

Efeitos das Oscilações Climáticas sobre a Produtividade da Soja no Brasil: Uma Análise em Dados em Pannel (2011-2024)

Effects of Climate Fluctuations on Soybean Productivity in Brazil: A Panel Data Analysis (2011-2024)

Anna Júlia da Silva

Universidade Estadual do Paraná (Unespar). Campo Mourão, Paraná (PR), Brasil

Juliane Borchers

Universidade Estadual do Paraná (Unespar). Campo Mourão, Paraná (PR), Brasil

André Ricardo Bechlin

Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Toledo, Paraná (PR), Brasil

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

Resumo: O estudo analisa a influência das variáveis climáticas sobre a produtividade da soja no Brasil entre os anos de 2011 e 2024, com foco nos principais estados produtores, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná e Rio Grande do Sul. A pesquisa parte do reconhecimento da soja como o principal vetor do agronegócio nacional, responsável por parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB) agrícola e das exportações brasileiras, mas altamente vulnerável a fatores climáticos, especialmente os fenômenos *El Niño* e *La Niña* associados ao ciclo *El Niño*–Oscilação Sul (ENOS), que afetam precipitação e temperatura. Para avaliar esses impactos, foi utilizada a metodologia econométrica de dados em painel, com informações de 1.142 municípios. O modelo permitiu captar tanto efeitos estáticos quanto dinâmicos, evidenciando como choques climáticos passados repercutem nas safras subsequentes. Os resultados indicam que choques climáticos, especialmente temperaturas elevadas, variabilidade térmica e a ocorrência de eventos ENOS, exercem impacto negativo e estatisticamente significativo sobre o rendimento da soja, inclusive com efeitos defasados ao longo das safras. Do ponto de vista econômico, tais impactos implicam redução de produtividade, aumento de custos unitários de produção e maior volatilidade da renda agrícola, afetando diretamente a competitividade do setor e o desempenho das exportações. Nesse sentido, o estudo contribui ao fornecer evidências empíricas sobre os efeitos das mudanças climáticas na produção de soja, ampliando a literatura que relaciona variabilidade climática e desempenho agrícola em economias emergentes. Conclui-se que o fortalecimento de instrumentos como o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), o seguro rural, o crédito agrícola orientado e o investimento em pesquisa e inovação são fundamentais para mitigar riscos climáticos, garantir estabilidade produtiva e sustentar a competitividade do agronegócio brasileiro em um contexto de mudanças climáticas.

Palavras-chave: Soja, ENOS, Produtividade, Rendimento Médio, *El Niño*, *La Niña*.

Abstract: This study analyses the influence of climatic variables on soybean productivity in Brazil between 2011 and 2024, with a focus on the main producing states: Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná, and Rio Grande do Sul. The research begins with an acknowledgement that soybeans are the primary driver of national agribusiness, accounting for a significant proportion of agricultural Gross Domestic Product (GDP) and Brazilian exports. However, soybeans are highly vulnerable to climatic factors, particularly the *El Niño* and *La Niña* phenomena associated with the *El Niño*–Southern Oscillation (ENSO) cycle, which impact precipitation and temperature. To evaluate these impacts, econometric panel data methodology was employed, utilizing information from 1,142 municipalities. The model captured both static and dynamic effects, demonstrating the impact of past climatic shocks on subsequent harvests. The results indicate that climate shocks, especially elevated temperatures, thermal variability, and the occurrence of ENSO events, exert a negative and statistically significant impact on soybean yield, including lagged effects across growing seasons. From an economic standpoint, these impacts imply reduced productivity, increased unit production costs, and greater volatility in agricultural income, directly affecting the sector's competitiveness and export performance. In this sense, the study contributes by providing empirical evidence on the effects of climate change on soybean production, expanding the literature that relates climate variability and agricultural performance in emerging economies. It concludes that strengthening instruments such as the Agricultural Zoning for Climate Risk (ZARC), rural insurance, targeted agricultural credit, and investment in research and innovation are fundamental to mitigating climate risks, ensuring productive stability, and sustaining the competitiveness of Brazilian agribusiness in a context of climate change.

Keywords: Soy, ENOS, Productivity, Average Yield, *El Niño*, *La Niña*.

1. Introdução

A soja (*Glycine max L. Merrill*) é uma das culturas agrícolas mais relevantes no cenário mundial e ocupa posição estratégica no desenvolvimento do agronegócio brasileiro. Introduzida no país com elevado nível tecnológico, a cultura consolidou-se como uma *commodity* de grande importância econômica, sendo cultivada em praticamente todas as regiões do território nacional. Nesse contexto, a eficiência na alocação de recursos e o conhecimento dos fatores que determinam a produtividade, como a adequada classificação dos grupos de maturação em relação às condições ambientais, tornam-se fundamentais para o desempenho da cultura (Rio *et al.*, 2012; Alliprandini *et al.*, 2009).

Do ponto de vista econômico, no Brasil, a soja ultrapassa o papel de produto agrícola, configurando-se como eixo estruturante de uma complexa cadeia produtiva que envolve a produção primária, a indústria de processamento (farelo e óleo), a produção de biocombustíveis e a cadeia de proteínas animais. Essa integração amplia significativamente sua contribuição para o Produto Interno Bruto (PIB), uma vez que seus efeitos se propagam para diversos setores da economia. Além disso, o complexo soja representou cerca de 38% das exportações brasileiras em 2022, reforçando sua centralidade na geração de divisas, estabilidade cambial e crescimento econômico (Vieira Filho, 2024).

