

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE OS FATORES SOCIOECONÔMICOS E A ADOÇÃO DA AGRICULTURA DE PRECISÃO

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN SOCIOECONOMIC FACTORS AND THE ADOPTION OF PRECISION AGRICULTURE

Keilla Gomes Borges

Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Agronegócios da Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD
keillagb@gmail.com

Roselaine Bonfim de Almeida

Professora do Programa de Pós-graduação em Agronegócios da Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD
roselainealmeida@ufgd.edu.br

Jonathan Gonçalves da Silva

Professor do Programa de Pós-graduação em Agronegócios da Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD
jonathandasilva@ufgd.edu.br

Grupo de Trabalho (GT): GT12. Impactos socioambientais das novas tecnologias no agronegócio

Resumo

A agricultura de precisão rompeu paradigmas na agricultura, marcando a transição da agricultura tradicional para a agricultura moderna. A adoção da agricultura de precisão contribuiu para que o produtor deixasse de analisar a sua propriedade como uma unidade e passasse a analisá-la, mais precisamente, por partes. A adoção da agricultura de precisão traz benefícios em termos de eficiência, eficácia e sustentabilidade para o agronegócio. Todavia, a adoção tecnológica é desafiadora, especialmente em países em desenvolvimento, como o Brasil. Aspectos socioeconômicos, como altos custos, baixa escolaridade e a idade dos produtores rurais, têm uma importante relação com a adoção tecnológica. Esses aspectos tornam-se barreiras importantes para a incorporação igualitária das tecnologias no campo. Dessa forma, o objetivo deste artigo é apontar a relação entre os fatores socioeconômicos – idade, renda e educação – e a adoção da agricultura de precisão pelos produtores rurais brasileiros. A metodologia adotada é a regressão logística com dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) de 2015. Os resultados evidenciaram que a idade é estatisticamente significativa e tem um efeito negativo. A variável renda, apesar de ser estatisticamente significativa a um nível de 5%, tem um impacto muito pequeno na adoção da agricultura de precisão. A variável educação foi a mais relevante no modelo, com efeito positivo sobre a adoção da agricultura de precisão. Isso indica que níveis mais elevados de escolaridade estão fortemente associados a um maior acesso às tecnologias.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Desigualdade; Fatores Socioeconômicos; Logit; Pnad.

Abstract

Precision agriculture has broken paradigms in agriculture, marking the transition from traditional to modern farming. The adoption of precision agriculture has shifted the producer's perspective from analyzing their property as a single unit to examining it more precisely in parts. This adoption brings benefits in terms of efficiency, effectiveness, and sustainability for agribusiness. However, technological adoption is challenging, especially in developing countries such as Brazil. Socioeconomic factors, including high costs, low education levels, and the age of rural producers, play a crucial role in technological adoption. These factors create significant barriers to the equitable incorporation of technologies in the field. This article aims to identify the relationship between socioeconomic factors—age, income, and education—and the adoption of precision agriculture by Brazilian rural producers. The methodology employed is logistic regression using data from the 2015 National Household Sample Survey (PNAD). The results show that age is statistically significant and has a negative effect. The income variable, although statistically significant at a 5% level, has a very small impact on the adoption of precision agriculture, according to the proposed model. The education variable was the most relevant in the model, with a positive effect on the adoption of precision agriculture. This indicates that higher education levels are strongly associated with greater access to technologies.

Key words: Precision agriculture; Inequality; Socioeconomic Factors; Logit; PNAD.

1. Introdução

A crescente demanda mundial por alimentos, ocasionada pelo crescimento populacional global, exige o aumento da oferta desses produtos (Pereira; Castro, 2022). Para atender essa demanda é necessário expandir a produção agrícola, mas sem deixar de lado a proteção ao meio ambiente. Para isso, é necessário que os processos produtivos sejam cada vez mais eficientes, tanto em produtividade quanto em custos (Pereira; Castro, 2022; Vasconcelos; Mendes, 2023). A adoção de tecnologias na agricultura desempenha um papel fundamental para enfrentar esse desafio mundial (Vasconcelos; Mendes, 2023).

A evolução tecnológica na agricultura remonta a períodos históricos antigos e progrediu desde o uso das ferramentas manuais até a atual era digital (Shepherd et al., 2018; Karunathilake et al., 2023). Nesse contexto de inserção tecnológica na agricultura, em 1980, surgiu a agricultura de precisão, marcando uma mudança significativa nas práticas agrícolas (Shepherd et al., 2018). A agricultura de precisão difere da tradicional ao tratar pequenas áreas dentro de um campo, em vez de considerar a área como uma unidade única (Tschiedel; Ferreira, 2002), combinando ciência da computação e tecnologia da informação para melhorar a qualidade e eficiência dos processos agrícolas (Bhatnagar; Poonia; Sunda, 2019).

A agricultura de precisão tem como objetivo fornecer ferramentas e informações precisas para otimizar o manejo dos recursos agrícolas, visando aumentar a produtividade, reduzir custos e minimizar impactos ambientais. Essa estratégia trouxe avanços nos aspectos de eficiência, produtividade e sustentabilidade na agricultura (Pathak; Brown; Best, 2019). A evolução da agricultura de precisão levou à digitalização agrícola, integrando tecnologias como Internet das Coisas (IoT), *Big data* e inteligência artificial (IA). Essas tecnologias avançadas foram incorporadas à agricultura para superar desafios socioeconômicos e tecnológicos, resultando na transição da agricultura de precisão para a Agricultura 4.0 (Karunathilake et al., 2023).

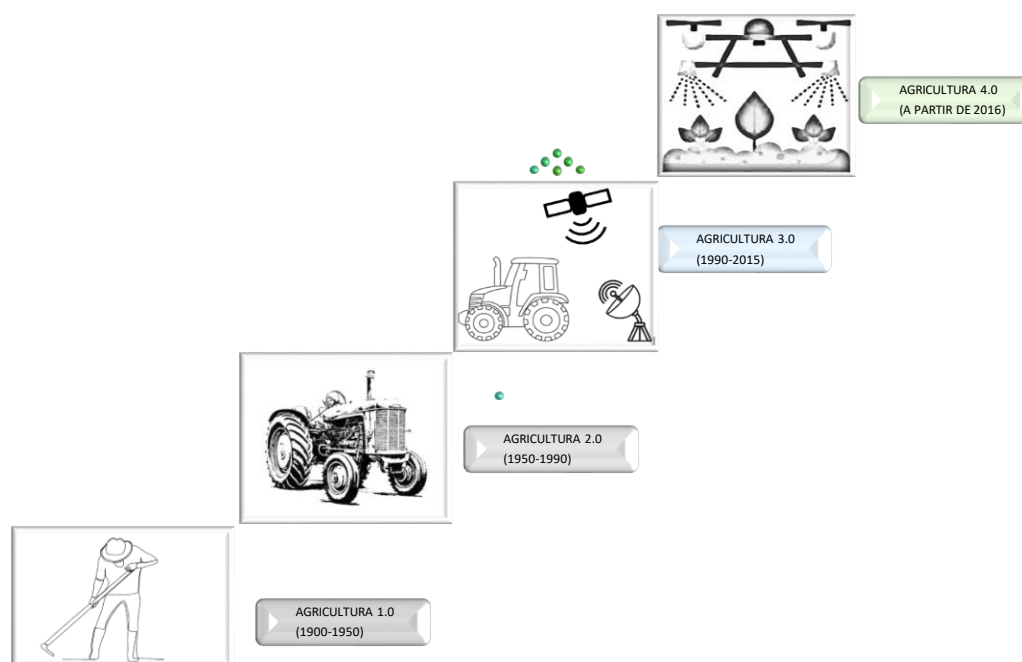
As tecnologias são cada vez mais comuns na agricultura, todavia os produtores rurais de países em desenvolvimento, como o Brasil, enfrentam barreiras significativas para sua adoção (Da Silveira; Lermen; Amaral, 2021). Entre elas estão as barreiras socioeconômicas, como custos elevados e baixo nível educacional (Bolfe et al., 2020; Souza et al., 2020; Buainain; Cavalcante; Consoline, 2021; Da Silveira; Lermen; Amaral, 2021; Mendes et al., 2023). Diante desse cenário, este estudo busca analisar a relação entre os fatores socioeconômicos – idade, renda e educação – e a adoção da agricultura de precisão pelos produtores rurais brasileiros, por meio de um modelo de regressão logística, modelo *Logit*, utilizando a base de dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) do ano de 2015.

O artigo está organizado em sete seções, além desta introdução. A segunda seção apresenta a revisão de literatura, contextualizando a temática abordada. A terceira seção apresenta a metodologia, com destaque para o modelo econométrico adotado no estudo. Na quarta seção é possível observar o comportamento da amostra através da análise descritiva dos dados. A quinta seção descreve os resultados esperados, enquanto a sexta seção apresenta os resultados e a discussão. A sétima seção apresenta as considerações finais, e, por fim, tem-se as referências bibliográficas.

2. Revisão de Literatura

A literatura científica classifica as eras agrícolas em quatro eras distintas, (Huang et al., 2020; Ragazou et al., 2022). Essas eras, conforme apresentado na figura 1, são baseadas na evolução tecnológica (Huang et al., 2020; Ragazou et al., 2022) e são classificadas como Agricultura 1.0, Agricultura 2.0, Agricultura 3.0 e Agricultura 4.0 (Massruhá, 2020; Zhai et al., 2020).

Figura 1: Evolução tecnológica das eras agrícolas



Fonte: Adaptado pelos autores de Huang et al., (2020); Massruhá et al., (2020); Zhai (2020); Abbasi et al., (2022); Ragazou et al., (2022).

A Agricultura 1.0 era caracterizada predominantemente pelo trabalho manual, exigindo grande esforço físico dos agricultores. Com o advento da Agricultura 2.0, esse cenário mudou significativamente, pois a introdução de máquinas, fertilizantes e sementes de maior qualidade reduziu a necessidade de esforço físico direto, ao mesmo tempo em que aumentou a produtividade agrícola (Zhai et al., 2020).

A Agricultura 3.0 representou um novo marco na modernização do setor agrícola (Zhai et al., 2020). Durante esse período, as tecnologias agrícolas avançaram de maneira expressiva, possibilitando o uso de máquinas e implementos agrícolas cada vez mais eficientes e sofisticados (Massruhá et al., 2020). Essa fase ficou conhecida como agricultura de precisão, devido à incorporação de ferramentas tecnológicas que aumentaram a eficiência das atividades no campo (Zhai et al., 2020).

A transição da agricultura de precisão para a Agricultura 4.0 consolidou uma era ainda mais tecnológica, com a integração de sensores de alta tecnologia, computação em nuvem, *softwares* especializados e a Internet das Coisas (IoT) na produção agrícola (Abbasi; Martinez; Ahmad, 2022; Karunathilake et al., 2023). Esses avanços permitiram uma maior automatização e controle das operações agrícolas, ampliando a capacidade de monitoramento e gestão de recursos de forma inteligente.

2.1 Agricultura de Precisão

A agricultura de precisão representou uma evolução das práticas agrícolas por meio da utilização de tecnologias avançadas (Sung, 2018). Ela integrou ferramentas como GPS, sensores e análise de dados para otimizar o uso de recursos e melhorar a tomada de decisão com base nas condições específicas do local (Tangkesalu et al., 2023). A adoção dessas tecnologias trouxe uma abordagem transformadora para a agricultura, melhorando a eficiência agrícola, ao utilizar a tecnologia para lidar com a variabilidade na produção agrícola (Tangkesalu et al., 2023), medindo e analisando as necessidades das áreas de cultivo e das culturas de forma individualizada (Monteiro; Santos; Gonçalves, 2021).

A implementação de técnicas de agricultura de precisão trouxe benefícios econômicos para os agricultores, ao proporcionar um melhor gerenciamento dos recursos. Essa adoção otimiza o uso de insumos como água, fertilizantes e pesticidas, resultando em um aumento de 20% na eficiência e uma redução de 15% no impacto ambiental (Godavari et al., 2024). Estudos indicam que a agricultura de precisão pode reduzir os custos de proteção de cultivos e fertilizantes em 20% e 15%, respectivamente, sem comprometer a produtividade, mostrando uma relação positiva entre a sua adoção e os retornos agrícolas (Sanyaolu; Sadowski, 2024).

Embora a agricultura de precisão proporcione benefícios aos produtores rurais, desafios como altos custos de investimento inicial e acesso limitado à tecnologia podem impedir a sua adoção, especialmente entre pequenos agricultores. Superar essas barreiras é crucial para maximizar as vantagens econômicas da adoção tecnológica na agricultura (Buainain; Cavalcante; Consoline, 2021; Da Silveira; Lermen; Amaral, 2021).

2.2 Barreiras Socioeconômicas da Adoção Tecnológica na Agricultura

A incorporação tecnológica na agricultura é crescente (Carrer; De Souza Filho; Batalha, 2017; Carrer et al., 2022). Contudo, sua disseminação igualitária para todos os perfis de produtores rurais ainda permanece como um desafio considerável. No Brasil foram identificadas um conjunto de vinte e cinco barreiras que impedem que esse desafio seja superado. Os autores categorizaram essas vinte e cinco barreiras em cinco dimensões: tecnológicas, econômicas, políticas, sociais e ambientais (Da Silveira; Lermen; Amaral, 2021). Para fins desse estudo, serão considerados, exclusivamente, aspectos relacionados às barreiras sociais e econômicas para a adoção das tecnologias digitais pelos produtores rurais.

A dimensão econômica está relacionada aos altos custos de aquisição e manutenção, custo de mão de obra qualificada, componentes operacionais e falta de soluções acessíveis aos produtores rurais. Na dimensão social, se destacam os problemas com educação, falta de habilidades digitais, a faixa etária dos produtores rurais, entre outros (Da Silveira; Lermen; Amaral, 2021).

Nesse contexto, uma parcela importante de produtores rurais, em especial os médios e pequenos, terão maiores dificuldades para se encaixar nessa nova realidade digital. A necessidade de grandes investimentos restringirá os benefícios das tecnologias digitais aos grandes produtores, pelo menos inicialmente (Javaid et al., 2022). Esse cenário restritivo da adoção das tecnologias digitais aumentará o desnível tecnológico já existente entre os produtores rurais, mesmo diante dos benefícios econômicos e ambientais decorrentes da sua adoção, como o aumento dos rendimentos financeiros, a maximização da produção e a redução dos impactos ambientais (Mühl; Oliveira, 2022). Assim, esse desnível tecnológico direcionará o estado da arte tecnológico a um grupo restrito de produtores rurais (Pereira; Castro, 2022).

3. Metodologia

O artigo utilizou uma regressão logística, modelo *Logit*, para estimar a relação entre a variável dependente (Y) e as diferentes variáveis independentes (X), utilizando uma base de dados que investiga diversas características socioeconômicas da população brasileira. A regressão estimou, para indivíduos caracterizados como produtores rurais, a relação entre uma variável tecnológica, representada no estudo pela variável acesso à internet, com as seguintes variáveis independentes: sexo, idade, anos de estudo e renda.

A base de dados não apresentou uma identificação clara do produtor rural. Para superar essa lacuna foram realizados ajustes, buscando se aproximar ao máximo do perfil que pode ser caracterizado como produtor rural. As características fundamentais adotadas para caracterizar esse produtor rural foram: indivíduos moradores na zona rural e que tenham a atividade agrícola como principal no empreendimento.

3.1 Fonte de Dados

A base de dados utilizada neste estudo foi a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) de 2015, que foi organizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e investiga diversas características socioeconômicas da população brasileira. O sistema de pesquisas domiciliares, implementado no Brasil com a criação da PNAD, tem como objetivo fornecer informações essenciais para a análise do desenvolvimento socioeconômico do país. A PNAD, iniciada em 1967, foi encerrada em 2016, com a divulgação das informações referentes a 2015. No decorrer dos 49 anos de sua existência ela produziu resultados para o Brasil, e suas unidades federativas, através de pesquisa permanente, abordando características gerais da população, tais como educação, trabalho, rendimento, entre outros. A PNAD 2015 contém uma amostra de 356.904 pessoas, que correspondem a 204.860.101 pessoas com a ponderação da pesquisa. A PNAD utiliza um plano amostral estratificado, conglomerado que, dependendo do estrato, pode ter dois ou três estágios (IBGE, 2016).

A escolha dessa base de dados se deve à sua importância na formulação, validação e avaliação de políticas voltadas ao desenvolvimento socioeconômico da população e à melhoria das condições de vida no Brasil (IBGE, 2016). Além disso, a PNAD fornece informações detalhadas sobre as características socioeconômicas da população brasileira, incluindo dados sobre acesso à internet. Neste estudo, o foco será no segmento agrícola, com a exclusão da população urbana.

3.2 Definição das Variáveis

As características socioeconômicas renda, idade e educação foram escolhidas por serem determinantes na adoção tecnológica (Gyawali et al., 2023) e por serem barreiras a serem superadas para a adoção tecnológica no Brasil (Da Silveira; Lermen; Amaral, 2021). Para fins desse estudo, outras características socioeconômicas importantes para a adoção tecnológica, tais como tempo de experiência e o tipo de atividade (Marescotti et al., 2021), não foram adotadas devido à ausência dessas informações na base de dados utilizada. No modelo econométrico os custos foram substituídos pela variável renda *per capita*, variável disponível na base de dados. Para o estudo foram utilizadas as variáveis da PNAD 2015, apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 - Variáveis da PNAD 2015 utilizadas no modelo econométrico

Quesito	Categoria
Atividade principal do empreendimento do trabalho principal na semana de referência	Agrícola
Local de residência do indivíduo	Variável binária cujo valor 1 indica que o indivíduo mora na zona urbana e 0 mora na zona rural
Identificação dos moradores da zona rural que trabalham na atividade agrícola	Variável binária cujo valor 1 indica que o indivíduo mora na zona rural e trabalha na atividade agrícola; e 0 indivíduos que moram na zona urbana e trabalham na atividade agrícola
Sexo	Variável binária cujo valor 1 indica que o indivíduo é do sexo masculino e 0 é do sexo feminino
Idade	Idade do indivíduo
Educação	Variável que indica o número de anos de estudo;
Rendimento mensal familiar <i>per capita</i> :	Variável que indica o rendimento familiar <i>per capita</i> ;
Acesso à internet nos últimos três meses	Variável binária cujo valor 1 indica que o indivíduo acessou a internet nos últimos 3 meses e 0 em caso negativo

Fonte: PNAD 2015 (IBGE, 2016).

A base de dados da PNAD 2015 conta com outras variáveis, todavia para o estudo foram utilizadas somente as apresentadas na Tabela 1.

3.3 Modelo Econométrico

A relação entre as características socioeconômicas dos produtores rurais brasileiros e a adoção tecnológica foi calculada baseada nos fatores socioeconômicos, renda, idade e educação, além da variável sexo. Essa relação foi calculada, adotando um modelo de resposta binária, onde Y é a variável binária a ser explicada, sendo ela a adoção tecnológica. Dessa forma, Y=1 indica que o indivíduo adota as tecnologias e Y=0 indica que ele não adota.

O modelo de regressão logística, modelo *Logit*, foi utilizado para analisar esta relação. Esse modelo, teve por objetivo determinar os efeitos das variáveis independentes, que neste estudo representam as características pessoais dos indivíduos, sobre a probabilidade de resposta da variável dependente (Wooldridge, 2006).

A regressão logística, modelo *Logit*, para o acesso a agricultura de precisão pelos produtores rurais, que tem como atividade principal a atividade agrícola, com base nas variáveis sexo (X_1), idade (X_2), educação (X_3) e renda (X_4), é definida como:

$$\text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4$$

Na equação:

- p é a probabilidade de adoção da agricultura de precisão ($P(Y=1)$);
- β_0 é o intercepto;
- β_1 , β_2 , β_3 e β_4 são os coeficientes das variáveis independentes sexo (X_1), idade (X_2), educação (X_3) e renda (X_4).

Na regressão logística a variável dependente tem apenas duas categorias, ou seja, quando o Y apenas pode assumir dois valores. Ela também é chamada de variáveis dependentes dicotômicas. Usualmente a ocorrência do evento de interesse é codificada como “1” e a ausência como “0” (Fernandes et al., 2020).

No modelo apresentado no artigo tem-se:

- Y = 0 = Não utilizou a internet nos últimos 3 meses
- Y = 1 = Utilizou a internet nos últimos 3 meses

A relação linear entre a variável dependente (Y) e as diferentes variáveis independentes (X) foi estimada utilizando o *software* estatístico *Stata*. Para isso, foram considerados os dados da PNAD 2015, onde a variável acesso à internet nos últimos 3 meses é a variável dependente (Y), que representa a adoção tecnológica; idade, sexo, nível educacional e renda representam as variáveis independentes (X). Isso, considerando somente os indivíduos que tenham como atividade principal do empreendimento na semana de referência a atividade agrícola.

4. Análise Descritiva dos Dados

Devido à necessidade de determinação exata da amostra foi necessário identificar, dentro dos 356.904 indivíduos contidos na amostra da PNAD 2015, a divisão das atividades principais dos empreendimentos agrícola e não agrícola, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Identificação da amostra de acordo com as atividades principais dos empreendimentos

Atividade principal do empreendimento	Frequência	Percentual (%)
Agrícola	22.292	13,49
Não Agrícola	142.901	86,51
Total	165.193	100

Fonte: Elaborado pelos autores, com base nos dados da PNAD 2015.

Foi possível observar na amostra que a atividade agrícola representa somente 13,49% dos 165.193 empreendimentos. A maior representatividade é de empreendimentos não agrícolas, com 86,51%. Ainda, considerando a atividade principal do empreendimento, para determinação da amostra foi necessário identificar aqueles que moram na área rural, levando em consideração sua condição censitária, que é o foco principal do artigo, conforme apresentado na Tabela 3:

Tabela 3 – Identificação da amostra de acordo com a situação censitária

Situação censitária	Atividade principal do empreendimento		
	Agrícola	Não Agrícola	Total
Rural	16.025	9.174	25.199
Urbana	6.267	133.727	139.994
Total	22.292	142.901	165.193

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da PNAD 2015.

Diante disso, a amostra foi composta por 16.025 indivíduos, caracterizando os moradores na zona rural que tem a atividade agrícola como principal do empreendimento.

Posteriormente, uma variável *dummy* de gênero foi criada para identificar esses indivíduos, conforme apresentado na Tabela 4:

Tabela 4 – Variável *dummy* gênero

Sexo	Frequência	Percentual (%)
Masculino = 1	11.067	69,06
Feminino = 0	4.958	30,94
Total	16.025	100

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da PNAD 2015.

Considerando a variável idade, a Tabela 5 apresenta o quantitativo de indivíduos, pertencentes à amostra.

Tabela 5 - Idade dos indivíduos pertencentes à amostra

Idade	Frequência	Percentual (%)
10-19	1.649	10,30
20-29	2.296	14,32
30-39	3.178	19,82
40-49	3.266	38,61
50-59	2.929	17,38
60-69	1.825	11,38
70-79	739	4,62
80-89	132	0,74
90-100	11	0,08
Total	16.025	100%

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da PNAD 2015.

A Tabela 6 apresenta o quantitativo de indivíduos de acordo com os anos de estudo. É importante destacar que da amostra inicial de 16.025 indivíduos, em 47 deles não foi possível determinar os anos de estudo.

Tabela 6 - Anos de estudo dos indivíduos pertencentes à amostra

Anos de estudo	Frequência	Percentual (%)
0	3.311	20,72
1	724	4,53
2	1.175	7,35
3	1.456	9,11
4	2.599	16,27
5	1.351	8,46
6	726	4,54
7	671	4,20
8	1.363	8,53
9	436	2,73
10	419	2,62
11	1.396	8,74
12	109	0,68
13	28	0,18
14	29	0,18
15	185	1,16
Total	15.978	100

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da PNAD 2015.

Considerando as informações contidas na base de dados, os indivíduos pertencentes à amostra utilizada no estudo, que foram caracterizados como produtores rurais, apresentam o seguinte perfil: indivíduos residem em áreas rurais, que possuem 10 anos de idade ou mais, e têm na atividade agrícola a principal ocupação. O rendimento mensal familiar *per capita* é de R\$ 591,78 reais.

5. Resultados Esperados

Ao estabelecer a relação entre as variáveis, tem-se os seguintes resultados esperados:

I. Relação positiva do nível educacional e da renda ao acesso tecnológico, ou seja, quanto maior o nível educacional e de renda, maior a capacidade dos produtores de lidar com as funcionalidades das ferramentas tecnológicas e, assim, empregá-las. Essa relação positiva é esperada pois a adoção e utilização das tecnologias exigem, além de novos investimentos financeiros, certo nível educacional, bem como acesso à internet. Esse cenário demanda não somente a aquisição de novos e modernos equipamentos para a obtenção e processamento de informações, mas também conhecimento para sua interpretação e aplicação, visando tomadas de decisão mais eficientes (Pivoto et al., 2018).

II. Relação negativa entre a idade e o acesso às tecnologias, ou seja, à medida que a idade aumenta a probabilidade de acesso à internet diminui. Essa relação, negativa, é esperada pois quanto maior a idade do indivíduo, menor a habilidade tecnológica (Michels et al., 2020; De Souza Filho et al., 2021; Mendes et al., 2023).

6. Resultados e Discussões

O presente estudo teve como objetivo analisar a relação entre fatores socioeconômicos – idade, renda, sexo e educação – na adoção de agricultura de precisão pelos produtores rurais brasileiros, utilizando um modelo de regressão logística (*Logit*). Para isso, foram utilizadas variáveis extraídas da base de dados da PNAD 2015. O modelo foi ajustado com um total de 15.395 observações, e cinco interações foram necessárias para o ajuste.

Os resultados do teste LR χ^2 (qui-quadrado) indicam que o modelo é estatisticamente significativo para explicar a relação entre os fatores socioeconômicos e a adoção de agricultura de precisão por produtores rurais que residem em áreas rurais e têm a agricultura como principal atividade. O valor da estatística $\text{prob} > \chi^2$ confirma que podemos rejeitar, ao nível de significância de 1%, a hipótese de que todos os coeficientes sejam iguais a zero, demonstrando que as variáveis explicativas têm um impacto significativo na probabilidade de adoção da tecnologia. Os coeficientes estimados e os Odds Ratios estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Coeficientes estimados sobre a probabilidade de acesso à internet

Variável	Coeficientes	Erro Padrão	Odds Ratio
Gênero	-0,1014335	0,0643773	0,9035413
Idade	-0,0843296**	0,0024631	0,9191282
Educação	0,2337695**	0,0085791	1,263353
Renda	0,9055609**	0,036272	2,473319

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da PNAD 2015.

Nota: ** significativo a 5%; Número de observações = 15.395

A variável gênero não foi estatisticamente significativa ao nível de 5%, o que indica que, segundo o modelo, o gênero dos produtores rurais não afeta a probabilidade de adoção da agricultura de precisão. Esse resultado sugere que homens e mulheres têm as mesmas chances de adotar tecnologias de agricultura de precisão, o que pode indicar um contexto em que o gênero não desempenha um papel relevante no acesso às inovações tecnológicas no setor rural. Ainda, segundo o teste Z, às demais variáveis do modelo são estatisticamente significantes.

A variável idade mostrou-se estatisticamente significativa e apresentou coeficiente negativo, sugerindo que, à medida que a idade dos produtores aumenta, a probabilidade de adoção de agricultura de precisão diminui. Esse resultado confirma as expectativas, pois estudos anteriores indicam que produtores mais velhos tendem a ser mais resistentes à adoção de novas tecnologias, em parte devido ao elevado custo de aprendizado e à percepção de que seu horizonte de trabalho é mais curto (Barnes et al., 2019; Michels et al., 2020). Produtores mais jovens, em contrapartida, demonstram maior facilidade em compreender e implementar novas tecnologias, o que está alinhado com a literatura que destaca uma maior propensão dos jovens à adoção tecnológica (Pivoto et al., 2019; Giua; Materia; Camanzi, 2021).

A educação foi outra variável estatisticamente significativa e positiva no modelo. Esse resultado era esperado, já que a educação aprimora a capacidade dos produtores de entender as funcionalidades e os benefícios das inovações tecnológicas, tornando-os mais propensos a adotar novas tecnologias no campo (Carrer; De Souza Filho; Batalha, 2017; Mendes et al., 2023). A relação entre o nível de escolaridade e a adoção tecnológica é amplamente documentada, principalmente em setores como a agricultura, onde o conhecimento técnico é fundamental para a implementação de tecnologias digitais (Michels et al., 2020). Além disso, os produtores mais instruídos tendem a desenvolver habilidades de gestão e resolução de problemas, facilitando o processo de inovação (Knierim et al., 2019).

A renda foi estatisticamente significativa e apresentou coeficiente positivo, corroborando com as expectativas de que produtores com maior renda têm mais facilidade para adotar tecnologias de agricultura de precisão. A adoção de tecnologias avançadas exige investimentos iniciais elevados, o que pode ser um obstáculo para produtores de menor poder aquisitivo (Da Silveira; Lermen; Amaral, 2021). Esses resultados reforçam a necessidade de políticas que reduzam as barreiras financeiras e incentivem a adoção de tecnologia por produtores com menor capacidade de investimento, sobretudo nas pequenas propriedades

(Mendes et al., 2022). A criação de subsídios ou a oferta de linhas de crédito específicas pode ser uma estratégia eficaz para mitigar o impacto desses custos (Barnes et al., 2019; Kernecker et al., 2020).

7. Considerações Finais

Os resultados deste estudo evidenciam a importância dos fatores socioeconômicos, especialmente a idade e a educação, na adoção de tecnologias de precisão pelos produtores rurais brasileiros. Embora a renda não tenha se mostrado determinante no modelo econométrico utilizado, a educação emerge como o fator mais relevante para aumentar a probabilidade de acesso às tecnologias. Isso sugere que investimentos na capacitação educacional dos produtores rurais são cruciais para que possam tirar o máximo proveito das inovações tecnológicas disponíveis no setor agrícola.

A promoção da educação, tanto em níveis básicos quanto por meio de programas de treinamento e qualificação contínuos, é essencial para melhorar a compreensão e aceitação das novas tecnologias. Iniciativas como escolas de campo e programas de extensão rural são particularmente valiosas nesse contexto, pois não apenas fornecem suporte técnico, mas também ampliam a conscientização dos produtores sobre os benefícios associados à adoção das inovações tecnológicas.

Os resultados do estudo destacam a influência negativa da idade sobre a adoção tecnológica. Os produtores mais jovens demonstram maior facilidade de adaptação e familiaridade com as tecnologias, enquanto os mais velhos enfrentam desafios consideráveis. Isso reforça a necessidade de estratégias de capacitação inclusivas, que abranjam todas as faixas etárias. Treinamentos específicos podem ajudar a reduzir as barreiras geracionais e promover a adoção tecnológica entre os produtores mais experientes.

A variável renda, embora não tenha demonstrado impacto expressivo neste estudo, é fundamental para garantir que os produtores tenham acesso a programas de financiamento e incentivos financeiros. O acesso ampliado ao crédito é um elemento-chave para que os agricultores possam modernizar seus equipamentos e maquinários, superando as barreiras econômicas à adoção tecnológica.

Os achados deste estudo fornecem insumos valiosos para a formulação de estratégias do ponto de vista das políticas públicas. Essas políticas devem incentivar a adoção de tecnologias no meio rural. Considerar fatores socioeconômicos, como educação e idade, é fundamental para desenhar políticas mais inclusivas e eficazes. Adicionalmente, é importante que futuros programas governamentais também ofereçam suporte técnico e financeiro, de modo a estimular a modernização das atividades agrícolas de maneira abrangente.

Por fim, é necessário destacar a carência de dados abrangentes e atualizados sobre o uso de tecnologias emergentes no meio rural brasileiro. A inclusão de perguntas sobre a adoção de tecnologias no censo agropecuário do IBGE seria uma ferramenta importante para entender melhor o nível de utilização dessas inovações entre os produtores rurais e orientar futuras políticas de desenvolvimento rural.

Uma limitação deste estudo diz respeito à escolha temporal dos dados, baseados no ano de 2015. Embora esse ano tenha sido selecionado pela sua proximidade com o início da transição da agricultura de precisão para a agricultura 4.0, o uso da internet como *proxy* para a adoção tecnológica pode não refletir integralmente a realidade atual, dado que a internet em 2015 ainda não estava amplamente disseminada nas tecnologias agrícolas como nos dias de hoje. Futuros estudos com dados mais recentes poderão fornecer uma visão mais precisa e atualizada sobre esse processo de adoção no contexto brasileiro.

Referências Bibliográficas

- ABBASI, R.; MARTINEZ, P.; AHMAD, R. The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0. **Smart Agricultural Technology**, [S. l.], v. 2, p. 100042, dez. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772375522000090>. Acesso em: 20 set. 2023.
- BARNES, A. P. *et al.* Influencing incentives for precision agricultural technologies within European arable farming systems. **Environmental Science & Policy**, [S. l.], v. 93, p. 66–74, mar. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1462901118305471>. Acesso em: 3 dez. 2023.
- BHATNAGAR, V.; POONIA, R. C.; SUNDA, S. State of the Art and Gap Analysis of Precision Agriculture: A Case Study of Indian Farmers. **International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 72–92, jul. 2019. Disponível em: <http://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/IJAEIS.2019070105>. Acesso em: 17 fev. 2024.
- BOLFE, É. L. *et al.* Precision and Digital Agriculture: Adoption of Technologies and Perception of Brazilian Farmers. **Agriculture**, [S. l.], v. 10, n. 12, p. 653, 21 dez. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/12/653>. Acesso em: 15 out. 2023.
- BUAINAIN, A.; CAVALCANTE, P.; CONSOLINE, L. “Estado atual da agricultura digital no Brasil: inclusão dos agricultores familiares e pequenos produtores rurais”. [S. l.]: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), 2021. Disponível em: <https://www.cepal.org/pt-br/publicaciones/46958-estado-atual-agricultura-digital-brasil-inclusao-agricultores-familiares>. Acesso em: 5 set. 2023.
- CARRER, M. J. *et al.* Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil. **Technological Forecasting and Social Change**, [S. l.], v. 177, p. 121510, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162522000427>.
- 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**, [S. l.], v. 138, p. 11–19, jun. 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169916302629>. Acesso em: 15 out. 2023.
- DA SILVEIRA, F. *et al.* Farmers’ perception of the barriers that hinder the implementation of agriculture 4.0. **Agricultural Systems**, [S. l.], v. 208, p. 103656, maio 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308521X23000616>. Acesso em: 4 out. 2023.
- DA SILVEIRA, F.; LERMEN, F. H.; AMARAL, F. G. An overview of agriculture 4.0 development: Systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S. l.], v. 189, p. 106405, out. 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169921004221>. Acesso em: 20 set. 2023.
- FERNANDES, A. A. T. *et al.* Leia este artigo se você quiser aprender regressão logística. **Revista de sociologia e política**, [S. l.], Curitiba, v. 28, n. 74, 2020.

GIUA, C.; MATERIA, V. C.; CAMANZI, L. Management information system adoption at the farm level: evidence from the literature. **British Food Journal**, [S. l.], v. 123, n. 3, p. 884–909, 5 fev. 2021. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/BFJ-05-2020-0420/full/html>. Acesso em: 15 out. 2023.

GODAVARI, H. *et al.* Precision Farming Solutions: Integrating Technology for Sustainable Pest Management. **Journal of Advances in Biology & Biotechnology**, [S. l.], v. 27, n. 8, p. 33–54, 11 jul. 2024. Disponível em: <https://journaljabb.com/index.php/JABB/article/view/1119>. Acesso em: 30 set. 2024.

GYAWALI, B. R. *et al.* Adoption of computer-based technology (CBT) in agriculture in Kentucky, USA: Opportunities and barriers. **Technology in society**, [S. l.], v. 72, p. 102202, 2023.

HUANG, K. *et al.* Photovoltaic Agricultural Internet of Things Towards Realizing the Next Generation of Smart Farming. **IEEE Access**, [S. l.], v. PP, p. 1–1, abr. 2020.

IBGE, I. B. de G. e E. (Org.). **Acesso à Internet e à televisão e posse de telefone móvel celular para uso pessoal, 2015: Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios**. Rio de Janeiro: IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016.

JAVAID, M. *et al.* Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. **International Journal of Intelligent Networks**, [S. l.], v. 3, p. 150–164, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666603022000173>. Acesso em: 15 out. 2023.

KARUNATHILAKE, E. M. B. M. *et al.* The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. **Agriculture**, [S. l.], v. 13, n. 8, p. 1593, 11 ago. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/8/1593>. Acesso em: 17 fev. 2024.

KERNECKER, M. *et al.* Experience versus expectation: farmers' perceptions of smart farming technologies for cropping systems across Europe. **Precision Agriculture**, [S. l.], v. 21, fev. 2020.

KNIERIM, A. *et al.* Smart farming technology innovations – Insights and reflections from the German Smart-AKIS hub. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, [S. l.], v. 90–91, p. 100314, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157352141830232X>.

MAHANTO, S. *et al.* Precision farming: Innovations, techniques and sustainability. **International Journal of Agriculture Extension and Social Development**, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 42–47, 1 abr. 2024. Disponível em: <https://www.extensionjournal.com/archives/2024.v7.i4.A.513>. Acesso em: 30 set. 2024.

MARESCOTTI, M. E. *et al.* Smart farming in mountain areas: Investigating livestock farmers' technophobia and technophilia and their perception of innovation. **Journal of Rural Studies**, [S. l.], v. 86, p. 463–472, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743016721002126>.

MASSRUHÁ, S. M. F. S. *et al.* Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. 2020. [S. l.: s. n.], 2020.

MASSRUHÁ, Silvia Maria Fonseca Silveira. **Agricultura Digital**. [S. l.]: Embrapa, 2020.

MENDES *et al.* Dimensions of digital transformation in the context of modern agriculture. **Sustainable Production and Consumption**, [S. l.], v. 34, p. 613–637, nov. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352550922002676>. Acesso em: 15 fev. 2024.

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**, [S. l.], 4 jan. 2023. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JADEE-09-2022-0194/full/html>. Acesso em: 15 out. 2023.

MICHELS, M. *et al.* Smartphone adoption and use in agriculture: empirical evidence from Germany. **Precision Agriculture**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 403–425, abr. 2020. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11119-019-09675-5>. Acesso em: 15 out. 2023.

MONTEIRO, A.; SANTOS, S.; GONÇALVES, P. Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review. **Animals**, [S. l.], v. 11, n. 8, p. 2345, 9 ago. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2615/11/8/2345>. Acesso em: 30 set. 2024.

MÜHL, D. D.; OLIVEIRA, L. de. A bibliometric and thematic approach to agriculture 4.0. **Heliyon**, [S. l.], v. 8, n. 5, p. e09369, maio 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844022006570>. Acesso em: 9 set. 2023.

OVCHINNIKOV, A.; AFANASYEVA, Y. “Precision farming” as a concept for big data management in agriculture. **Russian journal of resources, conservation and recycling**, [S. l.], v. 10, n. 1, mar. 2023. Disponível em: <https://resources.today/03NZOR123.html>. Acesso em: 30 set. 2024.

PATHAK, H. S.; BROWN, P.; BEST, T. A systematic literature review of the factors affecting the precision agriculture adoption process. **Precision Agriculture**, [S. l.], v. 20, n. 6, p. 1292–1316, dez. 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11119-019-09653-x>. Acesso em: 17 fev. 2024.

PEREIRA, C. N.; CASTRO, C. N. D. TD 2765 - Expansão da produção agrícola, novas tecnologias de produção, aumento de produtividade e o desnível tecnológico no meio rural. **Texto para Discussão - IPEA**, [S. l.], , p. 1–72, 6 maio 2022. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/220506_217036_td_2765_we b.pdf. Acesso em: 4 out. 2023.

PIVOTO, D. *et al.* Factors influencing the adoption of smart farming by Brazilian grain farmers. **International Food and Agribusiness Management Review**, [S. l.], v. 22, n. 4, p. 571–588, 18 jun. 2019. Disponível em: https://brill.com/view/journals/ifam/22/4/article-p571_571.xml. Acesso em: 15 out. 2023.

RAGAZOU, K. *et al.* Agriculture 5.0: A New Strategic Management Mode for a Cut Cost and an Energy Efficient Agriculture Sector. **Energies**, [S. l.], , p. 17, abr. 2022.

SANYAOLU, M.; SADOWSKI, A. The Role of Precision Agriculture Technologies in Enhancing Sustainable Agriculture. **Sustainability**, [S. l.], v. 16, n. 15, p. 6668, 4 ago. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/15/6668>. Acesso em: 30 set. 2024.

SHEPHERD, M. *et al.* Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the “digital agriculture” revolution: **J Sci Food Agric**, [S. l.], 2018.

SOUZA, G. D. S. E. *et al.* Technological progress in the Brazilian agriculture. **Socio-Economic Planning Sciences**, [S. l.], v. 72, p. 100879, dez. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038012119305774>. Acesso em: 4 out. 2023.

SUNG, J. The Fourth Industrial Revolution and Precision Agriculture. *In*: HUSSMANN, S. (org.). **Automation in Agriculture - Securing Food Supplies for Future Generations**. [S. l.]: InTech, 2018. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/automation-in-agriculture-securing-food-supplies-for-future-generations/the-fourth-industrial-revolution-and-precision-agriculture>. Acesso em: 30 set. 2024.

TANGKESALU, D. *et al.* Precision Agriculture: Integrating Technology for Enhanced Efficiency and Sustainability in Crop Management. **Global International Journal of Innovative Research**, [S. l.], v. 1, n. 3, p. 213–219, 13 dez. 2023. Disponível em: <https://global-us.mellbaou.com/index.php/global/article/view/37>. Acesso em: 30 set. 2024.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. INTRODUÇÃO À AGRICULTURA DE PRECISÃO: CONCEITOS E VANTAGENS. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 159–163, fev. 2002. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782002000100027&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 17 fev. 2024.

VASCONCELOS, M.; MENDES, A. Brasil até 2050 - Exportador de soluções para sustentabilidade e inovação no agronegócio. **O futuro da agricultura brasileira : 10 visões**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 71–82. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1153216/o-futuro-da-agricultura-brasileira-10-visoes>. Acesso em: 26 set. 2023.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introdução à econometria: uma abordagem moderna**. São Paulo: **Pioneira Thomson Learning**, 2006. [S. l.: s. n.], 2006.

ZHAI, Z. *et al.* Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S. l.], v. 170, p. 105256, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919316497>.