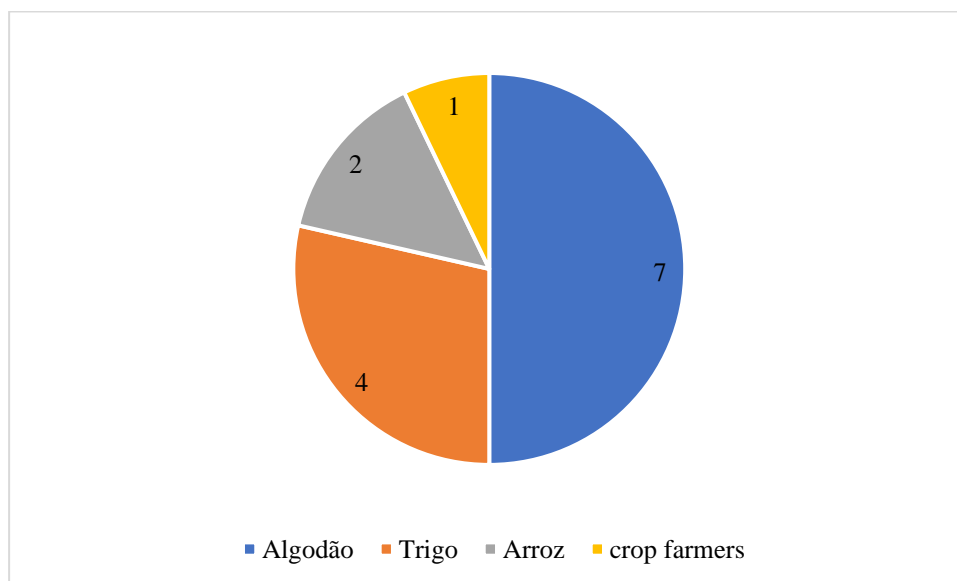


Figura 3. Tipos de culturas estudadas em cada artigo

Fonte: Elaboração do autor

Nota: O paper descrito como “crop farmers” não especifica uma única cultura analisada

A Tabela 2 destaca os periódicos que os artigos selecionados foram publicados e como o próprio nome já indica, a Precision Agriculture foi a única que teve mais de um artigo incluído na revisão, representando 35% do total.

Tabela 2. Distribuição dos artigos em relação aos journals publicados

Journals	Qtde artigos
Precision Agriculture	5
Agricultural And Resource Economics Review	1
Applied Sciences-Basel	1
Computers And Electronics In Agriculture	1
Environmental Science & Policy	1
Evaluation Review	1
International Journal Of Social Economics	1
Science Of The Total Environment	1
Sustainability	1
Water	1

Fonte: Elaboração do autor

A Figura 4 destaca a evolução ao longo dos anos, da publicação dos artigos, mostrando que houve um pico de publicação em 2022, mas que em todos os outros anos tiveram apenas uma única publicação sobre a temática dessa revisão.

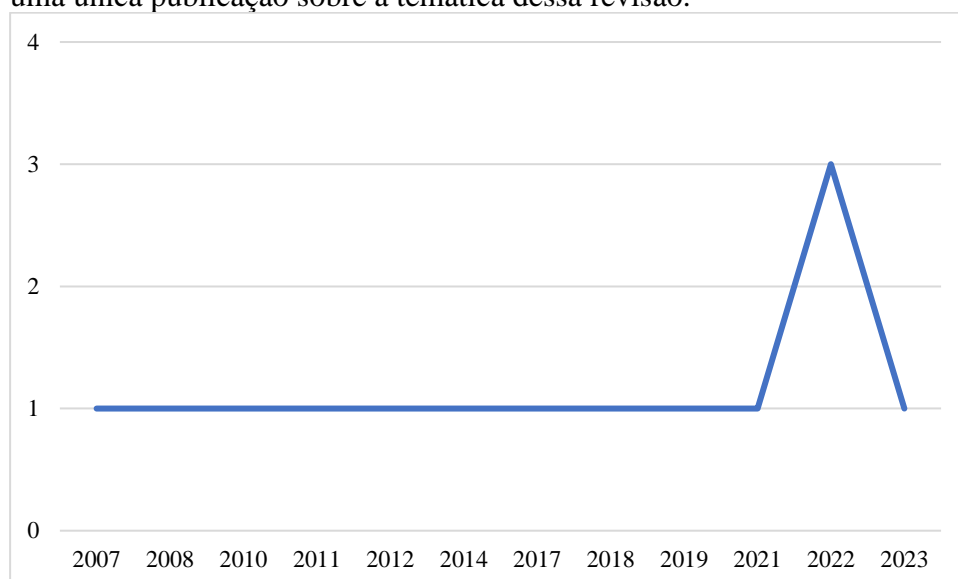


Figura 4. Distribuição dos artigos ao longo do tempo

Fonte: Elaboração do autor

A Figura 5 destaca as principais palavras-chave encontradas nos artigos. Na categoria outras, estão as palavras-chave que foram mencionadas apenas uma única vez, mas é interessante destacar algumas delas, por se tratar de metodologias para a realização da pesquisa (por exemplo, Binary logistic regression model, Multinomial logit estimation, Multivariate Tobit, Ordered logit, Probit) ou tecnologias específicas relacionadas a agricultura digital (Autosteer, GPS, Remote sensing, Satellite imagery, entre outras).