Adicionalmente, a soja representa aproximadamente metade da produção nacional de grãos, evidenciando sua predominância no sistema agrícola brasileiro (Vieira Filho, 2024). Esse protagonismo está associado à elevada demanda internacional, ao avanço tecnológico e à capacidade de adaptação da cultura a diferentes regiões, especialmente no Cerrado, cuja ocupação foi fortemente baseada em inovação científica e tecnológica.

O Brasil consolidou-se nas últimas décadas como o maior produtor e exportador mundial de soja, resultado da combinação entre disponibilidade de terras agricultáveis, condições climáticas favoráveis e avanços tecnológicos aplicados à produção agrícola (Coelho, 2022). A cultura representa um dos principais pilares do agronegócio nacional, contribuindo significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) do setor e para o saldo da balança comercial. O cultivo do grão também impulsiona o desenvolvimento socioeconômico de importantes regiões produtoras, especialmente o Centro-Oeste, o Sul e a região do Matopiba, fronteira agrícola formada pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, que vem registrando expansão de área e ganhos de produtividade (Coelho, 2022; Landgraf, 2023).

Dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) e do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) indicam crescimento contínuo da produção e das exportações de soja, mesmo diante de desafios recentes, como a pandemia de Covid-19, a

guerra entre Rússia e Ucrânia e oscilações climáticas globais associadas a fenômenos como o *La Niña*. Em 2021, por exemplo, as exportações brasileiras de soja em grão registraram aumento de aproximadamente 35% em valor, impulsionadas pela forte demanda internacional e pela valorização das *commodities* agrícolas (Coêlho, 2022).

Apesar de sua relevância econômica, a produtividade da soja é fortemente influenciada por fatores ambientais. O desempenho da cultura depende, entre outros aspectos, da definição adequada das épocas de plantio e colheita, que estão diretamente relacionadas às condições climáticas. Fenômenos climáticos de grande escala, como *El Niño* e *La Niña*, associados ao ciclo *El Niño*–Oscilação Sul (ENOS), podem alterar padrões de precipitação e temperatura, influenciando significativamente o desenvolvimento das lavouras e os níveis de produtividade.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a relação entre variáveis climáticas associadas ao ENOS, especialmente os fenômenos *El Niño* e *La Niña*, e o rendimento médio da soja nos principais estados produtores do Brasil: Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná e Rio Grande do Sul. Ao investigar essas interações, o estudo contribui para o aprimoramento das estratégias de manejo e adaptação às variabilidades climáticas, além de fornecer evidências empíricas que podem subsidiar políticas públicas, decisões de investimento e práticas voltadas à sustentabilidade da produção agrícola no Brasil. Dessa forma, o trabalho está organizado em cinco seções, incluindo esta introdução. A seção 2 apresenta o referencial teórico, a seção 3 descreve a metodologia, a seção 4 apresenta e discute os resultados das estimativas, e a seção 5 apresenta as conclusões.

2. Revisão da literatura

Esta seção tem como objetivo contextualizar a cultura da soja no cenário brasileiro, abordando sua relevância econômica e a profunda interdependência com os fatores climáticos. Serão explorados os principais fenômenos meteorológicos que influenciam a sojicultura, como o *El Niño* e *La Niña*, e como suas manifestações afetam a produtividade da produção no país. Por fim, este referencial apresentará as ferramentas de zoneamento agrícola de risco climático, importantes para o planejamento e a prevenção, e nas projeções futuras das mudanças climáticas, destacando seus impactos.

2.1 A importância econômica da soja no Brasil

A soja consolidou-se como uma das culturas agrícolas mais relevantes para a economia brasileira, sendo atualmente a principal oleaginosa produzida e exportada pelo país. Nas últimas décadas, o Brasil tornou-se um dos maiores produtores mundiais, resultado da expansão da

fronteira agrícola, do avanço tecnológico e do desenvolvimento de cultivares adaptadas às diferentes condições edafoclimáticas do território nacional (Lazzarotto; Hirakuri, 2009; Silva *et al.*, 2022).

A expansão da cultura foi particularmente intensa a partir da década de 1970, quando programas de pesquisa e políticas agrícolas favoreceram a adaptação da soja às regiões tropicais, permitindo sua disseminação para o Cerrado e outras áreas do Centro-Oeste brasileiro. Esse processo foi acompanhado por melhorias significativas em produtividade, decorrentes do avanço do melhoramento genético, da mecanização e da adoção de novas práticas de manejo (Lazzarotto; Hirakuri, 2009).

Atualmente, a soja desempenha papel estratégico no agronegócio brasileiro, contribuindo significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB), para a geração de divisas e para a dinâmica econômica de diversas regiões do país. Na safra 2023/24, a produção nacional alcançou aproximadamente 147 milhões de toneladas, consolidando o Brasil como um dos principais fornecedores globais da *commodity* (Conab, 2024). Apesar do elevado nível tecnológico do processo produtivo, o desempenho da cultura permanece fortemente condicionado às condições climáticas, o que torna necessário compreender a relação entre variáveis meteorológicas e produtividade agrícola.

2.2 Relação entre clima e produtividade agrícola

A produtividade agrícola é fortemente influenciada pelas condições climáticas, especialmente em sistemas de produção dependentes de precipitação natural, como ocorre em grande parte da sojicultura brasileira. