



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ECONÔMICAS

**PAULO GUILHERME ALARCON FERNANDES**

**A CONTRIBUIÇÃO DO CRÉDITO RURAL PARA A  
SUSTENTABILIDADE E O DESENVOLVIMENTO DO BIOMA  
AMAZÔNICO**

**Maringá  
2025**

PAULO GUILHERME ALARCON FERNANDES

**A Contribuição do Crédito Rural para a Sustentabilidade e o  
Desenvolvimento do Bioma Amazônico**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Ciências Econômicas da Universidade  
Estadual de Maringá, como requisito parcial  
para obtenção do título de Doutor em Teoria  
Econômica.

Orientador(a): Prof. Dr. José Luiz Parré

Maringá  
2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

F363c

Fernandes, Paulo Guilherme Alarcon

A contribuição do crédito rural para a sustentabilidade e o desenvolvimento do bioma amazônico / Paulo Guilherme Alarcon Fernandes. -- Maringá, PR, 2025.  
109 f. : il. color., tabs., mapas

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Parré.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Departamento de Economia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas, 2025.

1. Desenvolvimento econômico. 2. Segurança alimentar. 3. Diversificação agropecuária-florestal. 4. Crédito rural. 5. Sustentabilidade ambiental. I. Parré, José Luiz, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Sociais Aplicadas. Departamento de Economia. Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas. III. Título.

CDD 23.ed. 338

Síntique Raquel de C. Eleutério - CRB 9/1641

PAULO GUILHERME ALARCON FERNANDES

## A CONTRIBUIÇÃO DO CRÉDITO RURAL PARA A SUSTENTABILIDADE E O DESENVOLVIMENTO DO BIOMA AMAZÔNICO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas da Universidade Estadual de Maringá como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Teoria Econômica.

Aprovado em: 25 de fevereiro de 2025.

### Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente



JOSE LUIZ PARRE

Data: 25/02/2025 16:39:42-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Professor Dr. José Luiz Parré  
Orientador/ UEM

Documento assinado digitalmente



ANGELO RONDINA NETO

Data: 25/02/2025 17:51:08-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Professor Dr. Angelo Rondina Neto  
UEL

Documento assinado digitalmente



WEIMAR FREIRE DA ROCHA JUNIOR

Data: 25/02/2025 17:16:17-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Professor Dr. Weimar Freire da Rocha Junior  
Unioeste

Documento assinado digitalmente



ALEXANDRE FLORINDO ALVES

Data: 26/02/2025 14:43:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Professor Dr. Alexandre Florindo Alves  
UEM

Documento assinado digitalmente



JULYERME MATHEUS TONIN

Data: 03/03/2025 11:06:33-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Professor Dr. Julyerme Matheus Tonin  
UEM

FERNANDES, Paulo Guilherme Alarcon. **A contribuição do crédito rural para a sustentabilidade e o desenvolvimento do bioma amazônico.** 2025. 120 p. Tese de Doutorado em Teoria Econômica. Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas. Universidade Estadual de Maringá, 2025.

## RESUMO

A tese é composta por três ensaios e tem como objetivo principal estudar a dicotomia entre o desmatamento florestal e o desenvolvimento econômico, com base na utilização do crédito rural e suas influências sobre a segurança alimentar e a diversificação agropecuária-florestal no bioma Amazônico. Para tal fim, foram empregados métodos econométricos e análises espaciais, como a Regressão Ponderada Geograficamente (RPG), o modelo Autorregressivo Espacial (SAR), o modelo de Defasagem Espacial com Erro Autorregressivo (SAC), o modelo Espacial de Durbin (SDM) e o modelo Probit Espacial. A pesquisa abrangeu os anos de 2021 e 2022, utilizando bases de dados secundárias como do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Banco Central do Brasil (BACEN), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e outros. O foco no Bioma Amazônico se justifica por sua relevância ambiental, econômica e social no contexto global. Além disso, a região regula o clima e realiza a manutenção da biodiversidade. Apesar disso, o avanço da agropecuária modifica o ambiente ao mesmo tempo em que contribui para o aumento da renda na região. Com isso, compreender a associação entre o crédito rural e as práticas agropecuárias no bioma amazônico permite avaliar se os recursos financeiros estão sendo direcionados para um modelo de desenvolvimento sustentável. Portanto, o nível de contratação de crédito rural e o grau de desmatamento mostram relação negativa, evidenciando que, em alguns municípios, as atividades rurais estão contribuindo para a preservação do bioma original. Ademais, a Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008, do Banco Central do Brasil (BACEN), mostrou-se eficiente ao direcionar o crédito para atividades que preservam a área de floresta. No contexto da segurança alimentar, constatou-se que as atividades ligadas à agricultura temporária são as que mais demandam recursos financeiros na região, apresentando, entretanto, menor contribuição para a preservação e sustentabilidade ambiental. Quanto à diversificação agropecuária-florestal, o crédito rural evidenciou promover, de forma positiva, uma produção mais variada, sugerindo que os recursos estão sendo direcionados a atividades que contribuem em maior proporção para a preservação ambiental e o aumento da renda da população. Futuras pesquisas podem adotar dados em painel para alcançar maior abrangência temporal nas inferências ou subdividir o bioma em áreas menores, considerando a heterogeneidade observada nos valores das variáveis de alguns municípios.

**Palavras-chave:** Desenvolvimento econômico; Segurança alimentar; Diversificação agropecuária-florestal; Recursos financeiros; Renda; Biodiversidade; Sustentabilidade ambiental.

## ABSTRACT

The thesis consists of three essays and aims to study the dichotomy between forest deforestation and economic development, based on the use of rural credit and its influences on food security and agricultural-forestry diversification in the Amazon biome. To this end, econometric methods and spatial analyses were employed, including Geographically Weighted Regression (GWR), the Spatial Autoregressive Model (SAR), the Spatial Error Autoregressive Model (SAC), the Spatial Durbin Model (SDM), and the Spatial Probit Model. The research covered the years 2021 and 2022, utilizing secondary databases from institutions such as the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), the Central Bank of Brazil (BACEN), the National Institute for Space Research (INPE), and others. The focus on the Amazon biome is justified by its environmental, economic, and social relevance in the global context. Furthermore, the region plays a crucial role in climate regulation and biodiversity conservation. However, the expansion of agricultural activities alters the environment while simultaneously contributing to an increase in regional income. Therefore, understanding the relationship between rural credit and agricultural practices in the Amazon biome allows for an assessment of whether financial resources are being directed toward a sustainable development model. The results indicate that the level of rural credit allocation and the degree of deforestation exhibit a negative relationship, demonstrating that in some municipalities, rural activities contribute to the preservation of the original biome. Additionally, Resolution 3,545, of February 29, 2008 of the Central Bank of Brazil (BACEN) proved effective in directing credit toward activities that preserve forest areas. In the context of food security, it was found that temporary agriculture-related activities demand the most financial resources in the region but contribute less to environmental conservation and sustainability. Regarding agricultural-forestry diversification, rural credit was shown to positively promote more varied production, suggesting that financial resources are being allocated to activities that contribute more significantly to environmental preservation and income generation for the population. Future research may adopt panel data to achieve broader temporal coverage in inferences or subdivide the biome into smaller areas, considering the heterogeneity observed in the variable values of some municipalities.

**Keywords:** Economic development; Food security; Agricultural-forestry diversification; Financial resources; Income; Biodiversity; Environmental sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Municípios inseridos no bioma amazônico.....	17
Figura 2. Representação de uma matriz de peso do tipo rainha .....	20
Figura 3. Representação da largura da banda de uma RPG.....	22
Figura 4. Banda da função <i>kernel</i> fixa e adaptativa .....	23
Figura 5. Distribuição da taxa de desmatamento por município do bioma amazônico.....	24
Figura 6. Valor dos coeficientes estimados e do teste <i>t</i> a 5% de significância para a variável <i>cred</i> .....	29
Figura 7. Valor dos coeficientes estimados e do teste <i>t</i> a 5% de significância para a variável soja.....	32
Figura 8. Valor dos coeficientes estimados e do teste <i>t</i> a 5% de significância para a variável gado .....	33
Figura 9. Valor dos coeficientes estimados e do teste <i>t</i> a 5% de significância para a variável flo .....	34
Figura 10. Municípios do bioma amazônico que contratam crédito rural em 2022 .....	50
Figura 11. A dispersão dos valores das variáveis no cartograma do bioma amazônico.....	83
Figura 12. A dispersão dos valores das variáveis no cartograma do bioma amazônico.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição das variáveis selecionadas para o modelo econômico .....	18
Tabela 2. Ressumo dos resultados do teste I de Moran Global .....	25
Tabela 3. Resultados do teste FIV para multicolinearidade .....	25
Tabela 4. Análise descritiva das variáveis.....	26
Tabela 5. Resumo dos resultados do modelo global estimado por MV .....	26
Tabela 6. Os resultados do teste de escolha da banda para a RPG.....	27
Tabela 7. Resumo do teste da significância da variância dos regressores.....	28
Tabela 8. Descrição das variáveis selecionadas .....	51
Tabela 9. Valores máximos, mínimos e médios dos regressores .....	57
Tabela 10. Resumo dos resultados do modelo Probit.....	58
Tabela 11. Chance de contratação de crédito rural em termos percentuais.....	59
Tabela 12. Resumo dos resultados do Probit espacial.....	59
Tabela 13. Resumo dos resultados do efeito total, direto e indireto.....	60
Tabela 14. Maiores quantidades de produtos produzidos na agropecuária-floresta.....	78
Tabela 15. Descrição das variáveis utilizadas na pesquisa.....	81
Tabela 16. Resumo descritivo dos valores das variáveis utilizadas na investigação .....	82
Tabela 17. Sinais esperados para as estimativas dos coeficientes do modelo econométrico ...	89
Tabela 18. Resumo da regressão linear por MV .....	90
Tabela 19. Resumo das estimativas dos modelos econôméticos por matrizes de peso .....	94
Tabela 20. Resumo dos efeitos diretos e indiretos do modelo SAC .....	93
Tabela 21. Maiores quantidades de produtos produzidos na agropecuária-floresta.....	102

## **LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS**

AIC	Critério de Informação de Akaike
BACEN	Banco Central do Brasil
CNPJ	Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica
CPF	Cadastro de Pessoa Física
CSD	Dependência Transversal
CV	Coeficiente de Validação
DOLS	Mínimos Quadrados Ordinários Dinâmicos
EXT	Extrativismo Sustentável Orgânico
EAV	Efeitos Aleatórios Verdadeiros
ESTBAN	Estatística Bancária Mensal por município
FIV	Fator de Inflação de Variância
FGLS	Mínimos Quadrados Generalizados Viáveis
GMM	Método de Momentos Generalizados
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPW	Ponderação pela Probabilidade Inversa
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
MM	Método dos Momentos
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
MV	Máxima Verossimilhança
NE	Número Efetivo
ONG	Organização Não Governamental
PAM	Produção Agrícola Municipal
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PRONAF	Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar
PSM	Pareamento de Escore de Propensão
QAR	Quantil Autoregressivo
QL	Quociente Locacional
RPG	Rregressão Ponderada Geograficamente
SAC	Defasagem Espacial com Erro Autorregressivo

SAR	Modelo Autorregressivo Espacial
SDEM	Modelo Durbin com Erro Espacial
SDM	Modelo Espacial de Durbin
VC	Validação Cruzada
app	Área de produção agrícola permanente
apt	Área de produção agrícola temporária
bin	Binária que indica se houve ou não contratação de crédito rural
cred	Crédito contratado para atividades rurais
des	Taxa da área desflorestada
Eq.	Equação
flo	Área coberta por floresta
gado	Cabeças de gado
hid	Área coberta de água
Kg.	Quilogramas
Km <sup>2</sup>	Quilômetros quadrados
milho	Milho colhido
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
nflo	Área de não floresta
org	Quantidade de produtores orgânicos
piba	Produto Interno Bruto da Agropecuária
R\$	Reais
soja	Soja colhida
t.	Tonelada
vpp	Valor da produção agrícola permanente
vpt	Valor da produção agrícola temporária

## LISTA DE SÍMBOLOS

$I$	Estatística I de Moran Global
$z$	Valores da variável de interesse padronizados
$\bar{z}$	Valores médios dos vizinhos padronizados
$n$	Número de localidades
$W$	Matriz de ponderação espacial
$d_{ij}$	Distância entre as localidades $i$ e $j$
$k$	Parâmetro de largura de banda
$\beta_i$	Coeficiente de regressão estimado na localidade $i$
$u_i$	Erro residual na localidade $i$
$y_i$	Variável dependente na localidade $i$
$x_{ij}$	Valor da variável preditora $j$ na localidade $i$
$\hat{\beta}_i$	Coeficiente de regressão ajustado
$\varepsilon$	Termo de erro aleatório
$X$	Matriz de variáveis explicativas
$WY$	Termo autorregressivo espacial
$\phi$	Função de distribuição normal padrão
$D$	Índice de Simpson
$H$	Índice de Shannon
$EN$	Número Efetivo
$p_i$	Proporção da quantidade na categoria $i$
$exp$	Função exponencial
$\rho$	Coeficiente de defasagem espacial
$\lambda$	Coeficiente de autocorrelação espacial do erro
$\Sigma$	Somatório
$log$	Logaritmo
$I$	Estatística I de Moran Global
$z$	Valores da variável de interesse padronizados
$\bar{z}$	Valores médios dos vizinhos padronizados
$n$	Número de localidades
$W$	Matriz de ponderação espacial
$d_{ij}$	Distância entre as localidades $i$ e $j$

$k$	Parâmetro de largura de banda
$\beta_i$	Coeficiente de regressão estimado na localidade $i$
$u_i$	Erro residual na localidade $i$
$y_i$	Variável dependente na localidade $i$
$x_{ij}$	Valor da variável preditora $j$ na localidade $i$
$\hat{\beta}_i$	Coeficiente de regressão ajustado
$\varepsilon$	Termo de erro aleatório
$X$	Matriz de variáveis explicativas
$WY$	Termo autorregressivo espacial
$\phi$	Função de distribuição normal padrão
$D$	Índice de Simpson
$H$	Índice de Shannon
$EN$	Número Efetivo
$p_i$	Proporção da quantidade na categoria $i$
$exp$	Função exponencial

## LISTA DE EQUAÇÕES

Eq. (1) .....	20
Eq. (2) .....	21
Eq. (3) .....	21
Eq. (4) .....	22
Eq. (5) .....	23
Eq. (6) .....	53
Eq. (7) .....	53
Eq. (8) .....	53
Eq. (9) .....	54
Eq. (10) .....	55
Eq. (11) .....	77
Eq. (12) .....	77
Eq. (13) .....	78
Eq. (14) .....	85
Eq. (15) .....	86
Eq. (16) .....	87
Eq. (17) .....	87
Eq. (18) .....	87
Eq. (19) .....	87

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>4</b>
<b>1 A INFLUÊNCIA DO CRÉDITO RURAL NA CONSERVAÇÃO DO BIOMA AMAZÔNICO .....</b>	<b>11</b>
RESUMO .....	11
1.1 INTRODUÇÃO .....	11
1.2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	13
1.2.1 Economia e Sustentabilidade.....	13
1.2.2 Métodos quantitativos e políticas públicas.....	15
1.3 MATERIAL E MÉTODOS .....	16
1.3.1 Análise da situação do desmatamento na Amazônia .....	17
1.3.2 Teoria e metodologia da Regressão Ponderada Geograficamente .....	21
1.3.3 Modelagem econométrica .....	23
1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
1.4.1 Exame e aplicação de modelos espaciais .....	24
1.4.2 Impactos regionais do crédito rural no desmatamento .....	28
1.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	35
1.6 REFERÊNCIAS .....	36
<b>2 CRÉDITO RURAL E SUSTENTABILIDADE NO BIOMA AMAZÔNICO: AVALIAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE CONTRATAÇÃO E IMPLICAÇÕES PARA A SEGURANÇA ALIMENTAR .....</b>	<b>41</b>
RESUMO .....	41
2.1 INTRODUÇÃO .....	41
2.2 REVISÃO DE LITERATURA.....	44
2.2.1 A resolução 3.545/2008 do BACEN como instrumento de sustentabilidade no crédito rural.....	44
2.2.2 Desafios e perspectivas da agricultura familiar no Brasil .....	45
2.2.3 Métodos quantitativos e estatísticos aplicados ao crédito rural.....	47
2.3 MATERIAL E MÉTODOS .....	50
2.3.1 Distribuição municipal e variáveis explicativas.....	50
2.3.2 Incorporação da estrutura espacial no modelo Probit .....	52
2.3.3 O modelo econômico espacial.....	55
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
2.4.1 Qualidade das variáveis e caracterização estatística dos dados.....	56

2.4.2	<b>Impacto das atividades agropecuárias na contratação de crédito rural .....</b>	<b>57</b>
2.4.3	<b>Análise do efeito espacial e dos impactos diretos e indiretos.....</b>	<b>59</b>
2.5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>62</b>
2.6	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>63</b>
<b>3</b>	<b>DIVERSIFICAÇÃO DA AGOPECUÁRIA-FLORESTA NO BIOMA AMAZÔNICO: DINÂMICAS ESPACIAIS, SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO REGIONAL.....</b>	<b>70</b>
	<b>RESUMO .....</b>	<b>70</b>
3.1	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>70</b>
3.2	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>72</b>
3.2.1	<b>Diversificação agropecuária-floresta para o desenvolvimento rural sustentável.....</b>	<b>72</b>
3.2.2	<b>Determinantes e impactos da diversificação agropecuária .....</b>	<b>74</b>
3.3	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>76</b>
3.3.1	<b>Índices de diversificação da agricultura, pecuária e silvicultura.....</b>	<b>76</b>
3.3.2	<b>Caracterização e análise da diversificação agropecuária-floresta.....</b>	<b>78</b>
3.3.3	<b>Variáveis explicativas na análise da diversificação agropecuária-florestal.</b>	<b>80</b>
3.3.4	<b>Análise descritiva das variáveis e disparidades regionais no bioma amazônico.....</b>	<b>82</b>
3.3.5	<b>Matriz de ponderação e análise da autocorrelação espacial .....</b>	<b>85</b>
3.3.6	<b>Estruturação da modelagem econômica .....</b>	<b>86</b>
3.3.7	<b>Especificação do modelo econométrico espacial SAC.....</b>	<b>86</b>
3.3.8	<b>Relações das variáveis explicativas com o índice de Shannon .....</b>	<b>88</b>
3.4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>89</b>
3.5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>95</b>
3.6	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>96</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>102</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>104</b>
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>108</b>

## INTRODUÇÃO

O crédito rural é um importante instrumento de estímulo à agropecuária e se configura como um dos principais mecanismos de política agrícola. Ainda assim, o difícil acesso ao crédito pode resultar em baixa produtividade rural, principalmente em países em desenvolvimento, onde a atividade agropecuária enfrenta maior volatilidade dos preços, o que desestimula investimentos e diversificação. Diante desse cenário, os agricultores tendem a priorizar o cultivo de produtos com maior aceitação no mercado. Essa prática aumenta a demanda por terras como forma de ampliar a produtividade, mas pode comprometer a segurança alimentar devido à baixa diversificação de culturas. Assim, as linhas de crédito rural devem beneficiar não apenas os agricultores, mas também toda a sociedade (Nascimento, Carrasco-Gutierrez e Schneid, 2023; Sousa Leite, Castro e Tateishi, 2023; Cruz *et al.*, 2020; Bacha, Danelon e Bel Filho, 2006).

Nesse contexto, a agricultura contemporânea apresenta características que promovem benefícios para o meio ambiente por intermédio dos Sistemas Agroflorestais (SAFs), que se destacam como sistemas integrados capazes de conciliar produção e conservação ambiental. O crédito rural, essencial para impulsionar a agricultura, tem demonstrado uma associação positiva com os SAFs, devido às linhas de financiamento específicas voltadas para práticas rurais sustentáveis. Além disso, produtores vinculados a cooperativas também apresentam elevada adesão a esses sistemas, fortalecendo a integração entre produção e preservação ambiental. Esse cenário evidencia avanços na agricultura em busca da sustentabilidade de suas atividades, refletindo o comprometimento com práticas agrícolas responsáveis e ambientalmente conscientes (de Sene, Bacha, 2024).

Paralelamente, para fortalecer o setor agrícola, é essencial aprimorar não apenas a produção, mas também a eficiência das políticas públicas e dos sistemas de escoamento, tornando o crédito rural indispensável. Em países em desenvolvimento, o acesso ao crédito agropecuário abrange tanto o mercado formal quanto o informal, ampliando o alcance para uma maior parcela da população. A concessão de empréstimos é influenciada por fatores como idade, tamanho da família, nível educacional, gênero e capacidade produtiva. No contexto brasileiro, as restrições ao acesso ao crédito e as decisões de alocação dos recursos indicam que as políticas têm sido eficazes na redução da emissão de gases de efeito estufa, promovendo a sustentabilidade pela implementação de sistemas integrados de cultivo e pecuária (Akoijam, 2012; Linh *et al.*, 2019; Carrer *et al.*, 2020).

Por considerar esse contexto sustentável, o desmatamento no bioma amazônico vem sendo tema de debate na comunidade científica, que analisa a ameaça ecossistêmica imposta e os potenciais efeitos não sustentáveis, destacando, por exemplo, a prática da extração ilegal de madeira. Ademais, outros elementos, como os preços agrícolas e as políticas públicas, exercem influência sobre os índices de desmatamento na região. Embora existam efeitos negativos, como a redução da diversidade biológica, é relevante notar que o desflorestamento pode proporcionar crescimento econômico e aumentar a renda dos habitantes da região por intermédio da agropecuária. Para solucionar essa dicotomia, recorre-se a meios produtivos sustentáveis como o extrativismo orgânico, que explora os recursos naturais sem alterar significativamente o estado natural da mata (Celentano *et al.*, 2018; Ferreira e Coelho, 2015; Oliveira *et al.*, 2011; Ticktin, 2004).

Ainda no bioma amazônico, há comunidades que contribuem para a alimentação da população, principalmente por meio da pesca. Porém, a degradação da floresta tropical pode comprometer o fornecimento desses alimentos, evidenciando a natureza não sustentável do desmatamento. Como alternativa, a produção orgânica, já presente e em expansão no bioma amazônico, surge como solução para aumentar a disponibilidade de alimentos sem comprometer os escassos recursos naturais. Deste modo, a agricultura orgânica representa uma alternativa sustentável para garantir a segurança alimentar dos residentes das regiões de floresta. Desta forma, o crédito rural, especialmente pelas linhas específicas direcionadas à produção orgânica no âmbito do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF) incentiva práticas sustentáveis (Isaac *et al.*, 2015; Neto *et al.*, 2023; Lourenço, Schneider e Gazolla, 2017).

No cenário brasileiro, um elemento útil para o desenvolvimento sustentável e a resiliência econômica, principalmente em condições de mudanças climáticas e pressões ambientais crescentes, é a diversificação agropecuária-floresta. O país, reconhecido por sua diversidade agroecológica, apresenta adversidades devido à concentração da produção em culturas específicas, como soja, milho e cana-de-açúcar. Essa especialização pode trazer ganhos de escala, mas também aumenta a vulnerabilidade do setor agrícola a riscos climáticos e de mercado, além de agravar a perda de biodiversidade. Práticas de diversificação, como a diversificação lavoura-pecuária-floresta, têm demonstrado potencial para aprimorar a eficiência no uso de recursos naturais e promover a sustentabilidade ambiental, com impactos positivos na segurança alimentar e na mitigação de emissões de gases de efeito estufa. Essas estratégias são particularmente relevantes em regiões como o Cerrado e a Amazônia, onde a expansão agrícola tem sido associada ao desmatamento e à degradação ambiental (Paschoalino e Parré,

2023; Parré, Chagas e Arends Kuennen, 2024; Parré e Chagas, 2022; Piedra-Bonilla, Braga e Braga, 2020; Piedra-Bonilla, Cunha e Braga, 2020; Caldeira e Parré, 2020).

Desse jeito, a tese foi composta por três ensaios e teve como objetivo estudar a dicotomia entre o desmatamento florestal e o desenvolvimento econômico, com base no emprego do crédito rural e suas influências sobre a segurança alimentar e a diversificação agropecuária-florestal no bioma Amazônico. Verificou-se se o crédito rural vem sendo utilizado como instrumental capaz de promover a sustentabilidade, que, conforme Brundtland (1987), define-se como método capaz de suprir as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias. Para tanto, foram utilizados métodos econométricos e análises espaciais, como a Regressão Ponderada Geograficamente (RPG), modelo Autorregressivo Espacial (SAR), modelo de Defasagem Espacial com Erro Autorregressivo (SAC), Modelo Espacial de Durbin (SDM) e modelo Probit Espacial.

A partir do escopo geral, o primeiro ensaio teve como objetivo analisar o impacto do crédito rural na sustentabilidade produtiva da agropecuária nos municípios da região amazônica, com ênfase na preservação ambiental e na conciliação entre o crescimento econômico proporcionado pela agropecuária e a conservação do bioma amazônico. Para isso, empregou-se o método da Regressão Ponderada Geograficamente (RPG) na análise dos fatores determinantes do desmatamento no bioma amazônico em 2021. Essa abordagem considerou a variabilidade espacial entre os municípios, sendo o modelo RPG escolhido para identificar efeitos locais e compreender como essas relações mudam no espaço.

Ademais, o segundo ensaio teve como escopo verificar as chances de contratação de crédito rural pelos agropecuaristas do bioma amazônico, considerando variáveis explicativas relacionadas à sustentabilidade e à segurança alimentar, além de investigar como as políticas públicas afetaram esse processo. Para o exame, foram empregados os modelos Probit e Probit espacial. O Probit foi utilizado inicialmente para estimar a probabilidade de contratação sem considerar a dependência espacial, enquanto o Probit espacial incorporou o efeito da interação entre os municípios e seus vizinhos, utilizando uma matriz de contiguidade dos municípios do bioma amazônico para o ano de 2021.

Por fim, o último ensaio buscou identificar os determinantes espaciais da diversificação agropecuária e florestal no bioma amazônico e analisar como essa diversificação impacta os aspectos socioeconômicos e ambientais, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Para isso, foram utilizados índices de diversificação, como os de Simpson e Shannon, para mensurar a concentração produtiva e sua relação com fatores econômicos e ambientais. Além disso, o

estudo empregou o modelo SAC (Defasagem Espacial com Erro Autorregressivo), que combina a defasagem espacial da variável dependente com a autocorrelação espacial do erro.

A proposta da tese foi embasada na Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), do Banco Central do Brasil (BACEN), que regulamentou o acesso ao crédito rural no contexto da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). A resolução incentivou práticas produtivas sustentáveis e estabeleceu critérios para a concessão de crédito rural em áreas de biomas sensíveis, como o amazônico. Seu objetivo principal consistiu em restringir o acesso ao crédito rural em áreas onde houvesse descumprimento das normas ambientais, promovendo práticas que respeitassem a legislação ambiental e incentivando a conservação e o uso sustentável dos recursos naturais. A efetividade dessa resolução foi estudada por Assunção *et al.* (2020) e Feltran-Barbieri e Féres (2021), justificando sua relevância para o cenário agropecuário da região.

As principais contribuições do estudo são evidenciar como o crédito rural pode ser um instrumental eficaz para incentivar práticas sustentáveis, associando sua aplicação à redução do desmatamento, com destaque para a eficácia da Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), que condicionou – pois foi revogada em 1º de maio de 2021 – o acesso ao crédito às atividades não relacionadas ao desflorestamento. Além disso, identificou-se que o crédito rural pode ser direcionado a iniciativas como a recuperação de pastagens e a agricultura orgânica, promovendo equilíbrio entre conservação ambiental e desenvolvimento econômico. A tese também analisou a probabilidade de contratação de crédito rural no bioma amazônico, considerando variáveis agropecuárias que influenciam atividades rurais de maneira desigual entre os municípios, possibilitando compreender como as medidas de proteção da mata impactam o financiamento agropecuário.

Ainda sobre as contribuições, ampliou-se a literatura ao fornecer informações sobre os impactos econômicos regionais no desmatamento e na segurança alimentar. Finalmente, ao explorar características específicas do bioma amazônico, foram identificados fatores que afetam a diversificação agropecuária-florestal no contexto espacial, oferecendo subsídios para decisões políticas voltadas ao desenvolvimento regional sustentável, com foco na preservação ambiental e na garantia da segurança alimentar da população.

Essa tese foi estruturada em um modelo dividido em três ensaios com propostas distintas, porém interligadas. Cada ensaio seguiu a mesma estrutura, composta por resumo, introdução, revisão de literatura, material e métodos, resultados e discussão, além das considerações finais. Ademais, foram incluídos um resumo geral e uma introdução abrangente.

Esse formato proporcionou três artigos completos destinados à publicação, tornando o modelo mais eficiente em comparação ao formato convencional.

## REFERÊNCIAS

- AKOIJAM, S. L. Rural credit: a source of sustainable livelihood of rural India. **International journal of social economics**, v. 40, n. 1, p. 83-97, 2012. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/03068291311283454/full/html>. Acesso em: 01 jan. 2025.
- ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, R.; ROCHA, R. The effect of rural credit on deforestation: Evidence from the Brazilian Amazon. **The Economic Journal**, v. 130, n. 626, p. 290-330, 2020. Disponível em: <https://academic.oup.com/ej/article/130/626/290/5637860>. Acesso em: 01 jan. 2025.
- BACHA, C. J.; DANELON, L.; BEL FILHO, E. D. Evolução da taxa de juros real do crédito rural no Brasil: período de 1985 a 2003. **Teoria e Evidência Econômica**, v. 14, n. 26, p. 43-69, 2006. Disponível em: [http://cepeac.upf.br/download/rev\\_n26\\_2006\\_art2.pdf](http://cepeac.upf.br/download/rev_n26_2006_art2.pdf). Acesso em: 10 jan. 2025.
- BRASIL. Resolução nº 3.545, de 29 de fevereiro de 2008. **Dispõe sobre normas para concessão de crédito rural no contexto da Política Nacional sobre Mudança do Clima**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 mar. 2008. Disponível em: [https://www.bcb.gov.br/pre/normativos/res/2008/pdf/res\\_3545\\_v1\\_o.pdf](https://www.bcb.gov.br/pre/normativos/res/2008/pdf/res_3545_v1_o.pdf). Acesso em: 01 jan. 2025.
- BRUNDTLAND, G. H. What is sustainable development. **Our common future**, v. 8, n. 9, 1987. Disponível em: [https://www.latrobe.edu.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/554927/Sustainability-Plan-2013-2017.pdf](https://www.latrobe.edu.au/_data/assets/pdf_file/0005/554927/Sustainability-Plan-2013-2017.pdf). Acesso em: 01 jan. 2025.
- CALDEIRA, C.; PARRÉ, J. L. Diversificação agropecuária e desenvolvimento rural no bioma cerrado. **Revista Americana de Empreendedorismo e Inovação**, v. 2, n. 1, p. 344-359, 2020. Disponível em: <https://periodicos.unespar.edu.br/index.php/raei/article/view/3356>. Acesso em: 01 jan. 2025.
- CARRER, M. J.; MAIA, A. G.; VINHOLIS, M. D. M. B.; DE SOUZA FILHO, H. M. Assessing the effectiveness of rural credit policy on the adoption of integrated crop-livestock systems in Brazil. **Land use policy**, v. 92, p. 104468, 2020. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/lauspo/v92y2020ics0264837718313838.html>. Acesso em: 01 jan. 2025.
- CELENTANO, D.; MIRANDA, M.V.; MENDONÇA, E.N.; ROUSSEAU, G.X.; MUNIZ, F.H.; LOCH, V.D.C.; VARGA, I.V.D.; FREITAS, L.; ARAÚJO, P.; NARVAES, I.D.S; ADAMI, M. Desmatamento, degradação e violência no "Mosaico Gurupi" - A região mais ameaçada da Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 32, p. 315-339, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/FWCqjfLCzdwQGdjn5bRkBrs>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CRUZ, N. B. D.; JESUS, J. G. D.; BACHA, C. J. C.; COSTA, E. M. Acesso da agricultura familiar ao crédito e à assistência técnica no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 59, e226850, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/Vh4gyBhmFdqqMbMstWmBdGL/?format=html&stop=previo>. Acesso em: 10 jan. 2025

DE SENE, S. M.; BACHA, C. J. C. Adoção dos sistemas integrados na agropecuária do brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, n. 1, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/dChQPqQMtVzkKjp6JVH9cRb/>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FELTRAN-BARBIERI, R.; FÉRES, J. G. Degraded pastures in Brazil: improving livestock production and forest restoration. **Royal Society Open Science**, v. 8, n. 7, 2021. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsos.201854>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FERREIRA, M. D. P.; COELHO, A. B. Desmatamento Recente nos Estados da Amazônia Legal: uma análise da contribuição dos preços agrícolas e das políticas governamentais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 53, p. 91-108, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/ytxBkpWPXVP7t4XhXQKt4jh/>. Acesso em: 01 jan. 2025.

ISAAC, V. J.; ALMEIDA, M. C.; GIARRIZZO, T.; DEUS, C. P.; VALE, R.; KLEIN, G.; BEGOSSI, A. Food consumption as an indicator of the conservation of natural resources in riverine communities of the Brazilian Amazon. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, p. 2229-2242, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/WrNy7gRCLXRjdrhQMbQSPVn/?lang=en>. Acesso em: 01 jan. 2025.

LINH, T. N.; LONG, H. T.; CHI, L. V.; TAM, L. T.; LEBAILLY, P. Access to rural credit markets in developing countries, the case of Vietnam: a literature review. **Sustainability**, v. 11, n. 5, p. 1468, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/5/1468>. Acesso em: 01 jan. 2025.

LOURENÇO, A. V.; SCHNEIDER, S.; GAZOLLA, M. A agricultura orgânica no Brasil: um perfil a partir do censo agropecuário 2006. **Extensão Rural**, v. 24, p. 1, p. 42-61, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Andreia-Lourenco-3/publication/316920105\\_A\\_agricultura\\_organica\\_no\\_Brasil\\_um\\_perfil\\_a\\_partir\\_do\\_censo\\_agropecuario\\_2006/links/5dcd9559299bf1b74b423c64/A-agricultura-organica-no-Brasil-um-perfil-a-partir-do-censo-agropecuario-2006.pdf?\\_sg%5B0%5D=started\\_experiment\\_milestone&origin=journalDetail&rtd=e30%3D](https://www.researchgate.net/profile/Andreia-Lourenco-3/publication/316920105_A_agricultura_organica_no_Brasil_um_perfil_a_partir_do_censo_agropecuario_2006/links/5dcd9559299bf1b74b423c64/A-agricultura-organica-no-Brasil-um-perfil-a-partir-do-censo-agropecuario-2006.pdf?_sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail&rtd=e30%3D). Acesso em: 01 jan. 2025.

NASCIMENTO, D. H.; CARRASCO-GUTIERREZ, C. E.; SCHNEID T. M. Rural credit and agricultural production: empirical evidence from Brazil. **International Journal of Finance & Economics**, v. 28, n. 4, p. 4236-4245. 2023. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/wly/ijfec/v28y2023i4p4236-4245.html>. Acesso em: 01 jan. 2025.

NETO, L. R. B.; DE SOUZA, A. L.; DE OLIVEIRA, C. P.; PIMENTEL, C. A. C.; ALVES, R. D. P.; VASCONCELOS, R. D. C. F. Análise da certificação de produtos orgânicos no estado do Pará, Brasil: resultados e perspectivas. **Revista Macambira**, v. 7, n. 1, 2023. Disponível em: <http://www.revista.lapprudes.net/index.php/RM/article/view/935>. Acesso em: 01 jan. 2025.