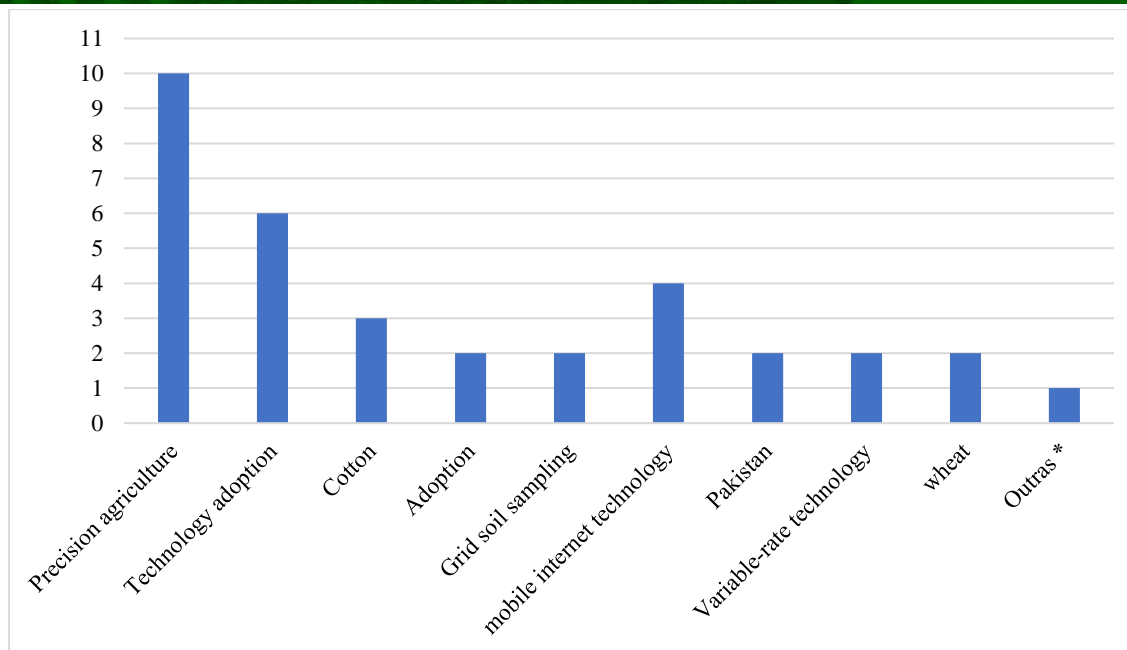


Figura 5. Total das principais palavras-chave encontradas nos artigos selecionados

Fonte: elaboração do autor

Nota: (*) 63 palavras-chave que tiveram apenas uma citação: Abandonment, Aerial imagery, Agricultural innovation, agricultural modernization, agricultural worker, agriculture, Article, Autosteer, Binary logistic regression model, climate change, Climate information, cooperatives, crop production, developing countries, Drought, Early warning system, Environmental risk, European, explanatory variable, Farmer organization, Farmers' perception, Fertilizer, GPS, health care policy, Heterogeneity, human, Information technology, Input cost saving, intensity, irrigation area allocation, irrigation technology, Multinomial logit estimation, multivariate fractional regression, Multivariate Tobit, negative binomial count data method, nonhuman, Ordered logit, Poisson, potato, precision agriculture technology, Precision farming, Precision farming technology, precision technologies, priority journal, Probit, productivity, propensity score matching, qualitative analysis, Recursive bivariate probit model, Remote sensing, rural, Satellite imagery, smart, smart agriculture, Socio-demographic factors, sustainable, sustainable agriculture, sustainable development goals, technology, Timing of adoption, unified theory of acceptance and use of technology, wheat productivity, Yield monitors.

Ao analisar a Figura 5, nota-se que Paquistão aparece duas vezes, com o mesmo autor principal, mas não são exatamente os mesmos autores, tendo em vista que um deles é Khan, Nawab and Ray, Ram L. and Kassem, Hazem S. and Zhang, Shemei (Khan, Ray, Kassem, & Zhang, 2022) e o outro é Khan, Nawab and Ray, Ram L. and Kassem, Hazem S. and Khan, Farhat Ullah and Ihtisham, Muhammad and Zhang, Shemei ((Khan, Ray, Kassem, Khan, et al., 2022).

