

Sistemas Agroflorestais como estratégia de resiliência climática na Agricultura familiar em Minas Gerais, Brasil.

Agroforestry systems as a climate resilience strategy in family farming in Minas Gerais, Brazil¹.

Elizângela Aparecida dos Santos

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, UFVJM, Campus Unaí. Unaí,
MG, Brasil.

GT 04 - Meio ambiente, agroecologia, sustentabilidade e mudanças climáticas:

Resumo

A crise climática impõe desafios significativos à agricultura, especialmente nos países em desenvolvimento, onde a segurança alimentar e a economia rural dependem fortemente da agricultura familiar. Em Minas Gerais (MG), um dos estados com maior extensão de agricultura familiar e florestas plantadas no Brasil, os impactos das mudanças climáticas são cada vez mais evidentes. Neste contexto, os sistemas agroflorestais (SAFs) surgem como uma alternativa sustentável, promovendo maior resiliência climática. Este estudo analisou a relação entre a vulnerabilidade climática e a adoção de SAFs em MG, considerando os componentes da vulnerabilidade definidos pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Utilizando um amplo conjunto de dados socioeconômicos, demográficos, ambientais e climáticos, o estudo investigou como a vulnerabilidade e variáveis climáticas históricas influenciam a adoção de SAFs por agricultores familiares. A análise foi realizada por meio de um modelo Logit, e os principais resultados indicam uma correlação estatisticamente significativa entre a vulnerabilidade climática e a adoção de SAFs, sugerindo que esses sistemas são, de fato, uma estratégia eficaz de adaptação às mudanças climáticas. Em particular, um aumento na vulnerabilidade dos municípios elevou a probabilidade de adoção de SAFs em 1,5%. Essa relação pode ser explicada pela maior necessidade de adaptação das áreas mais vulneráveis, que enfrentam riscos climáticos mais intensos. Ao confrontar mitos sobre as práticas agroecológicas e a adaptação às mudanças climáticas, este estudo reforça a importância do conhecimento científico na formulação de políticas voltadas à resiliência agrícola. Nosso trabalho contribui para o debate sobre sustentabilidade agrícola, demonstrando que os SAFs não apenas mitigam os riscos climáticos, mas também fortalecem a cadeia de suprimentos, garantindo segurança em um cenário de crescente instabilidade climática.

Palavras-chave: Agricultura familiar; Mudanças climáticas; Vulnerabilidade; SAF

Abstract

The climate crisis poses significant challenges to agriculture, particularly in developing countries where food security and rural economies are heavily dependent on family farming. In Minas Gerais (MG), one of the Brazilian states with the largest areas of family farming and planted forests, the impacts of climate change are becoming increasingly evident. Within this context, agroforestry systems (AFS) emerge as a sustainable alternative, enhancing climate resilience. This study analysed the relationship between climate vulnerability and the adoption of AFS in MG, based on the vulnerability components defined by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Drawing on a comprehensive dataset encompassing socioeconomic, demographic, environmental, and climatic variables, the study investigated how vulnerability and historical climate patterns influence the adoption of AFS by family farmers. A Logit model was employed, and the main results indicate a statistically significant correlation between climate vulnerability and the adoption of AFS, suggesting that these systems are, indeed, an effective climate adaptation strategy. Specifically, an increase in municipal vulnerability was associated with a 1.5% rise in the likelihood of adopting AFS. This relationship may be explained by the greater need for adaptation in more vulnerable areas, which are subject to more severe climate-related risks. By challenging myths surrounding agroecological practices and climate adaptation, this study underscores the importance of scientific evidence in shaping policies aimed at agricultural resilience. Our findings contribute to the ongoing debate on agricultural sustainability, demonstrating that AFS not only mitigate climate risks but also strengthen supply chains, thus ensuring security in the face of increasing climatic instability.

Keywords: Family farming; Climate change; Vulnerability; Agroforestry systems (AFS)

¹ Este trabalho foi realizado com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG)

1. Introdução

As transformações recentes no sistema climático global impõem desafios significativos à governança, à formulação de políticas públicas e à sociedade como um todo neste século. De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC-AR6, 2021), há evidências inequívocas de que as atividades humanas são a principal causa do aquecimento observado na atmosfera, o qual se apresenta como o mais intenso em séculos, ou até milênios. O relatório destaca que cada uma das últimas quatro décadas, desde 1980, foi progressivamente mais quente do que qualquer outra desde o início dos registros em 1850. Além disso, eventos extremos como secas, ondas de calor, tempestades e ciclones tropicais têm ocorrido com maior frequência e intensidade, afetando significativamente as regiões terrestres desde meados do século XX (IPCC, 2021).

A agricultura está entre os setores mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas. Evidências recentes apontam que fatores como escassez hídrica, instabilidade no regime de chuvas, aumento das temperaturas médias, eventos extremos de calor e o crescimento nas concentrações de CO₂ na atmosfera já vêm impactando negativamente a produção agrícola, ocasionando perdas de safra e queda na produtividade, tendências que devem se agravar conforme os cenários futuros de aquecimento global se concretizem (Jägermeyr et al., 2021). Esses impactos repercutem diretamente em outros desafios globais, como a erradicação da pobreza, a redução das desigualdades, a garantia da segurança alimentar e o combate à fome, evidenciando a interconexão entre essas questões (Charles et al., 2019; Schnitter & Berry, 2019). A redução na produção agrícola compromete a economia de regiões dependentes do setor primário, aumentando o desemprego; além disso, a menor oferta de alimentos tende a pressionar os preços, o que afeta o consumo das famílias, a qualidade nutricional das dietas e, consequentemente, a saúde da população. Conforme alertam Mbow et al. (2019), os efeitos das mudanças climáticas podem colocar até 183 milhões de pessoas adicionais em risco de insegurança alimentar ao longo do século XXI, dependendo do cenário socioeconômico considerado.

A crise climática tem ampliado significativamente os desafios enfrentados pela agricultura familiar, especialmente em países tropicais em desenvolvimento, como o Brasil (Dos Santos et al., 2024). Responsável por mais de 70% dos alimentos consumidos nacionalmente (IBGE, 2019), esse segmento cumpre papel estratégico na promoção da segurança alimentar, na conservação ambiental e no desenvolvimento territorial sustentável. No entanto, os eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, chuvas irregulares e

ondas de calor, têm comprometido a produtividade, a renda e a permanência dos agricultores no campo (Marengo et al., 2022). Cerca de 76% dos estabelecimentos agropecuários do Brasil são familiares, muitos dos quais localizados em áreas ambientalmente frágeis e socialmente vulneráveis (Angelotti & Giongo, 2019). Nessas regiões, a perda de produtividade agrícola agrava a pobreza rural, intensifica disputas por recursos naturais e acelera fluxos migratórios para centros urbanos superlotados (Marengo et al., 2022). Apesar disso, as análises dos impactos climáticos sobre o setor agrícola frequentemente negligenciam os agricultores familiares (Mbow et al., 2019), concentrando-se nas grandes commodities, como soja, milho e trigo (IPCC, 2022).

Estudos recentes no Brasil demonstram que culturas básicas da agricultura familiar como arroz, feijão e mandioca, já apresentam perdas significativas de produtividade decorrentes do estresse climático (Martins et al., 2019; Tanure et al., 2023). Pequenos sistemas de pecuária também sofrem com a escassez hídrica e o aumento das temperaturas (Lindoso et al., 2018). Contudo, tais análises geralmente não consideram as estratégias adaptativas adotadas pelos agricultores diante da variabilidade climática. Como destacam Petersen-Rockney (2022) e Da Cunha (2022), as decisões produtivas e de uso da terra são constantemente ajustadas em resposta às transformações ambientais, sociais e econômicas. Isso inclui o uso de práticas tradicionais combinadas a novos conhecimentos, fortalecendo a capacidade de adaptação local (Papa et al., 2020).

Nesse contexto, os Sistemas Agroflorestais (SAFs) despontam como uma das principais estratégias de adaptação às mudanças climáticas no meio rural, sobretudo para agricultores familiares. Considerados “ferramentas-chave” da agricultura inteligente para o clima (Miccolis et al., 2019; Dissanayaka et al., 2023), os SAFs promovem a resiliência agrícola, aumentam a oferta de serviços ecossistêmicos e contribuem para a mitigação de gases de efeito estufa. Além disso, possibilitam inclusão socioeconômica ao valorizarem produtos florestais e práticas sustentáveis (Cuadra et al., 2018). Segundo o IPCC (2022), os SAFs apresentam “alta confiança” como uma opção eficaz de adaptação climática, com potencial para aumentar a disponibilidade e estabilidade alimentar e reduzir riscos sistêmicos nos territórios rurais.

A literatura evidencia que a adoção de SAFs está relacionada a fatores como o nível de vulnerabilidade climática, o acesso à informação e o apoio institucional (Quandt et al., 2023). Em regiões altamente impactadas pelas mudanças do clima, como a África Subsaariana e a América Latina, agricultores tendem a incorporar práticas adaptativas com maior frequência (Dos Santos et al., 2021). No entanto, estudos aplicados à realidade brasileira ainda são

escassos. A revisão de Quandt et al. (2023) identificou apenas uma publicação específica sobre o tema no país (Gomes et al., 2020), o que reforça a necessidade de aprofundar esse debate no contexto da agricultura familiar regional.

A região de Minas Gerais no Brasil, por sua vez, reúne condições estratégicas para esse tipo de investigação. O estado concentra a maior área de estabelecimentos agropecuários familiares do Brasil e abriga territórios com grande diversidade climática e ecológica, além de liderar a extensão de florestas plantadas no país (IBGE, 2019). Ao mesmo tempo, regiões como o Norte e o Semiárido mineiro têm enfrentado intensificação dos impactos climáticos. Tais condições tornam o estado um espaço emblemático para analisar como agricultores familiares estão lidando com as adversidades ambientais e se os SAFs têm sido incorporados como resposta adaptativa.

Diante desse cenário, o objetivo central desta pesquisa é investigar se a adoção de Sistemas Agroflorestais (SAFs) pode ser compreendida como uma estratégia de resiliência climática por parte dos agricultores familiares em Minas Gerais, Brasil. A hipótese que norteia o estudo é que municípios com maiores níveis de vulnerabilidade climática tendem a apresentar maior incidência de adoção dos SAFs. Para isso, será analisada a relação entre a vulnerabilidade socioambiental dos territórios e a implementação dos sistemas agroflorestais, considerando indicadores climáticos, socioeconômicos e institucionais.

Além de contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre adaptação climática na agricultura, este trabalho busca oferecer subsídios para políticas públicas voltadas à promoção da resiliência rural e ao fortalecimento da agricultura familiar. Ao integrar as dimensões de vulnerabilidade, adaptação e sustentabilidade, a pesquisa também se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 1, 2, 13 e 15), promovendo justiça climática e estratégias de desenvolvimento territorial mais equitativas e inclusivas.

2. Metodologia

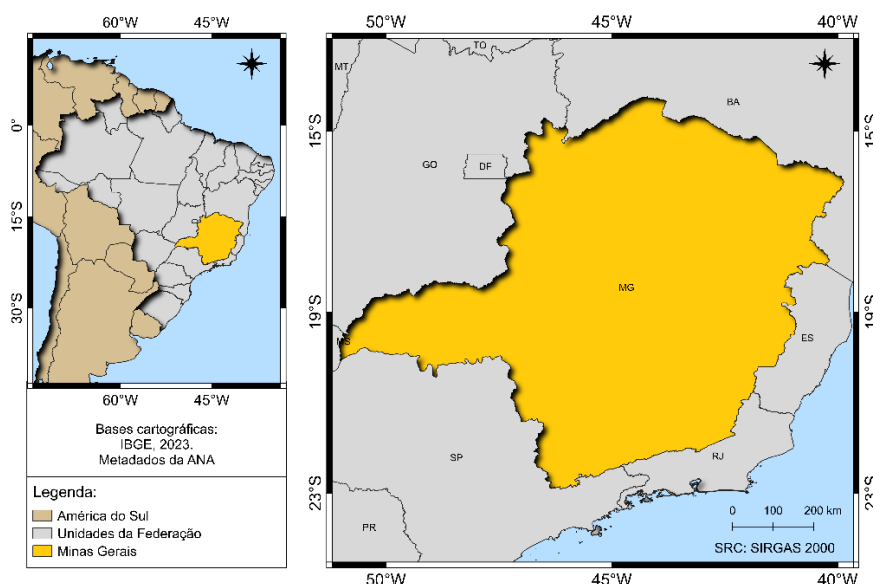
Para alcançar os objetivos propostos neste estudo, esta seção apresenta, de forma estruturada, as etapas metodológicas adotadas. Primeiramente, na Seção 2.1, é caracterizada a área de estudo, com destaque para os aspectos físicos, climáticos, demográficos e agropecuários do estado de Minas Gerais, Brasil. Em seguida, na Seção 2.2, detalha-se o procedimento metodológico para a construção do índice de vulnerabilidade climática dos municípios, com base em indicadores representativos de suscetibilidade, capacidade de enfrentamento e capacidade adaptativa. Por fim, na Seção 2.3, descreve-se a aplicação do modelo de regressão

logística (*Logit*), utilizado para analisar a relação entre os níveis de vulnerabilidade identificados e a probabilidade de adoção de Sistemas Agroflorestais (SAFs) pelos estabelecimentos agropecuários familiares, incorporando variáveis de controle de natureza climática. Essa abordagem integrada permite compreender de forma mais abrangente os fatores que influenciam a adoção de práticas sustentáveis de uso da terra em contextos de maior exposição a riscos climáticos.

2.1 Área de estudo

A área de estudo abrange o estado de Minas Gerais, localizado na região Sudeste do Brasil, conforme indicado na Figura 1.

Figura 1 – Localização do estado de Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Elaboração própria

Minas Gerais está inserido em uma posição estratégica do território nacional, fazendo fronteira com os estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia, Goiás e Mato Grosso do Sul. Com uma extensão territorial de 586.522 km², o estado é o quarto maior do país em área e o segundo mais populoso, com uma população estimada em 20,5 milhões de habitantes em 2022 (IBGE, 2022). Além disso, Minas Gerais possui grande relevância no cenário agropecuário nacional. De acordo com os dados do Censo Agropecuário de 2017, o estado abriga cerca de 600 mil estabelecimentos agropecuários, caracterizados majoritariamente por pequenas propriedades exploradas por agricultores familiares (IBGE, 2019). A diversidade climática e ambiental do território mineiro influencia diretamente a dinâmica produtiva. O clima predominante é o tropical, com variações sazonais marcantes, sendo registradas temperaturas médias anuais entre 18°C e 24°C, além de regimes

pluviométricos que variam de 900 milímetros (mm) a 2.100 mm anuais, com maior concentração de chuvas no verão (INMET, 2023).

Além disso, o estado apresenta expressiva diversidade de biomas, com predomínio do Cerrado e da Mata Atlântica, os quais coexistem com áreas de transição. Essa variedade ecológica impacta tanto a disponibilidade de recursos naturais quanto a vulnerabilidade dos sistemas agrícolas locais às mudanças climáticas. Em termos demográficos, Minas Gerais é caracterizado por uma distribuição populacional heterogênea, com densidade populacional mais elevada nas regiões Central e Sul, em contraposição a áreas mais despovoadas no Norte e Nordeste do estado, regiões que historicamente enfrentam maiores desafios socioeconômicos e climáticos (IBGE, 2022). Tais características tornam o estado um espaço de grande relevância para estudos que buscam compreender a vulnerabilidade climática no meio rural e as estratégias de adaptação adotadas por produtores. Ao mesmo tempo, refletem a necessidade de políticas públicas mais eficazes e territorialmente sensíveis para o fortalecimento da resiliência climática, especialmente entre os agricultores familiares.

2.2 Análise da Vulnerabilidade às mudanças climáticas

A avaliação da vulnerabilidade climática adotada neste estudo baseia-se no conceito estabelecido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*), que define vulnerabilidade como o grau em que um sistema é suscetível e incapaz de lidar com os efeitos adversos das mudanças climáticas, incluindo a variabilidade e os extremos climáticos (IPCC, 2014). Esse conceito envolve atualmente três componentes principais (Birkmann et al., 2022; Dos Santos et al., 2023): suscetibilidade, capacidade de enfrentamento e capacidade adaptativa, cuja interação determina a vulnerabilidade de um sistema. Essa abordagem é comumente empregada em estudos econômicos e ambientais devido a sua capacidade de elucidar situações complexas (Wu et al., 2025).

A Suscetibilidade refere-se às características socioeconômicas e ambientais que tornam o sistema mais propenso a sofrer impactos negativos. Inclui indicadores como percentual da ausência de saneamento básico, desigualdade de renda etc. A Capacidade de Enfrentamento envolve os recursos institucionais e sociais disponíveis para reagir a eventos climáticos extremos, como a presença de associação, acesso ao crédito rural e assistência técnica etc. Já a Capacidade Adaptativa está relacionada à habilidade dos produtores em modificar práticas agrícolas e adotar tecnologias que reduzam a exposição e os impactos. Inclui indicadores como

escolaridade, gestão política, recursos naturais, entre outros (Welle & Birkmann, 2015; Dos Santos et al., 2023; Wu et al., 2025).

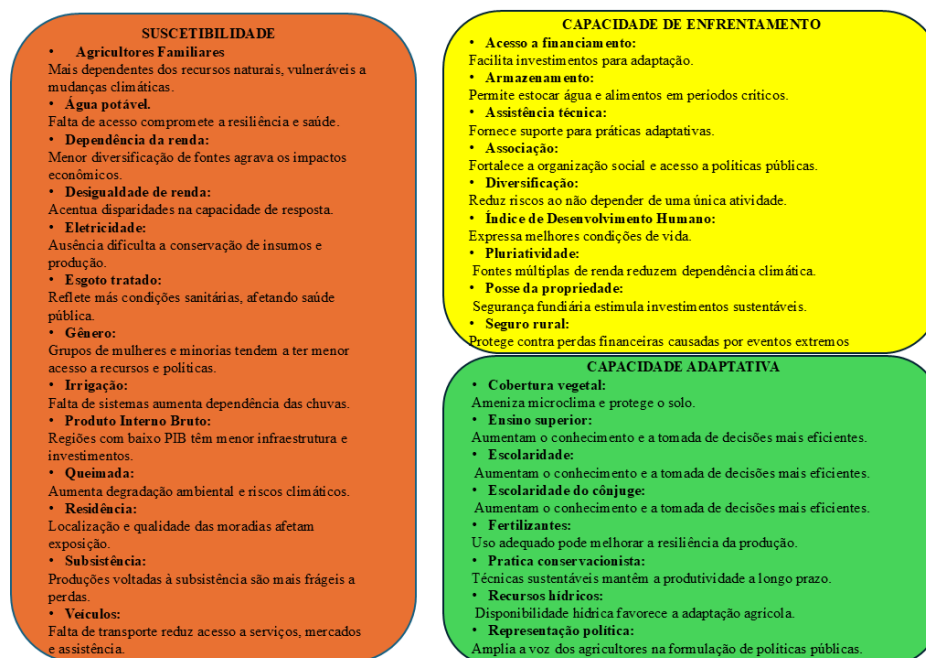
Assim, o índice de vulnerabilidade (*IV*) foi estimado conforme as abordagens adaptadas de Wu et al. (2025), Dos Santos et al. (2023) e de Welle e Birkmann (2015):

$$IV = \frac{1}{3} * \{S + (1 - CE) + (1 - CA)\} \quad (1)$$

em que S se refere a Suscetibilidade, CE a capacidade de enfrentamento e CA a capacidade de adaptativa.