OLIVEIRA, R. C. D.; ALMEIDA, E.; FREGUGLIA, R. D. S.; BARRETO, R. C. S. Desmatamento e crescimento econômico no Brasil: uma análise da curva de Kuznets ambiental para a Amazônia legal. **Revista de economia e sociologia rural**, v. 49, p. 709-739, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/6XXhymQGJLJsRZKwYNDw9S/?lang=pt>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PARRÉ, J. L.; CHAGAS, A. L. S. Determinants of agricultural diversification in Brazil: a spatial econometric analysis. **Letters in Spatial and Resource Sciences**, v. 15, n. 2: 173-195, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12076-021-00295-0>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PARRÉ, J. L.; CHAGAS, A. L. S.; ARENDS-KUENNING, M. P. The effect of farm size and farmland use on agricultural diversification: a spatial analysis of Brazilian municipalities. **Agricultural and Food Economics**, v. 12, n. 1, p. 27, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40100-024-00323-9>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PASCHOALINO, P. A. T.; PARRÉ, J. L. Diversificação e produção agrícola no Brasil. **Perspectivas das Exportações de Etanol no Brasil**, v. 121, 2023. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1833>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PIEDRA-BONILLA, E. B.; BRAGA, C. A. S.; BRAGA, M. J. Diversificação agropecuária no Brasil: conceitos e aplicações em nível municipal. **Brazilian Review of Economics & Agribusiness / Revista de Economia e Agronegócio**, v. 18, n. 2, 2020. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=16791614&AN=147970672>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PIEDRA-BONILLA, E. B.; DA CUNHA, D. A.; BRAGA, M. J. Climate variability and crop diversification in Brazil: An ordered probit analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120252, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620302997>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SOUZA LEITE, F. N.; CASTRO, E. R. D.; TATEISHI, H. R. Regional impacts of rural credit and rural insurance policies on crop area and productivity: evidence from São Paulo state, Brazil (2008 and 2017). **Agricultural Finance Review**, v. 83, n. 2, p. 352-374, 2023. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eme/afrpps/afr-02-2022-0024.html>. Acesso em: 01 jan. 2025.

TICKTIN, T. The ecological implications of harvesting non-timber forest products. **Journal of Applied Ecology**, v. 41, n. 1, p. 11-21, 2004. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2664.2004.00859.x>. Acesso em: 01 jan. 2025.

## **1 A INFLUÊNCIA DO CRÉDITO RURAL NA CONSERVAÇÃO DO BIOMA AMAZÔNICO**

### **RESUMO**

O avanço do desmatamento no bioma amazônico preocupa a sociedade contemporânea, ao passo que o crédito rural desempenha a função estimular as atividades agropecuárias da região. Recentemente, esforços têm sido realizados para conter o avanço sobre a floresta, como a restrição ao acesso de crédito rural. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi identificar os principais determinantes do desflorestamento e analisar os efeitos das medidas restritivas ao acesso do crédito rural no bioma amazônico, além de investigar como essas linhas de financiamento podem incentivar práticas ligadas à sustentabilidade. Para tal, foi aplicado o método de Regressão Ponderada Geograficamente (RPG) no ano de 2021. Foi encontrado que em grande parte dos municípios, a relação entre a taxa de desmatamento e os valores contratados mediante o crédito rural é negativa enquanto para a quantidade de bovinos, positiva. Desta forma, a variável contribui para a preservação florestal da região, acusando a eficiência da Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 que limitou os recursos financeiros da agropecuária ligados ao desflorestamento e foi revogada em 1º de maio de 2021. O achado está ligado ao maior emprego de escopos produtivos que combinam os conceitos de sustentabilidade. Como possível extensão do estudo, recomenda-se ampliar o espaço temporal para possibilitar a captação de efeitos que ocorrem ao longo do tempo.

**Palavras-chave:** Desmatamento; Atividades agropecuárias; Sustentabilidade; Recursos financeiros; Agropecuária.

### **1.1 INTRODUÇÃO**

O desmatamento na Amazônia, promovido pela agropecuária é uma objeção ambiental e socioeconômico. Em 2021, o estado do Pará perdeu 5.238 km<sup>2</sup> de floresta, impactando a biodiversidade, a qualidade da água e contribuindo para as mudanças climáticas. Apesar do crescimento econômico gerado pela agropecuária, seus impactos ambientais demandam medidas mitigadoras. À vista disso, políticas públicas e instrumentos financeiros, como o crédito rural, têm sido empregados para estimular práticas sustentáveis. A Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), estabeleceu critérios ambientais para a concessão de crédito rural na Amazônia, buscando reduzir o desmatamento. Contudo, sua revogação em maio de 2021 gera questionamentos sobre os impactos dessa medida e alternativas para equilibrar desenvolvimento econômico e conservação ambiental (Brasil, 2008; INPE, 2022).

A teoria de Coase (1960), oferece uma perspectiva para compreender essa dinâmica. Os problemas de externalidades, como poluição ou desmatamento, não devem ser vistos apenas como ações prejudiciais de um agente a outro, mas como um problema de escolha entre custos recíprocos. No caso amazônico, a agropecuária impulsiona a economia, mas gera custos ambientais. Se os direitos de propriedade e as transações de mercado fossem plenamente eficientes e sem custos, os agentes econômicos poderiam negociar soluções sustentáveis sem necessidade de regulação estatal. Porém, a ausência de governança adequada, fiscalização

insuficiente e barreiras institucionais impedem que tais negociações aconteçam de maneira eficiente. Portanto, a revogação da Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), pode ter reduzido a capacidade de internalizar esses custos ambientais, tornando a intervenção regulatória necessária para evitar que o crédito rural atue como um incentivo ao desmatamento.

O desmatamento do bioma amazônico é discutido na comunidade científica, que aponta riscos ecossistêmicos e os efeitos não sustentáveis dessa prática. Além da extração ilegal de madeira, fatores como os preços agrícolas e as políticas públicas influenciam as taxas de desmatamento. Apesar da redução da biodiversidade, a agropecuária proporciona elevação da renda local. Para solucionar essa dicotomia, propõem-se meios produtivos sustentáveis, como o extrativismo orgânico, que permite a exploração dos recursos naturais sem comprometer a floresta (Celentano *et al.*, 2018; Ferreira e Coelho, 2015; Oliveira *et al.*, 2011; Ticktin, 2004).

Nesse sentido, diferentes governos adotam estratégias diversas para conter o desmatamento. Enquanto políticas ambientais e Organizações Não Governamentais (ONGs) contribuem para a redução do desflorestamento, governos liberais tendem a incentivar a exploração ao garantir direitos individuais sobre as terras. Independentemente da política ambiental adotada, há esforços globais para preservar as florestas devido aos efeitos negativos do desmatamento, como o aumento da temperatura global. Entretanto, análises sobre os impactos do desmatamento podem ser distorcidas quando não consideram fatores como densidade populacional, área de floresta remanescente e preços internacionais do setor agropecuário (Wehkamp *et al.*, 2018; Motel, Pirard e Combes, 2009).

O crédito rural pode impulsionar o desmatamento ao viabilizar a conversão da vegetação nativa em áreas agropecuárias. Para conter esse avanço, a Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), determinava requisitos ambientais para a concessão de empréstimos, incentivando práticas sustentáveis, como a recuperação de pastagens degradadas. Não obstante, sua revogação em 2021 levanta preocupações sobre a flexibilização do acesso ao crédito e seus impactos na preservação da floresta (Brasil, 2008; Fernandes e Rondina Neto, 2022; Assunção *et al.*, 2020; Feltran-Barbieri e Féres, 2021).

É relevante ressaltar que, mesmo com incentivos legais, o desenvolvimento sustentável pode acarretar custos, incluindo a necessidade de abrir novas estradas, estabelecer normas sobre direito de propriedade e crescimento populacional. Apesar dos desafios associados a tais questões, o crescimento econômico sustentável pode ser alcançado. O escopo produtivo orgânico, por exemplo, demonstra como é possível unir prosperidade financeira com conservação ambiental (Jusys, 2016; Saraiva *et al.*, 2020).

Partindo da premissa de que o crédito rural contribui positivamente para a promoção da agropecuária sustentável no bioma amazônico, esta investigação analisou seus impactos na sustentabilidade, examinando a relação entre a concessão de crédito e a taxa de desmatamento após a revogação da Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008). Para isso, foi empregada a Regressão Ponderada Geograficamente (RPG) a fim de avaliar os efeitos locais do crédito rural em cada município. O estudo propôs estratégias para equilibrar o crescimento econômico e a conservação ambiental, incentivando o financiamento de práticas sustentáveis, como a recuperação de pastagens e a agricultura orgânica.

A investigação está estruturada em cinco etapas. A primeira consiste na introdução. Em seguida, apresenta-se a fundamentação teórica, baseada em uma revisão de literatura. Na terceira seção, são descritos o material e métodos utilizados. A discussão dos resultados é abordada na quarta etapa, e, por fim, o trabalho é encerrado com as considerações finais e recomendações para possíveis extensões desta pesquisa no futuro.

## 1.2 REFERENCIAL TEÓRICO

Há registros de estudos sobre economia e sustentabilidade que abordam o desenvolvimento econômico aliado à preservação ambiental, buscando explorar a formulação de políticas públicas que conciliem ambos. No Brasil, o avanço agropecuário entra em conflito com a demanda social pela preservação do bioma amazônico. Nessa mesma lógica, compreender fatores como governança, comércio e recursos financeiros auxilia na apreciação desse tema. Por esse motivo, a revisão de literatura e as aplicações realizadas pelos pesquisadores sobre a temática estão expostas nas próximas subseções. Inicialmente, apresentam-se as contribuições em torno do tema e, em seguida, as aplicações utilizadas para a obtenção desses achados.

### 1.2.1 Economia e Sustentabilidade

A literatura que aborda a relação entre governança e redução do desflorestamento apresenta resultados diversos, incluindo achados positivos, inconclusivos e negativos. Em um estudo conduzido por Wehkamp *et al.* (2018), por exemplo, os pesquisadores investigaram o nível de governança e as medidas específicas adotadas pelos governos. Os autores identificaram que as políticas de deflorestamento mudam de acordo com o tipo de governo. Esse achado evidenciou diferenças na forma como os agentes centrais conduzem a administração pública, sugerindo que os contextos políticos podem influenciar os resultados ambientais.

A governança, contudo, pode impactar não apenas o desmatamento, mas também as políticas de comércio exterior. No contexto brasileiro, o país se destaca como um dos maiores produtores e exportadores mundiais de carne bovina. A atividade de abate de gado está diretamente atrelada aos preços internacionais, de modo que o aumento desses preços estimula a expansão do rebanho no país. Conforme apontado por Zu Ermgassen *et al.* (2020), as exportações brasileiras de carne bovina figuram entre os principais vetores do desmatamento da Amazônia. A interação entre fatores econômicos, ambientais e comerciais, portanto, ressalta a necessidade de abordagens integradas para enfrentar as questões associados à produção agropecuária e ao comércio internacional.

Entre os fatores que podem ocasionar o desflorestamento, a agricultura se destaca como um dos principais. Nos países em desenvolvimento, o aumento da demanda por produtos agropecuários é frequentemente visto como uma oportunidade de gerar mais divisas. Nesse cenário, áreas de mata nativa, como a Amazônia, são visadas para expansão da produção agrícola. Embora existam esforços para manter a mata virgem, condições econômicas desencorajam a imposição de restrições às atividades rurais, evidenciando os obstáculos de conciliar a preservação ambiental com a geração de renda (Leblois, Damette e Wolfersberger, 2017).

Sob esse prisma, o estudo de Pfaff *et al.* (2015) discute a associação entre desenvolvimento econômico e a pressão sobre o uso da terra, enfatizando que áreas protegidas enfrentam menor incentivo ao desmatamento em virtude das legislações que as regem. Ao mesmo tempo, áreas próximas a rodovias e centros urbanos se apresentam mais suscetíveis à exploração. Comumente, as localidades onde o transporte é facilitado e menos dispendioso acabam sendo as primeiras a sofrerem degradação (Souza-Rodrigues, 2019). Nesse sentido, Souza-Rodrigues (2019) destaca a função de políticas que imponham restrições ao uso da terra, tais como a seleção de pontos de mata fechada para facilitar ações de controle e fiscalização. Portanto, ainda que as medidas regulatórias voltadas à sustentabilidade e à mitigação de impactos ambientais decorrentes do desenvolvimento econômico mostrem eficácia, elas nem sempre se refletem plenamente na realidade.

A questão da mudança climática, uma das preocupações ligadas ao desmatamento, tem atraído atenção mundial. No Brasil, as alterações na floresta amazônica afetam diretamente a qualidade de vida da população, conforme sinalizado por Balboni *et al.* (2023). Esses autores enfatizaram que o desflorestamento em países em desenvolvimento, juntamente com externalidades como o aumento da poluição e a redução do bem-estar social, adquiriu relevância na literatura econômica. Um exemplo pode ser observado no estudo de Prem, Saavedra e Vargas

(2020), segundo o qual o fim da guerra na Colômbia favoreceu a redução do desflorestamento na região amazônica do país, evidenciando as interações socioeconômicas, políticas e ambientais inerentes às florestas tropicais.

Desta maneira, o panorama da agricultura brasileira, predominantemente controlada por corporações multinacionais, apresenta elevada concentração de mercado em poucas empresas. Como consequência, há uma distribuição desigual do crédito rural não direcionado, com apenas uma pequena parcela destinada às famílias rurais, que costumam promover práticas de cultivo mais sustentáveis. Desse modo, a agroecologia surge como alternativa às atividades agropecuárias que não demandam desflorestamento, tal como salientam Santos *et al.* (2014). Ademais, Medina e Santos (2017) apontaram que menos de 20% do crédito rural contratado alcança as famílias rurais, o que restringe a adoção de métodos mais sustentáveis em áreas de desmatamento e expõe a carência de ações políticas focadas a esse grupo. Por fim, reforça-se a possibilidade de evitar ou diminuir o desflorestamento por meio do incentivo, via crédito, aos participantes da agricultura familiar, contribuindo para a conservação ambiental e o desenvolvimento econômico de forma equilibrada.

### **1.2.2 Métodos quantitativos e políticas públicas**

Diferentes métodos vêm sendo empregados para investigar o desmatamento. Um exemplo é o estudo de Assunção, Gandour, Rocha e Rocha (2020), que analisou o impacto das restrições ao acesso ao crédito rural em 2008, período em que foram impostos embargos na obtenção de linhas de crédito para atividades relacionadas ao desflorestamento. Na pesquisa, os autores utilizaram um painel espacial de diferenças em diferenças, abrangendo o período de 2003 a 2011 e considerando todos os municípios da Amazônia Legal. Logo, as exigências impostas foram eficazes na redução do desmatamento, pois restringiram um dos principais apoios à agropecuária brasileira.

No Brasil, observa-se a ocorrência de pastos degradados em razão da ineficiência técnica na manutenção do solo. A recuperação dessas áreas pode resultar em reflorestamento, viabilizando a restauração da mata. De acordo com Feltran-Barbieri e Féres (2021), esse processo beneficia tanto agropecuaristas quanto formuladores de políticas, já que a terra e a floresta, uma vez recuperadas, podem propiciar aumento de renda no futuro. Para verificar os ganhos econômicos locais provenientes da recuperação, as pastagens não degradadas foram estimadas por meio de um Modelo de Erro Autorregressivo Espacial (SEM), recorrendo-se, mais uma vez, a técnicas espaciais de análise.

Outro estudo que empregou métodos econométricos espaciais para avaliar a variabilidade local dos termos preditores, fazendo uso da Regressão Ponderada Geograficamente (RPG), foi o de Trigueiro, Nabout e Tessarolo (2020). Nessa investigação, o bioma analisado foi o cerrado, que apresenta altas taxas de desmatamento semelhantes às do bioma amazônico. O desflorestamento foi então associado a fatores socioeconômicos, ambientais e estruturais em escala regional. Constatou-se que padrões semelhantes de comportamento eram recorrentes em diversas localidades, sendo o crédito rural o principal fator impulsionador do desflorestamento no cerrado brasileiro. Os autores concluíram que as políticas públicas devem ter foco em biomassas específicas, considerando-se as diferenças entre as regiões e suas peculiaridades.

Santos *et al.* (2021) também aplicaram a RPG para identificar agrupamentos de desflorestamento na Amazônia. Foram selecionadas 14 variáveis estratégicas, as quais explicaram 96% do fenômeno, incluindo o número de bovinos, o Produto Interno Bruto (PIB) *per capita*, a população estimada, o crédito rural e a extensão de mata conservada. A variável que mais influenciou o desmatamento foi a quantidade de gado, que formou um agrupamento de municípios ao sul da área estudada. Contudo, algumas variáveis apresentaram colinearidade em virtude da transmissão de informações semelhantes. Ao final, foi identificado um arco de desflorestamento no sul da região, reforçando a eficácia da RPG.

Resultados semelhantes aos de Santos *et al.* (2021) também foram observados por Jusys (2016), que utilizou a RPG para analisar a Amazônia Legal, abrangendo parte do cerrado brasileiro. Em contrapartida, em um estudo com outro enfoque, Saraiva *et al.* (2020) buscaram identificar meios de regenerar florestas, empregando um painel estimado pelo Método de Momentos Generalizados (GMM). Concluiu-se que multas pelo uso indevido da terra contribuem para conter o desmatamento. Corroborando esse achado, Cisnegros, Zhou e Borner (2015) aplicaram um painel estimado por dupla diferença, assim como feito por Assunção, Gandour, Rocha e Rocha (2020), apontando que a fiscalização territorial, as campanhas de registro ambiental e a restrição ao crédito rural reduzem efetivamente o avanço do desmatamento.

### 1.3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta etapa, argumenta-se em torno dos materiais empregados nessa pesquisa como as variáveis que compõem a equação econômica base, as suas respectivas fontes e unidades de medida. Adicionalmente, o motivo da escolha do regressor e dos regressores também foi

explicado. Além disso, o modelo econométrico espacial decomposto completa a seção como o método aderente ao objetivo e aplicado aos dados.

### 1.3.1 Análise da situação do desmatamento na Amazônia

Para esta pesquisa, foram selecionados os 559 municípios que compõem o bioma amazônico, como indicado na Figura 1. Esses municípios estão distribuídos nos estados do Acre, Amazonas, Roraima, Rondônia, Mato Grosso, Pará, Amapá, Maranhão e Tocantins. Destacando que, devido à presença do bioma do cerrado nos estados do Maranhão e Tocantins, e a cobertura do estado do Mato Grosso em partes da Amazônia, do Cerrado e do Pantanal, algumas áreas destes três estados não foram incluídas no estudo.

Figura 1. Municípios inseridos no bioma amazônico



Fonte: realizado pelo autor com base nos dados do IBGE.

A coleta dos dados foi realizada de diversas fontes com unidades de medida diferentes, conforme descrito na Tabela 1. As variáveis monetárias tiveram seus valores ajustados para dezembro de 2021 com o auxílio do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para a exposição de informações e aplicação de métodos, foram usados programas de acesso livre, tais como Geoda, QGIS e R.

Ainda na Tabela 1, os valores das variáveis explicativas de cada município foram divididos pelo número de habitantes, visando remover algum possível viés decorrente do

tamanho geográfico da localidade. Porém, a taxa de desmatamento florestal foi obtida considerando a variação percentual do desmatamento do bioma amazônico entre 2020 e 2021. Além disso, coletou-se as informações dos regressores para o ano de 2021 por representar o momento em que a Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), foi revogada. Por fim, com o intuito de reduzir a variância das observações, aplicou-se o logaritmo natural em todos os termos independentes.

Tabela 1. Descrição das variáveis selecionadas para o modelo econômico

Variável	Descrição	Medida	Fonte
des	Taxa da área desflorestada	%	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
piba	Produto Interno Bruto da agropecuária por município	R\$	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)
cred	Crédito contratado para atividades rurais de custeio e investimento	R\$	Banco Central do Brasil (BACEN)
milho	Milho colhido por município	Tonelada	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)
soja	Soja colhida por município	Tonelada	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)
gado	Cabeças de gado por município	Unidade	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
flo	Área de floresta por município	Km <sup>2</sup>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
nflo	Área de não-floresta por município	Km <sup>2</sup>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
hid	Área de superfície coberta por água por município	Km <sup>2</sup>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Nota: realizado pelos autores.

A taxa de desflorestamento, *des*, reflete o espaço em quilômetros onde ocorreu a remoção da vegetação natural. Esta foi selecionada como o termo dependente, porque se visou identificar os fatores que influenciaram a redução da floresta amazônica, similar ao regressor utilizado por Santos *et al.* (2021). Na sequência, a primeira variável explicativa incluída foi *piba*, que indica o Produto Interno Bruto (PIB) agropecuário de cada município selecionado, expressando o valor total em reais gerado pela atividade agrícola e pecuária na região. Acreditou-se que seu efeito fosse positivo, dado que a agricultura convencional demanda espaço para suas operações, como indicado por Trigueiro, Nabout e Tessarolo (2020), que usaram o PIB, e Santos *et al.* (2021), que empregaram o PIB ponderado pela população.

O crédito rural, *cred*, é um regressor bastante utilizado na literatura, adotado também por Santos *et al.* (2021), Trigueiro, Nabout e Tessarolo (2020), e Assunção, Gandour, Rocha e Rocha (2020). Esperou-se que os valores monetários, obtidos da Estatística Bancária Mensal

por município (ESTBAN) do BACEN, direcionados às atividades rurais estimulassem o desmatamento, pois a agropecuária é conhecida por utilizar recursos naturais. Portanto, uma relação positiva entre o crédito rural e o desmatamento no bioma amazônico foi pressuposta. Tanto *milho*, toneladas de milho, quanto *soja*, toneladas de soja, são termos incluídos por representarem a agricultura e estarem presentes na região. Dado que ambas exigem espaço para o cultivo, um efeito positivo no desmatamento foi aguardado. Enquanto Santos *et al.* (2021) e Trigueiro, Nabout e Tessarolo (2020) consideraram os produtos agrícolas de maneira agregada, nesta investigação se optou por separar as duas principais culturas, buscando captar efeitos distintos.

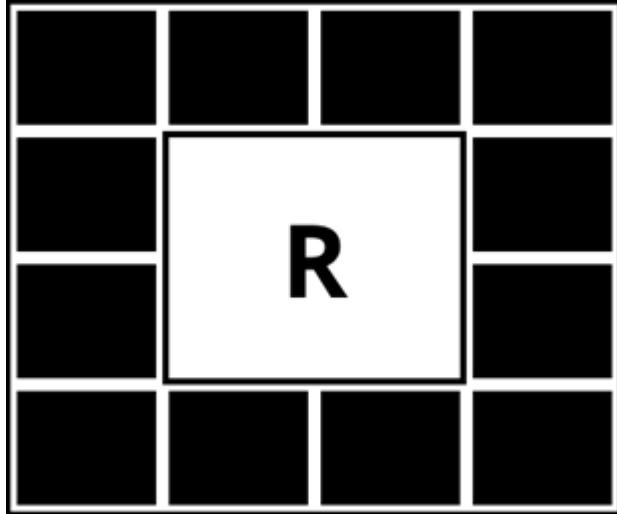
O número de cabeças de gado, *gado*, é outro termo independente comum na literatura. A criação de gado é estimulada pelos preços internacionais e pela desvalorização cambial, o que beneficia as exportações. Isso proporciona aos agropecuaristas o incentivo de expandir seus rebanhos em busca de maior renda, tornando a região da Amazônia um alvo atrativo. A quantidade de cabeças de gado foi incluída em outras pesquisas como possível fator causador de desflorestamento, incluindo Assunção, Gandour, Rocha e Rocha (2020), Feltran-Barbieri e Féres (2021), Trigueiro, Nabout e Tessarolo (2020), e Santos *et al.* (2021), demonstrando sua relevância nesta abordagem.

Novidades, as variáveis, *flo*, área de floresta, *nflo*, área de não-floresta, e *hid*, área coberta por água, não foram encontradas na literatura base dessa pesquisa. A partir disto, antecipou-se um impacto positivo para *flo*, considerando que uma maior extensão de floresta poderia sugerir maior potencial de desmatamento. Em contrapartida, previu-se um efeito oposto para *nflo*, partindo da suposição de que uma menor quantidade de árvores disponíveis resultaria em um nível inferior de desmatamento. Por fim, relação negativa entre *hid* e *des* foi aguardada, seguindo o mesmo raciocínio de *nflo*, uma vez que maior cobertura de água pode limitar a capacidade de uso da terra para a agropecuária. O propósito ao observar *hid* era de descobrir qualquer relação entre a área percentual desmatada e os recursos hídricos dos municípios, como lagos e rios.

Antes de analisar os efeitos locais por meio da RPG, foi verificada a existência da autocorrelação global por meio do I de Moran Global, condição mínima para viabilizar a inferência espacial, pois as áreas devem influenciar umas às outras apontando autocorrelação. Iniciou-se conforme descrito por Anselin (1995), na estatística espacial, deve-se definir a matriz de ponderação espacial de dimensão  $n$  por  $n$  antes de aplicar o algoritmo. O peso espacial,  $W_{ij}$ , indica o grau conectivo entre as localidades  $i$  e  $j$  conforme algum critério geográfico ou socioeconômico. Definida de acordo com a contiguidade e a distância entre as localidades, a

base geográfica foi escolhida por se estar trabalhando com municípios. Devido à disposição das localidades no espaço, a matriz do tipo rainha foi utilizada por considerar os vértices contínuos (Almeida, 2012). Na Figura 2, apresenta-se uma região central, chamada de R, que é vizinha de outras áreas em sua volta, formando uma representação de matriz de contingência do tipo rainha.

Figura 2. Representação de uma matriz de peso do tipo rainha



Fonte: realizado pelos autores.

Definida a matriz de peso, aplicou-se o I de Moran Global. Em Moran (1948), foi definido um coeficiente de autocorrelação espacial pela medida da autocovariância do produto cruzado conhecido como I de Moran Global, Eq. (1):

$$I = \frac{z'Wz}{z'z} \quad (1)$$

em que a autocovariância espacial é representada pelos produtos cruzados  $z'Wz$ ,  $z$  denota os valores da variável de interesse padronizada,  $Wz$  indica os valores médios dos vizinhos da variável de interesse padronizada, definidos pela matriz de ponderação espacial  $W$ . O número índice encontrado,  $I$ , pode estar entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo da unidade positiva, maior será a autocorrelação positiva enquanto mais perto da unidade negativa, maior será a autocorrelação negativa. Exalta-se que diferente do coeficiente de correlação clássico, a total ausência de correlação espacial não corresponde ao valor zero, exceto quando  $n$  tende ao infinito que não é o caso, mas pela expressão  $-1/(n-1)$ , apontado por Chasco e Vallone (2023) e Fernandes e Stachio (2024).

### 1.3.2 Teoria e metodologia da Regressão Ponderada Geograficamente

Como se desejou verificar as causas do desmatamento do bioma amazônico por município com foco nas variáveis selecionadas, optou-se pelo método da RPG para compreender a dinâmica do desflorestamento. O conceito da RPG foi inicialmente introduzido por Goodchild e Longley (1987). Nessa ocasião, os estudiosos discutiram o potencial de utilizar sistemas de informações geográficas em dados espaciais e enfatizaram a possível heterogeneidade das regressões, delineando os princípios básicos da RPG e suas aplicações.

A RPG foi definida por Fotheringham, Brunsdon e Charlton (2002) e Brunsdon, Fotheringham e Charlton (1996). Para cada localização específica  $i$ , o modelo da RPG pode ser escrito como na Eq. (2):

$$y_i = \beta_{0i} + \sum_{j=1}^p \beta_{ji} x_{ji} + e_i \quad (2)$$

em que:  $y_i$  é a variável de resposta para a localização  $i$ ,  $\beta_{0i}$  é o intercepto que varia espacialmente em  $i$ ,  $\beta_{ji}$  é o coeficiente de regressão da variável preditora  $j$  na localização  $i$ ,  $x_{ji}$  é o valor da variável preditora  $j$  na localização  $i$  e  $e_i$  é o termo de erro para a localização  $i$ .

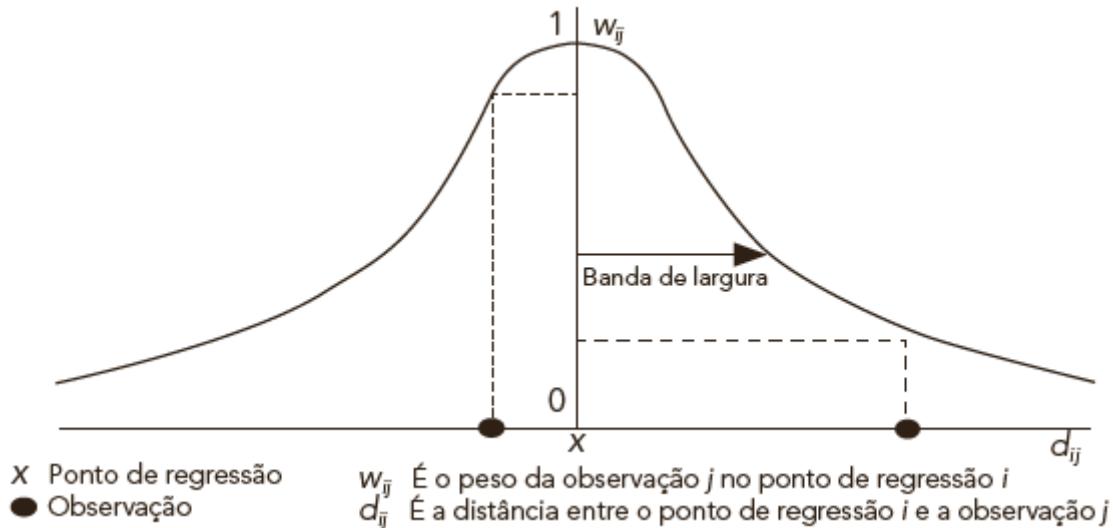
Para Almeida (2012) e Marconato, Parré e Coelho (2020), a RPG cria uma sucessão de regressões lineares, estimadas para cada localidade, utilizando subamostras ponderadas pela distância. São incluídos pesos às observações com base em um ponto de referência conhecido como ponto de calibragem, sendo que quanto mais próxima dessa referência for a observação, maior é sua importância. A partir da Eq. (3), pode-se estimar os coeficientes locais como:

$$y_i = \beta_0(u_i v_i) + \sum_{j=1}^p \beta_{ji}(u_i v_i) x_{ji} + e_i \quad (3)$$

em que  $(u_i v_i)$  representam as coordenadas do ponto  $i$  no espaço, e  $\beta_{ji}(u_i v_i)$ , o coeficiente local  $i$ . E o termo de erro,  $e_i$ , segue uma distribuição normal com média zero e variância constante. Desta forma, a RPG gera um coeficiente para cada região  $i$  a partir da distância do ponto focal que se baseia a regressão.

Característica distinta da RPG, a largura da banda foca na suavização dos coeficientes locais, quanto maior for a banda, maior será a suavização dos coeficientes locais, porque mais observações serão selecionadas em torno do ponto de calibragem. Ou seja, quanto menor for a banda, maior será a heterogeneidade nos resultados, pois menos observações serão utilizadas em torno da referência, a Figura 3 representa essa ideia.

Figura 3. Representação da largura da banda de uma RPG



Fonte: adaptado pelos autores com base em Fotheringham *et al.* (2002).

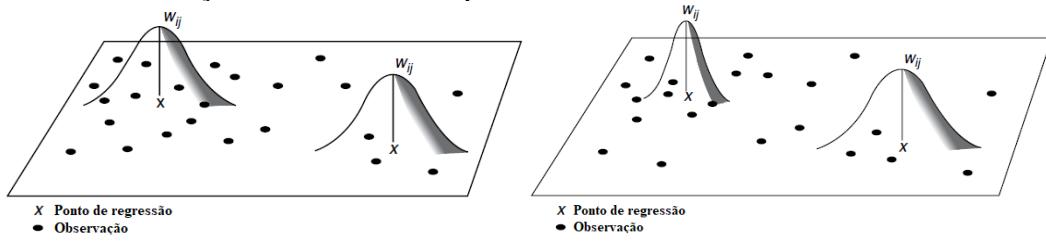
A técnica utiliza uma função de ponderação usada para atribuir pesos mais altos às observações próximas e pesos mais baixos às observações distantes. O peso atribuído a cada observação é tipicamente definido usando uma função *kernel*, a observação  $j$  em relação à localização  $i$  é dado pela Eq. (4):

$$W_{ij} = K\left(\frac{d_{ij}}{h_i}\right) \quad (4)$$

em que  $K(\cdot)$  é a função de *kernel*,  $d_{ij}$  é a distância entre a localização  $i$  e a observação  $j$ ,  $h_i$  é o parâmetro de largura de banda para a localização  $i$  que determina o tamanho do município local.

Podendo assumir os tipos de banda fixa ou adaptativa, deve-se selecionar a classe mais aderente aos dados. Em razão disso, a função *kernel* do tipo fixo pode ser redundante a depender da subamostra, são comumente aplicados em regiões densas em dados, considerando o elevado número de observações para a calibragem. O *kernel* fixo é ineficiente em regiões em que os dados são escassos, podendo ser menor que o necessário para a calibração dos coeficientes locais. De outra maneira, o *kernel* adaptativo expande as áreas em que as observações são escassas e se encolhe nas áreas em que as observações são abundantes, isto é, em regiões de alta densidade de dados. A diferença entre os tipos de banda é mostrada na Figura 4 (Fotheringham *et al.* 2002).

Figura 4. Banda da função *kernel* fixa e adaptativa



Nota: adaptado pelo autor com base em Fotheringham *et al.* (2002).

A largura de banda  $h_i$  é essencial na RPG, pois determina a extensão espacial do local para cada observação. Alguns métodos podem ser usados para selecionar uma largura de banda apropriada, como o Critério de Informação de Akaike (AIC) ou a Validação Cruzada (VC). O procedimento é estimado separadamente para cada localização, permitindo que os coeficientes de regressão variem espacialmente, oferecendo informações sobre como as relações entre as variáveis mudam no espaço de acordo com o recorte selecionado. Então, os modelos locais são estimados com base na largura de banda escolhida e na função de ponderação espacial.

### 1.3.3 Modelagem econométrica

Gerando uma sequência de regressões lineares, a RPG estima cada área empregando subamostras ponderadas pela distância, Almeida (2012). Afirma-se que a atribuição de pesos às observações individuais ocorre a partir de um ponto focal e a influência das observações reduz quanto mais distante estiverem desta referência. A representação da Eq. (5) estimada:

$$\begin{aligned} des_i = & \beta_o(u_i, v_i) + \rho(u_i, v_i)des_i^* + credito\beta_1(u_i, v_i) + piba\beta_2(u_i, v_i) \\ & + milho\beta_3(u_i, v_i) + soja\beta_4(u_i, v_i) + gado\beta_5(u_i, v_i) \\ & + flo\beta_6(u_i, v_i) + nflo\beta_7(u_i, v_i) + hid\beta_8(u_i, v_i) + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (5)$$

em que o termo  $(u_i, v_i)$  representa as coordenadas no espaço da localidade i,  $des_i^*$  representa a média da taxa de desmatamento dos 10 municípios mais próximos de i,  $\varepsilon_i$  é o termo de erro aleatório e o  $\rho$ ,  $credito\beta_1$ ,  $piba\beta_2$ ,  $milho\beta_3$ ,  $soja\beta_4$ ,  $gado\beta_5$ ,  $flo\beta_6$ ,  $nflo\beta_7$  e  $hid\beta_8$  são os coeficientes a serem estimados.

## 1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

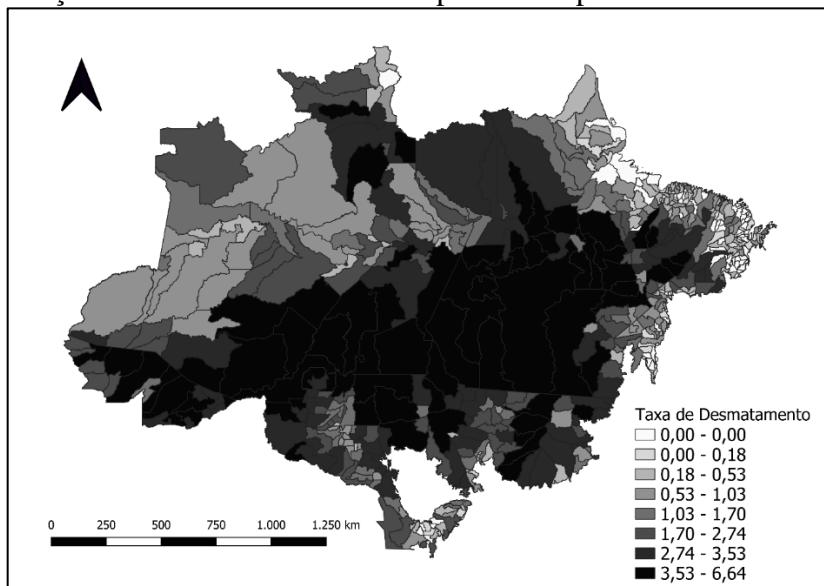
O resumo dos resultados do método selecionado e aplicado estão expostos e interpretados nesta parte da investigação. Adicionalmente, o debate dos achados em comparação aos da literatura base foram incluídos com o intuito de acusar e justificar suas

diferenças e similaridades, além de destacar os pontos em que houve avanços científicos na temática.