3.2 Análise de Conteúdo

A Tabela 3 lista as tecnologias de agricultura digital encontradas nos artigos. Todas essas tecnologias podem ser classificadas em dois grandes grupos: gestão da produção e aplicação em campo. De forma geral, o primeiro grupo contempla tecnologias que coletam, organizam, analisam e oferecem dados para auxiliar o processo de tomada de decisão do produtor/administrador. Já o segundo grupo contempla tecnologias utilizadas para melhorar as operações e o uso dos fatores de produção nos processos operacionais da fazenda. Essa classificação está fundamentada em (MORENO et al., 2024)– que propôs uma classificação mais abrangente em oito grupos (automação/controle/robótica, biotecnologia/bioengenharia, tecnologias de computação em nuvem, aquisição de dados/tecnologias de comunicação, ciência dos dados/inteligência artificial, sistemas de informação, tecnologias/equipamentos de

fabricação e tecnologias relacionadas a recursos) e, especialmente, em (Balafoutis et al., 2017) – que estabeleceu uma classificação mais direta, referentes as tecnologias para aquisição de dados, análise de dados e aplicação de insumos.

Tabela 3. Mapeamento das tecnologias de agricultura digital

Tecnologias de Agricultura Digital	Codificação (*)	Autor(es)
Detecção de movimento	AD.C	TORBETT et al., 2007
Amostragem de solo	AD.C	TORBETT et al., 2007; WATCHARAANANTAPONG et al., 2014; WALTON et al., 2010; PAXTON et al., 2011
Aplicação de insumos a taxa variável	AD.C	TORBETT et al., 2007; BARNES et al., 2019b; LARSON et al., 2008
Sistema de orientação de máquinas	AD.C	BARNES et al., 2019b
Agricultura de tráfego controlado	AD.C	BARNES et al., 2019b
Mecanização (tratores, rebocadores)	AD.C	ADDAI et al., 2022
Sistema de plantio em fileiras	AD.C	ADDAI et al., 2022
Tecnologias de agricultura de precisão (termo genérico) **	AD.C	NGUYEN et al., 2023; PAUSTIAN; THEUVSEN, 2017
Controles automáticos – GPS ou lightbar	AD.C	D'ANTONI et al., 2012
Tecnologias de irrigação com eficiência hídrica	AD.C	POKHREL et al., 2018
Dispositivos portáteis GPS/PDA	AD.C	PAXTON et al., 2011
Monitoramento da produção	AD.G	TORBETT et al., 2007; WATCHARAANANTAPONG et al., 2014; PAXTON et al., 2011
Sensoriamento remoto	AD.G	TORBETT et al., 2007; WATCHARAANANTAPONG et al., 2014; LARSON et al., 2008
Imagem satélite / fotografias aéreas	AD.G	TORBETT et al., 2007; PAXTON et al., 2011
Mapeamento da topografia	AD.G	TORBETT et al., 2007
Mapeamento digitalizado da área	AD.G	PAXTON et al., 2011
Tec. Comunicação e Informação - Internet móvel	AD.G	KHAN et al., 2022a; KHAN et al., 2022b
Sistemas de alerta precoce (para seca)	AD.G	SHARAFI et al., 2021

Fonte: Elaboração do autor

Nota: (*) AD.C tecnologias de agricultura digital aplicadas no campo – e AD.G - tecnologias de agricultura digital para a gestão da propriedade

** Os autores não discriminaram quais tecnologias de agricultura de precisão foram analisadas. Portanto, optou-se por manter o termo de forma ampla.

Já os fatores determinantes das decisões de adoção dessas tecnologias foram agrupados em: biofísicos (características da fazenda/propriedade rural – FD.B), sociodemográficos (características do proprietário/ produtor rural – FD.D), comportamentais (características psicológicas e de personalidade dos indivíduos – FD.C), institucionais (características de apoio de órgãos públicos ou outras entidades – FD.I) e tecnológicos (características específicas dos produtores em relação a percepções sobre as tecnologias – FD.T) (SHANG et al., 2021) (APARO; ODONGO; DE STEUR, 2022). A

Tabela 4 apresenta a classificação dos determinantes encontrados nos estudos analisados.

Tabela 4. Identificação e codificação dos determinantes para a adoção de tecnologia de agricultura digital

DETERMINANTES	QTDE	CODIFICAÇÃO
distância para a estrada	1	FD.B
área plantada	1	
diversificação da produção	3	
fatores externos	1	
localização da propriedade	6	
distância dos recursos hídricos	1	
posse de terra	5	
mão de obra na propriedade (sem empregados familiares têm uma probabilidade significativamente maior de adotarem o AP)	1	
número de máquinas agrícolas	1	
porção da terra irrigada na propriedade	1	
tamanho da propriedade	5	
aversão ao risco	1	FD.C.
relação/interação entre produtores	1	
percepção de potencial melhora na qualidade ambiental	1	
percepções sobre lucros atuais e importância futura das tecnologias	1	FD.D.
anos de escolaridade/educação	8	
anos de experiência	1	
Gênero	4	
idade do proprietário	7	FD.I.
renda familiar	3	
acesso ao crédito	1	
Consultoria	5	
participação em cooperativas	3	
serviço de extensão agrícola	1	FD.T
Treinamento	2	
percepção da importância da tecnologia	1	
percepção do desempenho da tecnologia	1	
percepção da facilidade do uso	1	
expectativa de lucro futuro	1	
percepção da importância em utilizar informação climática	1	
apoio de empresas privadas	1	
uso de computador	4	
uso de GPS portátil - Personal Digital Assistant (PDA)	1	
uso de mapas e informações geradas por terceiros (distribuidor, revendedor)	1	