Os indicadores que compõem o índice de vulnerabilidade foram selecionados com base em variáveis ambientais, socioeconômicas e demográficas, conforme a metodologia previamente adotada por Dos Santos et al. (2023). Todas as variáveis foram normalizadas em uma escala de 0 a 1, a fim de garantir a comparabilidade entre os diferentes domínios. A Figura 2 apresenta os indicadores utilizados, com base e adaptações do estudo original. A atribuição de pesos aos indicadores seguiu as recomendações propostas por Welle e Birkmann (2015) e Dos Santos et al. (2023). As informações foram extraídas de distintas bases de dados, incluindo: (i) Censo Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2022); (ii) Terrestrial Hydrology Research Group da Universidade de Princeton; (iii) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE; (iv) Atlas Brasil; e (v) Censo Agropecuário do IBGE (2019).

Figura 2 – Variáveis utilizadas para a composição do índice de vulnerabilidade.



Fonte: Adaptado de Dos Santos et al. (2023) e Wu et al. (2025).

2.3 Regressão econométrica

Para investigar a associação entre a vulnerabilidade climática e a adoção de Sistemas Agroflorestais (SAF) pelos estabelecimentos familiares, utilizou-se o modelo *Logit*, apropriado para variáveis dependentes binárias (Greene, 2018; Wooldridge, 2021). A variável dependente assume o valor 1 quando o estabelecimento adota SAF e 0 caso contrário.

O modelo *Logit* estima a probabilidade condicional de ocorrência do evento (adoção de SAF) com base na seguinte função de distribuição logística:

$$P(Y_i = 1|X_i) = \frac{e^{X_i\beta}}{1+e^{X_i\beta}} \quad (2)$$

em que, Y_i é a variável binária indicando adoção de SAF; X_i representa o vetor de variáveis explicativas (incluindo o índice de vulnerabilidade climática (IV) e os controles climáticos) e β são os parâmetros a serem estimados.

Os coeficientes foram apresentados em *odds ratios*, que indicam a razão entre a chance de adoção quando a variável explicativa aumenta em uma unidade e a chance quando ela permanece constante (Long & Freese, 2014). Um *odds ratio* maior que 1 sugere aumento na chance de adoção; menor que 1 indica redução. As regressões foram estimadas com erros-padrão robustos e agrupados por município (*clustering*), considerando a possibilidade de correlações intra-municipais nos resíduos, conforme recomendado por Cameron & Miller (2015). Além do índice de vulnerabilidade, foram incluídas como variáveis de controle a temperatura média anual histórica (1949-2016) e a precipitação média anual no mesmo período, captando características climáticas de longo prazo relevantes para a decisão dos produtores (Dos Santos et al., 2021).

3. Resultados

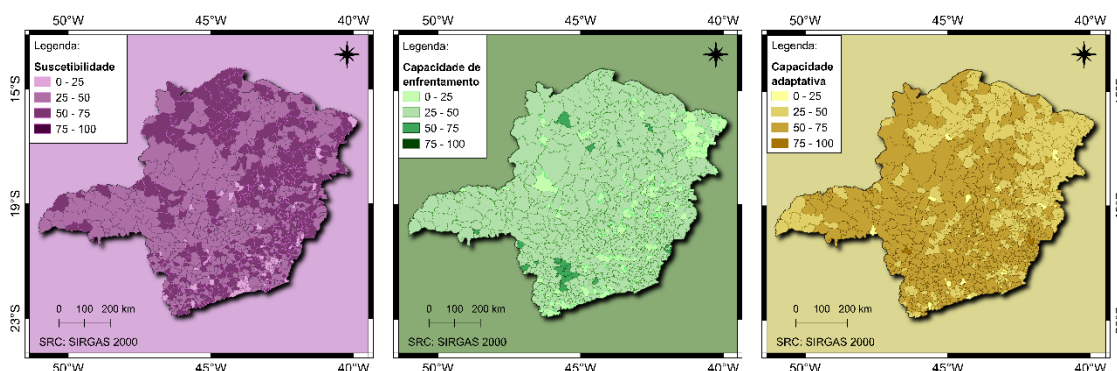
Esta seção apresenta os principais resultados empíricos da pesquisa, organizados em três etapas. Inicialmente, são apresentados os resultados do índice de vulnerabilidade e seus indicadores dos municípios do estado de Minas Gerais. Em seguida, é realizada uma análise descritiva das variáveis principais envolvidas no estudo, buscando caracterizar a amostra e evidenciar as diferenças entre municípios. Por fim, são apresentados os resultados do modelo econométrico estimado por regressão logística, que permitem identificar os fatores associados à adoção de Sistemas Agroflorestais (SAF) pelos estabelecimentos agropecuários familiares.

3.1 Análise da Vulnerabilidade

A Figura 3 apresenta a distribuição espacial dos valores dos indicadores que compõem o índice de vulnerabilidade climática nos municípios de Minas Gerais. Observa-se variação

significativa entre os municípios em cada uma das três dimensões analisadas: suscetibilidade, capacidade de enfrentamento e capacidade adaptativa. Essa heterogeneidade reflete as diferentes condições ambientais, socioeconômicas e institucionais presentes no estado, evidenciando áreas com maior exposição a riscos climáticos e menores condições de resposta e adaptação.

Figura 3 – Indicadores de vulnerabilidade no estado de Minas Gerais, Brasil.