#### 1.4.1 Exame e aplicação de modelos espaciais

Antes da inferência estatística, precisa-se entender a dinâmica espacial do desmatamento no bioma amazônico. O regressando, a taxa de desmatamento por localidade, está exposta na Figura 5 em termos percentuais. O município de Altamira, o único na categoria com 6,64% de desflorestamento, está situado no estado do Pará e representa a maior área desflorestada. Também é possível visualizar que as regiões de maiores taxas estão concentradas nas áreas centrais do bioma amazônico, ocorrendo menor exploração da mata nas fronteiras. Segundo dados do IBGE (2023), Altamira é próspera na agropecuária e, no ano de 2021, contou com quase um milhão de cabeças de gado em seu território. Em conclusão, o agrupamento que inicia no Maranhão e Pará e vai em direção aos estados do Mato Grosso, Rondônia e Acre, é conhecido como o cinturão do desmatamento e se destaca como a área de maior nível de desflorestamento em todo o recorte (Domingues e Bermann, 2012).

Figura 5. Distribuição da taxa de desmatamento por município do bioma amazônico



Fonte: realizado pelo autor com base nos dados do INPE.

Compreendidos os focos do desflorestamento, buscou-se, por meio da RPG, verificar a significância dos termos regressores em cada município, adotando a taxa de desmatamento como dependente, uma vez que os resultados podem variar conforme a localidade. Por conseguinte, a RPG foi selecionada para explicar o grau de influência dos termos explicativos na taxa de desmatamento do bioma amazônico.

No teste que verifica a existência de autocorrelação espacial global, a hipótese nula é de aleatoriedade espacial. A partir disso, rejeitou-se a hipótese nula apontando autocorrelação espacial, Tabela 2. A verificação foi realizada a partir dos resíduos de uma regressão estimada por Máxima Verossimilhança (MV), porque, de acordo com Almeida (2012), é preferível a MV ou o Método dos Momentos Generalizados (GMM), em comparação ao método de estimação dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) quando há correlação espacial nos dados. Por fim, como o coeficiente encontrado foi de 0,5866, a autocorrelação espacial é positiva, indicando que as interações municipais acontecem de maneira positiva no contexto global.

Tabela 2. Ressumo dos resultados do teste I de Moran Global

Valores	I de Moran Global 0,5866***	Expectativa -0,0095	Variância 0,0007
---------	--------------------------------	------------------------	---------------------

Nota: realizado pelo autor.

Legenda: “\*” = significativo a 10%; “\*\*” = significativo a 5%; “\*\*\*” = significativo a 1%.

Embora parte das variáveis utilizadas neste estudo já tenha sido utilizada em outras pesquisas, ainda foi necessário verificar a qualidade destas no modelo proposto. Para tal, o Fator de Inflação de Variância (FIV), foi adotado com o intuito de identificar a presença de multicolinearidade, como apresentado na Tabela 3. Observou-se que nenhum regressor exibe problemas de elevada colinearidade. É exaltado que os termos relacionados à quantidade produzida de milho, *milho*, e de soja, *soja*, apresentaram valores mais elevados no teste, mas não indicam problema de colinearidade.

Tabela 3. Resultados do teste FIV para multicolinearidade

Variáveis	FIV
cred	1.169531
piba	1.174509
milho	5.628415
soja	5.555475
gado	1.450330
flo	1.327409
nflo	1.053562
hid	1.283648

Fonte: realizado pelo autor com base nos resultados da pesquisa.

Ainda avaliando a qualidade das variáveis estudadas, expôs-se algumas informações descritivas em logaritmo natural na Tabela 4. A amplitude, a média e o desvio padrão, acusa a qualidade dos dados para a inferência estatística que busca disponibilizar informações que representem a realidade. A boa aderência é percebida nos desvios-padrão baixos, assim como a amplitude em que, apenas no crédito rural, indicou valor máximo elevado em comparação aos

outros regressores, da mesma forma que a média e o desvio padrão. A maioria dos termos mostraram valor mínimo igual a zero, isto é causado devido às suas características que não permitem valores negativos. Em conclusão, os valores revelam qualidade para a aplicação do método proposto.

Tabela 4. Análise descritiva das variáveis

Variáveis	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo
des	1,5577	1,5682	6,6420	0,0000
cred	12,2700	3,2607	19,4000	0,0000
piba	4,0098	2,3857	12,118	0,2427
milho	0,8502	1,2482	5,8391	0,0000
soja	0,8087	1,3991	5,4304	0,0000
gado	2,9706	1,5605	6,7870	0,0002
flo	0,2604	0,5116	4,9151	0,0000
nflo	0,0691	0,1247	0,6792	0,0000
hid	0,0327	0,0884	1,2886	0,0000

Nota: realizado pelo autor com base nos resultados da pesquisa.

Na sequência, após a análise descritiva, estimou-se o modelo linear por MV, Tabela 5. Nesse contexto, o crédito rural, *cred*, mostrou-se associado negativamente ao desmatamento, o que sugere que, no período e região de análise, o uso de recursos financeiros não contribuiu para o desflorestamento. Esse resultado ratifica os efeitos da Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), e corrobora os achados de Assunção, Gandour, Rocha e Rocha (2020). Contudo, a *soja* apresentou impacto positivo, assim como a área coberta por floresta, *flo*. Tais resultados eram esperados, pois o cultivo de soja pode demandar expansão de áreas para aumento produtivo e, no caso de *flo*, quanto maior a quantidade de floresta disponível, maior se torna a viabilidade de retirada de mata para atividades ligadas ao campo. Em contrapartida, o contrário ocorre com *nflo*, quanto menor for o espaço para desmatar, menor tende a ser o estímulo para o desmate. Da mesma forma, a área coberta por água, fundamentada na Lei n. 12.651/2012, Brasil (2012), também funciona como limitador do desflorestamento; quanto maior for o território de rios e lagos, *hid*, menor será a superfície passível de conversão florestal. Em suma, os resultados corroboram a literatura existente.

Tabela 5. Resumo dos resultados do modelo global estimado por MV

Variáveis	Coeficiente
Intercepto	1,8496***
cred	-0,5772***
piba	0,0194
milho	-0,0511
soja	0,1793*

gado	0,0495
flo	1,2319***
nflo	-1,2421**
hid	-4,6337***

Fonte: realizado pelo autor com base nos resultados da pesquisa.

Legenda: “\*\*\*” = significância de 1%, “\*\*” = significância de 5%, “\*” = significância de 10%.

Depois da estimação por MV, determinou-se a quantidade ótima de vizinhos para cada localização, também conhecida como largura de banda, antes da aplicação da RPG. Esta foi definida por meio da função *kernel* que pode ser fixa ou adaptativa. No caso de uma configuração fixa, a amostragem é regular, enquanto na adaptativa, o formato distributivo é irregular. Na Tabela 6, foi testada a aderência com base na Validação Cruzada (CV) e no Kernel Gaussiano (G) com base no teste formulado por Leung, Mei e Zhang (2000) em que a menor pontuação indica o modelo adequado. Sendo assim, as saídas contidas na Tabela 6 mostram que a largura de banda mais aderente aos dados é o Kernel Gaussiano Adaptativo, isto é, a banda será maior em áreas de observações escassas e menor nas densas.

Tabela 6. Os resultados do teste de escolha da banda para a RPG

Método	Kernel	Tipo	RMSE
CV	Gaussian	Adaptativo	0,8763
CV	Bisquare	Adaptativo	0,9066
CV	Gaussian	Fixo	0,9204
CV	Bisquare	Fixo	1,0135
AIC	Gaussian	Adaptativo	1540,95
AIC	Bisquare	Adaptativo	1470,18
AIC	Gaussian	Fixo	1438,25
AIC	Bisquare	Fixo	1610,97

Nota: realizado pelo autor com base nos resultados da pesquisa.

Legenda: RMSE = Desvio quadrático médio.

Estimado o modelo por MV e RPG, Leung, Mei e Zhang (2000) propuseram outro teste para averiguar a qualidade da RPG em comparação a MV. Contrasta-se a Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) entre as duas propostas, sendo que o menor valor indica o modelo de regressão preferível. Foi identificado um SQR de 206,193 para a RPG e 1084,833 para a MV, acusando a preferência da RPG. Adicionalmente, a significância a 1% do teste *F* confirma que há diferença estatística entre os procedimentos. Desta forma, sustenta-se que a RPG é mais aderente aos dados. Além disso, no teste de significância da variância dos regressores da RPG, Tabela 7, apenas o *cred*, *soja*, *gado* e *flo* apresentam relevância estatística para estimar o desmatamento do bioma amazônico, foram analisadas por esse motivo.

Tabela 7. Resumo do teste da significância da variância dos regressores

Variável	Estatística F	Denominador	Numerador
Intercepto	3,0108***	113,2428	391,66
cred	1,4977**	94,1286	391,66
piba	0,4643	89,4040	391,66
milho	1,0071	22,2549	391,66
soja	1,4139*	22,8953	391,66
gado	2,9536***	79,6935	391,66
flo	2,3185***	47,9869	391,66
nflo	0,5585	9,1292	391,66
hid	0,6685	16,4725	391,66

Nota: realizado pelos autores.

Legenda: “\*\*\*” = significância de 1%, “\*\*” = significância de 5%, “\*” = significância de 10%.

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que a RPG se apresentou a abordagem mais adequada para analisar as dinâmicas espaciais do desmatamento no bioma amazônico, superando a MV em termos de aderência aos dados. A metodologia revelou que variáveis como crédito rural, produção de soja, quantidade de cabeças de gado e área florestal exercem influência significativa sobre as taxas de desmatamento, destacando os fatores econômicos e ambientais na configuração do problema.

#### 1.4.2 Impactos regionais do crédito rural no desmatamento

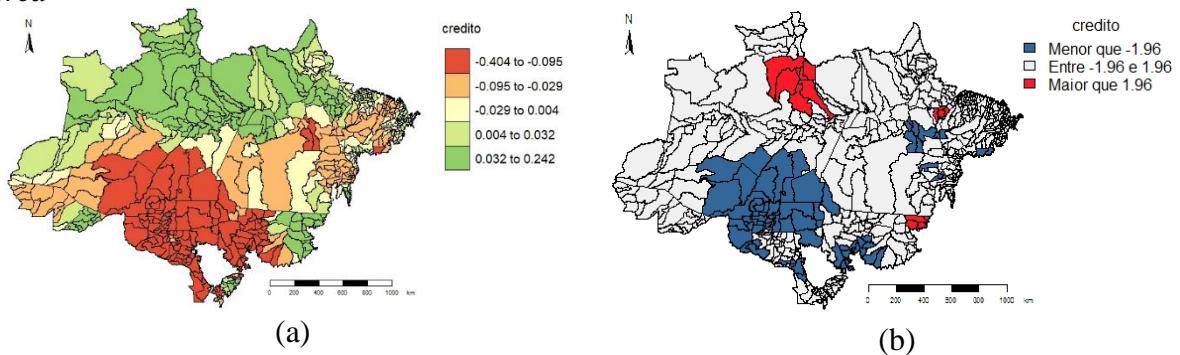
Como os resultados da RPG mostraram que as variáveis explicativas de *crédito*, *soja*, *gado* e *flo* foram as únicas estatisticamente significativas para explicar a taxa de desmatamento do bioma amazônico, em função disso, a inferência se concentrou nos resultados destes regressores. A começar pelos empréstimos de crédito rural, Figura 6 (a) – termo também empregado por Assunção, Gandour, Rocha e Rocha (2020) –, observa-se que, na maior parte das observações, os coeficientes são negativos. Isso indica uma relação inversa entre a taxa de desmatamento e o nível de contratação de empréstimos rurais; ou seja, quanto maior o valor dos empréstimos, menor a taxa de desmatamento. Logo, o crédito tem contribuído negativamente para o desflorestamento, corroborando os achados de Assunção, Gandour, Rocha e Rocha (2020), que identificaram uma redução no uso das linhas de financiamento rural destinadas a atividades de desarborização. Deste jeito, os efeitos positivos da Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), como a disponibilização de financiamento apenas para atividades não ligadas ao desmatamento, são ratificados.

A partir dos valores dos coeficientes, foi aplicado o teste *t* a 5%, o qual evidenciou a significância estatística dos resultados. Na Figura 6 (a) são apresentados os valores dos coeficientes, e na Figura 6 (b) constam aqueles que exibiram significância estatística. Deste

modo, compararam-se os valores de todos os coeficientes com aqueles que efetivamente se mostraram estatisticamente significativos, evidenciando sua relevância para explicar a contratação de crédito rural no bioma amazônico.

Na maioria dos municípios que apresentaram coeficientes estatisticamente significativos na Figura 6 (b), constatou-se uma relação negativa com o crédito rural, sugerindo que as linhas de financiamento para atividades agropecuárias não contribuem para o desmatamento. Em contrapartida, há alguns pequenos agrupamentos em que a relação ainda é positiva, o que sugere que a Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), trouxe benefícios, embora não de forma plena. Nesse sentido, recomenda-se a manutenção ou até mesmo a intensificação da política restritiva.

Figura 6. Valor dos coeficientes estimados e do teste  $t$  a 5% de significância para a variável *cred*



Fonte: realizado pelo autor com base nos dados da pesquisa.

Nota: (a) representa os valores dos coeficientes da variável *cred*; (b) representa os valores do teste  $t$  da variável *cred*.

O município de Presidente Figueiredo (AM) registrou um acréscimo de 15% no desmatamento em comparação ao ano de 2020, além de ter recebido aproximadamente 15 milhões de reais em crédito rural. Entretanto, nenhum dos municípios localizados no agrupamento ao norte do recorte da Figura 6 (b) – Presidente Figueiredo (AM), Urucará (AM), Caracaraí (RR), São Luiz (RR), Rorainópolis (RR), São João da Baliza (RR) e Caroebe (RR) – cultivou soja no período analisado. Isso sugere que o desmatamento nesses locais não está relacionado ao cultivo da soja, mas ao de outras culturas como o arroz e a mandioca.

Todavia, existe uma ligação entre o desmatamento e a quantidade de cabeças de gado, como observado em Rorainópolis, que registrou 54% de desmatamento e possui 81.767 cabeças de gado. Em Caroebe, com 37,3% de desmatamento, há 81.233 cabeças de gado, enquanto Caracaraí, com 22,7% de desmatamento, apresenta 47.766 cabeças. Esses dados indicam que o desmatamento está associado à pecuária, que demanda a conversão de áreas florestais em

pastagens. Além disso, essa dinâmica é facilitada pelo fato de esses municípios ainda apresentarem extensas áreas florestais disponíveis, o que viabiliza a expansão das atividades rurais, como demonstram os territórios de Rorainópolis, 23.815 km<sup>2</sup>, e Caroebe, 10.803 km<sup>2</sup>.

Outro aspecto pertinente revelado é a falta de diversificação de atividades econômicas na região, evidenciando uma dependência da pecuária como principal geradora de renda rural. Logo, a principal justificativa para o desmatamento nesses locais é a conversão de florestas em pastagens destinadas à criação de gado. Em suma, o crédito rural tem exercido valiosa incumbência nesses municípios, mas está sendo majoritariamente direcionado para atividades ligadas à pecuária, que não seguem os princípios da Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008). Isso exprime que a política de crédito rural não está sendo plenamente cumprida em toda a região, já que os recursos têm fomentado o desmatamento.

Embora o grupo formado por Presidente Figueiredo (AM), Urucará (AM), Caracaraí (RR), São Luiz (RR), Rorainópolis (RR), São João da Baliza (RR) e Caroebe (RR) também produza itens como mel de abelha, açaí e dendê, observa-se a expansão de atividades menos alinhadas aos princípios agroecológicos, como o cultivo de cana-de-açúcar e a criação de gado, reforçando a conexão positiva entre o desmatamento e o uso do crédito rural na região.

Em relação a outros dois agrupamentos menores destacados em vermelho na Figura 6 (b) e localizados mais próximos ao Cerrado, um deles é formado por Cametá (PA), Oeiras do Pará (PA), Limoeiro do Ajuru (PA) e Igarapé-Miri (PA). Este apresenta características semelhantes ao outro agrupamento menor, localizado mais ao sul, composto por Vila Rica (MT), Confresa (MT) e Santa Terezinha (MT). Nessas localidades, foi registrada a presença de cultivo de soja, evidenciando que o crédito rural tem contribuído para o desmatamento tanto pela expansão da soja quanto pela criação de gado.

No agrupamento de Cametá, Oeiras do Pará, Limoeiro do Ajuru e Igarapé-Miri, destaca-se ainda uma elevada produção de cacau, em comparação com outras áreas de significância positiva identificadas na Figura 6 (b). Embora o cacau possa ser extraído de forma orgânica, a presença de cabeças de gado sugere que o manejo dessas atividades não está sendo realizado de maneira alinhada à Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008).

Por sua vez, no recorte formado por Vila Rica, Confresa e Santa Terezinha, não foram registradas atividades relacionadas ao açaí ou ao cacau. Ainda assim, há presença de borracha, que poderia ser extraída de forma orgânica. Com isso, o destaque recai sobre o cultivo em larga escala de soja e milho, além de considerável quantidade de cabeças de gado, justificando a relação positiva entre o crédito rural e o desmatamento na região.

Já na área em que a relação entre o crédito rural e o desmatamento é negativa, destacada em azul na Figura 6 (b), observa-se um caso diferente, como em Porto Velho, capital de Rondônia. Nessa cidade e em suas adjacências, prevalecem culturas agropecuárias mais alinhadas aos princípios agroecológicos. Em Porto Velho, por exemplo, destacam-se a produção de mel de abelha, com 5.000 kg em 2021, e açaí, que é um exemplo de extrativismo orgânico, com 642 toneladas produzidas, de acordo com as definições de Landau *et al.* (2020). Esses elementos ajudam a explicar os resultados apresentados na Figura 6 (b), que indicam atividades sustentáveis no município.

Nesta investigação, a agricultura está sendo representada pela soja, uma cultura comum no Brasil e presente na região. Diferentemente do crédito rural, a soja apresenta, em (a) da Figura 7, coeficientes de maior valor em comparação ao cartograma da Figura 6 (a). Em sua maioria, os valores foram baixos; mas, em alguns pontos do mapa, a quantidade de soja produzida em toneladas exerceu impacto positivo na derrubada de árvores. Nesse sentido, conforme destacado por Trigueiro, Nabout e Tessarolo (2020), a dinâmica do desmatamento na Amazônia pode ser similar à do Cerrado. Por conseguinte, os fatores que contribuem para o desflorestamento do Cerrado podem ser os mesmos que atuam na Amazônia, tais como os socioeconômicos, ambientais e estruturais em escala regional.

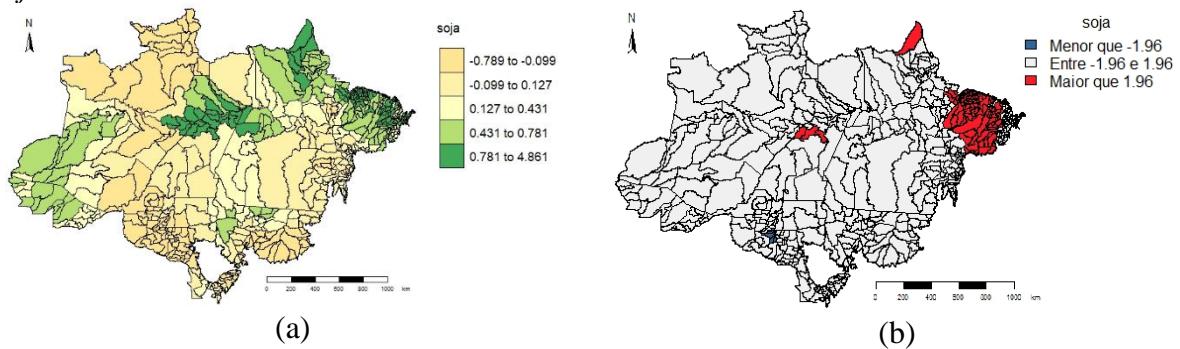
Ainda no contexto da soja, Figura 7 (b), observou-se que, no nordeste do bioma amazônico – região próxima ao Cerrado –, os coeficientes influenciam positivamente a taxa de desmatamento. À vista disso, a cultura da soja se destaca como um fator que contribui positivamente para o desflorestamento. Essa constatação está alinhada a estudos anteriores sobre a Amazônia Legal e o Cerrado, como os trabalhos de Assunção, Gandour, Rocha e Rocha (2020), Feltran-Barbieri e Féres (2021) e Trigueiro, Nabout e Tessarolo (2020).

Tendo como referência o município de Paragominas (PA), observa-se um agrupamento de municípios em que a cultura da soja afeta positivamente o desmatamento, com significância estatística de 5%. Esse fenômeno ocorre predominantemente no bioma amazônico, mas é mais comum na região de fronteira com o cerrado. Isso sugere uma possível extensão de uma atividade que se inicia no cerrado e, progressivamente, expande-se para a Amazônia.

Porém, um pequeno conjunto de municípios – composto por Nova Olinda do Norte (AM), Autazes (AM) e Careiro (AM) – apresenta uma contribuição positiva da soja no desmatamento. Essa tendência, que também pode ser observada na Figura 7 (b), destaca-se em áreas onde há maior intensidade de desmatamento, conforme indicado pela Figura 5. Essa dinâmica ocorre porque, proporcionalmente, essas localidades já tiveram grande parte de seus territórios desmatados, principalmente devido à presença prolongada da agropecuária.

Além disso, o recorte mais ao sul do cinturão do desmatamento, destacado por Domingues e Bermann, (2012), Figura 5, reflete um histórico de avanço sobre a vegetação nativa por períodos mais longos. Como consequência, essas áreas têm registrado maior eficácia na aplicação da Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), possivelmente devido a uma fiscalização mais rigorosa.

Figura 7. Valor dos coeficientes estimados e do teste  $t$  a 5% de significância para a variável soja



Nota: (a) representa os valores dos coeficientes da variável *soja*; (b) representa os valores do teste  $t$  da variável *soja*.

Fonte: realizado pelo autor com base nos dados da pesquisa.

Em relação ao número de cabeças de gado, foram observadas algumas semelhanças entre as áreas destacadas em (a) e (b) da Figura 8, principalmente no cinturão do desmatamento, onde a presença de gado contribui para o avanço do desflorestamento na maior parte dos municípios. Isso mostra que, diferentemente do que ocorre com o crédito, o aumento no número de cabeças de gado está positivamente associado à expansão do desmatamento.

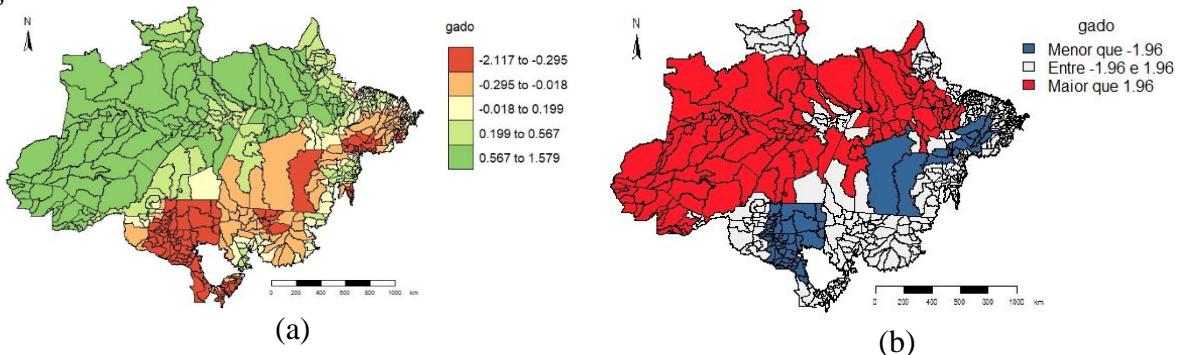
Uma possível explicação para esse resultado está relacionada à demanda e aos preços, uma vez que a criação de gado frequentemente ocorre de forma extensiva no Brasil, exigindo vastas áreas de pastagem. Não obstante, essa situação pode representar uma oportunidade para o reflorestamento, conforme discutido por Feltran-Barbieri e Féres (2021), que destacaram a grande quantidade de pastagens degradadas no território brasileiro. Ademais, a recuperação dessas áreas degradadas pode, além de contribuir para o reflorestamento, oferecer possibilidades de exploração sustentável no futuro.

Devido à realização de atividades mais alinhadas aos conceitos de sustentabilidade, observa-se, na Figura 8 (b), que há municípios onde, quanto maior a quantidade de gado, menor é o desmatamento. Esse fenômeno é atribuído à recuperação de pastagens, como ocorre em Altamira (PA). Não obstante, na faixa que se inicia no estado do Pará e se estende até o Acre, uma área de fronteira onde o desmatamento tem ocorrido em taxas menores, Figura 5, verifica-

se que a quantidade de gado contribui para o desmatamento em uma proporção maior do que a agricultura, quando comparada à Figura 7 (b).

Como resultado, o maior estímulo ao desmatamento nessa região de menor taxa de desmatamento está relacionado à variável *gado*. Ainda assim, nas áreas onde a agropecuária está presente há mais tempo, observa-se o início de processos de recuperação de áreas degradadas, incluindo o plantio de novas árvores, como Feltran-Barbieri e Féres, (2021) destacam. Isso evidencia que ações voltadas para a conservação da floresta e a promoção de atividades sustentáveis são mais frequentes nas regiões com maior histórico de desmatamento.

Figura 8. Valor dos coeficientes estimados e do teste *t* a 5% de significância para a variável *gado*



Nota: (a) representa os valores dos coeficientes da variável *gado*; (b) representa os valores do teste *t* da variável *gado*.

Fonte: realizado pelo autor com base nos dados da pesquisa.

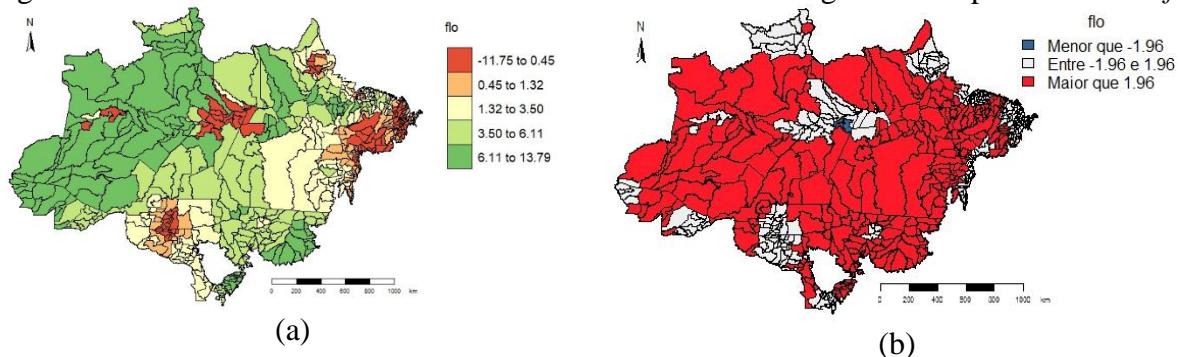
Quanto maior a extensão de área disponível para o desmatamento, maiores são as chances de ocorrer desflorestamento. Entretanto, apesar desse argumento, foi possível identificar na Figura 9 (a) que alguns municípios cujos coeficientes apresentam valores negativos. Esse resultado ocorre em áreas de reservas florestais, industriais ou em regiões em que o desmatamento já atingiu a maior parte do território municipal. Independentemente do nível de desmatamento em determinada região, medidas como a aplicação de multas, campanhas de conscientização e registro, bem como restrições ao crédito rural, podem ser adotadas para conter a expansão sobre a floresta, conforme destacado por Santos *et al.* (2021), Jusys (2016), Saraiva *et al.* (2020), Cisnegros, Zhou e Borner (2015) e Assunção, Gandour, Rocha e Rocha (2020).

Em vista disso, a Figura 9 (b) mostra que a área disponível de floresta apresenta significância positiva em quase todo o recorte, corroborando o argumento de que uma maior densidade de mata afeta positivamente o desmatamento. Embora seja significativa, a variável representativa de floresta, *flo*, não exibiu um padrão diferente do esperado. Em alguns municípios de menor área, verificou-se uma relação negativa com o desmatamento,

provavelmente devido à limitação de área florestal disponível para exploração nessas localidades.

Na Figura 9 (b), observa-se que a maioria dos municípios do bioma amazônico apresenta uma relação de causalidade positiva entre a área florestal e o nível de desmatamento. Ainda assim, três municípios – Barreirinha (AM), Urucurituba (AM) e Boa Vista do Ramos (AM) – exibem uma causalidade negativa. Essa discrepância é explicada pelo tamanho dos municípios, uma vez que localidades com grandes áreas de floresta tendem a apresentar maiores valores absolutos de desmatamento. Isso sugere que, em regiões onde a cobertura florestal já é reduzida, os índices percentuais de desmatamento podem ser menores, pois a área restante já foi intensamente desmatada em anos anteriores, alcançando um limite. Tal fenômeno ocorre, sobretudo, em áreas que foram previamente convertidas para atividades como agricultura e urbanização.

Figura 9. Valor dos coeficientes estimados e do teste  $t$  a 5% de significância para a variável *flo*



Nota: (a) representa os valores dos coeficientes da variável *flo*; (b) representa os valores do teste  $t$  da variável *flo*.  
Fonte: realizado pelo autor com base nos dados da pesquisa.

Em conclusão, a análise da Figura 6, Figura 7, Figura 8 e Figura 9, revelou variações nos valores dos coeficientes entre os municípios. Entretanto, foi necessário verificar a significância estatística desses resultados, independentemente dos regressores em questão. Mesmo que uma localidade apresente um coeficiente positivo, este pode não ser estatisticamente relevante de acordo com os critérios adotados. Portanto, apenas as regiões que passaram no teste de significância estatística foram exploradas.

Em síntese, houve heterogeneidade nos resultados das variáveis, não sendo possível identificar qualquer padrão uniforme entre os regressores, com exceção de *flo*. Além disso, propõe-se o Extrativismo Sustentável Orgânico (EXT) como alternativa para alocar o crédito rural, pois o EXT combina os conceitos de extrativismo sustentável e agricultura orgânica. Essa prática consiste na coleta de recursos naturais sem comprometer sua recuperação a longo prazo, isto é, de maneira sustentável e sem o uso de produtos químicos sintéticos. O EXT é classificado

como um escopo produtivo do método orgânico de cultivo e pode auxiliar os agropecuaristas do bioma amazônico a desenvolver a região por meio do emprego de recursos financeiros destinados ao meio rural, sem promover o desmatamento. Ademais, define-se escopo produtivo como o conjunto de atividades, processos e recursos necessários para produzir bens ou serviços em um determinado contexto (Ticktin, 2004; Landau *et al.*, 2020).

Em resumo, as variáveis explicativas *cred*, *soja*, *gado* e *flo* foram estatisticamente significativas para explicar a taxa de desmatamento no bioma amazônico. O crédito rural apresentou, na maioria dos casos, uma relação negativa com o desmatamento, sugerindo que as restrições impostas pela Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), têm contribuído para a redução da derrubada de árvores. Contudo, há exceções, onde o financiamento foi direcionado para atividades agropecuárias associadas ao desflorestamento, como na pecuária extensiva. Em alguns municípios, a criação de gado causou desmatamento, indicando que a conversão de florestas em pastagens é um dos motivos que elevam as taxas de desflorestamento.

## 1.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo contribuiu com a literatura identificando os fatores que influenciam as taxas de desmatamento, tanto positivamente como negativamente, num contexto espacial. Além disso, foi identificado diferentes padrões no recorte que não expõem uniformidade. Desta forma, propôs-se tratar cada município considerando as suas especificidades. À vista disso, as localidades de maior taxa de desmatamento apresentaram comportamento diferente das demais de menor nível, isto mostra a atuação do fluxo de empréstimos de crédito rural, da quantidade em toneladas de soja, do número de cabeças de gado e da área coberta por floresta na desarborização do bioma amazônico.

Após o estabelecimento da Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), que objetivou restringir o acesso aos financiamentos rurais para conter o desflorestamento da floresta amazônica, percebeu-se menor grau de desmatamento mediante atividades que utilizam os recursos financeiros voltados para a agropecuária. Sendo o acesso ao crédito rural um impulsor do avanço agropecuário, foi apontado que a resolução vem sendo efetiva, pois a maior parte dos municípios que apresentaram significância estatística e estão localizados na região focal do desmatamento, mostraram relação inversa dos efeitos do uso do crédito rural sobre o desflorestamento. Tanto que se identificou um agrupamento de localidades em que o maior uso de recursos rurais causou menor nível de desmatamento.

A criação de gado está presente no bioma amazônico e, assim como a produção de soja, exige recursos financeiros para sua realização. Apesar das restrições, o número de cabeças de gado não foi impactado pela Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008) da mesma forma e proporção que o crédito rural. Isto posto, em alguns municípios, o aumento na quantidade de gado contribuiu para o incremento da taxa de desmatamento, uma vez que, em áreas onde o desmatamento ainda não havia ocorrido em maior escala, a presença de gado incentivou essa prática. Nesse contexto, a recuperação de pastagens pode justificar a redução do desmatamento em regiões onde a criação de gado é uma atividade agropecuária predominante.

Atividade sustentável presente na região do bioma amazônica, o EXT, combina características do extrativismo sustentável e agricultura orgânica. Esse é um escopo produtivo que se extrai os benefícios da mata sem desflorestar. Dentre os produtos que estão presentes no território e são extraídos de maneira sustentável estão o açaí, a castanha-do-Brasil, o cupuaçu e o guaraná. Com isso, esse método de produção justifica o uso dos recursos financeiros voltados ao setor rural de maneira que não haja contribuição positiva ao desmatamento.

Por fim, esta investigação corrobora com a literatura e contribuí apontando que a taxa de desmatamento foi afetada negativamente pelo nível de crédito rural e positivamente pela quantidade de cabeça de gado. Assim, destinar recursos financeiros ao meio rural para atividades sustentáveis pode representar ser uma alternativa viável para a preservação da floresta, proporcionando benefícios sociais que não comprometam significativamente o bioma e promovam o desenvolvimento econômico. Além disso, a produção voltada para práticas agroecológicas, como a agricultura orgânica, permite essa integração. Para o futuro, recomenda-se uma análise temporal mais abrangente para capturar os efeitos espaciais ao longo do tempo.

## 1.6 REFERÊNCIAS

ANSELIN, L. Local indicators of spatial association - LISA. **Geographical analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>. Acesso em: 01 jan. 2025.

ALMEIDA, E. **Econometria Espacial Aplicada**. Editora Alínea, 2012.

ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, R.; ROCHA, R. The effect of rural credit on deforestation: Evidence from the Brazilian Amazon. **The Economic Journal**, v. 130, n. 626, p. 290-330, 2020. Disponível em: <https://academic.oup.com/ej/article/130/626/290/5637860>. Acesso em: 01 jan. 2025.

BALBONI, C.; BERMAN, A.; BURGESS, R.; OLKEN, B. A. The economics of tropical deforestation. **Annual Review of Economics**, v. 15, p. 723-754, 2023. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-economics-090622-024705>. Acesso em: 01 jan. 2025.

BRASIL. Resolução nº 3.545, de 29 de fevereiro de 2008. **Dispõe sobre normas para concessão de crédito rural no contexto da Política Nacional sobre Mudança do Clima**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 mar. 2008. Disponível em: [https://www.bcb.gov.br/pre/normativos/res/2008/pdf/res\\_3545\\_v1\\_o.pdf](https://www.bcb.gov.br/pre/normativos/res/2008/pdf/res_3545_v1_o.pdf). Acesso em: 01 jan. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 maio 2012. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acesso em: 01 jan. 2025.

BRUNSDON, C.; FOTHERINGHAM, A. S.; CHARLTON, M. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. **Geographical Analysis**, v. 28, n. 4, p. 281-298, 1996. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1538-4632.1996.tb00936.x>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CELENTANO, D.; MIRANDA, M.V.; MENDONÇA, E.N.; ROUSSEAU, G.X.; MUNIZ, F.H.; LOCH, V.D.C.; VARGA, I.V.D.; FREITAS, L.; ARAÚJO, P.; NARVAES, I.D.S.; ADAMI, M. Desmatamento, degradação e violência no "Mosaico Gurupi" - A região mais ameaçada da Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 32, p. 315-339, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/FWCqjfLCzcvQGdjn5bRkBrS>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CISNEROS, E.; ZHOU, S. L.; BÖRNER, J. Naming and shaming for conservation: Evidence from the Brazilian Amazon. **Plos One**, v. 10, n. 9, sep., 2015. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.013640>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CHASCO, C; VALLONE, A. **Introduction to Cross-Section Spatial Econometric Models with Applications in R**. 2023. Disponível em: <https://www.preprints.org/manuscript/202309.0413/v1>. Acesso em: 01 jan. 2025.

COASE, R. H. The problem of social cost. **Journal of Law and Economics**, v. 3, n. 1, p. 1-44, 1960.

DOMINGUES, M. S.; BERMANN, C. O arco de desflorestamento na Amazônia: da pecuária à soja. **Ambiente & sociedade**, v. 15, p. 1-22, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/tykKcbYvdnsX5CHcH97qNcd/?lang=pt>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FELTRAN-BARBIERI, R.; FÉRES, J. G. Degraded pastures in Brazil: improving livestock production and forest restoration. **Royal Society Open Science**, v. 8, n. 7, 2021. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsos.201854>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FERNANDES, P. G. A.; NETO, A. R. Crédito rural no paraná: uma análise municipal para o período entre 2013 e 2018. **Revista Paranaense de Desenvolvimento - RPD**, v. 43, n. 142, 2022. Disponível em: <https://ipardes.emnuvens.com.br/revistaparanaense/article/view/1220>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FERNANDES, P. G. A.; STACHIO, L. P. Análise espacial dos repasses do estado do Paraná aos municípios de 2017 até 2021. **Cadernos de Finanças Públicas**, v. 24, n. 02, 2024. Disponível em: <https://publicacoes.tesouro.gov.br/index.php/cadernos/article/view/222>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FERREIRA, M. D. P.; COELHO, A. B. Desmatamento Recente nos Estados da Amazônia Legal: uma análise da contribuição dos preços agrícolas e das políticas governamentais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 53, p. 91-108, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/ytxBkpWPXVP7t4XhXQKt4jh/>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FOTHERINGHAM, A. S.; BRUNSDON, C.; CHARLTON, M. Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships. **John Wiley & Sons**, 2023. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Geographically+Weighted+Regression%3A+The+Analysis+of+Spatially+Varying+Relationships+-p-9780471496168>. Acesso em: 01 jan. 2025.

GOODCHILD, M. F.; LONGLEY, J. A. T. The geographical information system and the future of spatial data analysis in social science. **Journal of Regional Science**, v. 27, n. 4, p. 403-406, 1987.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2023. **Altamira**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/altamira/pesquisa/18/0?ano=2021>. Acesso em: 01 jan. 2025.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2022. **A taxa consolidada de desmatamento por corte raso para os nove Estados da Amazônia Legal em 2021 foi de 13.038 km<sup>2</sup>**. Disponível em: [https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/nota-tecnica-prodes/NotaTecnica\\_consolidado\\_PRODES\\_2021\\_rev.pdf](https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/nota-tecnica-prodes/NotaTecnica_consolidado_PRODES_2021_rev.pdf). Acesso em: 01 jan. 2025.

LANDAU, E. C.; DA SILVA, G. A.; MATRANGOLO, W.; PEDROSA, M. W. Variação geográfica do uso de agricultura orgânica. **Dinâmica da Produção Agropecuária e da Paisagem Natural no Brasil nas Últimas Décadas**, 2020. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/214963/1/Cap53-AgriculturaOrganica.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2025.

JUSYS, T. Fundamental causes and spatial heterogeneity of deforestation in Legal Amazon. **Applied Geography**, v. 75, p. 188-199, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622816303599>. Acesso em: 01 jan. 2025.

LEBLOIS, A.; DAMETTE, O.; WOLFERSBERGER, J. What has driven deforestation in developing countries since the 2000s? Evidence from new remote-sensing data. **World Development**, v. 92, p. 82-102, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X16305411>. Acesso em: 01 jan. 2025.

LEUNG, Y.; MEI, C. L.; ZHANG, W. X. Statistical tests for spatial nonstationarity based on the geographically weighted regression model. **Environment and Planning A**, v. 32, n. 1, p. 9-32, 2000. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/a3162>. Acesso em: 01 jan. 2025.

MARCONATO, M; PARRÉ, J. L.; COELHO, M. H. Análise fiscal dos municípios brasileiros no ano de 2016, a partir do modelo RPG. **Revista de Economia Mackenzie**, v. 17, n. 1, p. 11-41, 2020. Disponível em:

<https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rem/article/view/12685>. Acesso em: 01 jan. 2025.

MEDINA, G.; SANTOS, A. P. Curbing enthusiasm for Brazilian agribusiness: The use of actor-specific assessments to transform sustainable development on the ground. **Applied Geography**, v. 85, p. 101-112, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622816302879>. Acesso em: 01 jan. 2025.

MORAN, P. A. The interpretation of statistical maps. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, v. 10, n. 2, p. 243-251, 1948. Disponível em: [https://www.jstor.org/stable/2983777?casa\\_token=RawbEt\\_igvQAAAAA%3AHTYJ7t3iLnh1lQgEvcyy22VH\\_bfXOv6iRIH3eocOesJZjpMxBH\\_b7mzz2hiBvg4qmoQ0dy2R3LfNruc5kkdUCAzlaJde1HP-CUmeg9o2yU5zPxei8Yo](https://www.jstor.org/stable/2983777?casa_token=RawbEt_igvQAAAAA%3AHTYJ7t3iLnh1lQgEvcyy22VH_bfXOv6iRIH3eocOesJZjpMxBH_b7mzz2hiBvg4qmoQ0dy2R3LfNruc5kkdUCAzlaJde1HP-CUmeg9o2yU5zPxei8Yo). Acesso em: 01 jan. 2025.

MOTEL, P. C.; PIRARD, R.; COMBES, J. L. A methodology to estimate impacts of domestic policies on deforestation: Compensated Successful Efforts for “avoided deforestation” (REDD). **Ecological economics**, v. 68, n. 3, p. 680-691, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800908002577>. Acesso em: 01 jan. 2025.

OLIVEIRA, R. C. D.; ALMEIDA, E.; FREGUGLIA, R. D. S.; BARRETO, R. C. S. Desmatamento e crescimento econômico no Brasil: uma análise da curva de Kuznets ambiental para a Amazônia legal. **Revista de economia e sociologia rural**, v. 49, p. 709-739, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/6XXhymQGJLJsnRZKwYNDw9S/?lang=pt>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PREM, M.; SAAVEDRA, S.; VARGAS, J. F. End-of-conflict deforestation: Evidence from Colombia’s peace agreement. **World Development**, v. 129, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305750X19305017>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PFAFF, A.; ROBALINO, J.; HERRERA, D.; SANDOVAL, C. Protected areas’ impacts on Brazilian Amazon deforestation: examining conservation–development interactions to inform planning. **PloS one**, v. 10, n. 7, 2015. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0129460>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SANTOS, A. M.; da SILVA, C. F. A.; de ALMEIDA JUNIOR, P. M.; RUDKE, A. P.; de MELO, S. N. Deforestation drivers in the Brazilian Amazon: Assessing new spatial predictors. **Journal of environmental management**, v. 294, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721010823>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SANTOS, C. F. D.; SIQUEIRA, E. S.; ARAÚJO, I. T. D.; MAIA, Z. M. G. A agroecologia como perspectiva de sustentabilidade na agricultura familiar. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, p. 33-52, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/Q8YfrW7m6mLWBWBcmcbKKrQ/?lang=pt>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SARAIVA, M. B.; FERREIRA, M. D. P.; da CUNHA, D. A.; DANIEL, L. P.; HOMMA, A. K. O.; PIRES, G. F. Forest regeneration in the Brazilian Amazon: Public policies and economic conditions. **Journal of cleaner production**, v. 269, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620324719>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SOUZA-RODRIGUES, E. Deforestation in the Amazon: A unified framework for estimation and policy analysis. **The Review of Economic Studies**, v. 86, n. 6, p. 2713-2744, 2019. Disponível em: <https://academic.oup.com/restud/article-abstract/86/6/2713/5232206>. Acesso em: 01 jan. 2025.

TICKTIN, T. The ecological implications of harvesting non-timber forest products. **Journal of Applied Ecology**, v. 41, n. 1, p. 11-21, 2004. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2664.2004.00859.x>. Acesso em: 01 jan. 2025.

TRIGUEIRO, W. R.; NABOUT, J. C.; TESSAROLO, G. Uncovering the spatial variability of recent deforestation drivers in the Brazilian Cerrado. **Journal of Environmental Management**, v. 275, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720311671>. Acesso em: 01 jan. 2025.

WEHKAMP, J.; KOCH, N.; LÜBBERS, S.; FUSS, S. Governance and deforestation - a meta-analysis in economics. **Ecological economics**, v. 144, p. 214-227, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800916315427>. Acesso em: 01 jan. 2025.

ZU ERMGASSEN, E. K.; GODAR, J.; LATHUILLIÈRE, M. J.; LÖFGREN, P.; GARDNER, T.; VASCONCELOS, A.; MEYFROIDT, P. The origin, supply chain, and deforestation risk of Brazil's beef exports. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 50, p. 31770-31779, 2020. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2003270117>. Acesso em: 01 jan. 2025.

## **2 CRÉDITO RURAL E SUSTENTABILIDADE NO BIOMA AMAZÔNICO: AVALIAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE CONTRATAÇÃO E IMPLICAÇÕES PARA A SEGURANÇA ALIMENTAR**

### **RESUMO**

O aumento populacional e a escassez de recursos afetam a segurança alimentar mundial. Nesse contexto, o crédito rural surge como um instrumento capaz de ampliar a produtividade rural e, ao mesmo tempo, elevar a oferta de alimentos de maneira sustentável, considerando que há atividades agropecuárias comprometidas com o uso ótimo de insumos. Partindo desse panorama, este ensaio teve como objetivo analisar, com base em dados de 2022, as probabilidades de as propriedades rurais localizadas no bioma amazônico obterem empréstimos para financiar suas atividades. Para realizar a inferência, foram utilizados os modelos Probit e Probit espacial, cujos resultados foram comparados. Observou-se que os municípios com maior probabilidade de conseguir financiamento rural são aqueles que se dedicam predominantemente ao cultivo temporário. Contudo, esse tipo de cultivo apresenta contribuição proporcionalmente menor para a sustentabilidade quando comparado à agricultura orgânica e ao cultivo permanente, o que indica a necessidade de ajustes nas políticas voltadas à oferta sustentável de alimentos. Para pesquisas futuras, recomenda-se estudar outros tipos de bioma em diferentes períodos temporais, de modo a ampliar o entendimento sobre as dinâmicas de financiamento e sustentabilidade na produção agropecuária.

**Palavras-chave:** Produtividade rural; Probit espacial; Cultivo temporário; Agricultura orgânica; Cultivo permanente.

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A função do crédito rural na promoção da produção de alimentos é relevante para a segurança alimentar e tem sido objeto de estudos pela comunidade científica. Contudo, a concessão de empréstimos aos agropecuaristas enfrenta obstáculos, como a volatilidade dos preços e as mudanças climáticas, que prejudicam a quantidade produzida e aumentam a vulnerabilidade dos agricultores familiares, os quais contribuem para a disponibilização de alimentos à população. Desta maneira, a eficiente distribuição dos financiamentos rurais torna-se substancial para assegurar a continuidade produtiva dos pequenos agropecuaristas e simplificar o acesso da população aos alimentos (Castro e Garcia, 2014; Grisa, Gazolla e Schneider, 2010).

No bioma amazônico, há comunidades que colaboram para a alimentação populacional por meio da pesca. Porém, a degradação da floresta tropical pode comprometer o fornecimento desses alimentos, evidenciando a natureza não sustentável do desmatamento. Nesse contexto, a produção orgânica, presente e em expansão na região, surge como solução para aumentar a disponibilidade de alimentos sem comprometer os escassos recursos naturais. Assim, a agricultura orgânica apresenta-se como uma alternativa sustentável para garantir a segurança alimentar dos residentes das

áreas de floresta. Dessa maneira, o crédito rural, principalmente por meio de linhas específicas destinadas à produção orgânica no âmbito do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), incentiva práticas sustentáveis (Isaac *et al.*, 2015; Neto *et al.*, 2023; Lourenço, Schneider e Gazolla, 2017).

Além da lavoura permanente, o bioma amazônico abriga a criação de gado e a lavoura temporária, todos demandando financiamento rural para suas atividades. Embora haja registros de pecuária leiteira realizada pela agricultura familiar na Amazônia, a maior parte dos produtores é de grande porte. Desse modo, o estímulo produtivo feito por meio dos financiamentos rurais para evitar a escassez de alimentos deve ser direcionado àqueles que mais contribuem para métodos sustentáveis e que apresentam menor nível de desmatamento, ou seja, para a agricultura familiar (Silva, Rodrigues e Silva, 2018; Spínola e Carneiro Filho, 2019).

O termo sustentabilidade ganhou popularidade a partir do Relatório de Brundtland (1987), publicado pela Comissão do Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas. Nesse documento, definiu-se o desenvolvimento sustentável como aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade de gerações futuras suprirem suas próprias demandas, gerando, portanto, maior conscientização global acerca da relevância da sustentabilidade na economia. Em 2008, com base nesse conceito, foi instituída a Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), mediante legislação condicional, visando restringir atividades agropecuárias não sustentáveis no bioma amazônico. Tal resolução estabeleceu critérios para empréstimos de crédito rural, com o objetivo de reduzir a exploração não sustentável da floresta. Logo, não basta que o avanço agropecuário contribua para a segurança alimentar populacional; é preciso que o aporte seja realizado de forma sustentável. Desta forma, define-se a segurança alimentar como a situação em que todas as pessoas têm acesso físico, social e econômico a alimentos seguros e nutritivos (Godfray *et al.*, 2010).

Para identificar a eficácia da Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008) nas restrições relacionadas à contratação de crédito rural, foram mapeadas as atividades agropecuárias que demandam recursos financeiros para sua operação. Inicialmente, a bovinocultura, presente na região do bioma amazônico, requer contratos de financiamento para viabilizar sua atividade. Ademais, a busca por empréstimos está vinculada ao tamanho da propriedade, pois, quanto maior a área, maior a quantidade de recursos financeiros demandados. Entretanto, não é apenas a área que importa; o retorno sobre o investimento também afeta a captação de crédito rural. Consequentemente,

quanto maior o retorno, maior a quantidade de recursos demandados, pois compensa o pagamento dos juros. Não só a bovinocultura, mas também o tamanho da terra, o valor dos produtos e a diferenciação entre culturas temporárias e permanentes demandam crédito rural e foram afetados pela referida Resolução (Carrer, Souza Filho e Vinholis, 2013; Wood, Walker e Toni, 2001; Ribeiro e Franco, 2017; Parré, Chagas e Arends Kuenning, 2024; Assunção, Gandour, Rocha e Rocha, 2020; Feltran-Barbieri e Féres, 2021; Fernandes e Rondina Neto, 2022).

Considerando esse contexto, a presente pesquisa objetivou investigar a probabilidade de o agropecuarista demandar crédito rural, de acordo com a categoria de atividade, considerando o desempenho das políticas públicas de acesso aos financiamentos voltados para a agropecuária, em um cenário orientado para a segurança alimentar e a sustentabilidade no bioma amazônico. Para esse fim, utilizou-se dois métodos, o Probit, que não considera a dependência espacial na identificação da chance de ocorrência por classe, e o Probit espacial, que inclui o efeito da interação entre os municípios e seus vizinhos por meio de uma matriz de contiguidade.

As variáveis selecionadas, com base na literatura, que representam fatores impulsionadores para a contratação de crédito rural incluem: o número de produtores orgânicos na região, como medida aproximada do nível de cultivo orgânico; a quantidade de cabeças de gado no território, tendo em vista a prevalência dessa atividade; e o valor e a quantidade de culturas agrícolas, representados pela área e valor da produção temporária e permanente, considerando seus impactos na segurança alimentar da população.

O estudo contribui para a área de conhecimento ao analisar a probabilidade percentual de contratação de crédito rural em áreas do bioma amazônico, cujo as variáveis agropecuárias influenciam as atividades rurais em diferentes níveis entre os municípios estudados. A investigação permitiu verificar como as medidas de proteção da mata afetam a contratação de financiamento rural para atividades da agricultura e pecuária e ampliou a literatura ao fornecer mais informações sobre a situação econômica regional, bem como seus impactos no desmatamento e na segurança alimentar.

Esta pesquisa foi estruturada em três grandes blocos, além da introdução, das considerações finais e das referências. O primeiro bloco compreende a revisão de literatura, que inclui tanto uma parte abrangente quanto uma parte específica sobre o tema. Em seguida, na seção de materiais e métodos, apresentam-se os dados utilizados, a fundamentação do modelo Probit e os modelos econométricos. Por fim, a seção de

resultados e discussão traz os principais achados do estudo junto a comparação de outros autores.

## 2.2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção, buscou-se explorar o estado da arte sobre a agricultura familiar e a concessão de crédito rural no Brasil, destacando os principais desafios, perspectivas e limitações enfrentadas por pequenos produtores rurais no que se refere à sustentabilidade e à segurança alimentar. Em seguida, discutiu-se o uso de métodos quantitativos e estatísticos aplicados ao estudo do crédito rural, evidenciando como diferentes abordagens metodológicas têm contribuído para a compreensão dos fatores que influenciam o acesso e a efetividade dos recursos destinados à agricultura familiar. Além disso, foi analisada a Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008) e sua relação com as atividades sustentáveis no emprego do crédito rural. Essa revisão, ao reunir contribuições teóricas e empíricas, permite um maior entendimento sobre políticas e práticas atuais, bem como dos impactos que o crédito rural pode ter na mitigação de desigualdades e no fomento de práticas agrícolas sustentáveis.

### 2.2.1 A resolução 3.545/2008 do BACEN como instrumento de sustentabilidade no crédito rural

A Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), editada pelo Conselho Monetário Nacional, estabeleceu diretrizes que vinculam a concessão do crédito rural ao cumprimento de requisitos ambientais, ressaltando a relevância da sustentabilidade nas atividades agropecuárias. Na prática, essa norma incentiva os produtores a adotarem métodos produtivos que minimizem impactos socioambientais, pois exige, por exemplo, a apresentação de documentos que comprovem a regularidade ambiental do empreendimento. Desse jeito, o crédito rural não só viabiliza investimentos no meio rural, mas também funciona como instrumento de política pública voltado à conservação dos recursos naturais, contribuindo para a construção de uma cadeia produtiva mais responsável e sustentável.

Os benefícios da Resolução já foram comprovados, com registros de menores níveis de desmatamento e maior produtividade do bioma amazônico em comparação a regiões vizinhas, conforme apontado por Harfuch *et al.* (2016). Segundo Assunção, Gandour e Rocha (2013), essa política estabeleceu condições para a concessão de crédito rural exigindo a comprovação de conformidade com a legislação ambiental, a

legitimidade das reivindicações de terras e a regularidade dos estabelecimentos rurais. Como resultado, a política demonstrou que é possível alinhar interesses produtivos e preservacionistas, servindo como exemplo para outras iniciativas de governança ambiental e gestão sustentável de recursos naturais.

Nesse sentido, Nepstad *et al.* (2014) destacaram a função dos financiamentos destinados a fazendas situadas em municípios prioritários, caracterizados por elevadas taxas de desmatamento, observando que, esses municípios tiveram seu fluxo de financiamento interrompido de forma imediata. Ademais, Jusys (2016) propôs em estudar a região de maneira segmentada, devido à heterocedasticidade entre os municípios, apontando que sua investigação não encontrou causalidade entre o desmatamento e o crédito rural quando considerada a região como um todo, o que reforça a necessidade de abordar o tema em escalas menores e mais específicas para maior precisão.

Em suma, a Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), representou um marco na integração entre política financeira e conservação ambiental, ao condicionar o crédito rural ao cumprimento de normas ambientais e promover práticas produtivas mais responsáveis. Suas diretrizes revelaram potencial para reduzir o desmatamento e incentivar o uso sustentável dos recursos naturais, contribuindo para um modelo de desenvolvimento rural mais equilibrado. Entretanto, os estudos analisados destacam abordagens regionais específicas para maximizar os resultados dessa política, evidenciando que uma análise segmentada pode oferecer soluções mais precisas e eficazes para os desafios socioambientais enfrentados em diferentes contextos do bioma amazônico.

## **2.2.2 Desafios e perspectivas da agricultura familiar no Brasil**

No Brasil, a agricultura familiar desempenha a função de garantia a segurança alimentar e na geração de empregos em áreas rurais. O acesso ao crédito rural para esse grupo é simplificado pelo PRONAF, que também promove a produção sustentável. Entretanto, conforme argumentam Moreira-Dantas *et al.* (2023), há indícios de que parte desses recursos esteja sendo direcionada para produtores de gado que não integram o público-alvo do programa, o que pode gerar disparidades na distribuição de empréstimos e favorecer determinadas regiões em detrimento de outras.

Em um recorte geográfico diferente do bioma amazônico, abrangendo todas as regiões tropicais, Ponce, Ribeiro e Telles (2020) enfatizaram a relevância da mandioca para a segurança alimentar, devido à sua rusticidade e facilidade de cultivo, além de ser

produzida em todos os estados do Brasil. Apesar de ser uma cultura comum que contribui para a segurança alimentar, seus produtores podem enfrentar dificuldades para expandir a lavoura em razão da distribuição heterogênea de empréstimos rurais e de barreiras para obtê-los, como as garantias ambientais (Araújo, Mota e Siraj, 2023). Essa exigência está alinhada às políticas de prevenção do desmatamento não sustentável.

Nesse contexto, quando subsídios para a produção agropecuária não estão disponíveis, os custos tornam-se um obstáculo. Para reduzir os impactos negativos desses custos, a disponibilidade de crédito destinado às atividades rurais é importante para auxiliar financeiramente as famílias do campo. Por conseguinte, as restrições de acesso a esses recursos dificultam a adoção de novas tecnologias no processo de cultivo. Além dos custos de produção e das limitações ao acesso aos recursos financeiros, outras adversidades afetam a segurança alimentar, tais como mudanças climáticas, competição por terra e escassez de mão-de-obra causada pela urbanização e industrialização. Consequentemente, fatores podem contribuir para a interrupção das lavouras, comprometendo a segurança alimentar e dificultando a adoção de um cultivo sustentável (Rayhan, Rahman e Lyu, 2023; Nguyen, Nguyen e Grote, 2023).

A ampliação produtiva e sustentável de alimentos representa um obstáculo para a sociedade contemporânea. Mesmo com investimentos e recursos financeiros disponíveis, o aumento da produtividade ainda pode ser limitado. Nesse sentido, a sustentabilidade da produção agropecuária está atrelada à disponibilidade de água na região em que a atividade ocorre; a redução da quantidade de água disponível para irrigação e a mudança na frequência de chuvas podem restringir os resultados no campo. Portanto, o desempenho dos cultivos e da criação de animais está sujeito a fatores naturais, ressaltando a relevância da conservação ambiental para evitar o comprometimento dos rendimentos e, consequentemente, da segurança alimentar (Liu *et al.*, 2022).

No que diz respeito às mudanças climáticas, novos obstáculos surgem a partir de tais transformações. A vulnerabilidade climática e a necessidade de adaptação rápida são questões centrais com as quais os agentes do meio rural precisam lidar. Diante dessas mudanças, é preciso adequar-se à nova realidade para garantir o abastecimento de alimentos. Porém, se essa adaptação às condições climáticas não ocorrer de forma célere, a população pode ficar em situação de vulnerabilidade, levando à inviabilidade da atividade agropecuária na região e à escassez de alimentos. Por essa razão, é essencial que programas governamentais sejam instituídos para ajustar a produção rural ao novo

cenário ambiental, como programas de irrigação, de conservação de água e de instalação de cisternas (Connolly-Boutin e Smit, 2016).

Uma alternativa para aumentar a produtividade de maneira sustentável, enfrentar os desafios climáticos e assegurar a segurança alimentar é a otimização de cultivos sazonais. Embora a intensificação da produção agropecuária convencional possa contribuir para a degradação ambiental, o uso de fertilizantes nitrogenados em períodos específicos tem mostrado resultados promissores na manutenção do bioma. Em alguns casos, contudo, não é simples garantir a segurança alimentar de forma sustentável, pois a produtividade do cultivo convencional pode superar a obtida pelo cultivo sazonal, gerando debates sociais sobre o método agropecuário mais adequado (Li, Guo e Zhang, 2021; Wittman *et al.*, 2017).

Em suma, o uso criterioso da terra pode reduzir os impactos ambientais das atividades econômicas no campo e possibilitar a identificação de novas áreas para uso, conforme destacam Cerri *et al.* (2018). Esses temas são especialmente pertinentes para o bioma amazônico, que enfrenta elevadas taxas de desmatamento, incentivando a comunidade científica a buscar soluções para explorar a floresta sem devastá-la. Ademais, as restrições ao crédito rural orientam as atividades dos produtores de alimentos para que haja redução do desflorestamento, como defendem Andrieu, Blundo-Canto e Cruz-Garcia (2019).

Por fim, a literatura ainda não define com precisão qual é a técnica mais eficaz para aumentar a produção sustentável e garantir a segurança alimentar da população. Por outro lado, estudos indicam que os recursos disponibilizados por meio do crédito rural podem incentivar a agricultura familiar, a qual recorre a práticas menos prejudiciais aos biomas em comparação ao cultivo convencional. Estratégias como o cultivo sazonal e a agricultura orgânica ganham destaque, ainda que enfrentem contratempos para elevar sua produtividade e, em vista disso, contribuir de forma satisfatória para a segurança alimentar.

### **2.2.3 Métodos quantitativos e estatísticos aplicados ao crédito rural**

Nesta seção, foram apresentados trabalhos que empregam métodos quantitativos na agropecuária, com ênfase no crédito rural. Observa-se literatura sobre o tema, contemplando diferentes aplicações em que os empréstimos rurais são variáveis incluídas nos métodos. Diferentemente da etapa anterior, que trouxe um panorama mais amplo e

teórico, neste momento são discutidos os algoritmos utilizados para responder às questões de pesquisa, destacando de forma objetiva os instrumentos e os resultados.

Analisando os fatores que determinam o recebimento de crédito rural, Moreira-Dantas *et al.* (2023) aplicaram um Modelo Durbin com Erro Espacial (SDEM) em 103 microrregiões da Amazônia Legal. Entre os achados, identificou-se a interdependência espacial e uma maior concentração de contratos em regiões que contam com bancos comerciais. Para o Paraná, outra abordagem espacial foi adotada por Ponce, Ribeiro e Telles (2020), ao verificar o plantio de mandioca no estado, por microrregiões, de 1999 a 2018. Utilizando a metodologia do Quociente Locacional (QL), constatou-se que o número de microrregiões especializadas na produção de mandioca reduziu-se de 11 para 9, em razão da concentração dos financiamentos rurais nas áreas mais produtivas.

Os determinantes do acesso ao crédito rural também são investigados em Rayhan, Rahman e Lyu (2023), porém sem o uso de econometria espacial. Uma regressão Probit, associada ao Pareamento de Escore de Propensão (PSM) e à Ponderação pela Probabilidade Inversa (IPW), mostrou que a idade e o tamanho da família influenciam negativamente a obtenção de financiamento rural, enquanto a renda e a alfabetização afetam positivamente. Já o impacto do crédito rural na produtividade das lavouras foi abordado por Nguyen, Nguyen e Grote (2023), que recorreram a uma regressão de Efeitos Aleatórios Verdadeiros (EAV). Identificou-se que choques climáticos e a erosão do solo são as principais fontes de ineficiência rural, ao passo que a mecanização e a educação apresentaram resultados positivos. Concluiu-se que o crédito rural ameniza as ineficiências e promove a segurança alimentar.

De forma mais abrangente, os riscos da produção agropecuária, incluindo o clima e as consequências na segurança alimentar, foram explorados por Chavas *et al.* (2022). Para garantir maior flexibilidade no modelo, foi adotado o Quantil Autoregressivo (QAR), estimado em duas etapas, numa distribuição multivariada. Os resultados mostram que o crescimento da produtividade no campo, a melhoria na gestão de riscos e o aumento de renda reduzem a insegurança alimentar. Contudo, o incremento contínuo da produtividade pode gerar danos ao meio ambiente, evidenciando que a expansão do modelo de cultivo convencional não é sustentável e, dessa forma, abre espaço para práticas alinhadas ao ideal agroecológico.

Na investigação de Chandio *et al.* (2022), afirmou-se que a oferta de crédito rural é uma estratégia pertinente para promover a produção sustentável na agricultura. Os impactos de longo prazo, de 1992 até 2020, foram avaliados considerando a inclusão de

variáveis como insumos agroquímicos, área de plantio, maquinário e mão-de-obra. Na análise do painel, adotaram-se técnicas como Dependência Transversal (CSD), cointegração de Westerlund, Mínimos Quadrados Generalizados Viáveis (FGLS), Mínimos Quadrados Ordinários Dinâmicos (DOLS) e Método dos Momentos Generalizados (GMM). Em conclusão, observou-se que o crédito rural eleva a produção sustentável de diferentes formas.

A redução de perdas no período pós-colheita também pode contribuir para a segurança alimentar, pois se trata de um problema comum no transporte de determinados produtos agropecuários. Para identificar fatores que reduzem ou impedem tais perdas, Debebe (2022) utilizou análise descritiva e um modelo Tobit, destacando o tamanho das propriedades, o controle de pragas no armazenamento, a qualidade dos equipamentos de armazenamento, a adesão ao cooperativismo e a distância até os pontos de descarga. No Brasil, as grandes distâncias entre locais de colheita e descarregamento, somadas à predominância do transporte rodoviário, favorecem a ocorrência de perdas. Então, o autor sugere que o crédito rural voltado para obras de infraestrutura poderia mitigar os problemas de armazenamento.

Ressaltando as deficiências na estrutura de transporte e as limitações na oferta de crédito rural, Beke (2011), por meio de um modelo Logit fracionário, encontrou uma relação positiva entre os financiamentos rurais e o total da produção agrícola. Isso demonstra que, embora o cultivo sustentável em larga escala seja fundamental, ele não resolve o problema da segurança alimentar se a quantidade de alimentos que efetivamente chega ao consumidor final for baixa. Portanto, o uso dos recursos rurais para a estruturação do produtor beneficia os demais agentes da sociedade de forma indireta, pois facilita o acesso aos alimentos, independentemente de como o fornecedor conduz suas atividades.

Em suma, o uso do crédito rural como variável explicativa do nível de produção sustentável e do grau de segurança alimentar surge com frequência na literatura. Por essa razão, diferentes métodos estatísticos e descritivos vêm sendo empregados nos trabalhos selecionados para fundamentar essa investigação. Como resultado, há uma diversidade de achados que variam de acordo com o objetivo e o instrumental metodológico de cada estudo. Desse modo, observa-se a disponibilidade de materiais contemporâneos em torno do tema, evidenciando sua relevância para a sociedade.

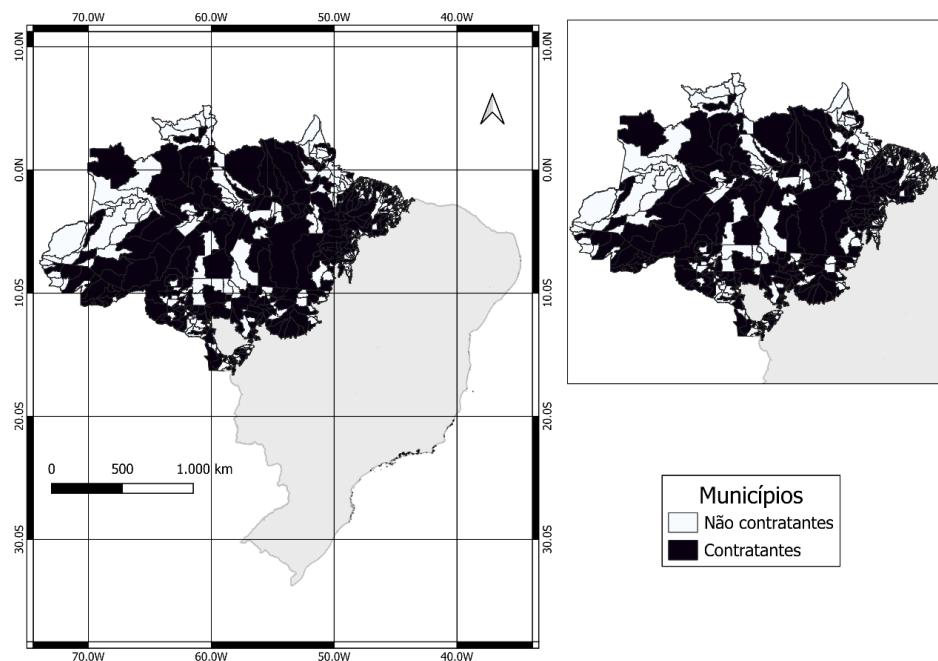
## 2.3 MATERIAL E MÉTODOS

Nessa seção metodológica, apresentam-se os materiais utilizados na pesquisa, com ênfase nas variáveis que compõem a equação de base, bem como suas fontes e unidades de medida. Discute-se, ainda, a escolha dos regressores e a justificativa para cada um deles. Adicionalmente, descreve-se o modelo econométrico espacial, incluindo as implementações práticas, ilustrando como o método foi aplicado para alcançar os objetivos da pesquisa e como ele se adequa aos dados coletados.

### 2.3.1 Distribuição municipal e variáveis explicativas

O bioma amazônico é composto por 599 municípios em que a maioria está localizada na região norte do Brasil. A distribuição das localidades se encontra representada na Figura 10, que também destaca os contratantes de crédito rural. Na região, demandou-se empréstimos devido as atividades da agropecuária que são variadas, embora numa área de floresta tropical. Desta forma, não foi percebido nenhum padrão distributivo no arranjo, sendo que parte dos que não registraram nenhum fluxo de empréstimos rurais é composta por municípios e reservas florestais. Esse recorte espacial é novidade na literatura, desde que a maioria das investigações abrangem a Amazônia Legal, como em Moreira-Dantas *et al.* (2023).

Figura 10. Municípios do bioma amazônico que contratam crédito rural em 2022



Fonte: realizado pelos autores com o auxílio do programa livre Qgis.

As variáveis de diferentes fontes e medidas foram selecionadas, padronizadas e normalizadas para o ano de 2022, Tabela 8. Todos os valores monetários obtidos em períodos distintos foram atualizados pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o mesmo momento temporal. Justifica-se o emprego do IBGE por sua ampla cobertura nacional, coerência metodológica já que é utilizado pelo BACEN e homogeneização devido o alinhamento do índice às séries selecionadas. Sobre as variáveis, uma composição de termos empregados na literatura e um inédito, *org*, compõem a equação do modelo. Os programas livres usados nesta pesquisa foram o Geoda, Qgis e o R.

Como se buscou verificar a chance de contratação dos recursos financeiros destinados ao agropecuarista, o termo dependente *bin* foi o regressando estabelecido para representar os municípios contratantes de crédito rural, já que nem todas as localidades do recorte demandaram empréstimos rurais. Essa pode assumir os valores de zero e um por ser uma binária de um termo comumente utilizado na literatura. Dentre as investigações que fizeram o uso desta variável estão Moreira-Dantas *et al.* (2023), Ponce, Ribeiro e Telles (2020), Rayhan, Rahman e Lyu (2023) e Beke (2011).

Por sua vez, a variável explicativa *org* foi incluída como uma variável inovadora, porque a crescente preocupação científica sobre a capacidade da agropecuária em fornecer alimentos de maneira sustentável, torna o cultivo orgânico uma alternativa para garantir a segurança alimentar populacional; desde que o número de atuantes nesse método de produção possam afetar a disponibilização de alimentos sem desflorestar ou, pelo menos, reduzindo os efeitos negativos da exploração da terra. Os benefícios da agricultura orgânica são explorados por Isaac *et al.* (2015), Neto *et al.* (2023), Lourenço, Schneider e Gazolla (2017). Então, a quantidade registros por CNPJ e CPF categorizados como utilizadores de técnicas orgânicas, estão representados em *org* e podem demandar crédito rural para suas atividades.

Tabela 8. Descrição das variáveis selecionadas

Variável	Descrição	Medida	Fonte
bin	Binária que indica se houve ou não contratação de crédito rural.	Unidade	Banco Central do Brasil (BACEN) Ministério da
org	Quantidade de produtores orgânicos.	Unidade	Agricultura e Pecuária (MAPA)
gado	Quantidade de cabeças de gado.	Unidade	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)

app	Área de produção agrícola permanente.	Hectares	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
apt	Área de produção agrícola temporária.	Hectares	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
vpp	Valor da produção agrícola permanente.	Reais	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
vpt	Valor da produção agrícola temporária.	Reais	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)

Nota: realizado pelos autores.