Fonte: Elaboração do autor

Os dois determinantes mais analisados nos estudos sobre adoção de tecnologia por produtores de grãos são referentes às características do produtor, em especial a idade e o nível educacional (ou anos de escolaridade), tendo sido mencionados em oito estudos. A idade apresentou efeito negativo na maioria dos estudos revisados. Isto é, quanto maior a idade do produtor, menor é a probabilidade de adoção das tecnologias digitais na produção de grãos. As principais explicações para este resultado são que produtores rurais com idade mais avançada tendem a ser mais conservadores em sua tomada de decisão e apresentam maiores aversões a riscos, principalmente para a adoção de tecnologias que não estão habituados e/ou que exigem tempo de adaptação e aprendizagem.

Já os fatores relacionados a propriedade rural (FD.B) mais relevantes foram a localização da propriedade (seis citações), seguidos do tamanho e a posse das terras agricultáveis, ambos com cinco estudos que constaram serem variáveis relevantes para determinar a adoção de tecnologia digital.

Ao relacionar as principais tecnologias de agricultura digital encontradas com os seus respectivos determinantes, nota-se que os principais determinantes para a aplicação de insumos a taxa variável são a consultoria (contratação de serviços agrícolas para auxiliar o produtor) e o tipo de mão de obra empregada na propriedade. No caso específico apresentado por (Torbett et al., 2007), as propriedades sem empregados familiares têm uma probabilidade significativamente maior de adotarem a aplicação de insumos a taxa variável como uma ferramenta da agricultura de precisão. A principal explicação para o resultado é de que..... Larson et al. (2008) também identificaram a consultoria como um determinante para a adoção de sensoriamento remoto como finalidade de aplicação de insumos a taxa variável, mas os autores citam especificamente a contratação de serviços para a geração de mapas a partir dos dados de sensoriamento remoto para otimizar a aplicação de insumos. Portanto, trata-se de um serviço específico para melhorar o uso da própria tecnologia. Os autores também constataram que produtores que utilizam computadores portáteis (para a consulta dos mapas), são mais jovens, com maior grau de escolaridade e que geram seus próprios mapas apresentam probabilidade maior em adotar essa tecnologia.

Quatro autores (BARNES ET AL., 2019; NGUYEN ET AL., 2023; PAXTON ET AL., 2011; PAUSTIAN & THEUVSEN, 2017) mencionam, em linhas gerais, tecnologias de agricultura de precisão, com abordagens distintas entre si. Barnes et al., 2019 compararam entre cinco países da Europa os adotantes e não adotantes de tecnologias de agricultura de precisão. Os autores observaram que o tamanho da propriedade e a renda são variáveis que explicam a adoção em um primeiro momento, mas essas variáveis não são significantes quando se pretende analisar a intensidade de adoção (considerando apenas os adotantes). Por outro lado, o nível educacional, a realização de treinamento com funcionários e a contratação de consultorias são fatores que explicam a adoção de tecnologias de agricultura de precisão, bem como a intensidade de uso dessas tecnologias.

Nguyen et al., 2023 analisaram os fatores que influenciam a intenção comportamental dos pequenos produtores de arroz vietnamitas de adotar a tecnologia de agricultura de precisão através de uma avaliação qualitativa das opiniões e perspectivas dos agricultores. Constatou-se que o apoio de empresas privadas, a participação do produtor em cooperativas, a relação e interação entre os produtores locais, o apoio governamental e as percepções dos produtores em relação aos benefícios e a facilidade de uso das tecnologias foram os principais determinantes que explicaram a adoção.

As variáveis relacionadas às características do proprietário, como idade e educação foram abordadas pelos outros autores. Enquanto (Paxton et al., 2011) constatou que a idade é um fator que explica a adoção dos produtores de algodão nos Estados Unidos, pois agricultores mais velhos são menos propensos a adotar novas tecnologias devido a um menor retorno esperado de um horizonte de planejamento mais curto, (Paustian & Theuvsen, 2017) conclui que a idade não foi um fator que explicou a adoção de tecnologias de agricultura de precisão na Alemanha.

Em contrapartida, mesmo sendo realizado em países diferentes, ao definir a variável localização da propriedade (como estados em seus respectivos países), ambos os autores concluíram que essa variável está positivamente relacionada com a adoção de tecnologias de agricultura de precisão. De forma geral, propriedades rurais localizadas em regiões com maior produção de grãos e/ou com melhor infraestrutura para comercialização da produção são mais propensas à adoção de tecnologias digitais.

Devido a maior concentração de fornecedores em determinadas regiões da Alemanha, Paustian & Theuvsen (2017) identificaram que a variável localização (classificada como o estado em que a propriedade rural está localizada) apresentou resultados significativos em termos de adoção de tecnologias de agricultura de precisão.

Por sua vez, Paxton et al., (2011) definiram a localização como uma variável dummy (se estava ou não localizada em determinado estado dos Estados Unidos) e identificaram um impacto significativo em relação ao número de tecnologias de agricultura de precisão adotadas. Como ressaltado pelos próprios autores, a análise dos resultados evidenciou que outros fatores aliados a localização da propriedade, como a idade e a escolaridade média dos produtores nos diferentes estados, assim como as características do clima e do solo também explicam a relevância da variável localização.

Neste caso, os autores não especificaram as tecnologias de agricultura de precisão pois o objeto de estudo é a intensidade da adoção, ou seja, quantas tecnologias os produtores adotam e não analisar especificamente um tipo de tecnologia de agricultura de precisão específica. Especificamente para a amostragem de solo em grade, ambos os estudos revisados identificaram que produtores mais jovens e que tenham a posse da terra têm maior probabilidade de adoção (Watcharaanantapong et al., 2014) e (Walton et al., 2010). Esses estudos também apresentam outros fatores que afetam positivamente a adoção dessa tecnologia, como contratação de consultoria, a percepção sobre a melhora da qualidade ambiental (Watcharaanantapong et al., 2014), a área destinada a produção da cultura analisada (no caso ambos os estudos foram realizados para o algodão nos Estados Unidos), a diversificação da produção, o uso de computador e de GPS portátil (Walton et al., 2010).

Outras tecnologias estudadas por (Watcharaanantapong et al., 2014) foram o Monitoramento da produção, cujos principais determinantes foram a idade do produtor e a percepção de melhora na qualidade ambiental e o Sensoriamento remoto, que também teve como determinante essa percepção de melhora, assim como a contratação de consultoria especializada.

Ambos os autores que estudaram a adoção de tecnologias de internet móvel tiveram como base a produção de trigo no Paquistão. As propriedades que apresentaram maior área e cujos produtores tinham um nível de escolaridade maior foram as mais propensas a adotar as tecnologias de internet móvel ((Khan, Ray, Kassem, Khan, et al., 2022) e (Khan, Ray, Kassem, & Zhang, 2022). Outros fatores que explicaram a adoção de tecnologia de internet móvel foram acesso ao crédito, participação em cooperativas e serviços e extensão rural ((Khan, Ray, Kassem, Khan, et al., 2022). Khan, Ray, Kassem, & Zhang, 2022 também identificaram que agricultores mais jovens, que compreendem o nível de risco da atividade agrícola e a variável de localização da propriedade também explicam a adoção da tecnologia ((.

Porém, a variável conflitante nesses estudos é o gênero do proprietário. Enquanto (Khan, Ray, Kassem, Khan, et al., 2022) aponta que famílias chefiadas por mulheres têm menores probabilidade de adoção (ou seja, a variável gênero contribui para explicar a adoção de tecnologia), o outro estudo diz que a variável gênero não é estatisticamente significativa para a adoção da tecnologia ((Khan, Ray, Kassem, & Zhang, 2022).

Os fatores que afetam positivamente a adoção das Máquinas e plantio em linha (Machinery and row planting) são o gênero (homens têm maior probabilidade de adotar), e a participação em cooperativas e organização de produtores. Por sua vez, a escolaridade do proprietário, e o tamanho e a localização da propriedade apresentaram relação negativa com a adoção dessas tecnologias (Addai et al., 2022).

Os fatores que afetam positivamente a adoção do Piloto automático (tecnologias lighbar e GPS) são o tamanho da propriedade e a utilização de computadores, tendo em vista que quanto maior a propriedade maior é a necessidade de se automatizar os processos e o uso de

equipamentos específicos no manuseio de piloto automático é essencial para a automatização. Por outro lado, a idade do operador está negativamente relacionada com a adoção da tecnologia, ou seja, operadores mais velhos tendem a rejeitar essa tecnologia (D'Antoni et al., 2012).

(Sharafi et al., 2021) apresentam uma abordagem diferente em relação aos determinantes para a adoção de Sistema de alerta precoce a seca. Não há uma especificação, mas os fatores pessoais e traços de personalidade, assim como fatores agrícolas externos e físicos (características da propriedade, características climáticas e de relevo e solo) e a percepção dos produtores sobre a importância de se utilizar dados climáticos para a produção rural são os fatores que explicam a adoção de sistemas de alertas na propriedade rural.

A última tecnologia encontrada nos estudos revisados foi a Irrigação por gotejamento, cujos fatores biofísicos (localização da propriedade e área da terra irrigada) e sociodemográficos (nível educacional e a posse da terra), além do uso de computadores, estão positivamente relacionados com a adoção desse tipo de tecnologia (Pokhrel et al., 2018). A Figura 6 apresenta o modelo analítico proposto a partir da revisão dos estudos, sintetizando os principais fatores determinantes com as tecnologias de agricultura digital.