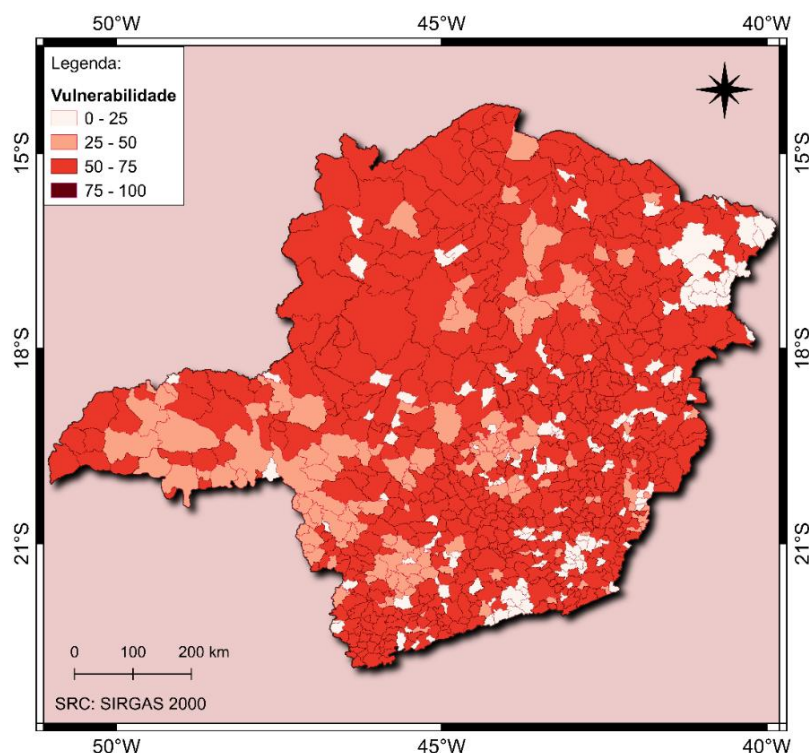


Fonte: Elaboração própria

A média do indicador de suscetibilidade foi de 45,33, indicando que, em geral, os municípios mineiros apresentam moderada exposição a fatores de risco climático, com variações que vão de 0 a 60,71. Já a capacidade de enfrentamento apresentou média de 32,05, sugerindo uma limitação significativa nas condições institucionais e operacionais para lidar com eventos adversos, sendo o indicador com menor média entre os três. Por outro lado, a capacidade adaptativa apresentou a maior média (50,95), indicando que, apesar das limitações no enfrentamento imediato, os municípios possuem, em média, melhores condições estruturais e sociais para adaptação a longo prazo. Esses resultados reforçam a necessidade de políticas públicas específicas para fortalecer a capacidade de resposta e reduzir a vulnerabilidade nas regiões mais expostas.

Em se tratando da vulnerabilidade, a Figura 4 apresenta a distribuição espacial do índice de vulnerabilidade climática nos municípios de Minas Gerais, construído a partir da combinação dos três indicadores anteriores. A representação cartográfica evidencia padrões regionais distintos de vulnerabilidade, com municípios em diferentes níveis de exposição e capacidade de resposta às mudanças climáticas. A espacialização permite identificar áreas prioritárias para intervenção, especialmente aquelas com elevada vulnerabilidade e baixa capacidade institucional.

Figura 4 – Índice de vulnerabilidade dos municípios de Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Elaboração própria

A média do índice de vulnerabilidade climática foi de 44,51, com desvio padrão de aproximadamente 20,28, indicando uma variação considerável entre os municípios do estado. Os valores oscilaram entre 0 e 63,68, refletindo desde contextos de mínima até máxima vulnerabilidade dentro da escala adotada. Esse resultado reforça a heterogeneidade do território mineiro quanto à exposição e capacidade de adaptação frente aos impactos das mudanças climáticas. Municípios com maior vulnerabilidade tendem a coincidir com aqueles que apresentam menor capacidade de enfrentamento, evidenciando a importância de políticas públicas integradas e territorializadas para reduzir desigualdades e fortalecer a resiliência local.

3.2 Estatística descritiva das principais variáveis utilizadas na estimação *Logit*.

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das principais variáveis utilizadas na análise. São exibidos as médias, desvios-padrão, valores mínimos e máximos para cada variável considerada na amostra, composta por 852 municípios do estado de Minas Gerais, Brasil. As variáveis incluem a variável dependente binária *adoção*, que assume valor 1 para municípios que possuem pelo menos 1% dos estabelecimentos agropecuários familiares adotando Sistemas Agroflorestais (SAF), e 0 caso contrário, bem como as variáveis independentes utilizadas na análise econométrica.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na análise

Variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Adoção	0,565	0,496	0	1
Vulnerabilidade	44,51	20,28	0	63,68
Precipitação	110,42	19,94	0	144,93
Temperatura	22,28	1,88	0	25,77

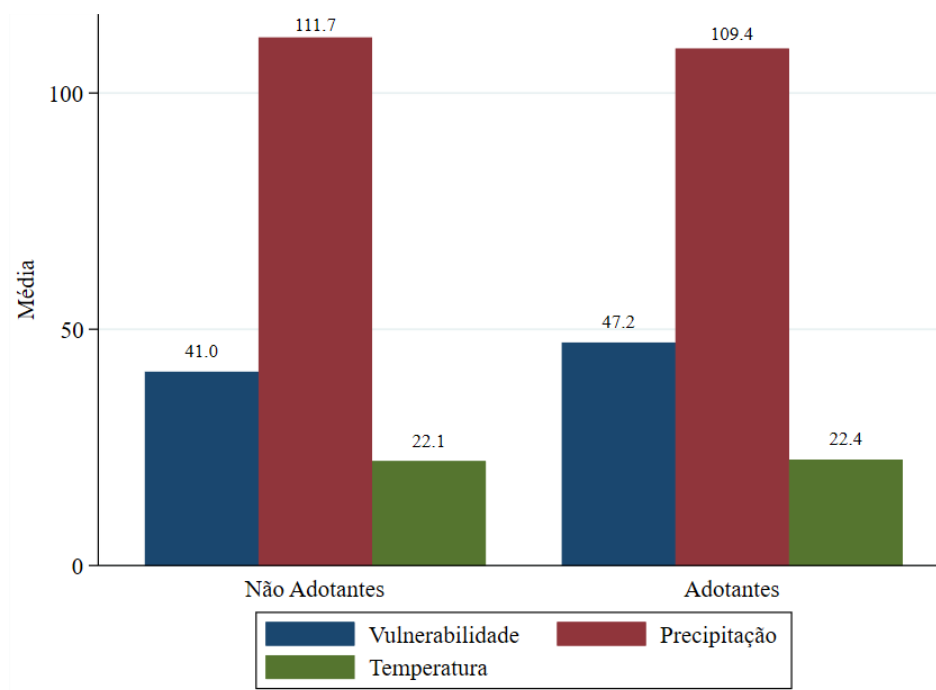
Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 1 sintetiza as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na análise. A variável dependente binária, que identifica municípios com pelo menos 1% dos estabelecimentos agropecuários familiares adotando Sistemas Agroflorestais (SAF), apresenta uma média de 0,565, indicando que aproximadamente 56,5% dos municípios da amostra atendem a esse critério. Observa-se, portanto, uma adoção significativa de SAF entre os municípios analisados. A variável explicativa principal, *vulnerabilidade*, apresenta uma média de 44,51 e desvio padrão de 20,28, refletindo considerável variabilidade entre os municípios, o que evidencia diferentes níveis do fator representado por essa variável na amostra.

Quanto às variáveis climáticas, a precipitação média histórica no período de 1949 a 2016 apresenta uma média de 110,42 mm, com ampla variação entre municípios, indo de 0 a 144,93 mm. A temperatura média no mesmo período registra uma média de 22,28 °C, indicando condições térmicas variadas em Minas Gerais, com municípios situados em diferentes faixas climáticas. Esses dados fornecem uma visão inicial da heterogeneidade espacial e climática da amostra.

A Figura 5 apresenta a comparação das médias das principais variáveis climáticas e do índice de vulnerabilidade entre municípios adotantes e não adotantes dos Sistemas Agroflorestais (SAF). O gráfico destaca as diferenças nos valores médios de vulnerabilidade climática, temperatura média histórica e precipitação média histórica para os dois grupos.

Figura 5 – Características médias adotantes *versus* não adotantes de SAF.



Fonte: Elaboração própria

Conforme observado na Figura 5, os municípios adotantes dos SAF apresentam média mais elevada no índice de vulnerabilidade climática (47,19) em comparação aos não adotantes (41,01), sugerindo que localidades com maior vulnerabilidade tendem a buscar estratégias adaptativas como a adoção de SAF. Em relação à temperatura média histórica, o grupo de não adotantes apresenta valor ligeiramente superior (111,74) em relação aos adotantes (109,39). Já a precipitação média histórica é um pouco maior nos municípios adotantes (22,41) do que nos não adotantes (22,10). Essas diferenças reforçam a importância dos fatores climáticos e de vulnerabilidade na decisão pela adoção de práticas agroflorestais, o que será aprofundado na análise econométrica subsequente.

3.3 Resultado da Regressão Logística

A Tabela 2 apresenta os resultados das regressões logísticas estimadas para explicar a adoção dos Sistemas Agroflorestais (SAF) pelos estabelecimentos agropecuários familiares. O modelo (1) considera apenas o índice de vulnerabilidade climática, enquanto o modelo (2) incorpora variáveis climáticas históricas temperatura média e precipitação média como controles adicionais. Todas as regressões foram estimadas com erros-padrão robustos agrupados por município, a fim de corrigir possíveis correlações intra-municipais nos resíduos.

Tabela 2 – Resultado da regressão logística

	(1)	(2)
Vulnerabilidade	1,0151*** (0,0034)	1,01499*** 0,0034)
Temperatura		1,079* (0,0459)
Precipitação		0,9979 (0,0039)
Constante	0,6694** (0,1123)	0,1533** (0,1874)
Observações	852	852

Nota: Erros padrão entre parêntese. Significância * $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

Os resultados mostram que o índice de vulnerabilidade climática é positivamente associado à adoção dos SAF em ambos os modelos, apresentando *odds ratio* em torno de 1,015, com significância estatística ao nível de 1%. Isso indica que um aumento unitário no índice de vulnerabilidade está associado a um aumento de aproximadamente 1,5% na chance de adoção dos sistemas agroflorestais. No modelo com controles climáticos, a temperatura média histórica apresenta um efeito positivo e marginalmente significativo (*odds ratio* $\approx 1,08$; $p < 0,10$), sugerindo que municípios com temperaturas mais altas têm maior propensão à adoção. Já a precipitação média não mostrou efeito estatisticamente significativo (*odds ratio* $\approx 0,997$; $p > 0,10$), indicando que, dentro do intervalo analisado, essa variável não influencia significativamente a decisão de adoção.

Esses resultados reforçam a importância do índice de vulnerabilidade climática e da temperatura média histórica como determinantes para a adoção dos SAF, ressaltando a necessidade de políticas públicas que considerem essas variáveis para apoiar práticas agroflorestais em regiões mais vulneráveis.

4. Discussão

Os resultados desta pesquisa oferecem evidências empíricas robustas em apoio à hipótese central do estudo: municípios com maior vulnerabilidade climática tendem a apresentar maior propensão à adoção de Sistemas Agroflorestais (SAF) como estratégia adaptativa. Essa associação entre vulnerabilidade e adoção reforça a compreensão de que práticas agroecológicas, como os SAF, são não apenas medidas de mitigação, mas também instrumentos eficazes de adaptação às mudanças climáticas no contexto da agricultura familiar.

O índice de vulnerabilidade climática apresentou média de 44,51 com considerável variação entre os municípios, refletindo a heterogeneidade territorial de Minas Gerais em

termos de exposição e capacidade adaptativa. Essa variação espacial é consistente com estudos prévios que destacam o caráter desigual dos impactos climáticos em territórios rurais (IPCC, 2022; Dos Santos et al., 2023). A média mais elevada de vulnerabilidade entre os municípios adotantes dos SAF (47,19 contra 41,01 entre os não adotantes) sugere que agricultores em contextos mais expostos às ameaças climáticas estão mais inclinados a adotar práticas resilientes, como também demonstrado por Dos Santos et al. (2021) e Wu et al. (2025), que apontam os SAF como uma resposta eficaz à degradação ambiental e aos eventos climáticos extremos.

A capacidade adaptativa média mais elevada em relação à capacidade de enfrentamento imediato (50,95 contra 32,05) reforça a ideia de que, embora os municípios mineiros apresentem limitações operacionais e institucionais, há um potencial estruturante que pode ser fortalecido por políticas públicas voltadas à adaptação de longo prazo. Essa diferença entre capacidades é abordada por Birkmann et al. (2022), que argumentam que as estratégias adaptativas de comunidades vulneráveis não devem ser avaliadas apenas com base na capacidade de resposta emergencial, mas sim em sua resiliência estrutural e organizacional ao longo do tempo.

A análise econométrica por regressão logística confirmou que o índice de vulnerabilidade é positivamente associado à adoção de SAF, com um *odds ratio* de aproximadamente 1,015 e significância estatística ao nível de 1%. Isso implica que cada ponto adicional no índice de vulnerabilidade aumenta em cerca de 1,5% a chance de um município adotar SAF. Esses achados dialogam com pesquisas recentes como a de Soterroni et al. (2018), que evidenciam o papel da agricultura familiar e dos sistemas agroflorestais na promoção da resiliência climática no Brasil. Além disso, Mbow et al. (2019) destacam que os SAF promovem sinergias entre adaptação e mitigação, contribuindo para diversificação produtiva, segurança alimentar e conservação ambiental, especialmente em áreas de alta vulnerabilidade.

Os controles climáticos inseridos no modelo reforçam a relevância das variáveis contextuais. A temperatura média histórica apresentou um efeito positivo e marginalmente significativo, indicando que em municípios mais quentes há maior propensão à adoção dos SAF. Isso é consistente com estudos de Dos Santos et al. (2024) que identificam a relação entre estresse térmico e a adoção de sistemas produtivos e de gestão de risco mais resilientes. Por outro lado, a precipitação média histórica não apresentou efeito estatisticamente significativo, sugerindo que, dentro da variação observada na amostra, o fator pluviométrico não é um determinante direto da adoção dos SAF. Esse resultado sinaliza que a percepção dos produtores

sobre risco climático tende a ser mais sensível a variáveis como calor extremo do que à variabilidade da chuva (Cuni-Sanchez et al., 2025).

Do ponto de vista das políticas públicas, os resultados da pesquisa apontam para a necessidade de intervenções territorializadas que promovam a adoção de práticas agroflorestais em áreas mais vulneráveis, com atenção especial aos municípios com baixa capacidade de enfrentamento. Políticas de incentivo à agroecologia e aos SAF devem ser combinadas com investimentos em extensão rural, crédito facilitado e infraestrutura, especialmente nas regiões mais expostas aos riscos climáticos (Miccolis et al., 2019; Dissanayaka et al., 2023; Dos Santos et al., 2025)

Por fim, os resultados desta pesquisa indicam que os municípios mais vulneráveis apresentam maior probabilidade de adotar Sistemas Agroflorestais (SAFs), o que sugere uma estratégia adaptativa ativa por parte da agricultura familiar mineira diante dos riscos climáticos. Esses achados desafiam a visão tradicional que tende a representar populações vulneráveis como passivas frente às adversidades, revelando, ao contrário, sua capacidade de resposta e tomada de decisão frente aos impactos das mudanças climáticas. Essa evidência reforça a perspectiva da justiça climática, ao evidenciar que comunidades em contextos de maior fragilidade socioambiental estão buscando alternativas sustentáveis para aumentar sua resiliência, ao mesmo tempo em que destaca a urgência de políticas públicas que reconheçam, apoiem e ampliem essas iniciativas, promovendo maior equidade territorial.

5. Considerações finais

A presente pesquisa buscou compreender a relação entre a vulnerabilidade climática e a adoção de Sistemas Agroflorestais (SAFs) no contexto da agricultura familiar em Minas Gerais, partindo da hipótese de que territórios mais vulneráveis tenderiam a apresentar maior propensão à adoção desses sistemas como estratégia de adaptação. Os resultados obtidos confirmam essa hipótese, revelando que, diante de maiores riscos climáticos, agricultores familiares têm recorrido de forma ativa aos SAFs como resposta resiliente às adversidades ambientais.

A análise do índice de vulnerabilidade climática evidenciou a heterogeneidade territorial do estado, com significativa variação entre municípios quanto à exposição e capacidade de enfrentamento. Essa diversidade reforça a necessidade de políticas públicas sensíveis ao contexto local, que levem em conta as especificidades socioambientais de cada região. Além disso, a regressão logística demonstrou uma associação estatisticamente significativa entre o

aumento da vulnerabilidade e a chance de adoção dos SAFs, corroborando a ideia de que populações rurais, mesmo em condições de maior fragilidade, não apenas reconhecem os riscos, como também são capazes de implementar estratégias inovadoras e sustentáveis.

Os achados deste estudo contribuem para o debate sobre justiça climática, ao mostrar que os agricultores familiares em contextos mais vulneráveis não são agentes passivos, mas protagonistas na construção de soluções adaptativas. Tais evidências reforçam a importância de apoiar, por meio de políticas públicas e instrumentos financeiros, iniciativas como os SAFs, que promovem a resiliência ecológica, a segurança alimentar e a inclusão socioeconômica.

Em um cenário de agravamento das mudanças climáticas, investir na agricultura familiar e em práticas agroecológicas como os Sistemas Agroflorestais é uma estratégia não apenas ambientalmente eficaz, mas também socialmente justa. Os resultados desta pesquisa apontam, portanto, para a urgência de ampliar o suporte técnico, institucional e financeiro à adoção dos SAFs, especialmente nas regiões mais expostas e com menor capacidade de resposta, contribuindo para um desenvolvimento rural mais equitativo, sustentável e alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Referências Bibliográficas

Angelotti, F.; Giongo, V. Ações de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas. In: Melo, R. F.; Voltolini, T. V. (Eds.). *Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido*. Brasília: Embrapa, 2019. p. 445-467.

Atlas Brasil. 2021 Indicador Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.atlasbrasil.org.br/consulta/planilha>> Acesso em: 05 jan. de 2025.

Birkmann, Joern; Jamshed, Ali; Mcmillan, Joanna M.; Feldmeyer, Daniel; Totin, Edmond; Solecki, William; Ibrahim, Zelina Zaiton; Roberts, Debra; Bezner Kerr, Rachel; Poertner, Hans-Otto; Pelling, Mark; Djalante, Riyanti; Garschagen, Matthias; Leal Filho, Walter; Guha-Sapir, Debarati; Alegria, Andrés. Understanding human vulnerability to climate change: A global perspective on index validation for adaptation planning. *Science of The Total Environment*, v. 803, p. 150065, 10 jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150065>.

Cameron, A. C., & Miller, D. L. (2015). *A practitioner's guide to cluster-robust inference*. *Journal of Human Resources*, 50(2), 317–372.

Charles, A.; Kalikoski, D.; Macnaughton, A. *Addressing the climate change and poverty nexus: a coordinated approach in the context of the 2030 agenda and the Paris agreement*. Roma: FAO, 2019.

Cuadra, S. V.; Heinemann, A. B.; Barioni, L. G.; Mozzer, G. B.; Bergier, I. (Eds.). *Ação contra a mudança global do clima: contribuições da Embrapa*. Brasília: Embrapa, 2018.

Cuni-Sanchez, Aida et al. Perceived climate change impacts and adaptation responses in ten African mountain regions. *Nature Climate Change*, p. 1-9, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02221-w>

Da Cunha, D. A. *Mudanças climáticas e convivência com o Semiárido brasileiro*. Viçosa: IPPDS, UFV, 2022.

Dissanayaka, D. M. N. S.; et al. Agroforestry – a key tool in the climate-smart agriculture context: a review on coconut cultivation in Sri Lanka. *Frontiers in Agronomy*, v. 5, p. 1162750, 2023. <https://10.3389/fagro.2023.1162750>

Dos Santos, E.A.; Da Cunha, D.A.; Santos, J.B.; Zanuncio, J.C. Agricultural vulnerability to climate change in the Rio das Contas Basin, Brazil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, p.1–12, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03188-3>

Dos Santos, E.A., Fortini, R.M., Cardoso, L.C.B. Zanuncio, J.C. Climate change in Brazilian agriculture: vulnerability and adaptation assessment. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 20, 10713–10730 (2023). <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04730-7>

Dos Santos, Elizângela Aparecida; Piedra-Bonilla, Elena Beatriz; Barroso, Gabriela Madureira; Silva, Jordão Vieira; Hejazirad, Seyede Parvin; Santos, José Barbosa Dos. Agricultural resilience: Impact of extreme weather events on the adoption of rural insurance in Brazil. *Global Environmental Change*, v. 89, p. 102938, dez. 2024. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2024.102938

Gomes, L. C.; Bianchi, F. J. J. A.; Cardoso, I. M.; Fernandes, R. B. A.; Fernandes Filho, E. I.; Schulte, R. P. O. *Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, [S.l.], v. 294, p. 106858, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858>.

Greene, W. H. (2018). *Econometric Analysis*. 8th ed. Pearson.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (2023). *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)*. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (GenevaIPCC). 2014.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. *Summary for policymakers. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; et al. (Eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. In Press: Cambridge University Press, 2021.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. *Summary for Policymakers. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Pörtner, H. O.; Roberts, D. C.; Tignor, M.; (Eds.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, 2022

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Censo agropecuário: resultados definitivos 2017*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/resultados-censo-agro-2017/resultados-definitivos.html>. Acesso em 30 jun. 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Censo Demográfico 2022: população e domicílios*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 30 jul. 2025.

Jägermeyr, J., Müller, C., Ruane, A.C. et al. Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nat Food* 2, 873–885 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>.

Lindoso, D. P.; Eiró, F.; Bursztyn, M.; Rodrigues-Filho, S.; Nasuti, S. Harvesting Water for Living with Drought: Insights from the Brazilian Human Coexistence with Semi-Aridity Approach towards Achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainability*, v. 10, p. 622, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10030622>

Long, J. S., & Freese, J. (2014). *Regression Models for Categorical Dependent Variables Using Stata*. 3rd ed. Stata Press.

Marengo, J. A.; Galdos, M. V.; Challinor, A.; Cunha, A. P.; Marin, F. R.; Vianna, M. D. S.; Alvala, R. C. S.; Alves, L. M.; Moraes, O. L.; Bender, F. Drought in Northeast Brazil: a review of agricultural and policy adaptation options for food security. *Climate Resilience and Sustainability*, v. 1, p. e17, 2022. <https://doi.org/10.1002/cli2.17>.

Martins, M. A.; Tomasella, J.; Dias, C. G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. *Agricultural Water Management*, v. 216, p. 339-350, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.011>.

Mbow, C.; Rosenzweig, C.; Barioni, L. G. et al. *Food Security*. In: Shukla, P. R.; Skea, J.; Calvo Buendia, E. et al. (Eds.). *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019, p. 437-550. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.007>

Miccolis, A.; Peneireiro, F.; Vieira, D.; Marques, H.; Hoffmann, M. Restoration Through Agroforestry: Options For Reconciling Livelihoods With Conservation In The Cerrado And Caatinga Biomes In Brazil. *Experimental Agriculture*, v. 55, n. S1, p. 208-225, 2019. <https://doi.org/10.1017/S0014479717000138>

Papa, C.; Nzokou, P.; Mbow, C. Farmer Livelihood Strategies and Attitudes in Response to Climate Change in Agroforestry Systems in Kedougou, Senegal. *Environmental Management*, v. 66, p. 218-231, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01302-8>.

Petersen-Rockney, M. Farmers adapt to climate change irrespective of stated belief in climate change: a California case study. *Climatic Change*, v. 173, p. 23, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03417-9>

Quandt, A.; Neufeldt, H.; Gorman, K. Climate change adaptation through agroforestry: opportunities and gaps. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 60, p. 101244, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101244>.

Schnitter, R; Berry, P. The Climate Change, Food Security and Human Health Nexus in Canada: A Framework to Protect Population Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, n. 14, p. 2531, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijerph16142531>.

Soterroni, Aline C.; Mosnier, Aline; Carvalho, Alexandre X. Y.; Câmara, Gilberto; Obersteiner, Michael; Andrade, Pedro R.; Souza, Ricardo C.; Brock, Rebecca; Pirker, Johannes; Kraxner, Florian; Havlík, Petr; Kapos, Valerie; Zu Ermgassen, Erasmus K. H. J.; Valin, Hugo; Ramos, Fernando M.
Future environmental and agricultural impacts of Brazil's Forest Code. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 7, p. 074021, 2018. DOI: 10.1088/1748-9326/aaccbb.

Tanure, T. M. P.; Domingues, E. P.; Magalhães, A. S. The Regional Economic Impacts of Climate Change on Family Farming and Large-Scale Agriculture in Brazil. *Climate change Economics*, 2023 (*in press*). <https://doi.org/10.1142/S2010007823500124>.

TERRESTRIAL HYDROLOGY RESEARCH GROUP – THRG. Disponível em <<http://hydrology.princeton.edu/data.php>> Acesso em: 30 de jan. de 2024.

Welle, T.; Birkmann, J. The World Risk Index – An Approach to Assess Risk and Vulnerability on a Global Scale. *Journal of Extreme Events*, v. 02, No. 01, 2015. <https://doi.org/10.1142/S234573761550003>

Wooldridge, J. M. (2021). *Introductory Econometrics: A Modern Approach*. 7th ed. Cengage Learning.

Wu, C., Yang, M., Wei, H., Gong, L., Tan, G. Spatial variability of cultural landscape vulnerability and influential factors in ethnic villages of Southeast Guizhou. *Sci Rep* 15, 1491 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83734-4>