Sob outro enfoque, a quantidade de bovinos é outro regressor comum entre as pesquisas dentro da temática. A carne de gado auxilia na segurança alimentar populacional, mas os custos de criação dos animais podem não ser sustentáveis, ainda mais no Brasil em que a maioria dos animais são criados de forma extensiva, a pasto, que demanda espaço sobre a terra e pode causar a desarborizarão de regiões. Com isso, o número de cabeças de gado foi definido como possível fator influenciador da demanda de crédito e representado pela variável *gado*. Na literatura, Moreira-Dantas *et al.*, (2023), também fizeram uso deste mesmo parâmetro.

Apresentando características distintas, tanto a área como o valor da quantidade da produção agrícola temporária e permanente foram incluídas e representadas por *app*, *apt*, *vpp* e *vpt*. A produção agrícola foi estudada em Beke (2011), mas, de forma diferente, essa investigação explorou como as variáveis contribuíram de forma sustentável a segurança alimentar. Além disso, buscou-se perceber alguma divergência nos resultados considerando a perspectiva dos valores e das áreas.

Em conclusão, os termos escolhidos como regressores são comuns na literatura do tema. Todavia, a quantidade de produtores orgânicos aparece como novidade e agrega a pesquisa sendo um diferencial. Isso mostra a aderência dos termos para explicar a chance de contratação do crédito rural por categoria no recorte do bioma amazônico.

### 2.3.2 Incorporação da estrutura espacial no modelo Probit

O modelo Probit é um modelo estatístico usado para regressão quando a variável dependente é binária, ou seja, assume dois valores possíveis, 1 ou 0. Ele se baseia na suposição de que a probabilidade de ocorrência de um evento pode ser modelada por uma função de distribuição acumulada normal que tem o formato de sigmoide. Diferentemente

do modelo linear, no Probit, os coeficientes estimados indicam a direção e a intensidade do efeito das variáveis explicativas sobre a probabilidade do evento, mas não podem ser interpretados diretamente como mudanças marginais. Em vez disso, para interpretar os coeficientes, calcula-se a derivada da função Probit, o que fornece os efeitos marginais, ou seja, a variação na probabilidade do evento dado um incremento unitário em uma variável explicativa (Greene, 2018; Wooldridge, 2010).

Gujarati e Porter (2011) argumentaram que a distribuição normal padrão é a base do Probit, Eq. (6). Após a derivação da função Probit, adquire-se os coeficientes que simplifica a interpretação. Esse processo é chamado de linearização da função. Logo, com base em  $Z_i = \beta_1 + \beta_2 X_i$ , pode-se estimar os coeficientes do Probit:

$$P(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{s^2}{2}} ds \quad (6)$$

em que  $P(Z)$  representa a probabilidade acumulada para o valor  $Z$ ;  $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$  é o fator de normalização da função de densidade e viabiliza que a integral seja igual a 1;  $\int_{-\infty}^Z$  indica a integral da área sob a curva de  $-\infty$  até  $Z$ , representando a probabilidade acumulada;  $e^{-\frac{s^2}{2}}$  é a função exponencial que define a forma da curva; e  $ds$  representa o elemento de integração sobre a variável  $s$  da densidade normal. Em suma, a Eq. (6) soma a densidade da normal padrão, resultando na probabilidade acumulada.

A chance de ocorrer a contratação do crédito rural por município contido no bioma amazônico com base nos regressores em questão, foi definido como um dos propósitos do trabalho. Por isso, o método selecionado para atender o objetivo proposto foi o Probit espacial que apresenta uma estrutura autorregressiva e pode ser empregado numa variável de resposta binária. Com base em Verbeek (2008) e Lee e Sohn (2021), sendo a variável latente representada como contínua,  $Y_i^*$ , exibe-se na Eq. (7):

$$Y_i = 1, Y_i^* > 0 \text{ ou } 0, \text{ caso contrário} \quad (7)$$

com  $i = 1, 2, \dots, n$ , sendo  $n$  o número de observações. A estrutura espacial é implementada da seguinte forma, Eq. (8):

$$Y^* = \rho W Y^* + X\beta + \varepsilon \quad (8)$$

em que  $Y^*$  é o vetor latente contínuo,  $X$  expressa a matriz de variáveis explicativas  $n \times k$  com os vetores dos coeficientes  $\beta$ ,  $W$  indica a matriz de pesos espaciais defasados,  $\rho$  é o parâmetro de dependência espacial e, por fim, o  $\varepsilon$  é o termo de erro (Verbeek, 2008; Lee e Sohn, 2021; Almeida 2012).

A partir da Eq. (9) chega-se ao modelo Autorregressivo Espacial (SAR):

$$P(bin_i = 1|X, W) = \Phi(\rho \sum_{j=1}^n w_{ij} bin_j + X'_i \beta) \quad (9)$$

como  $P(bin_i = 1|X, W) = Y^*$ , a probabilidade de  $bin_i$  – sendo  $i$  o município de referência – ser unitário depende do vetor de covariáveis  $X$  e a matriz de pesos espaciais  $W$ ;  $\Phi$  = função de distribuição normal padrão, ou como Almeida (2012) diz, é uma transformação normal dos dados;  $bin_j$  representa a variável dependente para a observação dos vizinhos,  $j$ ; o  $X'_i$  são os termos independentes *org*, *gado*, *app*, *apt*, *vpp* e *vpt*; e os  $\beta$ 's caracterizam os coeficientes das variáveis  $X'_i$ .

Ainda com Almeida (2012), o SAR é uma extensão do modelo linear comum que se considera a influência das observações vizinhas. Esse inclui a dependência espacial mediante um termo autorregressivo na equação, o termo captura os efeitos das observações adjacentes ao regressando, transmitindo o conceito de que os valores de cada componente de uma área sejam correlacionados aos valores de seus vizinhos. À vista disso, o SAR se torna uma opção viável de estimação quando o espaço é relevante para a análise.

Observa-se, diferente de um modelo Probit padrão, o termo  $\rho \sum_{j=1}^n w_{ij} bin_j$  que exprime a influência espacial das observações mediante a força de conexão entre as localidades  $i$  e  $j$ . Por sua vez, o  $\rho$  aponta a intensidade da dependência espacial. Por fim, o modelo foi estimado pelo Método de Momentos Generalizado (GMM), como indicam Piras e Sarrias (2023).

O método de estimação GMM, foi introduzido inicialmente por Hansen e Sargent (1982) que demonstraram sua aplicação e estimação em modelos lineares para a economia. Baseando-se na ideia de que a média, variância, assimetria e outros componentes são funções dos parâmetros do modelo, montou-se um sistema de equações capaz de estimar os coeficientes desconhecidos. O GMM é empregado nas situações em que o formato distributivo dos dados não é conhecido, sendo uma extensão dos Métodos dos Momentos (MM), inclui-se flexibilidade na estimação.

### 2.3.3 O modelo econométrico espacial

Diferente do Probit comum, quando se considera a vizinhança no espaço, inclui-se uma matriz de pesos em que as localidades próximas podem apresentar características parecidas. Com isso, a matriz de pesos auxilia a estruturação espacial dos dados e capta as medidas de autocorrelação, sendo esta a principal dessemelhança do modelo espacial para o convencional. Desta forma, foi possível definir a equação de regressão, Eq. (10):

$$\begin{aligned} bin_i = \beta_0 + \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} bin_j + org\beta_1 + bov\beta_2 + app\beta_3 + apt\beta_4 + vpp\beta_5 \\ + vpt\beta_6 + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (10)$$

em que o  $i$  representa cada município do bioma amazônico;  $j$  são as localidades contingentes de  $i$ ; o  $W_{ij}$  é a matriz de pesos espaciais que captura a influência das observações vizinhas,  $bin_j$ , sobre a variável dependente atribuindo pesos de acordo com a aproximação geográfica; o  $\varepsilon_i$  é o termo de erro aleatório;  $\rho$  caracteriza o parâmetro de dependência espacial;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$  são os coeficientes em que cada termo mostra o efeito da variável explicativa correspondente sobre o termo dependente; e o  $\beta_0$  é o intercepto que indica a média quando os regressores forem zero.

## 2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, discutiu-se os principais achados da pesquisa, com enfoque na qualidade das variáveis, na caracterização estatística dos dados e nos efeitos dos fatores estudados. Primeiramente, foi avaliada a qualidade dos dados e a estrutura de correlação entre as variáveis explicativas, garantindo a robustez dos modelos aplicados e mitigando possíveis problemas de colinearidade. Em seguida, realizou-se uma análise descritiva para verificar a distribuição e a variabilidade dos valores observados, proporcionando um entendimento detalhado sobre a dispersão e a assimetria dos dados. Por fim, foi apresentado os resultados da inferência estatística, com base nos modelos de regressão aplicados, considerando tanto os efeitos diretos e indiretos quanto o impacto do efeito espacial sobre as variáveis de interesse. Discutimos, ainda, a relevância desses achados para a formulação de políticas de crédito rural no contexto da sustentabilidade e da segurança alimentar no bioma amazônico.

#### 2.4.1 Qualidade das variáveis e caracterização estatística dos dados

Antes de proceder com a aplicação dos métodos, foi verificada a qualidade das variáveis. Inicialmente, buscou-se identificar a existência de elevada correlação entre os termos do modelo empírico. Mediante o Fator de Inflação de Variância (FIV), o regressando *apt* acusou um valor de 11,9954, sendo assim, foi retirado da equação para evitar o problema de colinearidade. De acordo com Gujarati e Porter (2011), a multicolinearidade acontece quando os regressores do modelo estatístico estão correlacionados entre si num elevado grau, podendo causar desvios na interpretação dos resultados e estimação dos parâmetros. Assim sendo, o termo correlacionado foi eliminado.

Posterior a validação da qualidade dos regressores, uma análise descritiva contendo os valores mínimos, médios e máximos dos componentes da regressão são apresentados na Tabela 9. O termo independente *org* tem um valor mínimo de 0, o que indica que em algumas observações pode não haver valor atribuído. A média de 4 indica uma concentração de valores baixos, sugerindo que a maioria das observações se encontra em níveis baixos, apesar do valor máximo de 216. A alta diferença entre a média e o máximo sugere uma distribuição bastante assimétrica e possivelmente a presença de valores discrepantes que elevam o valor máximo.

Por sua vez, *gado* apresenta valores substancialmente mais altos, com um mínimo de 29 e um máximo de mais de 2 milhões. A média, 141.571, indica que os valores estão mais dispersos e que há uma considerável variação dentro das observações. O intervalo entre o mínimo e o máximo sugere uma distribuição ampla e altamente assimétrica, o que pode indicar a presença de valores extremos que elevam a média.

No caso da variável *app*, possui-se um valor mínimo de 0, apontando para observações onde não tem valores registrados. A média de 1.485 é consideravelmente baixa em relação ao máximo de 61.830, sugerindo que os valores menores são mais frequentes. Essa disparidade entre média e máximo indica uma possível assimetria positiva, com alguns valores muito altos que podem estar influenciando a média.

A *vpp*, aponta um mínimo de 0, o que pode indicar a ausência de valor em algumas observações. A média, 26.881, é relativamente pequena em comparação com o máximo de 1.604.546, evidenciando uma dispersão ampla e uma possível assimetria na distribuição dos dados. Valores muito altos podem estar presentes e influenciar a média, levando-a a se distanciar do valor mínimo.

Seguindo o padrão das variáveis anteriores com um valor mínimo de 0 e um máximo elevado de quase 2 milhões. A média da *vpt* de 24.591 mostra que, embora a maioria dos valores possa estar concentrada em uma faixa menor, os valores extremos elevam o valor máximo, resultando em uma elevada assimetria.

As variáveis da Tabela 9, possuem diferenças entre os valores mínimos e máximos, com valores médios significativamente menores que os valores máximos. Isso sugere uma distribuição assimétrica, onde alguns valores extremos podem estar influenciando a média, possivelmente elevando-a para níveis que não refletem as observações mais comuns. Essa assimetria indica a necessidade de tratamento dos dados para identificar os pontos discrepantes e ajustá-los.

Tabela 9. Valores máximos, mínimos e médios dos regressores

Variáveis	Mínimo	Média	Máximo
org	0	4	216
gado	29	141.571	2.468.764
app	0	1.485	61.830
vpp	0	26.881	1.604.546
<i>vpt</i>	0	24.591	1.949.593

Fonte: realizado pelos autores.

A escolha dos fatores que podem afetar a demanda por crédito rural foi feita com base nas atividades da agropecuária no bioma amazônico. Encontrou-se a criação de gado, assim como o cultivo de orgânicos e outras culturas como relevantes. Por conseguinte, a produção agrícola foi separada em temporária e permanente com o intuito de encontrar alguma dissemelhança na contribuição dessas para a segurança alimentar da população. Por fim, tanto os regressores como o regressando indicaram aderência ao modelo proposto.

#### 2.4.2 Impacto das atividades agropecuárias na contratação de crédito rural

A inferência estatística foi iniciada com um modelo simples de Probit para depois ser inserido o efeito espacial e compará-los. Por este motivo, o resumo dos resultados da regressão do Probit está exposto na Tabela 10. Todos os regressores, com exceção do *app*, apresentaram relação positiva com o termo dependente, isto é, eles influenciam positivamente o *bin*. Este resultado era aguardado, pois na literatura se encontra soluções parecidas como em Nguyen, Nguyen e Grote (2023) e Chandio *et al.* (2022).

A partir dos achados expostos na Tabela 10 e após a aplicação do antilogaritmo nos coeficientes, observa-se que a probabilidade de o município contratar crédito rural

aumenta em 2,5 vezes quando há produtores orgânicos, *org*, alinhando-se às disposições da Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), que incentiva práticas sustentáveis na concessão de financiamento. No caso da pecuária bovina, *gado*, a chance de contratação é 5,5 vezes superior. Ademais, a presença de culturas permanentes e temporárias eleva, respectivamente, em 8,8 e 5,9 vezes a probabilidade de obtenção de recursos rurais, também em consonância com os critérios dessa resolução, que busca promover o desenvolvimento rural sustentável. Conclui-se, portanto, que a cultura de cultivo permanente exerce o maior impacto na contratação de empréstimos rurais, devendo receber prioridade em virtude de seu caráter sustentável e por ser majoritariamente realizada pela agricultura familiar (Silva, Rodrigues e Silva, 2018; Spínola; Carneiro Filho, 2019).

Tabela 10. Resumo dos resultados do modelo Probit

Variáveis	Coeficientes
(Intercepto)	-2.7366*** (0.4374)
<i>org</i>	0.9010** (0.3616)
<i>gado</i>	1.7912*** (0.2260)
<i>app</i>	-1.3487 (1.0727)
<i>vpp</i>	2.1702* (1.1416)
<i>vpt</i>	1.7764** (0.8414)

Nota: realizado pelos autores com o auxílio do programa livre R.

Legenda: “\*\*\*” = significância de 1%, “\*\*” = significância de 5%, “\*” = significância de 10%.

Em termos percentuais, o acréscimo da probabilidade de contratação após a inclusão da atividade está exposto na Tabela 11. O valor da produção de lavoura temporária, *vpt*, influencia em maior proporção o agropecuarista do município em adquirir empréstimos para suas atividades, aproximadamente 81%. Prosseguindo, exibe-se o *gado* com quase 62%, o *vpp* com cerca de 50% e a quantidade de produtores orgânicos, *org*, com 28,85%. Quando comparada a inclusão individual de cada termo explicativo na aquisição dos empréstimos rurais, o impacto da produção temporária é a maior, Tabela 11. Isso pode não ser algo negativo para a segurança alimentar, porque, na investigação de Castelo e Almeida (2015), a lavoura permanente e temporária apresenta correlação negativa com o desmatamento no estado do Pará. Então, estes tipos de lavoura demandam empréstimos para financiar suas atividades, embora impactem pouco o

desmatamento, contribuindo com a segurança alimentar de forma sustentável por intermédio de produtos à disposição da população para consumo.

Tabela 11. Chance de contratação de crédito rural em termos percentuais

Variáveis	Probabilidade
org	28,85%
gado	61,56%
vpp	48,61%
vpt	80,68%

Nota: realizado pelos autores com o auxílio do programa livre R.

O *vpp* e *org* são os regressores que apontaram as menores chances de obtenção de crédito rural nos municípios por atividade. Isso expõe a ineficiência das políticas que visam a sustentabilidade produtiva, pois as culturas permanentes contribuem em maior proporção com a remoção de carbono da atmosfera, assim como as florestas. Da mesma forma, número de produtores orgânicos, *org*, favorece a preservação dos recursos por meio do extrativismo que gera renda para a população local, preserva o bioma e auxilia a colocação de alimentos disponibilizados ao público (Caddeo *et al.*, 2019; Maia *et al.*, 2017).

#### 2.4.3 Análise do efeito espacial e dos impactos diretos e indiretos

Após a análise dos dados para o Probit, o efeito espacial foi incluído, Tabela 12. Embora a maioria das variáveis explicativas sejam significativas, não há relevância para o efeito local em *org* nem para o *gado*. O termo autorregressivo, *WY\**, expondo um valor positivo implica em autocorrelação positiva entre as observações, isto é, os municípios próximos tendem a ter valores parecidos com o regressando quando comparados aos distantes. Desta forma, conclui-se que há efeito espacial global. Da mesma forma que no Probit convencional, os termos significativos contribuem positivamente com a obtenção dos recursos financeiros voltados ao campo. Com isso, identificou-se diferenças nos resultados do método convencional e espacial para explicar os dados.

Tabela 12. Resumo dos resultados do Probit espacial

Variáveis	Valores estimados
(Intercepto)	-0.581472** (0.270993)
org	0.065591 (0.046932)
gado	0.016311 (0.021911)
app	0.198837*** (0.073868)

vpp	-0.095081*
	(0.056247)
vpt	0.075135***
	(0.020231)
WY*	0.330363*
	(0.180125)

Nota: realizado pelos autores com o auxílio do programa livre R.

Observação: os valores em parênteses são os desvios padrão.

Legenda: “\*\*\*” = significância de 1%, “\*\*” = significância de 5%, “\*” = significância de 10%.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 12, considera-se o efeito espacial nos dados. Nesse contexto, ao verificar o efeito espacial, os resultados se mostraram diferentes ao comparar o modelo convencional com o modelo espacial. Assim, havendo maior aderência do espacial para a tomada de decisões no contexto de segurança alimentar sustentável. A característica espacial dos dados também foi identificada nos trabalhos de Fernandes e Rondina Neto (2024), Fernandes e Rondina Neto (2022), Fernandes e Stachio (2024) e Parré e Chagas (2022).

Viabilizou-se a verificação do impacto direto e indireto das localidades por meio da aplicação do modelo SAR. Assim sendo, ao se considerarem as interações espaciais entre os municípios, é possível que uma área adjacente influencie a composição do coeficiente da localidade de referência. Nesse contexto, o efeito direto representa o quanto o regressor da região de referência impacta a si mesma, desconsiderando a parte indireta proveniente das áreas adjacentes. Por fim, o efeito indireto demonstra a proporção em que as localidades vizinhas afetam a região de referência. Em síntese, foi possível distinguir as parcelas direta e indireta de cada variável explicativa na probabilidade de contratação dos recursos monetários destinados às atividades rurais.

A maioria dos termos explicativos apresenta significância estatística para os efeitos diretos, enquanto apenas o *vpt* aponta significância para o efeito indireto, conforme mostrado na Tabela 13. Com isso, afirma-se que a maior parte da influência das variáveis explicativas tende a ter um efeito direto sobre o termo dependente, sem evidência de efeito de transbordamento entre as variáveis.

Tabela 13. Resumo dos resultados do efeito total, direto e indireto

Variáveis	Total	Direto	Indireto
org	0.029206 (0.021484)	0.020390 (0.014502)	0.008816 (0.009725)
gado	0.006418 (0.010247)	0.004354 (0.006811)	0.002064 (0.004348)
app	0.090458** (0.035673)	0.060331** (0.022274)	0.030127 (0.021692)

vpp	-0.043959*	-0.029273*	-0.014687
	(0.026503)	(0.017095)	(0.012967)
vpt	0.034014***	0.023236***	0.010778*
	(0.007989)	(0.006878)	(0.006546)

Nota: realizado pelos autores com o auxílio do programa livre R.

Observação: os valores em parênteses são os desvios padrão.

Legenda: “\*\*\*” = significância de 1%, “\*\*” = significância de 5%, “\*” = significância de 10%.

Identifica-se que a produção orgânica e a agricultura de culturas permanentes demandam crédito rural, embora em menor proporção que a pecuária e as lavouras temporárias. Isso reforça os argumentos de Caddeo *et al.* (2019) e Maia *et al.* (2017) a cerca de políticas eficientes para estimular os métodos de cultivo mais sustentáveis. Essas políticas – como a Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008) – contribuem aos meios menos danosos ao ambiente, pois condicionam a liberação dos recursos financeiros, destacados por Assunção, Gandon e Rocha (2013) e Nepstad *et al.* (2014). Ainda que existam benefícios vindos das ações governamentais, a implementação pode não ser simples, porque depende de burocracias e dos canais de acesso de produtores menores. Ademais, sendo os itens orgânicos, assim como a produção permanente, mais próximos da agricultura familiar, Silva, Rodrigues e Silva (2018) e Spínola e Carneiro Filho (2019) destacam a dimensão de criar meios que disponibilizem os recursos financeiros aos grupos familiares pela sua contribuição para a conservação ambiental e segurança alimentar, consentindo aos achados da pesquisa.

A elevada chance de contratação de recursos financeiros para a pecuária como a criação de bovinos em comparação às outras atividades, pode estar expandindo a quantidade de animais em áreas de preservação, compartilhando da preocupação de Moreira-Dantas *et al.* (2023). Sobre as áreas, aborda-se a regionalização em Jusys (2016) e Chandio *et al.* (2022), que vai de encontro com os achados de dependência espacial. Desta forma, regiões vizinhas influenciam os fluxos de financiamento do município em questão, sugerindo que se deve examinar o bioma amazônico de maneira fracionada em busca de características particulares para o direcionamento mais adequado de ações.

No cenário da segurança alimentar, a relevância do crédito rural em amenizar ineficiências e promover a segurança alimentar é confirmada como em Nguyen, Nguyen e Grote (2023). Em contrapartida, a ligação dos recursos financeiros voltados aos agropecuaristas também se mostra expressiva no combate ao desmatamento. Assim como colocado por Castelo e Almeida (2015), a agricultura permanente demanda financiamentos, mas com efeitos menos prejudiciais ao ambiente, apontando sua

capacidade de elevar a renda do agropecuarista e, consequentemente, do município de uma forma menos danosa ao meio em que está inserida.

A concessão não homogênea do crédito rural, mas por uma estrutura interdependente de municípios vai de acordo com Parré e Chagas (2022) e Fernandes e Rondina Neto (2024). Destaca-se a necessidade de considerar as especificidades de cada município para propostas de desenvolvimento bem direcionadas e que sejam efetivas considerando a realidade de cada localidade. Nesse sentido, a autocorrelação espacial positiva sugere que municípios próximos tendem a apresentar padrões parecidos aos seus adjacentes no quesito obtenção de crédito rural, confirmando a abordagem espacial.

Em conclusão, os resultados obtidos confirmam a relevância de incorporar o efeito espacial na análise dos dados, uma vez que ele mostrou a existência do efeito espacial. A inclusão do fator espacial destaca a interdependência entre municípios evidenciada pelo termo autorregressivo positivo, indicando uma autocorrelação positiva entre regiões próximas. Consequentemente, ao considerar os efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas, percebe-se que a maior parte da influência ocorre diretamente, sem transbordamentos significativos entre as variáveis. Esses achados reforçam a relevância de utilizar o modelo espacial para a formulação de políticas públicas e alocação de recursos financeiros no setor rural, visando uma abordagem mais eficaz e contextualizada para promover a segurança alimentar sustentável.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo evidencia a relevância do crédito rural para promover a sustentabilidade e a segurança alimentar no bioma amazônico, considerando a influência espacial entre os municípios. Os resultados mostram que a demanda por crédito rural entre os agropecuaristas é influenciada por atividades agropecuárias locais, como a produção de culturas permanentes e temporárias, a criação de gado e o cultivo orgânico. Observou-se que as variáveis ligadas à agricultura sustentável, em especial a produção orgânica, exercem impacto positivo na chance de obtenção de crédito, embora de forma limitada.

Ao se incorporar o efeito espacial ao modelo econométrico, foi possível identificar interdependências regionais, indicando que municípios próximos tendem a compartilhar padrões de contratação de crédito rural. Esse achado é relevante para as ações públicas, pois sugere que iniciativas de financiamento sustentável podem se beneficiar de uma abordagem regionalizada, atenta às especificidades locais e à conectividade entre áreas

vizinhas. Essa estratégia pode aumentar a eficácia na alocação de recursos e potencializar o efeito das políticas de apoio à agricultura familiar sustentável.

Em contrapartida, as variáveis relacionadas à produção temporária apresentaram maior probabilidade de contratação de crédito em comparação às atividades de cultivo permanente, sugerindo uma demanda elevada por financiamento de curto prazo. Esse resultado reforça a demanda de adaptar as linhas de crédito para contemplar não apenas a produção temporária, mas também incentivar a agricultura permanente e orgânica, que contribui para a segurança alimentar e a preservação ambiental a longo prazo. Ademais, a baixa significância da variável orgânica no modelo espacial ressalta a importância de maior atenção governamental para fortalecer políticas que promovam práticas sustentáveis e garantam o acesso igualitário ao crédito.

Em síntese, os achados deste estudo exibem a relevância de políticas de crédito rural que incentivem práticas agrícolas sustentáveis, com uma perspectiva regionalizada para o bioma amazônico. Tais políticas auxiliam o desenvolvimento econômico regional e a preservação dos recursos naturais. Recomenda-se, portanto, priorizar a agricultura familiar sustentável, de modo a promover a segurança alimentar e a minimização de impactos ambientais. Para futuras extensões, sugere-se investigar outros biomas em diferentes períodos, a fim de compreender as especificidades regionais e temporais no acesso ao crédito rural.

## 2.6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. **Econometria Espacial Aplicada**. Editora Alínea, 2012.

ANDRIEU, N.; BLUNDO-CANTO, G.; CRUZ-GARCÍA, G. S. Trade-offs between food security and forest exploitation by mestizo households in Ucayali, Peruvian Amazon. **Agricultural systems**, v. 173, p. 64-77, 2019. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X18303688?casa\\_token=mDd1d1S4tFkAAAAA:iDqyjhlHZgDoa2Ju28gGZ-qI8ctEJkXoVj2\\_yscv-HA1LR1zjGHMcZEEVsGC9v5AVxhYFhDc5-c](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X18303688?casa_token=mDd1d1S4tFkAAAAA:iDqyjhlHZgDoa2Ju28gGZ-qI8ctEJkXoVj2_yscv-HA1LR1zjGHMcZEEVsGC9v5AVxhYFhDc5-c). Acesso em: 01 jan. 2025.

ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, R.; ROCHA, R. The effect of rural credit on deforestation: Evidence from the Brazilian Amazon. **The Economic Journal**, v. 130, n. 626, p. 290-330, 2020. Disponível em: <https://academic.oup.com/ej/article/130/626/290/5637860>. Acesso em: 01 jan. 2025.

ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, R. DETERring deforestation in the Brazilian Amazon: environmental monitoring and law enforcement. **Climate Policy Initiative**, v. 1, p. 36, 2013. Disponível em: [https://www.econ.puc-rio.br/uploads/adm/trabalhos/files/Command\\_and\\_Control.pdf](https://www.econ.puc-rio.br/uploads/adm/trabalhos/files/Command_and_Control.pdf). Acesso em: 01 jan. 2025.

BRASIL. Resolução nº 3.545, de 29 de fevereiro de 2008. **Dispõe sobre normas para concessão de crédito rural no contexto da Política Nacional sobre Mudança do Clima.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 mar. 2008. Disponível em: [https://www.bcb.gov.br/pre/normativos/res/2008/pdf/res\\_3545\\_v1\\_o.pdf](https://www.bcb.gov.br/pre/normativos/res/2008/pdf/res_3545_v1_o.pdf). Acesso em: 01 jan. 2025.

ARAÚJO, A. V.; MOTA, C.; SIRAJ, S. Using Genetic Programming to Identify Characteristics of Brazilian Regions in Relation to Rural Credit Allocation. **Agriculture**, n. 13, v. 5, p. 935, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/5/935>. Acesso em: 01 jan. 2025.

BEKE, T. E. Institutional constraints and adoption of improved rice varieties: Econometric evidence from Ivory Coast. **Review of Agricultural and Environmental Studies-Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement (RAEStud)**, v. 92, n. 2, p. 117-141, 2011. Disponível em: <https://ageconsearch.umn.edu/record/188238/>. Acesso em: 01 jan. 2025.

BRUNDTLAND, G. H. What is sustainable development. **Our common future**, v. 8, n. 9, 1987. Disponível em: [https://www.la trobe.edu.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/554927/Sustainability-Plan-2013-2017.pdf](https://www.la trobe.edu.au/_data/assets/pdf_file/0005/554927/Sustainability-Plan-2013-2017.pdf). Acesso em: 01 jan. 2025.

CADDEO, A.; MARRAS, S.; SALLUSTIO, L.; SPANO, D.; SIRCA, C. Soil organic carbon in Italian forests and agroecosystems: Estimating current stock and future changes with a spatial modelling approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 278, n. 107654, 2019. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016819231930262X?casa\\_token=dJg2utEVEAAAAAA:kMCmCeN8N6CrUS3GPujMKDOsJrupb5VSPJblCEoTGqcYRBgx62a1yqPb4u1O5\\_Z6TCaGGBKiug](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016819231930262X?casa_token=dJg2utEVEAAAAAA:kMCmCeN8N6CrUS3GPujMKDOsJrupb5VSPJblCEoTGqcYRBgx62a1yqPb4u1O5_Z6TCaGGBKiug). Acesso em: 01 jan. 2025.

CARRER, M. J.; SOUZA FILHO, H. M. de; VINHOLIS, M. de M. B. Determinantes da demanda de crédito rural por pecuaristas de corte no estado de São Paulo. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 51, p. 455-478, 2013. Disponível em: <http://scielo.br/j/resr/a/RkD6Txs6HQYrsdh3nD3t58F/?lang=pt>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CASTELO, T. B.; ALMEIDA, O. T. D. Desmatamento e uso da terra no Pará. **Revista de política agrícola**, v. 24, n. 1, p. 99-111, 2015. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/970/861>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CASTRO, C.; GARCIA, K. Default risk in agricultural lending, the effects of commodity price volatility and climate. **Agricultural Finance Review**, v. 74, n. 4, p. 501-521, 2014. Disponível em: <https://publications.iadb.org/en/default-risk-agricultural-lending-effects-commodity-price-volatility-and-climate>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; MAIA, S. M. F.; CHERUBIN, M. R.; FEIGL, B. J.; LAL, R. Reducing Amazon deforestation through agricultural intensification in the

Cerrado for advancing food security and mitigating climate change. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 989, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/4/989>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CHANDIO, A. A.; NASERELDIN, Y. A.; KHAN, I.; TANG, Y.; JIANG, Y. Does rural financial development facilitate food production? Evidence from major wheat-producing provinces of China. **Cogent Food & Agriculture**, v. 9, n. 2, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311932.2023.2287287>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CHAVAS, J. P.; RIVIECCIO, G.; DI FALCO, S.; DE LUCA, G.; CAPITANIO, F. Agricultural diversification, productivity, and food security across time and space. **Agricultural Economics**, v. 53, n. S1, p. 41-58, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/agec.12742>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CONNOLLY-BOUTIN, L.; SMIT, B. Climate change, food security, and livelihoods in sub-Saharan Africa. **Regional Environmental Change**, v. 16, p. 385-399, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-015-0761-x>. Acesso em: 01 jan. 2025.

DEBEBE, S. Post-harvest losses of crops and its determinants in Ethiopia: tobit model analysis. **Agriculture & food security**, v. 11, n. 1, p. 1-8, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40066-022-00357-6>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FELTRAN-BARBIERI, R.; FÉRES, J. G. Degraded pastures in Brazil: improving livestock production and forest restoration. **Royal Society Open Science**, v. 8, n. 7, 2021. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsos.201854>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FERNANDES, P. G. A.; RONDINA NETO, A. Cooperativismo e o crédito rural paranaense: influência das cooperativas na distribuição de crédito entre 2013 e 2018. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 20, n. 2, 2024. Disponível em: <https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/view/7219>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FERNANDES, P. G. A.; RONDINA NETO, A. Crédito rural no paraná: uma análise municipal para o período entre 2013 e 2018. **Revista Paranaense de Desenvolvimento - RPD**, v. 43, n. 142, 2022. Disponível em: <https://ipardes.emnuvens.com.br/revistaparanaense/article/view/1220>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FERNANDES, P. G. A.; STACHIO, L. P. Análise espacial dos repasses do estado do Paraná aos municípios de 2017 até 2021. **Cadernos de Finanças Públicas**, v. 24, n. 02, 2024. Disponível em: <https://publicacoes.tesouro.gov.br/index.php/cadernos/article/view/222>. Acesso em: 01 jan. 2025.

GODFRAY, H. C. J.; BEDDINGTON, J. R.; CRUTE, I. R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J.F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S.M.; TOULMIN, C. **Food security: the challenge of feeding 9 billion people. science**, v.

327, n. 5967, p. 812-818, 2010. Disponível em:  
<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1185383>. Acesso em: 01 jan. 2025.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. Econometria básica. 5. ed. Amgh Editora, 2011, 175 p.

GREENE, W. H. **Econometric Analysis**. 8. ed. Boston: Pearson, 2018.

GRISA, C.; GAZOLLA, M.; SCHNEIDER, S. A "produção invisível" na agricultura familiar: autoconsumo, segurança alimentar e políticas públicas de desenvolvimento rural. **Agroalimentaria**, v. 16, p. 65-79, 2010. Disponível em:  
[https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-03542010000200005](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-03542010000200005). Acesso em: 01 jan. 2025.

HANSEN, L.P.; SARGENT, T.J. Instrumental variables procedures for estimating linear rational expectations models. **Journal of Monetary Economics**, v. 9, n. 3, p. 263-296, 1982. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0304393282900204>. Acesso em: 01 jan. 2025.

HARFUCH, L.; NASSAR, A. M.; ZAMBIANCO, W. M.; GURGEL, A. C. Modelling Beef and Dairy Sectors' Productivities and their Effects on Land Use Change in Brazil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, n. 02, p. 281-304, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/VQhZBHPGcN9zwsbvR98jvjL/?lang=en>. Acesso em: 01 jan. 2025.

ISAAC, V. J.; ALMEIDA, M. C.; GIARRIZZO, T.; DEUS, C. P.; VALE, R.; KLEIN, G.; BEGOSSI, A. Food consumption as an indicator of the conservation of natural resources in riverine communities of the Brazilian Amazon. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, p. 2229-2242, 2015. Disponível em:  
<https://www.scielo.br/j/aabc/a/WrNy7gRCLXRjdrhQMbQSPVn/?lang=en>. Acesso em: 01 jan. 2025.

JUSYS, T. Fundamental causes and spatial heterogeneity of deforestation in Legal Amazon. **Applied Geography**, v. 75, p. 188-199, 2016. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622816303599>. Acesso em: 01 jan. 2025

LEE, J. W.; SOHN, S. Y. Evaluating borrowers' default risk with a spatial probit model reflecting the distance in their relational network. **PloS one**, v. 16, n. 12, 2021. Disponível em:  
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0261737>. Acesso em: 01 jan. 2025.

LI, M.; GUO, Z.; ZHANG, W. Balancing food security and environmental sustainability by optimizing seasonal-spatial crop production in Bangladesh. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 7, 2021. 074046. Disponível em:  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac0be4/meta>. Acesso em: 01 jan. 2025.

LIU, F.; XIAO, X.; QIN, Y.; YAN, H.; HUANG, J.; WU, X.; DOUGHTY, R. B. Large spatial variation and stagnation of cropland gross primary production increases the challenges of sustainable grain production and food security in China. **Science of the Total Environment**, v. 811, 2022. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972106486X?casa\\_token=VTVJriKudzQAAAAA:l23u-xYgvkRWIsstn4d\\_OUVSBRkcl-b74\\_aS8LqvteAU8Ueesf3YJanepNwXwDyh1NGGG2WScnI](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972106486X?casa_token=VTVJriKudzQAAAAA:l23u-xYgvkRWIsstn4d_OUVSBRkcl-b74_aS8LqvteAU8Ueesf3YJanepNwXwDyh1NGGG2WScnI). Acesso em: 01 jan. 2025.

LOURENÇO, A. V.; SCHNEIDER, S.; GAZOLLA, M. A agricultura orgânica no Brasil: um perfil a partir do censo agropecuário 2006. **Extensão Rural**, v. 24, p. 1, p. 42-61, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Andreia-Lourenco-3/publication/316920105\\_A\\_agricultura\\_organica\\_no\\_Brasil\\_um\\_perfil\\_a\\_partir\\_do\\_ce\\_nso\\_agropecuario\\_2006/links/5dc9559299bf1b74b423c64/A-agricultura-organica-no-Brasil-um-perfil-a-partir-do-censo-agropecuario-2006.pdf?sg%5B0%5D=started\\_experiment\\_milestone&origin=journalDetail&rtd=e30%3D](https://www.researchgate.net/profile/Andreia-Lourenco-3/publication/316920105_A_agricultura_organica_no_Brasil_um_perfil_a_partir_do_ce_nso_agropecuario_2006/links/5dc9559299bf1b74b423c64/A-agricultura-organica-no-Brasil-um-perfil-a-partir-do-censo-agropecuario-2006.pdf?sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail&rtd=e30%3D). Acesso em: 01 jan. 2025.

MAIA, J. M., DE OLIVEIRA, V. F. S., DE LIRA, E. H. A.; DE LUCENA, A. M. A. Motivações socioeconômicas para a conservação e exploração sustentável do bioma Caatinga. **Desenvolvimento e meio ambiente**, v. 41, 2017.

MOREIRA-DANTAS, I. R.; MARTÍNEZ-ZARZOSO, I.; HENNING, C.; DOS SANTOS, M. S. Rural credit acquisition for family farming in Brazil: Evidence from the Legal Amazon. **Journal of Rural Studies**, v. 101, n. 103041, 2023. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743016723001079?casa\\_token=UbR6ArkqrDgAAAAA:eKVJPjxdgfoCg2ZUI8R4H56A\\_zSxk8Bt0qBfzYS4ZJ3ZXLirqKbD-WhC2-O0H5ANrtob93r5h18](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743016723001079?casa_token=UbR6ArkqrDgAAAAA:eKVJPjxdgfoCg2ZUI8R4H56A_zSxk8Bt0qBfzYS4ZJ3ZXLirqKbD-WhC2-O0H5ANrtob93r5h18). Acesso em: 01 jan. 2025.

NEPSTAD, D.; MCGRATH, D.; STICKLER, C.; ALENCAR, A.; AZEVEDO, A.; SWETTE, B.; BEZERRA, T.; DIGIANO, M.; SHIMADA, J.; SEROA da MOTTA, R.; ARMijo, E. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1118-1123, 2014. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1248525>. Acesso em: 01 jan. 2025.

NETO, L. R. B.; DE SOUZA, A. L.; DE OLIVEIRA, C. P.; PIMENTEL, C. A. C.; ALVES, R. D. P.; VASCONCELOS, R. D. C. F. Análise da certificação de produtos orgânicos no estado do Pará, Brasil: resultados e perspectivas. **Revista Macambira**, v. 7, n. 1, 2023. Disponível em: <http://www.revista.lapprudes.net/index.php/RM/article/view/935>. Acesso em: 01 jan. 2025.

NGUYEN, T. T.; NGUYEN, T. T.; GROTE, U. Credit, shocks and production efficiency of rice farmers in Vietnam. **Economic Analysis and Policy**, v. 77, p. 780-791, 2023. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0313592622002260?casa\\_token=FZhCKROcNRAAAAAA:IOFRXRwDW219t6hFk0tVCE09znKYlbl\\_QuuZrsMSCsLWK-tKTSHb1aaCMosJw2iwlmHXaFY33WU](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0313592622002260?casa_token=FZhCKROcNRAAAAAA:IOFRXRwDW219t6hFk0tVCE09znKYlbl_QuuZrsMSCsLWK-tKTSHb1aaCMosJw2iwlmHXaFY33WU). Acesso em: 01 jan. 2025.

PARRÉ, J. L.; CHAGAS, A. L. S. Determinants of agricultural diversification in Brazil: a spatial econometric analysis. **Letters in Spatial and Resource Sciences**, v. 15, n. 2:

173-195, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12076-021-00295-0>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PARRÉ, J. L.; CHAGAS, A. L. S.; ARENDS-KUENNING, M. P. The effect of farm size and farmland use on agricultural diversification: a spatial analysis of Brazilian municipalities. **Agricultural and Food Economics**, v. 12, n. 1, p. 27, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40100-024-00323-9>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PIRAS, G.; SARRIAS, M. GMM Estimators for Binary Spatial Models in R. **Journal of Statistical Software**, v. 107, p. 1-33, 2023. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/article/view/v107i08>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PONCE, T. P.; RIBEIRO, M. R.; TELLES, T. S. Dinâmica espacial da produção de mandioca no Paraná, Brasil. **Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, v. 48, 2020. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/34307>. Acesso em: 01 jan. 2025.

RAYHAN, S. J.; RAHMAN, M. S.; LYU, K. The Role of Rural Credit in Agricultural Technology Adoption: The Case of Boro Rice Farming in Bangladesh. **Agriculture**, v. 13, n. 12, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/12/2179>. Acesso em: 01 jan. 2025.

RIBEIRO, T. da R.; FRANCO, M. R. Retorno econômico da citricultura versus cultivo de grãos na região de Paranapanema-SP. **Revista iPecege**, v. 3, n. 4, p. 35-47, 2017. Disponível em: <https://www.revista.ipecege.com/revista/article/view/156>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SILVA, A. R. O.; RODRIGUES, M.; SILVA, D. C. C. Análise de viabilidade de irrigação na pecuária leiteira: alternativas para a agricultura familiar na Amazônia. **Revista de Estudos Sociais**, v. 20, n. 40, p. 179-191, 2018. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/res/article/view/6839>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SPÍNOLA, J. N.; CARNEIRO FILHO, A. Criação de gado em Reservas Extrativistas: ameaça ou necessidade? O caso da Reserva Extrativista tapajós-Arapiuns, Pará, Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 51, 2019.

VERBEEK, M. **A guide to modern econometrics**. John Wiley & Sons, 2008.

WITTMAN, H.; CHAPPELL, M. J.; ABSON, D. J.; KERR, R. B.; BLESH, J.; HANSPACH, J.; FISCHER, J. A social–ecological perspective on harmonizing food security and biodiversity conservation. **Regional Environmental Change**, v. 17, p. 1291-1301, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-016-1045-9>. Acesso em: 01 jan. 2025.

WOOD, C. H.; WALKER, R.; TONI, F. Os efeitos da posse de título da terra sobre o uso do solo e investimentos entre pequenos agricultores na Amazônia Brasileira. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 18, n. 2, p. 95-111, 2001.

Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/8844/0>. Acesso em: 01 jan. 2025.

WOOLDRIDGE, J. M. **Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data**. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 2010.

### **3 DIVERSIFICAÇÃO DA AGROPECUÁRIA-FLORESTA NO BIOMA AMAZÔNICO: DINÂMICAS ESPACIAIS, SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

#### **RESUMO**

Com a expansão do desmatamento no bioma amazônico, as preocupações acerca da sustentabilidade das práticas rurais aumentaram. Nesse contexto, foram analisadas as dinâmicas da diversificação agropecuária e florestal, com foco no desenvolvimento sustentável e nos impactos socioeconômicos. O estudo utilizou dados secundários de 2022 e modelos econométricos espaciais para investigar as dinâmicas da diversificação agropecuária e florestal no bioma amazônico. Aplicou-se índices como Simpson e Shannon, para mensurar a diversificação produtiva e sua relação com fatores econômicos e ambientais. Os resultados destacaram que o crédito rural e o valor da produção permanente influenciam positivamente a diversificação, enquanto a cobertura florestal apresenta relação inversa, indicando limitações estruturais em áreas de maior preservação. Concluiu-se que ações governamentais, como o incentivo ao crédito rural e à produção permanente, podem fomentar práticas diversificadas e sustentáveis, beneficiando tanto as comunidades locais quanto as regiões vizinhas. Todavia, deve-se considerar as especificidades territoriais e a interdependência entre municípios para maximizar os impactos positivos. Futuras pesquisas podem adotar painéis dinâmicos e integrar variáveis qualitativas e quantitativas para aprofundar a compreensão das interações entre diversificação produtiva, sustentabilidade e desenvolvimento econômico.

**Palavras-chave:** Modelos econométricos espaciais; Crédito rural; Desmatamento; Cobertura florestal; Regiões.

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

A diversificação agropecuária e florestal atua na sustentabilidade e resiliência dos sistemas agrícolas. Como estratégia, ela permite mitigar riscos climáticos, aumentar a estabilidade econômica e preservar a biodiversidade, equilibrando produção e conservação ambiental. Estudos como os de Paschoalino e Parré (2023); Parré, Chagas e Arends-Kuenning (2024); Parré e Chagas (2022); Piedra-Bonilla, Braga e Braga (2020); Piedra-Bonilla, Cunha e Braga (2020); Caldeira e Parré (2020); indicam que a diversificação aprimora a produtividade das culturas, reduz a vulnerabilidade às oscilações de preços e incrementa a eficiência no uso de recursos naturais, como água e solo. Ademais, práticas variadas, como rotação de culturas e diversificação lavoura-pecuária-floresta, promovem maior adaptação às mudanças climáticas e redução de emissões de gases de efeito estufa.

No contexto brasileiro, um elemento para promover o desenvolvimento sustentável e fortalecer a resiliência econômica, sobretudo diante das mudanças climáticas e das crescentes pressões ambientais, é a adoção da diversificação agropecuária-floresta. O Brasil, reconhecido por sua diversidade agroecológica, enfrenta, contudo, adversidades decorrentes da concentração produtiva em poucas culturas, como

soja, milho e cana-de-açúcar. Embora essa especialização possa gerar ganhos de escala, também amplifica a vulnerabilidade do setor agrícola a riscos climáticos e de mercado, além de intensificar a perda de biodiversidade. Nesse sentido, práticas que promovem a diversificação lavoura-pecuária-floresta, têm se destacado por seu potencial de aumentar a eficiência no uso de recursos naturais e de promover a sustentabilidade ambiental (Paschoalino e Parré, 2023; Parré, Chagas e Arends Kuenning, 2024; Parré e Chagas, 2022; Piedra-Bonilla, Braga e Braga, 2020; Piedra-Bonilla, Cunha e Braga, 2020; Caldeira e Parré, 2020).

Com isso, emerge a diversificação agropecuária-florestal como uma estratégia para promover o desenvolvimento sustentável em regiões com dependência econômica das atividades rurais. No bioma amazônico, a expansão do desmatamento e as crescentes pressões ambientais e socioeconômicas intensificam a busca por práticas produtivas que equilibrem conservação ambiental e geração de renda. O modelo tradicional baseado em monoculturas apresenta limitações, como a degradação ambiental e a vulnerabilidade econômica. Nesse cenário, a diversificação surge como uma abordagem capaz de mitigar tais problemas, ao mesmo tempo em que promove maior resiliência social, econômica e ambiental (Piedra-Bonilla, Braga e Braga, 2020; Piedra-Bonilla, Cunha e Braga, 2020; Parré, Chagas e Arends-Kuenning, 2024; Bellon *et al.*, 2020; Di Falco e Chavas, 2008; Maggio *et al.*, 2018).

Os estudos de Bellon *et al.* (2020); Di Falco e Chavas (2008); Maggio *et al.* (2018); Asfaw *et al.* (2018); Nguyen (2017), destacaram que a diversificação produtiva pode influenciar positivamente a sustentabilidade, aumentando a segurança alimentar e a capacidade de adaptação às mudanças climáticas. Todavia, em busca de compreender os fatores determinantes da diversificação no bioma amazônico, exigiu-se uma abordagem integrada, que considere as interações entre variáveis econômicas e ambientais. Com isso, modelos econométricos espaciais, como Autorregressivo Espacial (SAR), Defasagem Espacial com Erro Autorregressivo Espacial (SAC) e Espacial de Durbin (SDM), foram usados para analisar essas dinâmicas na área em questão, permitindo capturar as relações produtivas entre os municípios.

Foi objetivado investigar as dinâmicas da diversificação agropecuária e florestal no bioma amazônico que é composto de 559 municípios, com foco nos impactos socioeconômicos e ambientais. Desta forma, buscou-se identificar quais são os determinantes da diversificação da agropecuária-floresta no bioma amazônico. Utilizando dados secundários de 2022 e índices de diversificação, como Simpson e Shannon,

compreendeu-se como o crédito rural, o valor da produção permanente e a cobertura florestal influenciaram a diversificação dos itens rurais.

Desta forma, a investigação contribui com a área de conhecimento explorando as características de uma região específica e delimitada por um bioma do Brasil. Dessa forma, o estudo serve como base para futuras extensões que busquem averiguar a diversificação no bioma amazônico para subsidiar a tomada de decisões políticas que priorizem o desenvolvimento regional sustentável de forma que se preserve a mata e garanta a segurança alimentar da população.

Além da introdução, das considerações finais e as referências, a presente investigação é dividida em três seções. Iniciando com a revisão de literatura que expos o estado da arte, subdividiu-se essa parte em revisão teórica e empírica. Seguindo, o material e métodos mostraram quais foram as informações utilizadas e os métodos econometrícios empregados. Os resultados e a discussão, da mesma forma que o material e métodos, foram colocados de maneira conjunta, simplificando a estrutura do texto.

### **3.2 REVISÃO DE LITERATURA**

A diversificação produtiva na agropecuária-floresta tem sido comumente discutida como uma estratégia alternativa para impulsionar o desenvolvimento rural, promover a sustentabilidade e enfrentar os desafios econômicos e ambientais. O tema desperta interesse por sua capacidade de equilibrar os meios de produção, aumentar a segurança alimentar e mitigar os impactos das mudanças climáticas. Diferentes estudos têm explorado os determinantes e os impactos dessa prática, considerando suas vantagens em relação à especialização, bem como as adversidades regionais e metodológicas que afetam sua implementação e eficácia. Desta forma, reuniu-se contribuições da literatura que destacam os benefícios, limitações e perspectivas da diversificação no contexto rural.

#### **3.2.1 Diversificação agropecuária-floresta para o desenvolvimento rural sustentável**

Uma alternativa para superar o baixo desenvolvimento rural e elevar o crescimento econômico, a diversificação produtiva na agropecuária-floresta promove o equilíbrio dos meios de produção, a conservação ambiental e o bem-estar social. A diversificação agropecuária-floresta pode proporcionar um desenvolvimento rural mais elevado e ser usado para superar as adversidades promovidas pelas mudanças climáticas. A diversificação também contribui com a segurança alimentar, pois coloca maior variedade de alimentos no mercado. Portanto, foi percebida a interação da diversificação

agropecuária-floresta com a segurança alimentar, o desenvolvimento regional e a sustentabilidade (Mattei, Cattelan e Alves, 2023; Waha *et al.*, 2018).

O aumento do rendimento agrícola e da biodiversidade, assim como a redução do uso de agroquímicos, são benefícios obtidos pelas atividades variadas no campo. Para a biodiversidade, atua diretamente na ciclagem de nutrientes, a fertilidade do solo e a regulação da água. As vantagens são estendidas a regiões maiores, não ficando restrita ao local. Portanto, a adoção de culturas agrícolas diversificadas é uma estratégia útil para promover práticas agrícolas mais sustentáveis e benéficas tanto para o meio ambiente quanto para as comunidades agrícolas (Tamburini *et al.*, 2020).

Mesmo a diversificação apresentando suas vantagens, os agropecuaristas do Brasil especializam seus produtos. Alguns estados estão divididos em três ou quatro culturas. A determinação do nível de diversificação pode ser definida por alguns fatores como a população do local, o Produto Interno Bruto (PIB) *per capita*, o Valor Bruto da Produção Agrícola (VBP), a área plantada, a capacidade de armazenamento e o crédito rural. Compreender as variáveis que determinam o grau de diversificação da agricultura pode facilitar a definição de estratégias para contribuir com a sustentabilidade rural (Parré e Chagas, 2022).

As estratégias voltadas para o desenvolvimento rural podem falhar por não incrementar a renda *per capita* e nem outros benefícios sociais e ambientais. Dependendo da região, alcançar um sistema sustentável e diversificado não é simples. Estimular o avanço da diversificação rural sem considerar os aspectos ambientais não é contemporaneamente aceito pela sociedade. Adicionalmente, há registros de que a maior variedade de atividades agropecuárias tende a elevar o PIB *per capita* da região. Isto posto, para o desenvolvimento rural acontecer, deve-se usar abordagens integradas, visando o aspecto econômico, social e ambiental (Zhang, Song e Chen, 2012; Han e Lin, 2021).

Muito se discute na literatura sobre os determinantes da diversificação da produção agropecuária, mas ainda são poucos os estudos que analisam os impactos financeiros dessa variação de culturas sobre as famílias rurais. Salvioni, Henke e Vanni (2020) argumentaram que a estratégia de diversificação de atividades impacta positivamente as finanças familiares, embora a educação tenha apontado correlação positiva com o investimento em atividades especializadas. Em vista disso, quanto maior o nível de educação do indivíduo, maior tende a ser o retorno obtido em culturas específicas.

Em oposição às vantagens das culturas variadas, Perz (2004) apresentou um estudo que integra os cenários de desenvolvimento econômico, redução da pobreza e sustentabilidade ambiental em florestas amazônicas. O objetivo foi verificar se a diversificação dos itens contribui para a conservação das matas originais. Desse modo, a exploração agrícola mais diversificada eleva os rendimentos das famílias, mas reduz a cobertura florestal. Assim, conclui-se que a diversificação agropecuária, sem um enfoque na sustentabilidade, pode promover apenas parcialmente a relação entre produção e conservação.

Os cultivos não sustentáveis podem ser desestimulados por meio de restrições de crédito. Um exemplo disso é a produção de tabaco no Brasil, em que, segundo Vogt e Alvim (2023), há restrições de recursos para agricultores que cultivam esse item, considerado prejudicial à saúde. Com isso, estimula-se a mudança dessa cultura por outras que podem ser menos danosas à saúde humana e ao meio ambiente. Isso revela que o crédito rural pode promover a sustentabilidade na produção diversificada dos municípios. De fato, há registros de linhas específicas voltadas para o meio ambiente, com foco na agroecologia, oferecidas pelo Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF).

Em suma, parte da literatura destaca as vantagens da diversificação em relação à especialização, principalmente no que diz respeito à sustentabilidade produtiva. A escolha por culturas variadas também promove o desenvolvimento rural e o aumento da renda no campo, fazendo da diversificação uma estratégia vantajosa para municípios com baixo rendimento rural. Contudo, poucos estudos abordam a sustentabilidade da agropecuária no bioma amazônico e como equilibrar o crescimento econômico com a preservação da floresta. O crédito rural, implementado por meio de políticas de restrição, pode ser um instrumental para fomentar a diversificação sustentável.

### **3.2.2 Determinantes e impactos da diversificação agropecuária**

A presença da agropecuária está presente em diversas localidades do Brasil, como no Sul do país. Para essa região, Mattei, Cattelan e Alves (2023) associaram a diversificação agropecuária ao desenvolvimento rural por meio de Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE). Sendo assim, os municípios com alto índice de desenvolvimento rural tendem a ter vizinhos na mesma condição, e vice-versa. Mas, em uma análise bivariada, foi observado que municípios com alto desenvolvimento rural

possuem vizinhos com baixa diversificação agropecuária. Com isso, foi identificada uma relação positiva entre diversificação agropecuária e desenvolvimento rural.

Com o objetivo de identificar os determinantes da diversificação agrícola no Brasil, Parré e Chagas (2022) utilizaram o Modelo Regressivo Cruzado Espacial (SLX) em painel. À vista disso, a diversificação produtiva tende a diminuir à medida que a agricultura brasileira se torna mais especializada. Além disso, foi realizada uma análise de índices de concentração, e os resultados dos índices de Simpson e Shannon reforçaram o argumento sobre a especialização no campo. Com isso, a especificação dos fatores e a análise dos índices contribuem para uma maior compreensão da relação entre diversificação e especialização.

O desempenho financeiro das famílias rurais mediante a diversificação da produção agropecuária foi investigado por Salvioni, Henke e Vanni (2020). Os autores utilizaram um painel de dados com variáveis instrumentais e efeitos fixos para analisar duas fontes de investimento: a diversificação e a especialização. Concluiu-se que a diversificação gera retornos financeiros positivos, embora também tenha sido identificada uma relação de causalidade positiva com a especialização. Deste jeito, foram observadas vantagens em ambas as estratégias, embora a sustentabilidade não tenha sido abordada na investigação.

Felix *et al.* (2020) analisaram os efeitos da diversificação das atividades agrícolas no crescimento econômico. O modelo de Distúrbio de Defasagem Autorregressivo (ARDL) revelou que os gastos do governo destinados à agropecuária não apresentam um impacto significativo no PIB. Os autores recomendaram que os investimentos no setor agrícola sejam ampliados e direcionados por um plano de longo prazo. Isto posto, contrariaram Mattei, Cattelan e Alves (2023), ressaltando que os recortes regionais das investigações são distintos.

Retomando o argumento de que o cultivo de diferentes culturas na agricultura contribui para o aumento da renda rural, Anwer, Sahoo e Mohapatra (2019) buscaram examinar as variações temporais e espaciais da diversificação agropecuária. Os autores analisaram o período de 1990 a 2014, utilizando um painel ajustado por heterocedasticidade e efeitos fixos, combinado com o índice de diversificação de Simpson, para identificar os determinantes da diversificação agrícola. Os achados indicaram que o aumento da renda no campo tem promovido maior diversidade, favorecendo a segurança alimentar da população. Entretanto, fatores como armazenamento inadequado de produtos e infraestrutura rodoviária insuficiente

prejudicam a renda dos agropecuaristas. No aspecto social, a diversificação produtiva tem aumentado a desigualdade, uma vez que os agricultores que não diversificam suas culturas ficam em desvantagem. Tanto o modelo quanto os resultados diferem de Parré e Chagas (2022), destacando novamente que os períodos e áreas analisados mudam entre as pesquisas.

Embora existam vantagens na diversificação, observa-se uma tendência de especialização no trabalho de Nayak (2016). A utilização dos índices de Gini e Herfindahl, juntamente com a análise de um painel, revelou que a maior diversidade produtiva ocorre em comunidades menores, enquanto nas maiores prevalece a especialização. As conclusões alteram dependendo da região e do período analisados, destacando, novamente, as características específicas de cada localidade nas análises.

Os índices de concentração são utilizados, como observado no levantamento feito. Além desses índices, destaca-se o uso de painéis e suas variações, embora uma reduzida quantidade de pesquisas tenha considerado o aspecto espacial das variáveis, podendo gerar um viés nos achados desde que o efeito espacial esteja presente. O principal objetivo tem sido empregar métodos capazes de identificar os determinantes da diversificação agrícola e evidenciar suas vantagens e desvantagens. Adicionalmente, a maioria das investigações foca em regiões de países em desenvolvimento, indicando a maior relevância da diversificação nessas localidades.

### **3.3 MATERIAL E MÉTODOS**

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa quantitativa que utilizou informações provenientes de fontes secundárias para aplicar modelos econométricos espaciais, visando contribuir para a proposta da investigação. Inicialmente, foram calculados índices de diversificação com o objetivo de analisar a concentração de culturas agropecuária-florestal no bioma amazônico. Após a aplicação dos indicadores, apenas um deles foi utilizado como variável dependente, o índice de Shannon, devido à elevada correlação observada entre os demais. Em seguida, um conjunto de variáveis de diferentes categorias foi incluído no modelo econômico, permitindo a definição das representações econométricas aplicadas.

#### **3.3.1 Índices de diversificação da agricultura, pecuária e silvicultura**

Para investigar a diversificação da agricultura, pecuária e silvicultura dos municípios brasileiros, foram empregados três indicadores de concentração: o Índice de

Simpson (D), o Índice de Shannon (H) e o Número Efetivo (EN). Embora todos utilizem a mesma base de dados, os resultados variam devido às diferentes metodologias de cálculo do nível de diversificação (Shannon, 1948; Simpson, 1949; Magurran, 1988). Esses índices também foram adotados em estudos anteriores por autores como Parré, Chagas e Arends-Kuenning (2024), Piedra-Bonilla, Cunha e Braga (2020), Caldeira e Parré (2020) e Parré e Chagas (2022).

O indicador de Simpson se concentra na dominância das culturas em uma determinada região, avaliando o quanto prevalente é uma atividade agrícola em relação às outras. Logo, quanto mais comum uma cultura, maior é sua dominância. O índice varia de 0 a 1, em que 0 indica a máxima diversidade – todas as culturas são cultivadas em proporções iguais – e 1 representa a diversidade mínima, com a presença de apenas um tipo de cultivo. Portanto, um valor menor de  $D$  corresponde a uma maior diversidade e vice-versa. A fórmula é definida como na Eq. (11):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2, 0 \leq D \leq 1 \quad (11)$$

em que o  $p_i$  é a proporção da quantidade da categoria  $i$  em comparação aos demais itens (Simpson, 1949; Parré e Chagas, 2022).

De forma alternativa, o indicador de Shannon considera simultaneamente a quantidade de culturas presentes e a uniformidade na distribuição dessas culturas. O valor mínimo que esse índice pode assumir é zero, o que indica baixa diversidade. Valores elevados, sem um limite máximo definido, representam alta diversidade. A fórmula para calcular este índice é dado pela Eq. (12):

$$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i, H' \geq 0 \quad (12)$$

no qual o  $H'$  é o valor calculado (Shannon, 1948; Parré e Chagas, 2022).

Por fim, o Número Efetivo (NE) é o último dos indicadores de diversificação apresentados. Este índice mostra a quantidade de categorias que seriam necessárias para atingir o mesmo nível de diversidade de uma região, caso as culturas estivessem distribuídas uniformemente. Em outras palavras, o NE inclui uma parametrização,  $q$ , no valor de  $H'$ . O resultado pode ser interpretado como uma estimativa do número de culturas

que dominam a produção em uma determinada região, de outra forma, quanto maior for o NE, mais elevada será a uniformidade das espécies. O NE é calculado de acordo com a Eq. (13):

$$EN = \exp^{H'}, EN \geq 0 \quad (13)$$

sendo  $\exp$  uma função exponencial (Magurran, 1988, Parré e Chagas, 2022).

Com base nos resultados dos índices de diversificação, seguiu-se verificando a presença de padrões espaciais por meio da autocorrelação global. Para isso, o I de Moran foi acionado. Esse é um instrumental usado para identificar a presença de efeito espacial entre as observações e, consequentemente, viabilizando o emprego da estatística adequada para sanar a questão de pesquisa.

### 3.3.2 Caracterização e análise da diversificação agropecuária-floresta

O cálculo dos índices de diversificação agropecuária baseou-se em dados obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), especificamente da Produção Agrícola Municipal (PAM), utilizando as tabelas 5457, 74 e 291. A partir disso, consideraram-se as quantidades produzidas nas atividades de silvicultura, pecuária e agricultura, que foram organizadas por intermédio de dados referentes ao ano de 2022. Todos os 559 municípios do bioma amazônico integraram a análise. Diferentemente de Parré e Chagas (2022), que trabalharam com as quantidades produzidas em nível nacional, esta investigação focou nos dados de produção de um recorte geográfico específico.

Totalizou-se 71 itens da agricultura, 6 da pecuária e 21 da silvicultura, conforme a Tabela 14, completa no Apêndice A . Foi apresentado os maiores volumes de produtos da agricultura, pecuária e silvicultura produzidos na região do bioma amazônico. Os dados estão expressos em diferentes unidades de medida, dependendo do tipo de produto, como toneladas, metros cúbicos, quilogramas ou mil litros. A partir disso, foi verificada a dominância das culturas de milho e soja na agricultura do bioma amazônico, de forma semelhante ao observado por Caldeira e Parré (2020) no bioma do Cerrado.

Tabela 14. Maiores quantidades de produtos produzidos na agropecuária-floresta no ano de 2022

<b>Produto</b>	<b>Quantidade</b>
Soja (tonelada)	34.841.350

Milho (tonelada)	34.207.204
Cana-de-açúcar (tonelada)	15.189.540
Madeira em tora (Metros cúbicos)	8.342.781
Madeira em tora para papel e celulose (Metros cúbicos)	7.491.099
Madeira em tora de eucalipto para papel e celulose (Metros cúbicos)	7.491.099
Mandioca (tonelada)	6.605.170
Mel de abelha (Quilogramas)	4.062.220
Algodão herbáceo (tonelada)	3.009.046
Dendê (tonelada)	2.911.350
Leite (Mil litros)	2.148.258
Açaí (tonelada)	1.693.623
Banana (tonelada)	937.923
<u>Madeira em tora para outras finalidades (Metros cúbicos)</u>	<u>851.682</u>

Fonte: original da pesquisa com base nos dados do IBGE.

Os produtos agrícolas dominam os maiores volumes da região do bioma amazônico. A soja é o principal produto, com 34.841.350 toneladas, evidenciando sua relevância na economia regional. Em seguida, o milho registra 34.207.204 toneladas, possivelmente ligada à produção de ração animal (Almeida e Spolador, 2024). A cana-de-açúcar ocupa o terceiro lugar, com 15.189.540 toneladas, sendo uma das principais matérias-primas para a indústria de etanol e açúcar (Brito, Matai e Santos, 2024). Entre os produtos de relevância local, a mandioca, com 6.605.170 toneladas, destaca-se como uma cultura tradicional, contribuindo, majoritariamente, com a segurança alimentar da região (Rosa Neto e Neto, 2009). Por sua vez, o dendê, com 2.911.350 toneladas, é notável por seu uso na indústria de óleo de palma (Carvalho, Moraes e Ribeiro, 2023). O algodão herbáceo, embora em menor escala quando comparado à soja e ao milho, ainda apresenta um volume expressivo de 3.009.046 toneladas. Produtos característicos da biodiversidade amazônica, como a banana, com 937.923 toneladas, e o açaí, com 1.693.623 toneladas, reforçam a presença cultural da agricultura regional (Cruz e Cabral, 2023).

Na silvicultura presente no bioma amazônico, os produtos madeireiros se destacam sendo divididos em três categorias principais. A madeira em tora apresenta o maior volume entre os produtos florestais, totalizando 8.342.781 metros cúbicos. Depois, a madeira em tora destinada à produção de papel e celulose registra 7.491.099 metros cúbicos, com volume equivalente ao de madeira de eucalipto para a mesma finalidade, evidenciando sua utilidade para a indústria de papel e celulose. Por outra perspectiva, a madeira em tora para outras finalidades exibe um volume mais modesto, com 851.682 metros cúbicos, embora ainda relevante. Portanto, observa-se a predominância de

madeira destinada à produção industrial em comparação a outras finalidades, apontando a presença da silvicultura no território (Costa *et al.*, 2020).

Para os itens da pecuária, há registro de sua presença, com destaque para o leite, cuja produção atinge 2.148.258 mil litros (Amorim e Trajano, 2020). Outro produto de elevada produção é o mel de abelha, que totaliza 4.062.220 quilogramas, destacando-se por seu caráter sustentável e alto valor agregado (Vieira e Bendini, 2021). Em comparação aos volumes de produção, a soja mostra o maior volume absoluto, com mais de 34 milhões de toneladas, enquanto o menor volume registrado é o de madeira em tora para outras finalidades, com 851.682 metros cúbicos. Embora produtos como açaí e mel de abelha tenham volumes mais modestos, eles possuem importância cultural e econômica, refletindo a diversidade produtiva da região (Rosa Neto e Neto, 2009).

A análise dos dados revela que a predominância de culturas como soja e milho, associadas ao agronegócio, podem implicar em desmatamento e alterações no uso do solo. Apesar disso, a região demonstra uma diversidade econômica, combinando produções de maior escala, como soja, milho e madeira para celulose, com produtos tradicionais e sustentáveis, como açaí e mel de abelha. Com isso, torna-se viável relacionar o impacto ambiental dessas atividades com sua contribuição para a geração de renda e a melhoria da qualidade de vida da população.

Em resumo, esta pesquisa empregou os produtos da agropecuária e silvicultura para possibilitar em exame espacial sobre a diversificação das culturas. Identificou-se uma predominância da soja em relação aos demais itens. Desta forma, conforme destacam Parré e Chagas (2022), um aumento na renda da população tende a diversificar a demanda por alimentos. Desta forma, a concentração do cultivo em um número limitado de produtos pode estar associada a uma menor renda *per capita*. Entretanto, não se deve afirmar a existência de concentração produtiva de culturas por meio de uma inferência exploratória, há a necessidade de incluir métodos formais que proporcionem a ratificação do argumento. Por causa disso, além do uso de índices, inseriu-se alguns modelos estatísticos.

### **3.3.3 Variáveis explicativas na análise da diversificação agropecuária-florestal**

Além dos índices destacados, outras variáveis foram incorporadas ao modelo econométrico utilizado. A Tabela 15 apresenta os termos empregados, detalhando o nome, a descrição das informações associadas, a unidade de medida e a respectiva fonte dos dados. Entre as variáveis, encontram-se regressores tradicionais utilizados para

explicar o nível de diversificação das culturas agrícolas, como o emprego do crédito rural, seguindo a abordagem de Parré, Chagas e Arends-Kuennen (2024). Adicionalmente, foram incluídas variáveis inéditas na literatura, como a taxa de desmatamento e o número de produtores orgânicos. Esses elementos foram selecionados por refletirem características específicas do recorte espacial analisado, dado o foco no bioma amazônico. Por conseguinte, buscou-se investigar se esses fatores possuem capacidade explicativa sobre a diversificação agrícola na região.

**Tabela 15. Descrição das variáveis utilizadas na pesquisa**

Variável	Descrição	Medida	Fonte
vpp	Valor da produção permanente da agricultura	R\$	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
vpt	Valor da produção temporária da agricultura	R\$	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
flo	Área coberta por floresta	Km <sup>2</sup>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
cred	Crédito contratado para atividades rurais	R\$	Banco Central do Brasil (BACEN)
des	Taxa da área desflorestada	Taxa	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
org	Quantidade de produtores orgânicos	Unidade	Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA)

Fonte: original da pesquisa.

Ainda na Tabela 15, a variável *cred* representa o montante de crédito contratado para atividades rurais, medido em reais. Essa informação, obtida junto ao BACEN, indica ser um fator econômico diretamente relacionado ao suporte financeiro para as atividades da agropecuária e floresta. Por sua vez, *flo*, que se refere à extensão territorial de floresta de cada município, é medida em quilômetros quadrados. Fornecida pelo INPE, reflete-se o tamanho da floresta em cada localidade dentro do bioma, destacando a relevância territorial da região sobre a cobertura de mata. Outro componente, *des*, ou taxa de desmatamento, indica a proporção da área desflorestada em relação ao total do município. Também obtida pelo INPE, essa variável ambiental serve como parâmetro para a avaliação dos impactos do desmatamento nas atividades rurais e na sustentabilidade regional.

Com o objetivo de averiguar os efeitos do número de produtores orgânicos na agricultura, a variável *org* é expressa em unidades e obtida por meio do MAPA. Esse termo foi inserido como uma *proxy* que representa a produção orgânica no recorte espacial, evidenciando um aspecto qualitativo e sustentável da produção agrícola,

alinhado às práticas de conservação e responsabilidade. Adicionalmente, as variáveis *vpp* e *vpt*, que correspondem aos valores da produção permanente e temporária da agricultura, respectivamente. Por fim, indica-se que os efeitos da produção temporária e permanente diferem no processo de diversificação, justificando a separação desses termos na análise (Pires, 2023).

De maneira geral, essas variáveis abrangem dimensões econômicas e ambientais, oferecendo uma base mista para compreender as dinâmicas da diversificação agrícola no bioma amazônico, tornando essa abordagem relevante frente à sustentabilidade e ao uso racional dos recursos naturais. Desta forma, uniu-se regressores comuns da literatura como *cred*, *vpp* e *vpt*, mas houve inovação com a inclusão de variáveis inéditas como a *org*, *des* e *flo*. Logo, tanto os efeitos econômicos como os ambientais foram alcançados mediante a proposta realizada. De forma parcial, as variáveis selecionadas também foram empregadas nas investigações de Paschoalino e Parré (2023), Piedra-Bonilla, Braga e Braga (2020), Piedra-Bonilla, Cunha e Braga (2020) e Caldeira e Parré (2020).

### **3.3.4 Análise descritiva das variáveis e disparidades regionais no bioma amazônico**

Verificando os valores dos termos utilizados na investigação, integrou-se um exame descritivo, Tabela 16. A distribuição dos valores averiguados contribui para a compreensão das proporções de cada variável dentro do recorte espacial estudado. Embora as unidades de medida entre alguns termos sejam distintas, o que impede uma comparação direta, essa diversidade justifica o uso de cada elemento e esclarece o mérito relativo de cada um no contexto da pesquisa. Ainda assim, houve dificuldade em encontrar termos para compor o modelo econômico que estivessem do mesmo momento temporal, 2022.

**Tabela 16. Resumo descritivo dos valores das variáveis utilizadas na investigação**

Variável	Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
Shannon	0,000	0,8626	1,1732	1,1615	1,5158	2,3723
vpp	3,000	447,00	2.986,00	27.948,00	11.642,00	1.604.546,00
vpt	1,00	550,00	4.544,00	36.205,00	30.270,00	1.949.593,00
flo	0,400	133,90	735,30	5.613,30	4.473,70	1.426.570,20
cred	3.000,00	642.160,00	3.604.200,00	13.913.352,00	12.255.358,00	480.019.191,00
des	0,0125	0,5000	3,1000	23,8639	14,4500	731,7000
org	1	2	4	8	6	216

Nota: dados originais da pesquisa.

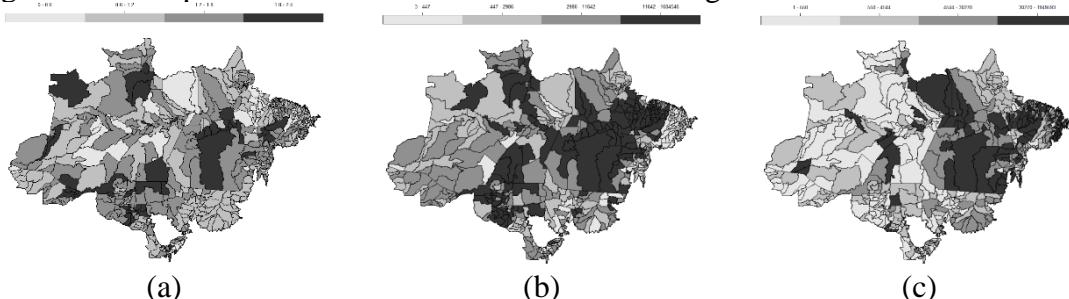
Com base nos resultados da Tabela 16, destaca-se informações sobre a dispersão, centralidade e amplitude das variáveis investigadas. Inicialmente, o índice Shannon, Figura 11 (a), em cores para daltônico no Apêndice B, que mede a diversidade produtiva

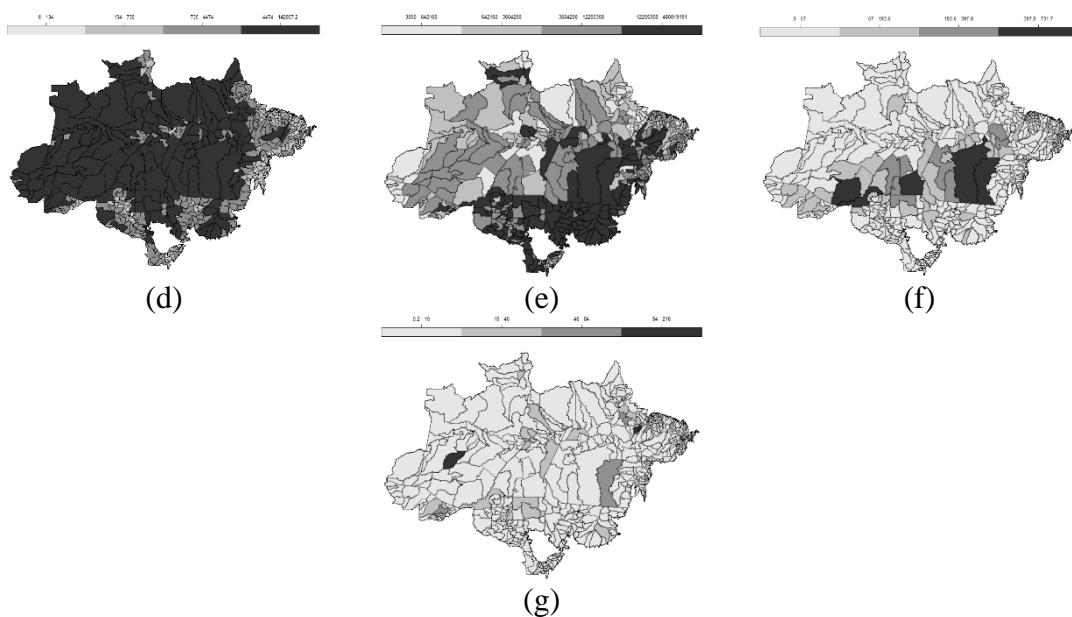
da silvicultura, pecuária e agricultura, apresenta valores que variam de 0 a 2,3723. Com isso, a mediana, 1,1732, e a média, 1,1615, são bastante próximas, indicando uma distribuição simétrica. Além disso, a concentração dos valores entre o 1º quartil, 0,8626, e o 3º quartil, 1,5158, sugere que a maior parte das observações se encontra em faixas intermediárias de diversidade.

Por sua vez, o valor da produção permanente, *vpp*, Figura 11 (b), em cores para daltônico no Apêndice B, mostra elevada dispersão. O mínimo de R\$ 3,00 é baixo em comparação ao máximo de R\$ 1.604.546,00, sugerindo a presença de municípios discrepantes ou uma distribuição assimétrica. A diferença entre a mediana e a média também reforça essa assimetria, com valores extremos puxando a média para cima. Similar ao *vpp*, o valor da produção temporária, *vpt*, Figura 11 (c), em cores para daltônico no Apêndice B, exibe elevada variabilidade. A diferença entre o 1º quartil e o máximo é elevada, com o máximo sendo quase 4.000 vezes maior que a mediana. Isso indica a presença de heterogeneidade na produção agrícola temporária. Os achados em torno do *vpp* e *vpt* é justificado pela presença da agricultura nas áreas em que o desmatamento é mais acentuado, Figura 11 (e), em cores para daltônico no Apêndice B, isto é, a atuação rural está localizada em locais específicos enquanto há municípios em que a mata está próxima ao total original.

Esse contraste entre áreas desmatadas e presença das atividades rurais podem ser ratificadas por meio da Figura 11 (c) e (b), em cores para daltônico no Apêndice B, apontando que as bordas próximas ao cerrado apresentam menor proporção de florestas quando comparado ao cinturão que exibe os maiores níveis de desmatamento para o ano de 2022. Por outro lado, a área florestal, *flo*, Figura 11 (d), em cores para daltônico no Apêndice B, também possui uma ampla variação. A média de 5.613,30 km<sup>2</sup> é influenciada por valores máximos elevados, como o de 1.426.570,20 km<sup>2</sup>. A mediana, 735,30 km<sup>2</sup>, está abaixo da média, sugerindo que a maior parte das áreas cobertas por floresta é menor do que os valores mais elevados.

Figura 11. A dispersão dos valores das variáveis no cartograma do bioma amazônico





Nota: (a) representa a variável *Shannon*; (b) representa a variável *vpp*; (c) representa a variável *vpt*; (d) representa a variável *flo*; (e) representa a variável *cred*; (f) representa a variável *des*; (g) representa a variável *org*.

Fonte: dados originais da pesquisa.

As atividades rurais estão presentes em maior proporção nas áreas específicas, não uniformes ao recorte, percebe-se esse mesmo padrão para o *cred*, Figura 11 (e), em cores para daltônico no Apêndice B, desta forma, o crédito rural indica alta dispersão. A diferença entre o mínimo e o máximo é relevante, com o máximo superando o mínimo em mais de 160 mil vezes. Com isso, a média é quase quatro vezes maior que o 3º quartil, o que sugestiona o registro de valores elevados que levam a média para cima. A expansão das atividades rurais é, novamente, confirmada pela variável *des*, Figura 11 (f), em cores para daltônico no Apêndice B, também podendo ser visualizada pela Figura 11 (e), em cores para daltônico no Apêndice B. Consequentemente, a taxa de desflorestamento varia de valores baixos, 0,0125, até um máximo elevado de 731,7. A média de 23,8639 é consideravelmente maior que a mediana, 3,1, propondo uma assimetria com valores muito elevados. O 3º quartil, 14,4500, sugere que 75% das observações possuem taxas relativamente baixas, de outra forma, o desflorestamento está concentrado em locais específicos.

A discrepância dos dados entre os municípios é mais destacada em *org*, Figura 11 (g), em cores para daltônico no Apêndice B. Neste caso, a quantidade de produtores orgânicos exibe uma distribuição concentrada em números baixos, com valores como da mediana, igual a 4, e do 3º quartil, igual a 6, revelando que a maioria das observações está nessa faixa. Porém, há valores elevados, máximo de 216, que puxam a média para cima. Assim, as variáveis ponderadas indicam heterogeneidade e assimetrias, com algumas

acusando valores extremos que impactam as médias. Esse exame reflete disparidades regionais no bioma amazônico justificando a concentração de atividades econômicas em agrupamentos locacionais específicos. Por isso, deve-se considerar na análise a presença de dados discrepantes que podem influenciar os resultados dos modelos empregados, desde que não haja tratamento.

### **3.3.5 Matriz de ponderação e análise da autocorrelação espacial**

Antes de aplicar o instrumental econométrico, foi necessário definir a matriz de contingência. Conforme Anselin (1995), na estatística espacial, é fundamental estabelecer uma matriz de ponderação de dimensão  $n \times n$  antes de proceder ao método analítico. O peso espacial, denotado por  $W_{ij}$ , representa o grau de conexão entre as áreas  $i$  e  $j$  com base em critérios geográficos ou socioeconômicos. A base geográfica foi selecionada considerando a contiguidade e a distância entre as localidades, escolha apropriada dado o foco nos municípios. Diante da natureza do contexto espacial, optou-se por uma matriz do tipo rainha, que leva em conta a continuidade dos vértices entre os polígonos adjacentes (Almeida, 2012).

Por sua vez, a autocorrelação espacial global é uma técnica que examina a existência de semelhanças espaciais nos dados selecionados. Em outras palavras, busca-se identificar se os valores de uma variável na região focal estão relacionados aos valores da mesma variável em regiões próximas. Com isso, existem três possíveis resultados: uma autocorrelação espacial positiva indica que valores semelhantes estão agrupados; uma negativa sugere o oposto; e um resultado próximo de zero aponta para uma distribuição aleatória no espaço. Em resumo, essa ferramenta é útil para determinar se as observações estão dispersas ou agrupadas (Almeida, 2012; Anselin, 1995).

Após definir a matriz de pesos, procedeu-se ao cálculo do I de Moran Global univariado para cada índice, com o objetivo de identificar a presença de autocorrelação espacial antes de definir o método econométrico mais aderente. Segundo Moran (1948), o coeficiente de autocorrelação espacial é estabelecido pela avaliação da autocovariância dos produtos cruzados, definido como na Eq. (14):

$$I = \frac{z'Wz}{z'z} \quad (14)$$

em que a autocovariância é expressa pelos produtos cruzados  $z'Wz$ , sendo  $z$  os valores padronizados da variável de interesse e  $Wz$  denota os valores médios padronizados dessa variável nos vizinhos, conforme definido pela matriz de ponderação espacial  $W$ . No teste para detectar a presença de autocorrelação espacial, a hipótese nula assume a aleatoriedade espacial.

### 3.3.6 Estruturação da modelagem econômica

A partir da definição das variáveis e a verificação de existência do efeito espacial, tornou-se possível montar o modelo econômico utilizado na pesquisa. Na Eq. (15), os termos estão expressos em função do índice de Shannon, que foi selecionado como variável dependente. Essa escolha foi motivada pela elevada correlação entre Shannon, NE e Simpson. Desta forma, tomou-se essa decisão com o objetivo de ajustar os dados de maneira que a normalidade dos resíduos fosse alcançada. Logo, temos:

$$\text{Shannon} = f(vpp + vpt + flo + cred + des + org) \quad (15)$$

em que  $\text{Shannon}$  está em função de  $vpp$ ,  $vpt$ ,  $flo$ ,  $cred$ ,  $des$  e  $org$ . Com isso, de acordo com Wooldridge (2019), definido o modelo econômico, pode-se estruturar o econométrico.

### 3.3.7 Especificação do modelo econométrico espacial SAC

Com a representação do instrumental econômico, inseriu-se o econométrico. De acordo com Almeida (2012), o modelo misto com SAC, incorpora a defasagem espacial do termo dependente e o erro espacialmente autocorrelacionado. Desta forma, combinando os efeitos, esse é denominado misto, pois o fator autorregressivo é representado por  $\rho Wy$  que capta a influência dos valores da variável dependente das unidades vizinhas sob a localidade de referência; e o erro espacial, simbolizado por  $\lambda Wu$  que mostra se o erro da área principal está correlacionado com os termos de erro de seus vizinhos. Decompondo os itens, temos que  $W$  é a matriz de pesos espaciais,  $\rho$  é o coeficiente de defasagem espacial da variável dependente,  $y$ , o  $\lambda$  é o coeficiente de autocorrelação espacial do erro, e o  $u$  é o termo de erro correlacionado no espaço.

Por ser um modelo de alcance global, ainda segundo Almeida (2012), os impactos das alterações se propagam por toda a região estudada. Dessa forma, possibilitando a identificação dos efeitos diretos, indiretos e totais, isto é, o impacto de alguma alteração nos termos explicativos sob o regressado numa mesma localidade, o transbordamento da

mudança das variáveis independentes nas outras localidades afetando o regressando, e a abrangência total, respectivamente. Anselin (1988), definiu a fundamentação do SAC que combina autocorrelação nos erros e na defasagem, mas Kelejian e Prucha (1998) apresentaram as técnicas de estimação. Com isso, definiu-se a especificação genérica pela Eq. (16):

$$y = \rho W y + X\beta + u \quad (16)$$

em que o erro, quando decomposto, temos a Eq. (17):

$$u = \lambda W u + \varepsilon \quad (17)$$

o  $X$  exprime ser a matriz de variáveis independentes, o  $\beta$  representa o vetor de coeficientes, o  $u$  é o erro autocorrelacionado enquanto o  $\varepsilon$  é o aleatório.

Derivando da equação genérica do SAC e inserindo as variáveis selecionadas, temos na Eq. (18) a versão empregada pela presente investigação:

$$\begin{aligned} Shannon_i = & \rho \sum_j W_{ij} Shannon_j + \beta_0 + \beta_1 \log(vpp) + \beta_2 \log(vpt) \\ & + \beta_3 \log(flo) + \beta_4 \log(cred) + \beta_5 \log(des) + \beta_6 \log(org) \\ & + u_i \end{aligned} \quad (18)$$

sendo que o  $i$  indica as localidades referenciais e o  $j$  as adjacentes definidas por meio da matriz de pesos estabelecida. Além disso, os betas são os coeficientes da equação.

Adicionalmente, a autocorrelação nos termos de erro é representada pela Eq. (19):

$$u_i = \lambda \sum_j W_{ij} u_j + \varepsilon_i \quad (19)$$

lembrando que o  $u$  é o erro correlacionado e o  $\varepsilon$ , aleatório.

Como mostrado na equação (18), a forma funcional adotada é *lin-log*. Isso significa que, enquanto a variável dependente permanece linear, os termos explicativos foram transformados logaritmicamente. Essa configuração influencia a interpretação dos dados. Por exemplo, para cada acréscimo de 1% em uma variável explicativa, *ceteris paribus*, o impacto na variável dependente corresponde ao valor do coeficiente associado a esse regressor multiplicado por 0,01, pois o regressado, representado por *Shannon*, está

em unidades lineares, enquanto os termos explicativos estão expressos em variações percentuais.

### **3.3.8 Relações das variáveis explicativas com o índice de Shannon**

Os sinais esperados para as estimativas dos coeficientes estão expostos na Tabela 17. Esperava-se que a variável representada pelo crédito rural, *cred*, tivesse o sinal positivo, pois quanto maior for a quantidade de crédito, maior a diversidade das culturas devido a presença de agricultura familiar na região que geralmente priorizam maior quantidade de itens em seus cultivos (Damiani, 2018). Além disso, pela pesquisa abranger não apenas a agricultura, mas a pecuária e a silvicultura no regressado, a quantidade de produtos que podem ser escolhidos também aumenta.

Por sua vez, a taxa de desmatamento, *des*, apresenta uma relação positiva com o indicador de Shannon, demonstrando que o desmatamento pode expandir a capacidade produtiva da pecuária, silvicultura e agricultura. Essa relação corrobora os achados de Barbieri (2007), que destaca a mobilidade populacional como um fator impulsor dessas atividades. Por conseguinte, o desmatamento eleva a diversidade de itens usados no recorte espacial selecionado. Por exemplo, antes do desmatamento, poderia haver a predominância da extração do açaí, fruto típico do bioma amazônico; contudo, após a retirada da floresta, a gama de possibilidades produtivas aumenta. A interação positiva entre o desmatamento e a diversificação agropecuária e florestal é destacada também em estudos como os de Castelo e Almeida (2015) e Rossoni e Moraes (2020).

No caso dos valores da produção permanente e temporária, *vpp* e *vpt*, estudos como o de Rathmann *et al.* (2008) relacionam a produção permanente a uma maior variedade de itens, enquanto a produção temporária tende a se concentrar em culturas específicas, com o objetivo de maximizar rendimentos conforme as demandas do mercado. Ademais, a diversificação tem uma influência positiva na geração de renda, conforme destacado por Goodman, Sorj e Wilkinson (1985).

A área coberta por florestas, *flo*, apresenta uma relação negativa com o indicador, pois, quanto maior a cobertura florestal, menor será o espaço disponível para atividades rurais. Piedra-Bonilla, Braga e Braga (2020) também associaram a área florestal à diversificação da agropecuária e silvicultura. Por sua vez, a quantidade de produtores orgânicos, *org*, pode estar negativamente relacionada à diversidade de produtos devido às limitações técnicas, já que o controle de pragas e doenças é simples de manejar com uma menor variedade de culturas, conforme afirmado por Mazzoleni e Nogueira (2006).

Adicionalmente, considerando as especificidades do mercado local, pode haver preferência por determinados itens em detrimento de outros, levando os agricultores orgânicos a concentrarem seus recursos nos produtos de maior demanda.

Tabela 17. Sinais esperados para as estimativas dos coeficientes do modelo econométrico

Variável	Sinal esperado
$\log(vpp)$	(+)
$\log(vpt)$	(-)
$\log(flo)$	(-)
$\log(cred)$	(+)
$\log(des)$	(+)
$\log(org)$	(-)

Fonte: dados originais da pesquisa.

Como resultado, os valores esperados dos coeficientes estão alinhados com os apontados na literatura. Foi apresentada uma combinação de variáveis tanto positivamente quanto negativamente relacionadas ao índice de Shannon. Portanto, espera-se identificar o grau de influência de cada variável independente sobre a diversificação no bioma amazônico, podendo assumir efeitos positivos ou negativos. Com base nos resultados, realizou-se uma análise que pode servir como subsídio para a formulação de ações voltadas à geração de renda e ao desenvolvimento sustentável da região.

### 3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o emprego das variáveis do modelo econômico, verificou-se a adequação dos dados para o uso de métodos espaciais. Diante disso, o resumo da regressão realizada por Máxima Verossimilhança (MV) está exposto na Tabela 18. Corroborando o esperado, os termos *vpp*, *cred* e *des* apresentaram associação positiva com o índice de Shannon, enquanto *vpt*, *flo* e *org* exibiram associação negativa. Ainda assim, os achados não são definitivos, pois devem ser validados mediante testes. Após constatada a normalidade residual dos erros, validou-se verificar a significância estatística individual e conjunta, testes *t* e *F*, respectivamente. Ambos indicaram aderência adequada da MV às observações utilizadas.

Considerando que o modelo é do tipo *lin-log*, tem-se que, para cada 1% adicional em *vpp*, a variável dependente cresce 0,000413, *ceteris paribus*. Por sua vez, a elevação de um ponto percentual em *vpt* reduz o termo explicado em 0,000178. Da mesma forma, o acréscimo de 1% em *flo* resulta em uma diminuição de 0,000217 em Shannon. Dando

continuidade ao exemplo, para cada 1% adicional em *cred*, *des* e *org*, as variações são de 0,000433, 0,000276 e -0,000356, respectivamente, mantendo as demais variáveis constantes. Em vista disso, o valor exato da variação pode ser determinado conforme os ajustes percentuais em cada termo explicativo.

Tabela 18. Resumo da regressão linear por MV

Variável	Estimativa
Intercepto	0,5095**
log(vpp)	0,0413***
log(vpt)	-0,0178**
log(flo)	-0,0217**
log(cred)	0,0433***
log(des)	0,0276**
log(org)	-0,0356*

Nota: os asteriscos indicam o nível de significância, sendo “\*\*” = 10%, “\*\*\*” = 5% e “\*\*\*\*” = 1%.

Fonte: resultados originais da pesquisa.

Para verificar a existência de multicolinearidade, recorreu-se ao Fator de Inflação da Variância (VIF). O teste indicou ausência de problemas, pois valores acima de 10 apontariam correlação elevada, enquanto nenhuma variável apresentou resultado superior a 2. Ainda avaliando a qualidade da proposta, outro instrumento utilizado para identificar a normalidade dos resíduos foi o teste de Jarque-Bera, comumente empregado em grandes amostras. Como o resultado não foi significativo, aceitou-se a hipótese nula de normalidade na distribuição dos resíduos, possibilitando a utilização de testes de hipótese.

Identificada a boa aderência do modelo aos dados, recorreu-se ao teste de Moran Global para verificar um possível efeito espacial nos resíduos da regressão por MV, encontrando-se autocorrelação positiva, I de Moran = 0,31\*\*\*. Contudo, como essa ferramenta não indica se o efeito é oriundo da defasagem ou do erro, aplicou-se o teste LM simples e o teste LM robusto, respectivamente. Inicialmente, o teste LM convencional foi inconclusivo, pois tanto o LMlag, 143, quanto o LMerr, 130, mostraram-se significativos ao nível de 1%. Em razão disso, partiu-se para o instrumental robusto, que apresentou RLMlag = 14 e RLMerr = 0,02, sendo significativo apenas o primeiro. Assim sendo, foi concluído que o modelo econométrico mais adequado deve considerar, principalmente, a defasagem, de modo que possa eliminar o efeito espacial de seus resíduos.

A partir do teste para identificar o efeito espacial, foram aplicadas três representações, expostos na Tabela 20, sendo eles o SAR, SAC e SDM, visando encontrar o mais aderente aos dados e capaz de eliminar a autocorrelação espacial em seu resíduo.

Porém, as propostas que abrangem apenas a defasagem não foram efetivas. De outra forma, o modelo SAC, que incorpora tanto a defasagem,  $\rho$ , quanto o erro,  $\lambda$ , demonstrou ser o mais adequado, pois ambos os termos foram significativos, representando de forma mais abrangente as características dos dados, além de exibir um Critério de Informação de Akaike (AIC) menor do que os demais.

Ainda na Tabela 20, foram apresentados os resultados referentes às matrizes k3, três vizinhos mais próximos, e k5, cinco vizinhos mais próximos, com o objetivo de confirmar os achados da matriz de pesos do tipo rainha. Não houve mudanças substanciais, garantindo a qualidade dos resultados. No entanto, no modelo SDM, algumas variáveis defasadas apresentaram alterações de sinal, propondo uma possível mudança estrutural ao se considerar subregiões, em contraste com a visão mais ampla fornecida pelos modelos SAC e SAR. Portanto, essa alteração de sinal, possivelmente decorrentes das características particulares de localidades menores, reforçam os achados do primeiro ensaio desta tese.

Em todos os casos, foram encontrados coeficientes de defasagem,  $\rho$ , e de erro,  $\lambda$ , de sinais diferentes. Enquanto um é positivo, o outro se encontra negativo, Tabela 20. Para um coeficiente de defasagem maior que zero, é mais provável que as localidades adjacentes da região de referência também apresentem valores positivos, possibilitando um efeito de agrupamento para o termo dependente. Por sua vez, o  $\lambda$  negativo mostra que os vizinhos apresentam valores com padrões não semelhantes ao da região focal, sendo que a localidade central pode ter valores positivos e os adjacentes, negativos. O sinal negativo sugere um efeito de compensação não capturado pelos termos explicativos. De outra forma, além do que foi absorvido pelo  $\rho$ , o resto se distribui de maneira contrária. Ainda mais, sugestiona-se a inclusão de novas variáveis explicativas com a intenção de reduzir os erros e aprimorar a representação.

As variáveis que apresentaram significância estatística nos modelos espaciais – com exceção do SDM de matriz k5 que não presentou significância para *flo* – foram *vpp*, *flo* e *cred*, diferentemente de Paschoalino e Parré (2023), que utilizaram um índice semelhante, mas com regressores sociais significativos. Contrariamente a Parré e Chagas (2022); Piedra-Bonilla, Cunha e Braga (2020), o termo explicativo que representa o crédito rural apresentou significância estatística, indicando que existem características próprias do bioma amazônico que divergem do restante do Brasil. Consequentemente, evidenciando a oportunidade de descobertas por investigações que considerem as

especificidades das diferentes regiões do país. Adicionalmente, destaca-se que os resultados relacionados a *cred* divergem da literatura utilizada.

O valor da produção permanente está positivamente relacionado ao nível de diversificação da agropecuária e silvicultura. Isso pode ocorrer porque o *vpp* engloba uma maior variedade de itens produzidos, ao contrário da produção temporária, que apresenta maior concentração em um número reduzido de culturas e, em alguns casos, realiza a rotação de monoculturas entre safras. Da mesma forma, o crédito rural contribui positivamente para a diversidade de produtos, indicando que os recursos financeiros destinados ao campo têm promovido maior diversificação. Essa relação positiva entre diversidade e culturas permanentes já havia sido identificada por Schneider (2010); contudo, nesse estudo, foram integradas também a pecuária e a silvicultura. Não apenas a agricultura, mas também as práticas permanentes corroboraram aos achados de Caldeira e Parré (2020), que apontaram causalidade entre práticas sustentáveis e o desenvolvimento regional. Deste modo, considerando apenas o *vpp*, apoia-se as conclusões de outros autores com abordagens semelhantes.

Nas áreas com maior cobertura florestal, observa-se um foco na produção de itens específicos característicos da região, como o açaí, o que resulta em uma relação inversa com a diversificação. Sob outro enfoque, quanto menor a área coberta por florestas, maior é a variedade de itens que podem ser produzidos, estabelecendo uma relação negativa. Diferentemente deste estudo, que aponta que maiores índices de cobertura florestal estão associados a menores níveis de desmatamento, o trabalho de Sambuichi *et al.* (2012) destaca a relevância da recomposição florestal, e não da cobertura, para promover a diversificação e a sustentabilidade agrícola. Segundo esses autores, a recuperação de áreas degradadas deve ser conduzida com técnicas sustentáveis, como o cultivo orgânico. Em uma análise alternativa, Santos e Silva (2022) argumentam que a preservação da cobertura florestal estimula práticas rurais diversificadas, um achado distinto do apresentado neste estudo.

Para cada acréscimo percentual em *vpp*, o índice de Shannon da região aumenta em cerca de 0,0002. De maneira análoga, um aumento percentual em *flo* reduz o indicador em aproximadamente 0,0001. Por fim, um aumento de uma unidade percentual em *cred* resulta em um incremento de 0,0002 no nível de diversificação calculado. Observa-se que as variáveis impactam a diversificação de maneira modesta, sendo necessário um acréscimo percentual significativo para que ocorra uma mudança substancial no indicador. Isso destaca a possibilidade de inclusão de novas variáveis que possam

influenciar o grau de diversificação de forma mais expressiva. Apesar disso, os achados contribuem para os estudos sobre o tema, sendo algo inédito no contexto do bioma da região amazônica.

Como o modelo SAC foi considerado o mais adequado entre os propostos, tornou-se possível verificar os efeitos diretos e indiretos, Tabela 19. Por meio de simulação de Monte Carlo, foram gerados os impactos de cada termo explicativo no regressando. O efeito direto refere-se ao impacto da variável explicativa sobre o termo dependente, considerando a mesma localidade. Já o efeito indireto está relacionado ao transbordamento, pois avalia a influência das variações dos termos explicativos das áreas adjacentes sobre a região de referência. Por fim, o efeito total representa o impacto global dos termos independentes tanto na localidade de referência quanto em suas vizinhas.

Nesse contexto, tanto *vpp* quanto *cred* foram significativos em todos os grupos analisados. Além disso, ambos demonstraram que o valor do efeito indireto é superior ao direto, indicando que as localidades adjacentes exercem uma influência maior sobre a região de referência do que a área central exerce sobre si mesma. Em outras palavras, o ponto focal é fortemente influenciado pelos seus vizinhos na diversificação dos produtos rurais nesse caso. Em suma, sugere-se que o aumento dos efeitos direto e indireto impacta positivamente a variável dependente, tanto localmente quanto nas regiões vizinhas.

Tabela 19. Resumo dos efeitos diretos e indiretos do modelo SAC

Variável	Direto	Indireto	Total
$\log(vpp)$	0,0225***	0,0477***	0,0702***
$\log(vpt)$	-0,0053	-0,0113	-0,0166
$\log(flo)$	-0,0156*	-0,0331	-0,0488
$\log(cred)$	0,0244***	0,0517***	0,0760***
$\log(des)$	0,0100	0,0212	0,0313
$\log(org)$	-0,0210	-0,0446	-0,0656

Nota: os asteriscos indicam o nível de significância, sendo “\*” = 10%, “\*\*” = 5% e “\*\*\*” = 1%.

Fonte: resultados originais da pesquisa.

Em resumo, o modelo SAC evidenciou a existência de transbordamento nos valores das variáveis *vpp* e *cred*. Então, recomenda-se que ações voltadas para essas variáveis no bioma amazônico considerem a interação entre as regiões analisadas, como os municípios, pois essas ações podem impactar não apenas uma localidade específica, mas também seus vizinhos. Isso tornará a medida mais abrangente, afetando sua efetividade. Por exemplo, se houver a intenção de expandir o crédito rural disponível para um município em particular, é provável que essa política também influencie as áreas ao seu redor.

Tabela 20. Resumo das estimativas dos modelos econôméticos por matrizes de peso

Variável	Matriz de Pesos Espaciais									
	Rainha				K-3			K-5		
	Modelos									
Variável	SAR	SAC	SDM	SAR	SAC	SDM	SAR	SAC	SDM	SDM
Intercepto	0,030954	0,0001	0,4680*	0,2148	0,0498	0,1318	0,0612	-0,0722	0,0804	
log(vpp)	0,0265***	0,0189***	0,0285**	0,0300***	0,0230***	0,0311***	0,0287***	0,0210***	0,0354***	
log(vpt)	-0,0081	-0,0045	-0,0015	-0,0115	-0,0071	-0,0061	-0,0078	-0,0018	-0,0071	
log(flo)	-0,0164*	-0,0132*	-0,0243*	-0,0197**	-0,0151**	-0,0267**	-0,0176*	-0,0133**	-0,0167	
log(cred)	0,0287***	0,0205***	0,0248**	0,0300***	0,0253***	0,0212*	0,0306***	0,0235***	0,0213*	
log(des)	0,0106	0,0084	0,0001	0,0167	0,0104	0,0122	0,0108	0,0065	0,0048	
log(org)	-0,0182	-0,0177	-0,0092	-0,0265	-0,0262*	-0,0155	-0,0214	-0,0261*	-0,0079	
lag.log(vpp)	-	-	-0,0072	-	-	-0,0019	-	-	-0,0115	
lag.log(vpt)	-	-	-0,0135	-	-	-0,0060	-	-	0,0024	
lag.log(flo)	-	-	-0,0009	-	-	0,0124	-	-	-0,0016	
lag.log(cred)	-	-	-0,0085	-	-	0,0165	-	-	0,0135	
lag.log(des)	-	-	0,0386**	-	-	0,0010	-	-	0,0138	
lag.log(org)	-	-	-0,0402	-	-	-0,0367	-	-	-0,0572*	
$\rho$	0,5372***	0,7303***	0,5167***	0,4434***	0,6404***	0,4345***	0,5378***	0,73901***	0,5285***	
$\lambda$	-	-0,3809***	-	-	-0,3445***	-	-	-0,4570***	-	
$\sigma^2$	0,1528	0,1364	0,1515	0,1598	0,1422	0,1588	0,1551	0,1384	0,1539	
Log-lik	-287,0000	-284,00	-283,00	-296,00	-293,14	-294,03	-288,21	-284,20	-285,32	
AIC	592,00	587,58	595,94	610,88	606,29	618,06	594,43	588,39	600,65	
LM test	5,4904**	-	4,2788**	5,6932**	-	4,9119**	6,1405**	-	7,7374***	

Nota: os asteriscos indicam o nível de significância, sendo \*\* = 10%, \*\*\* = 5% e \*\*\*\* = 1%.

Fonte: resultados originais da pesquisa.

A escolha do modelo SAC para explicar a diversificação agropecuária e silvicultural foi confirmada, pois tanto a defasagem quanto o erro apresentaram significância estatística. Observou-se que o valor da produção permanente e o crédito rural exercem influência positiva, tanto no município em questão quanto em seus vizinhos, sugerindo que ações de incentivo voltadas a essas variáveis podem gerar impactos benéficos em toda a região. Por outro prisma, a cobertura florestal apresentou uma relação inversa com a diversificação, possivelmente refletindo limitações estruturais associadas a cultivos específicos em áreas florestadas. Além disso, a magnitude relativamente modesta dos coeficientes indica a possibilidade de incluir novas variáveis que, associadas a uma abordagem espacial, ampliem a capacidade explicativa do modelo. Em última análise, a consideração do efeito de transbordamento reforça a necessidade de que as intervenções levem em conta a interdependência entre os municípios.

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou as dinâmicas da diversificação agropecuária-florestal no bioma amazônico em uma perspectiva sustentável, buscando promover o desenvolvimento econômico e compreender os determinantes espaciais, bem como suas implicações econômicas e ambientais. Os resultados confirmam que a diversificação produtiva é uma forma de fomentar a sustentabilidade e o desenvolvimento rural. A contribuição positiva do crédito rural e do valor da produção permanente evidencia que incentivos financeiros e políticas públicas que valorizem práticas agrícolas diversificadas podem impulsionar o desenvolvimento sustentável da região. Em contrapartida, a relação negativa entre a cobertura florestal e o índice de diversificação sugere que áreas com maior preservação florestal enfrentam limitações estruturais para diversificar suas atividades agrícolas.

Em contrapartida, os desafios para implementar uma diversificação produtiva eficaz não devem ser subestimados. A investigação apontou fragilidades metodológicas, como a dificuldade em ajustar o método mais adequado aos dados e a limitação do modelo em capturar integralmente os efeitos de defasagem espacial e erro. Ademais, a baixa magnitude dos coeficientes identificados ressalta a demanda pela incorporação de termos explicativos adicionais que abranjam fatores sociais, culturais e institucionais, que possam oferecer uma explicação mais ampla para as interações da diversificação agropecuária e florestal.

As implicações práticas deste trabalho destacam a relevância de políticas integradas que considerem não apenas o estímulo à diversificação, mas também a preservação ambiental. As intervenções devem adotar uma abordagem territorial, reconhecendo as interdependências entre municípios e incentivando a cooperação regional para maximizar os impactos positivos. Por

exemplo, ampliar o acesso ao crédito rural em determinadas áreas pode beneficiar não apenas os produtores locais, mas também os municípios vizinhos, conforme evidenciado pelos efeitos de transbordamento captados pelo modelo econométrico.

Para futuras investigações, recomenda-se a utilização de um painel espacial que permita examinar um maior espaço temporal, bem como a inclusão de indicadores qualitativos e quantitativos capazes de captar relações não observadas nesta proposta. Adicionalmente, estudos específicos sobre práticas sustentáveis no contexto amazônico, como agroflorestas e cultivo orgânico, podem proporcionar informações adicionais para a formulação de ações públicas mais bem direcionadas para a realidade de cada localidade.

Em última análise, este ensaio contribuiu para a discussão em torno da diversificação produtiva agroflorestal com foco na sustentabilidade e no desenvolvimento da região que engloba o bioma amazônico. Ao evidenciar tanto as potencialidades quanto as fraquezas dessa abordagem, buscou-se apoiar estratégias mais eficazes para equilibrar a conservação ambiental com o progresso socioeconômico na região.

### 3.6 REFERÊNCIAS

**ALMEIDA, E. Econometria espacial aplicada.** Campinas: Editora Alínea, 2012.

ALMEIDA, F. M. D. S.; SPOLADOR, H. F. S. Determinantes da produtividade total dos fatores da lavoura de milho no Brasil: uma análise de fronteira estocástica para o período de 1995 a 2017. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, p. e287305, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/k8VJ4C5pPL6XPvxXyrJmFkQ/>. Acesso em: 01 jan. 2025.

**ANSELIN, L. Spatial econometrics: methods and models.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

ANSELIN, L. Local indicators of spatial association—LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>. Acesso em: 01 jan. 2025.

ANWER, M. E.; SAHOO, B. K.; MOHAPATRA, S. Spatio-temporal variations in agricultural diversification in India: Determinants and convergence. **Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies**, v. 9, n. 5, p. 476-502, 2019. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JADEE-11-2018-0161/full/html?skipTracking=true>. Acesso em: 01 jan. 2025.

AMORIM, H. N. S.; TRAJANO, E. V. Pecuária na Amazônia: melhora na produção leiteira ante o desmatamento e programas de assentamentos na região do Bico do Papagaio/TO. **Revista Extensão**, v. 4, n. 2, p. 147-168, 2020. Disponível em: <https://revista.unitins.br/index.php/extensao/article/view/4243>. Acesso em: 01 jan. 2025.

ASFAW, A.; SIMANE, B.; HASSEN, A.; BANTIDER, A. Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin. **Weather and Climate Extremes**, v. 19, p. 29-41, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212094717300932>. Acesso em: 01 jan. 2025.

BARBIERI, A. F. Mobilidade populacional, meio ambiente e uso da terra em áreas de fronteira: uma abordagem multiescalar. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 24, p. 225-246, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbepop/a/gDGB9WnDg5N99g6FnNNCTb/>. Acesso em: 01 jan. 2025.

BELLON, M. R.; KOTU, B. H.; AZZARRI, C.; CARACCIOLLO, F. To diversify or not to diversify, that is the question. Pursuing agricultural development for smallholder farmers in marginal areas of Ghana. **World Development**, v. 125, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104682>. Acesso em: 01 jan. 2025.

BRITO, J. L. R.; MATAI, P. H. L. DOS S.; SANTOS, M. R. Inovação e a produção do etanol de cana-de-açúcar. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 3, p. e3537, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i3.3537>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CALDEIRA, C.; PARRÉ, J. L. Diversificação agropecuária e desenvolvimento rural no bioma cerrado. **Revista Americana de Empreendedorismo e Inovação**, v. 2, n. 1, p. 344-359, 2020. Disponível em: <https://periodicos.unesp.br/index.php/raei/article/view/3356>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CARVALHO, J. L.; MORAES, A. N.; RIBEIRO, M. C. Aderência à NBC TG 29 no Agronegócio de Dendê em Empresas atuantes na Amazônia paraense. **Amazônia, Organizações e Sustentabilidade**, v. 12, n. 1, p. 126-142, 2023. Disponível em: <https://revistas.unama.br/index.php/aos/article/view/2610>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CASTELO, T. B.; ALMEIDA, O. T. D. Desmatamento e uso da terra no Pará. **Revista de Política Agrícola**, v. 24, n. 1, p. 99-111, 2015. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/viewFile/970/861>. Acesso em: 01 jan. 2025.

COSTA, B. C.; SUZUKI, P. M.; DOS SANTOS BARROS, W.; JÚNIOR, P. S. M. F.; REBELLO, F. K.; DOS SANTOS, M. L. Análise da conjuntura do mercado de madeira de reflorestamento no Estado do Pará. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. e80491110578, 2020.

CRUZ, B. E. V.; CABRAL, R. C. A produção de açaí na microrregião de Cametá (PA): relevância de uma indicação geográfica. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 16, n. 11, p. 27011-27028, 2023.

DAMIANI, O. Diversificação agrícola e redução de pobreza: a introdução no Nordeste brasileiro de produtos agrícolas não-tradicionais de alto valor e seus efeitos sobre pequenos produtores e trabalhadores rurais assalariados. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 34, n. 1, p. 42–84, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.61673/ren.2003.815>. Acesso em: 01 jan. 2025.

DI FALCO, S.; CHAVAS, J. P. Rainfall shocks, resilience, and the effects of crop biodiversity on agroecosystem productivity. **Land Economics**, v. 84, n. 1, p. 83-96, 2008. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/27647807>. Acesso em: 01 jan. 2025.

FELIX, O. O.; JOSEPH, O.; SOLOMON, O.; EMMANUEL, A. K. Effect of Economic and Agricultural Diversification on the Economic Growth in Nigeria. **Agricultural Science Digest - A Research Journal**, v. 40, n. 1, p. 34-38, 2020. Disponível em: <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:asd&volume=40&issue=1&article=005>. Acesso em: 01 jan. 2025.

GOODMAN, D. E.; SORJ, B.; WILKINSON, J. Agroindústria, políticas públicas e estruturas sociais rurais: análises recentes sobre a agricultura brasileira. **Brazilian Journal of Political Economy**, v. 5, n. 4, p. 504-530, 1985. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rep/a/9stBNvjHfNcgW7fN4y7bdRF/>. Acesso em: 01 jan. 2025.

HAN, H.; LIN, H. Patterns of agricultural diversification in China and its policy implications for agricultural modernization. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 9, p. 4978, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/9/4978>. Acesso em: 01 jan. 2025.

KELEJIAN, H. H.; PRUCHA, I. R. A Generalized Spatial Two-Stage Least Squares Procedure for Estimating a Spatial Autoregressive Model with Autoregressive Disturbances. **Journal of Real Estate Finance and Economics**, v. 17, n. 1, p. 99-121, 1998.

MAGURRAN, A. E. **Ecological diversity and its measurement**. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-015-7358-0>. Acesso em: 01 jan. 2025.

MAGGIO, G.; SITKO, N.; IGNACIUK, A. Cropping system diversification in Eastern and Southern Africa: Identifying policy options to enhance productivity and build resilience. **FAO Agricultural Development Economics Working Paper**, n. 18-05, 2018. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/4f4f3267-c351-4f67-bb9a-63b86f00d206/content>. Acesso em: 01 jan. 2025.

MATTEI, T. S.; CATTELAN, R.; ALVES, L. R. Grau de diversificação agropecuária e desenvolvimento rural: uma análise exploratória espacial para a região sul do Brasil. **RDE - Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 1, n. 51, 2023. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/rde/article/view/7467>. Acesso em: 01 jan. 2025.

MAZZOLENI, E. M.; NOGUEIRA, J. M. Agricultura orgânica: características básicas do seu produtor. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 44, p. 263-293, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/y5sVd5dRvgvfRqgMCsfTmcv/>. Acesso em: 01 jan. 2025.

MORAN, P. A. The interpretation of statistical maps. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, v. 10, n. 2, p. 243-251, 1948. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2983777>. Acesso em: 01 jan. 2025.

NAYAK, D. K. Changing cropping pattern, agricultural diversification and productivity in Odisha-A district-wise study. **Agricultural Economics Research Review**, v. 29, n. 1, p. 93-

104, 2016. Disponível em:

<https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:aerr&volume=29&issue=1&article=00>. Acesso em: 01 jan. 2025.

NGUYEN, H. Q. Analyzing the economies of crop diversification in rural Vietnam using an input distance function. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 148-156, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X16302414>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PASCHOALINO, P. A. T.; PARRÉ, J. L. Diversificação e produção agrícola no Brasil. **Perspectivas das Exportações de Etanol no Brasil**, v. 121, 2023. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1833>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PIEDRA-BONILLA, E. B.; BRAGA, C. A. S.; BRAGA, M. J. Diversificação agropecuária no Brasil: conceitos e aplicações em nível municipal. **Brazilian Review of Economics & Agribusiness / Revista de Economia e Agronegócio**, v. 18, n. 2, 2020. Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=16791614&AN=147970672>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PIEDRA-BONILLA, E. B.; DA CUNHA, D. A.; BRAGA, M. J. Climate variability and crop diversification in Brazil: An ordered probit analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120252, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620302997>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PARRÉ, J. L.; CHAGAS, A. L. S.; ARENDS-KUENNING, M. P. The effect of farm size and farmland use on agricultural diversification: a spatial analysis of Brazilian municipalities. **Agricultural and Food Economics**, v. 12, n. 1, p. 27, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40100-024-00323-9>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PARRÉ, J. L.; CHAGAS, A. L. S. Determinants of agricultural diversification in Brazil: a spatial econometric analysis. **Letters in Spatial and Resource Sciences**, v. 15, n. 2, p. 173-195, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12076-021-00295-0>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PERZ, S. G. Are agricultural production and forest conservation compatible? Agricultural diversity, agricultural incomes and primary forest cover among small farm colonists in the Amazon. **World Development**, v. 32, n. 6, p. 957-977, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X04000427>. Acesso em: 01 jan. 2025.

PIRES, M. J. D. S. **Singularidades das estruturas agrícolas da região Centro-Oeste entre 1995 e 2021: um olhar por intermédio dos indicadores regionais de localização e especialização**. Texto para Discussão, n. 2949, 2023. Disponível em: <https://www.econstor.eu/handle/10419/285388>. Acesso em: 01 jan. 2025.

RATHMANN, R.; HOFF, D. N.; SANTOS, O. I. B.; PADULA, A. D. Diversificação produtiva e as possibilidades de desenvolvimento: um estudo da fruticultura na região da Campanha no RS. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 46, p. 325-354, 2008.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/T4WkcPJmsX3WXxRW6mRnMvc/>. Acesso em: 01 jan. 2025.

ROSA NETO, C.; NETO, C. R. **A cadeia agroindustrial da mandioca em Rondônia: situação atual, desafios e perspectivas**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2009. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/45484623.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2025.

ROSSONI, R. A.; MORAES, M. L. Agropecuária e desmatamento na Amazônia Legal Brasileira: uma análise espacial entre 2007 e 2017. **Geografia em Questão**, v. 13, n. 3, 2020. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/geoemquestao/article/view/23536>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SALVIONI, C.; HENKE, R.; VANNI, F. The impact of non-agricultural diversification on financial performance: Evidence from family farms in Italy. **Sustainability**, v. 12, n. 2, p. 486, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/2/486>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SANTOS, G. R. D. O.; SILVA, R. P. D. O. Agricultura e diversidades: trajetórias, desafios regionais e políticas públicas no Brasil. **Revista La Referencia**, 2022. Disponível em: [https://www.lareferencia.info/vufind/Record/BR\\_a4de6dc37f37c4149aeabcc79256eb39](https://www.lareferencia.info/vufind/Record/BR_a4de6dc37f37c4149aeabcc79256eb39). Acesso em: 01 jan. 2025.

SAMBUICHI, R. H. R.; CONSTANTINO DE OLIVEIRA, M. Â.; MOREIRA DA SILVA, A. P.; LUEDEMANN, G. **A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios**. Texto para Discussão, n. 1782, 2012. Disponível em: <https://www.econstor.eu/handle/10419/91310>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SCHNEIDER, S. Reflexões sobre diversidade e diversificação: agricultura, formas familiares e desenvolvimento rural. **RURIS**, v. 4, n. 1, 2010. Disponível em: <https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/ruris/article/view/16832>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **The Bell System Technical Journal**, v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6773024>. Acesso em: 01 jan. 2025.

SIMPSON, E. Measurement of diversity. **Nature**, v. 163, p. 688, 1949. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/163688a0>. Acesso em: 01 jan. 2025.

TAMBURINI, G.; BOMMARCO, R.; WANGER, T. C.; KREMEN, C.; VAN DER HEIJDEN, M. G.; LIEBMAN, M.; HALLIN, S. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. **Science Advances**, v. 6, n. 45, p. eaba1715, 2020. Disponível em: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aba1715>. Acesso em: 01 jan. 2025.

VIEIRA, M. M.; BENDINI, J. D. N. Mapping the educational “meliponaries” in the Northeast region: towards to conservation of native bees. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/11387>. Acesso em: 01 jan. 2025.

VOGT, C. DE M.; ALVIM, A. M. The tobacco small farmers and impact of restrictive credit policies on the planted area in Brazil: assessment of tobacco control policies.

**Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 62, 2023. Disponível em:

<https://doi.org/10.5380/dma.v62i0.85703>. Acesso em: 01 jan. 2025.

WAHA, K.; VAN WIJK, M. T.; FRITZ, S.; SEE, L.; THORNTON, P. K.; WICHERN, J.; HERRERO, M. Agricultural diversification as an important strategy for achieving food security in Africa. **Global Change Biology**, v. 24, n. 8, p. 3390-3400, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.14158>. Acesso em: 01 jan. 2025.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introdução à econometria: uma abordagem moderna**. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

ZHANG, L. X.; SONG, B.; CHEN, B. Emergy-based analysis of four farming systems: insight into agricultural diversification in rural China. **Journal of Cleaner Production**, v. 28, p. 33-44, 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611004860>. Acesso em: 01 jan. 2025.

## APÊNDICE A

Tabela 21. Maiores quantidades de produtos produzidos na agropecuária-floresta

<b>Produto</b>	<b>Quantidade</b>
Soja (em grão)	34.841.350
Milho (em grão)	34.207.204
Cana-de-açúcar	15.189.540
1.3 - Madeira em tora (Metros cúbicos)	8.342.781
1.3.1 - Madeira em tora para papel e celulose (Metros cúbicos)	7.491.099
1.3.1.1 - Madeira em tora de eucalipto para papel e celulose (Metros cúbicos)	7.491.099
Mandioca	6.605.170
Mel de abelha (Quilogramas)	4.062.220
Algodão herbáceo (em caroço)	3.009.046
Dendê (cacho de coco)	2.911.350
Leite (Mil litros)	2.148.258
Açaí	1.693.623
Banana (cacho)	937.923
1.3.2 - Madeira em tora para outras finalidades (Metros cúbicos)	851.682
Arroz (em casca)	754.167
1.2 - Lenha (Metros cúbicos)	740.221
1.2.1 - Lenha de eucalipto (Metros cúbicos)	659.497
1.3.2.1 - Madeira em tora de eucalipto para outras finalidades (Metros cúbicos)	556.716
Abacaxi	496.630
Laranja	327.203
1.3.2.3 - Madeira em tora de outras espécies para outras finalidades (Metros cúbicos)	294.966
Melancia	280.893
Feijão (em grão)	265.216
Ovos de galinha (Mil dúzias)	265.067
Café (em grão) Total	214.086
Café (em grão) Canephora	214.038
1.1 - Carvão vegetal (Toneladas)	199.042
Coco-da-baía*	190.885
1.1.1 - Carvão vegetal de eucalipto (Toneladas)	189.855
Cacau (em amêndoas)	152.282
Sorgo (em grão)	145.762
Limão	111.095
1.2.3 - Lenha de outras espécies (Metros cúbicos)	80.724
Maracujá	45.760
Pimenta-do-reino	42.298
Mamão	41.387
Tomate	18.975
Batata-doce	14.375
Borracha (látex coagulado)	11.212
1.1.3 - Carvão vegetal de outras espécies (Toneladas)	9.187
Goiaba	7.368
Tangerina	5.219
Girassol (em grão)	4.836
Cebola	3.900
Malva (fibra)	2.876
Palmito	2.159

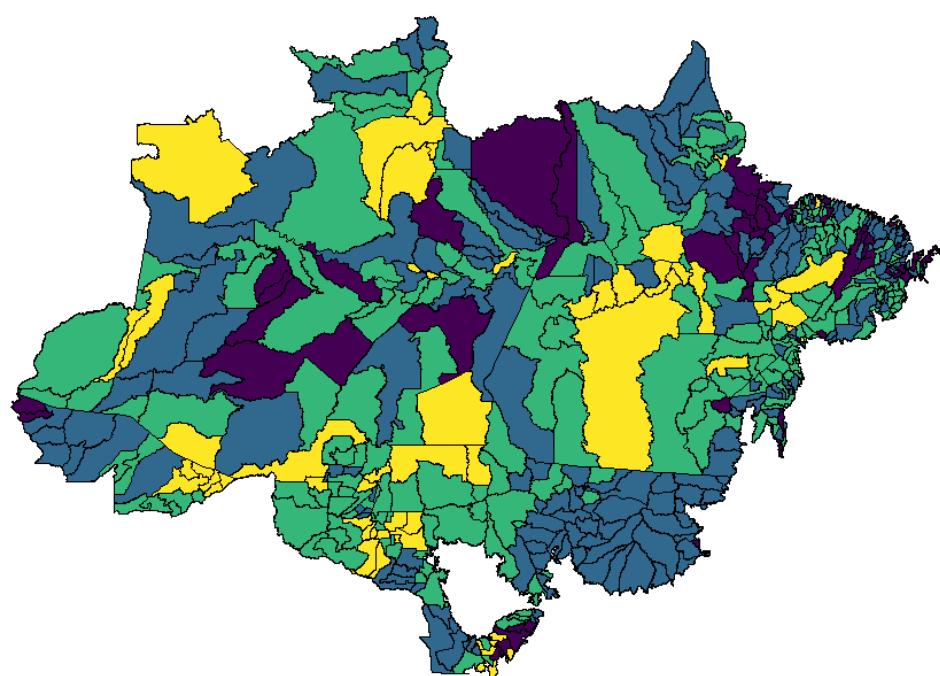
Melão	2.103
Manga	1.916
Urucum (semente)	1.754
Ovos de codorna (Mil dúzias)	1.709
Castanha de caju	1.382
Uva	1.263
Amendoim (em casca)	1.044
Guaraná (semente)	906
Abacate	767
Fumo (em folha)	129
Café (em grão) Arábica	48
Azeitona	46
Fava (em grão)	27
Juta (fibra)	21
Erva-mate (folha verde)	1
1.1.2 - Carvão vegetal de pinus (Toneladas)	-
1.2.2 - Lenha de pinus (Metros cúbicos)	-
1.3.1.2 - Madeira em tora de pinus para papel e celulose (Metros cúbicos)	-
1.3.1.3 - Madeira em tora de outras espécies para papel e celulose (Metros cúbicos)	-
1.3.2.2 - Madeira em tora de pinus para outras finalidades (Metros cúbicos)	-
2 - Outros produtos (Toneladas)	-
2.1 - Acácia-negra (casca) (Toneladas)	-
2.2 - Eucalipto (folha) (Toneladas)	-
2.3 - Resina (Toneladas)	-
Casulos do bicho-da-seda (Quilogramas)	-
Lã (Quilogramas)	-
Alfafa fenada	-
Algodão arbóreo (em caroço)	-
Alho	-
Aveia (em grão)	-
Batata-inglesa	-
Borracha (látex líquido)	-
Caju	-
Cana para forragem	-
Caqui	-
Centeio (em grão)	-
Cevada (em grão)	-
Chá-da-índia (folha verde)	-
Ervilha (em grão)	-
Figo	-
Linho (semente)	-
Maçã	-
Mamona (baga)	-
Marmelo	-
Noz (fruto seco)	-
Pera	-
Pêssego	-
Rami (fibra)	-
Sisal ou agave (fibra)	-

Trigo (em grão)	-
Triticale (em grão)	-
Tungue (fruto seco)	-

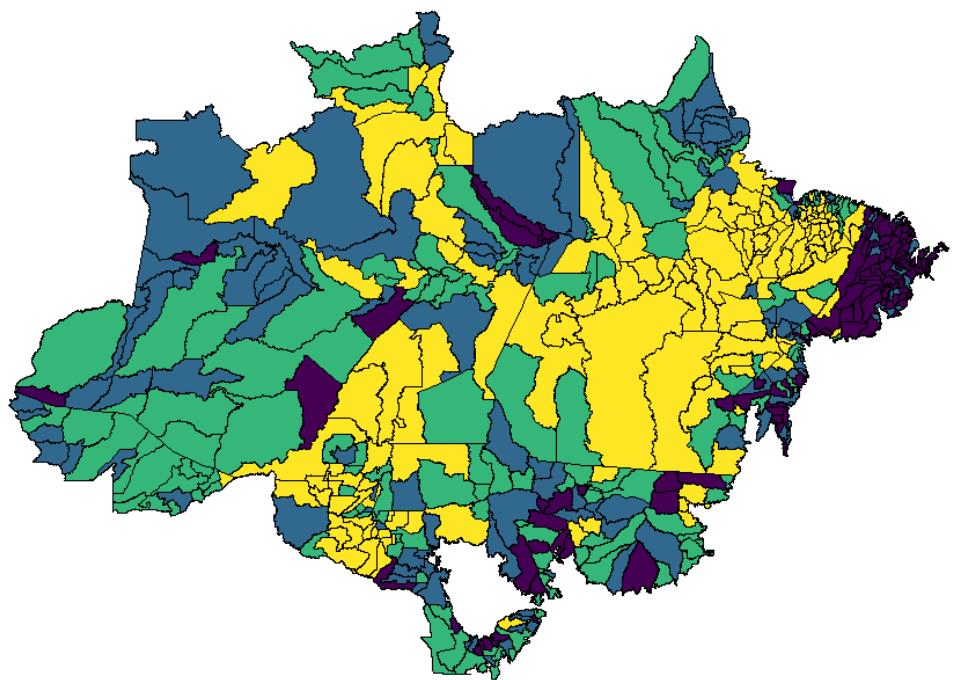
Fonte: original da pesquisa com base nos dados do IBGE.

## APÊNDICE B

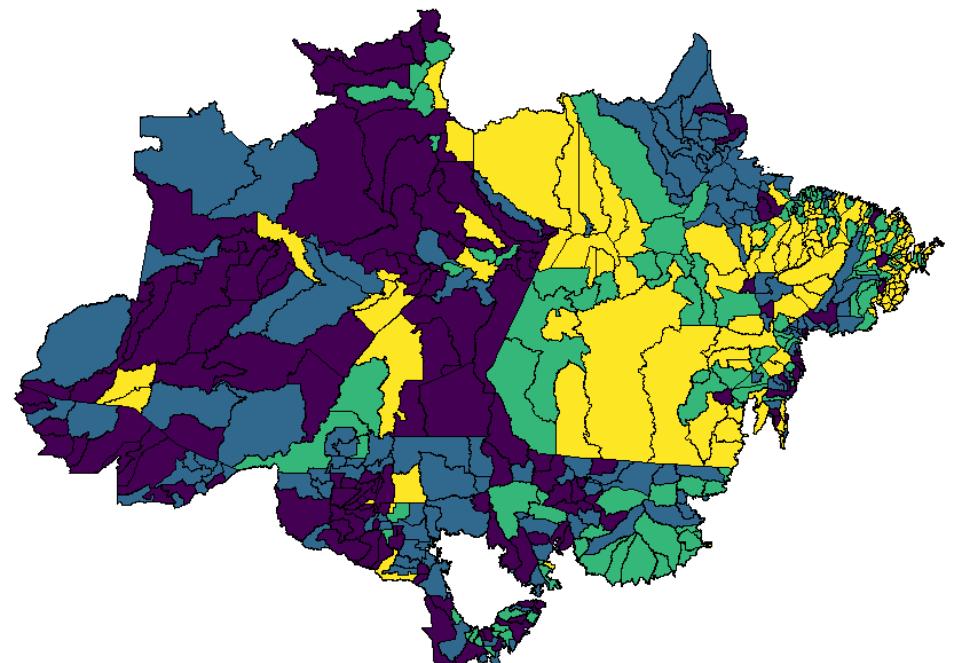
Figura 12. A dispersão dos valores das variáveis no cartograma do bioma amazônico



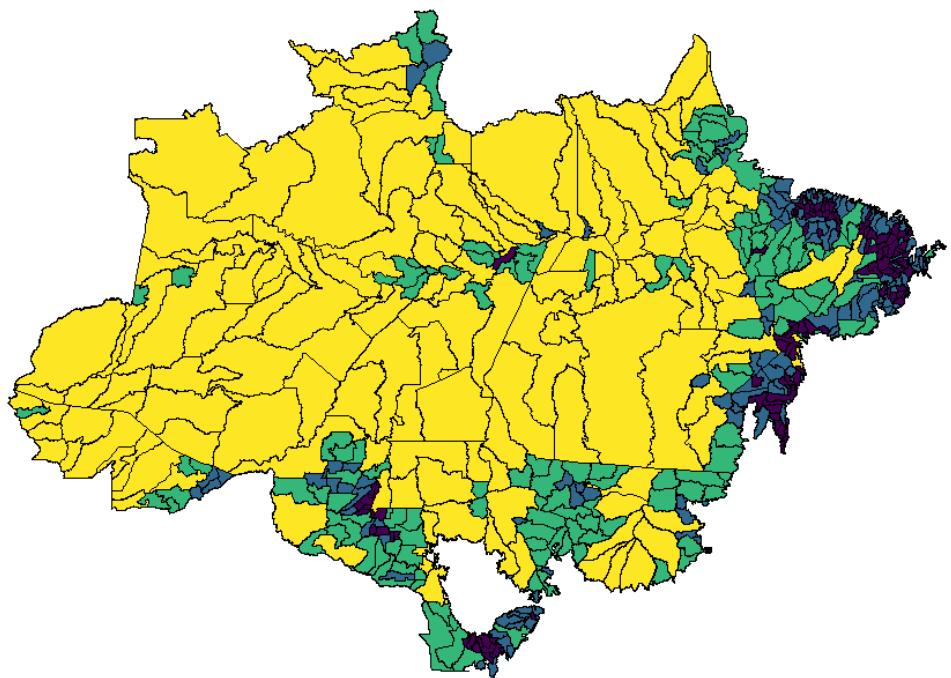
(a)



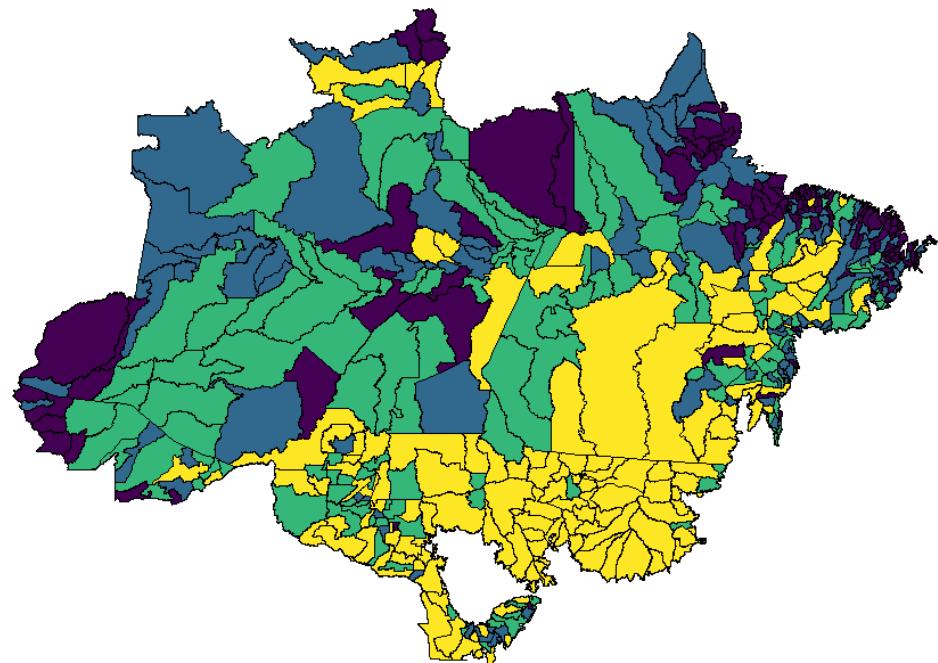
(b)



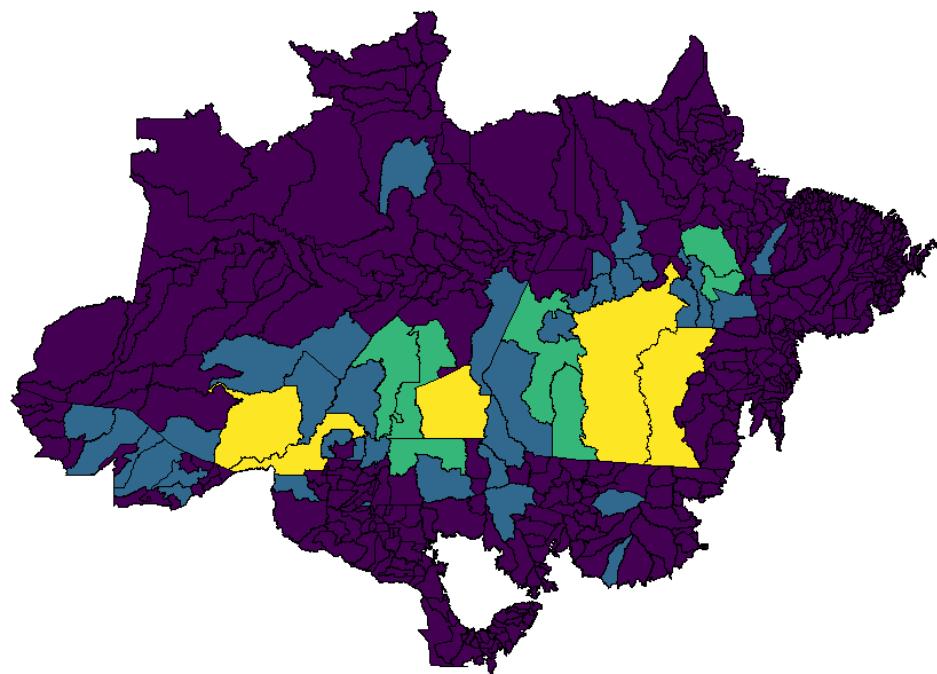
(c)



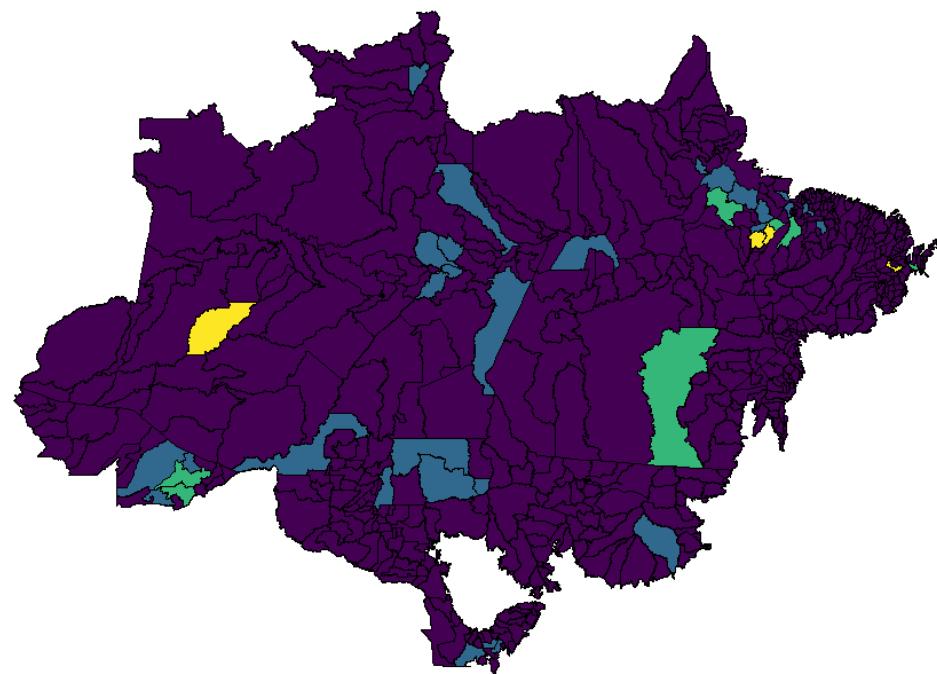
(d)



(e)



(f)



(g)

Nota: (a) representa a variável *Shannon*; (b) representa a variável *vpp*; (c) representa a variável *vpt*; (d) representa a variável *flo*; (e) representa a variável *cred*; (f) representa a variável *des*; (g) representa a variável *org*.  
Fonte: dados originais da pesquisa.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tese contribuiu para a literatura ao identificar fatores que influenciam as taxas de desmatamento, positiva e negativamente, dentro de um contexto espacial, evidenciando a ausência de uniformidade entre municípios e propondo abordagens específicas para cada localidade. Municípios com maior taxa de desmatamento apresentaram comportamentos distintos em relação aos de menor impacto, ressaltando a influência de fatores como crédito rural, produção de soja, criação de gado e área de cobertura florestal.

A análise dos ensaios revelou a magnitude do crédito rural para a sustentabilidade e segurança alimentar no bioma amazônico, mostrando que a demanda por crédito é afetada por atividades agropecuárias como culturas permanentes e temporárias, criação de gado e cultivo orgânico. Embora o impacto positivo de práticas sustentáveis, como a produção orgânica, seja limitado, ele reforça a necessidade de políticas públicas e incentivos financeiros que estimulem o desenvolvimento sustentável. Ademais, a relação negativa entre a cobertura florestal e o índice de diversificação indica que regiões com maior preservação enfrentam desafios estruturais para diversificar suas atividades, evidenciando a relevância de ações adaptadas às especificidades regionais.

A Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), ao restringir o acesso aos financiamentos rurais para conter o desmatamento da Amazônia, mostrou-se efetiva ao reduzir a degradação florestal em municípios onde o maior uso dos recursos agropecuários resultou em menor desmatamento, evidenciando ainda a formação de agrupamentos de localidades com esse mesmo padrão. A análise econometrística, ao incorporar o efeito espacial, revelou interdependências regionais que reforçam a necessidade de políticas de financiamento sustentável com abordagens territorializadas, pois municípios próximos tendem a compartilhar padrões de contratação de crédito rural. No entanto, persistem desafios para ampliar a diversificação produtiva, devido a fragilidades metodológicas e à dificuldade em capturar plenamente fatores sociais, culturais e institucionais, indicando a viabilidade de aperfeiçoar os modelos de análise e aprofundar a compreensão das relações entre diversificação agropecuária e florestal para potencializar a eficácia das políticas de desenvolvimento rural sustentável.

Ao lado da produção de soja, a criação de gado também exige recursos financeiros e foi indiretamente afetada pela Resolução 3.545, de 29 de fevereiro de 2008 (Brasil, 2008), mesmo sendo revogada em 1º de maio de 2021, de modo que, em algumas localidades, o aumento no rebanho está associado à redução do desmatamento – possivelmente pela recuperação de pastagens – enquanto na maioria ainda prevalece a relação positiva entre gado e supressão

florestal. Paralelamente, as atividades de produção temporária apresentam maior probabilidade de contratação de crédito em relação às culturas permanentes, reforçando a necessidade de linhas de financiamento capazes de contemplar tanto práticas de curto prazo quanto iniciativas permanentes e orgânicas, que promovem segurança alimentar e preservação ambiental no longo prazo.

A baixa significância das variáveis sustentáveis em alguns modelos sugere a utilização de políticas governamentais que impulsionem práticas agrícolas mais responsáveis e garantam acesso igualitário ao crédito. As implicações práticas apontam para a adoção de ações territoriais diversificadas, reconhecendo a interdependência entre municípios e incentivando a cooperação regional, de modo que a expansão do crédito rural em áreas específicas possa gerar efeitos positivos em localidades vizinhas, potencializando resultados socioeconômicos e ambientais.

O Extrativismo Sustentável Orgânico, por sua vez, surge como prática produtiva relevante para a conservação do bioma amazônico, ao extrair produtos como açaí, castanha-do-Brasil, cupuaçu e guaraná sem provocar desflorestamento, justificando o uso de recursos financeiros rurais sem ampliar as taxas de desmatamento. Nesse sentido, políticas de crédito rural voltadas a práticas agrícolas sustentáveis ganham destaque, sobretudo ao priorizar a agricultura familiar e a segurança alimentar, promovendo o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental. Recomenda-se, para futuras pesquisas, analisar outros biomas em diferentes momentos temporais, utilizar painéis espaciais de longo prazo e incluir indicadores qualitativos e quantitativos que capturem fatores sociais, culturais e institucionais ainda não observados, ampliando a compreensão das dinâmicas produtivas e de conservação.

Adicionalmente, constatou-se que variáveis como o nível de crédito rural e a quantidade de gado podem exercer influência negativa sobre as taxas de desmatamento, sugerindo que, ao direcionar recursos para práticas sustentáveis, é possível preservar a floresta e fomentar benefícios socioeconômicos. Práticas como a agricultura orgânica e a diversificação produtiva agroflorestal se revelam estratégias eficazes para conciliar conservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico, sobretudo com o apoio de políticas públicas que incentivem a cooperação regional e reforcem a conectividade entre os municípios. Em última análise, este ensaio contribuiu para o debate sobre o equilíbrio entre preservação e progresso, apontando caminhos para ações mais efetivas no bioma amazônico.