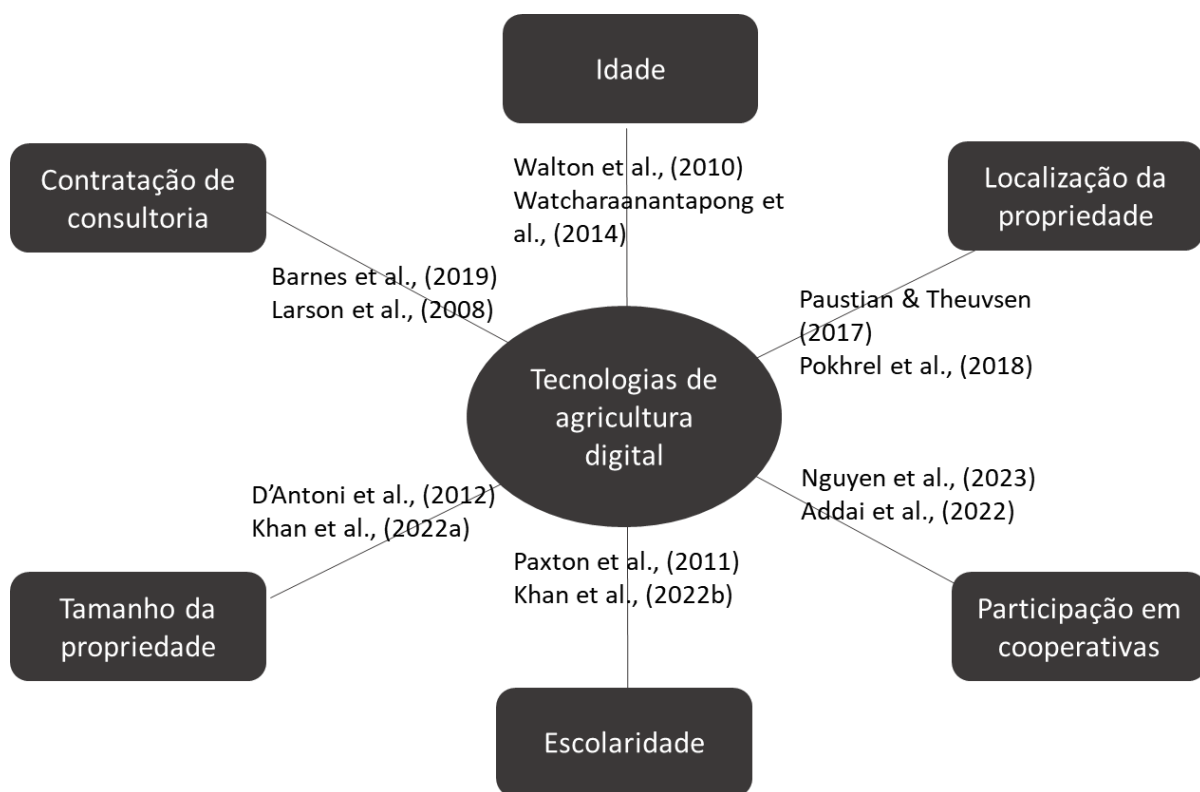


Figura 6. Síntese dos principais determinantes para a adoção de tecnologia de agricultura digital

Fonte: Elaboração dos autores

As três categorias mais relevantes para os determinantes de adoção das tecnologias digitais na produção de grãos foram os fatores biofísicos, demográficos e institucionais. Ou seja, os principais fatores de adoção das tecnologias digitais nos artigos analisados foram as características da propriedade rural (localização e o tamanho da propriedade), as características do proprietário (idade e nível de escolaridade) e a contratação de serviços de consultoria e participação em cooperativas agrícolas ou outra organização de produtores rurais, classificadas como fatores institucionais.

4. Discussão

Como pode ser visto na lista de palavras-chave, existem diversas abordagens para a realização desses estudos referentes a adoção de tecnologias digitais (modelos de regressão logística binomial, multinomial, modelo Poisson, entre outros). As variáveis utilizadas e as formas de interpretação dos resultados podem variar. Ou seja, alguns estudos analisam os fatores que explicam a adoção de determinada tecnologia enquanto que outros apontam também os fatores que não deram resultados significativos na modelagem proposta. Essas diferenças de abordagem estão ilustradas na Tabela 5, onde observa-se que os quadros em verde indicam os fatores positivamente relacionados com a adoção da tecnologia, em vermelho são os fatores que estão negativamente relacionados com a adoção da tecnologia (ao olhar dos autores, podem ser entendidos como eventuais barreiras para a adoção).

Há de se destacar ainda que existe a possibilidade de a abordagem metodológica escolhida pelos autores não responder a uma pergunta em questão, ou seja, não é possível fazer nenhum tipo de inferência sobre os determinantes para a adoção da tecnologia, mas esses casos específicos foram excluídos dessa análise.

Este artigo teve como foco a identificação das tecnologias específicas de agricultura digital. Entretanto, ao analisar Papers excluídos, observou-se que, para os produtores de grãos, artigos trataram das tecnologias climate smart – que pode ser entendido tanto como uma tecnologia (sementes modificadas, por exemplo) quanto práticas que visam a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (sistema de plantio direto, integração lavoura-pecuária-floresta, por exemplo). Nesse sentido, é importante a ampliação do escopo dessas tecnologias e práticas que visam a melhor utilização de recursos naturais e redução dos níveis de poluição.

Ao identificar as tecnologias de agricultura digital, nota-se que os dois grandes grupos – de gestão e de campo – estão interligados, os dados coletados no campo devem ser analisados por softwares e aplicativos classificados como gestão de propriedade. Isso é ilustrado pelo fato de incluir o uso de computador como um determinante para a adoção piloto automático (D’Antoni et al., 2012), amostragem de solo (Walton et al., 2010), tecnologia de irrigação por gotejamento (Pokhrel et al., 2018) e agricultura de precisão (Paxton et al., 2011).

Nesse sentido, é fundamental que sejam realizados estudos específicos sobre as complementariedades e integração dessas diferentes tecnologias, assim como as possíveis dependências e inter-relações das diferentes tecnologias e dos diferentes níveis tecnológicos.

5. Considerações Finais

Por meio de uma revisão sistemática de literatura, este artigo identificou as principais tecnologias de agricultura digital adotadas (e analisadas) na produção de grãos, como aplicação de insumos a taxa variável, amostragem de solo em grade, monitoramento da produção, sensoriamento remoto e tecnologia de internet móvel, assim como seus fatores mais relevantes para determinar a adoção.

Os fatores determinantes mais recorrentes nesses estudos, como idade e escolaridade do proprietário (características do proprietário), localização, tamanho da propriedade e posse da terra (características da propriedade rural) e a contratação de consultoria reforçam que a adoção de tecnologias de agricultura digital depende de fatores de diferentes naturezas, em especial de características econômicas e sociais. Políticas públicas e estratégias para a maior difusão dessas tecnologias devem considerar esses fatores. Além disso, estudos que avaliem como a adoção de tecnologia digital afeta a produtividade e os resultados econômicos da fazenda são relevantes.

Observou-se que os Estados Unidos foram o país com o maior número de estudos, muito por conta da sua base de dados já consolidada para determinados grãos. Entretanto, observou-se que o Brasil, um dos principais players desse mercado em termos globais, não teve

nenhum artigo selecionado. Uma possível explicação é o fato de os trabalhos não terem sido publicados em inglês (critério de exclusão da revisão) ou pela enorme dificuldade para a obtenção de microdados de produtores rurais no país.

Além disso, a difusão dessas tecnologias na produção de soja, uma das principais commodities produzidas no Brasil, ainda parece enfrentar consideráveis obstáculos. Assim, é importante que sejam desenvolvidas pesquisas a esse respeito para mapear as tecnologias de agricultura digital utilizadas na produção de soja no Brasil (em especial, no estado de São Paulo) e identificar quais são os determinantes para a sua adoção.

Agradecimentos

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Fapesp (Processo: 2023/14459-7 – bolsa de mestrado e Processo: 2022/02967-5: vinculado ao projeto de auxílio).

Referências bibliográficas

ADDAI, K. N.; TEMOSO, O.; NG'OMBE, J. N. Participation in farmer organizations and adoption of farming technologies among rice farmers in Ghana. **International Journal of Social Economics**, v. 49, n. 4, p. 529–545, 10 mar. 2022.

APARO, N. O.; ODONGO, W.; DE STEUR, H. Unraveling heterogeneity in farmer's adoption of mobile phone technologies: A systematic review. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 185, p. 122048, dez. 2022.

BALAFOUTIS, A.T., BECK, B., FOUNTAS, S., TSIROPOULOS, Z., VANGEYTE, J., VAN DER WAL, T., Smart farming technologies -description, taxonomy and economic impact. In: Pedersen, S., Lind, K. (Eds.), **Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives**. Progress in Precision Agriculture. Springer, Cham, pp. 21–77, 2017

BARNES, A. P. et al. Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. **Land Use Policy**, v. 80, p. 163–174, jan. 2019a.

BARNES, A. P. et al. Influencing incentives for precision agricultural technologies within European arable farming systems. **Environmental Science & Policy**, v. 93, p. 66–74, mar. 2019b.

CARRER, M. J. et al. Farm Management Information Systems (FMIS) and technical efficiency: An analysis of citrus farms in Brazil. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 119, p. 105–111, nov. 2015.

CARRER, M. J. et al. Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 177, p. 121510, abr. 2022.

CARRER, M. J.; DE SOUZA FILHO, H. M.; BATALHA, M. O. Factors influencing the adoption of Farm Management Information Systems (FMIS) by Brazilian citrus farmers. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 138, p. 11–19, jun. 2017.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 11, n. 6º Levantamento, safra 2023/24. Março/2024.

D'ANTONI, J. M.; MISHRA, A. K.; JOO, H. Farmers' perception of precision technology: The case of autosteer adoption by cotton farmers. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 87, p. 121–128, set. 2012.

DE SOUZA FILHO, H. M. et al. Adoption of farm management information systems (FMIS): The case of Brazilian sugarcane farmers. **Information Development**, p. 026666692311778, 29 maio 2023.

GABRIEL, A.; GANDORFER, M. Adoption of digital technologies in agriculture—an inventory in a european small-scale farming region. **Precision Agriculture**, v. 24, n. 1, p. 68–91, fev. 2023.

GOULART, D. F.; BATALHA, M. O.; CARRER, M. J. The predictors driving farmers' decision on drying and storage technology adoption. **Journal of Stored Products Research**, v. 105, p. 102216, fev. 2024.

ISPA. International Society of Precision Agriculture. 2021. Disponível em: <<https://www.ispag.org/>>. Acesso em 03/04/2024.

JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, T.; YANAZE, M. The adoption stages (Evaluation, Adoption, and Routinisation) of ERP systems with business analytics functionality in the context of farms. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 156, p. 334–348, jan. 2019.

KHAN, N. et al. Mobile Internet Technology Adoption for Sustainable Agriculture: Evidence from Wheat Farmers. **Applied Sciences**, v. 12, n. 10, p. 4902, 12 maio 2022a.

KHAN, N. et al. Does the Adoption of Mobile Internet Technology Promote Wheat Productivity? Evidence from Rural Farmers. **Sustainability**, v. 14, n. 13, p. 7614, 22 jun. 2022b.

LARSON, J. A. et al. Factors affecting farmer adoption of remotely sensed imagery for precision management in cotton production. **Precision Agriculture**, v. 9, n. 4, p. 195–208, ago. 2008.

LIBERATI, A. et al. **The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions**: Explanation and Elaboration. 2009.

MA, W.; GRAFTON, R. Q.; RENWICK, A. Smartphone use and income growth in rural China: empirical results and policy implications. **Electronic Commerce Research**, v. 20, n. 4, p. 713–736, dez. 2020.

MAPA. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2022/23 a 2032/33 - Projeções de Longo Prazo**. Brasília/DF. 2023.

MENDES, J. D. J. et al. Adoption and impacts of messaging applications and participation in agricultural information-sharing groups: an empirical analysis with Brazilian farmers. **Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies**, 4 jan. 2023.

MICHELS, M. et al. Smartphone adoption and use in agriculture: empirical evidence from Germany. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 2, p. 403–425, abr. 2020.

MOHER, D. et al. **Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement.** 2009.

MORENO, J. C. et al. A pending task for the digitalisation of agriculture: A general framework for technologies classification in agriculture. **Agricultural Systems**, v. 213, p. 103794, jan. 2024.

MOZAMBANI, C. I. et al. Adoption of precision agriculture technologies by sugarcane farmers in the state of São Paulo, Brazil. **Precision Agriculture**, v. 24, n. 5, p. 1813–1835, out. 2023.

MÜHL, D. D.; DE OLIVEIRA, L. A bibliometric and thematic approach to agriculture 4.0. **Heliyon**, v. 8, n. 5, p. e09369, maio 2022.

NGUYEN, L. L. H. et al. Factors That Influence the Intention of Smallholder Rice Farmers to Adopt Cleaner Production Practices: An Empirical Study of Precision Agriculture Adoption. **Evaluation Review**, p. 0193841X231200775, 7 set. 2023.

OGUTU, S. O.; OKELLO, J. J.; OTIENO, D. J. Impact of Information and Communication Technology-Based Market Information Services on Smallholder Farm Input Use and Productivity: The Case of Kenya. **World Development**, v. 64, p. 311–321, dez. 2014.

PAPADOPOULOS, G. et al. Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: A review. **Smart Agricultural Technology**, v. 8, p. 100441, ago. 2024.

PAUSTIAN, M.; THEUVSEN, L. Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 5, p. 701–716, out. 2017.

PAXTON, K. W. et al. Intensity of Precision Agriculture Technology Adoption by Cotton Producers. **Agricultural and Resource Economics Review**, v. 40, n. 1, p. 133–144, abr. 2011.

POKHREL, B.; PAUDEL, K.; SEGARRA, E. Factors Affecting the Choice, Intensity, and Allocation of Irrigation Technologies by U.S. Cotton Farmers. **Water**, v. 10, n. 6, p. 706, 30 maio 2018.

ROSSI, F. R. et al. The role of contracts in the adoption of irrigation by Brazilian orange growers. **Agricultural Water Management**, v. 233, p. 106078, abr. 2020.

SHANG, L. et al. Adoption and diffusion of digital farming technologies - integrating farm-level evidence and system interaction. **Agricultural Systems**, v. 190, p. 103074, maio 2021.

SHARAFI, L. et al. Farmers' decision to use drought early warning system in developing countries. **Science of The Total Environment**, v. 758, p. 142761, mar. 2021.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 104, p. 333–339, nov. 2019.

TORBETT, J. C. et al. Perceived importance of precision farming technologies in improving phosphorus and potassium efficiency in cotton production. **Precision Agriculture**, v. 8, n. 3, p. 127–137, jun. 2007.

TUMMERS, J.; KASSAHUN, A.; TEKINERDOGAN, B. Obstacles and features of Farm Management Information Systems: A systematic literature review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 189–204, fev. 2019.

WALTON, J. C. et al. Grid soil sampling adoption and abandonment in cotton production. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 2, p. 135–147, abr. 2010.

WATCHARAANANTAPONG, P. et al. Timing of precision agriculture technology adoption in US cotton production. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 4, p. 427–446, ago. 2014.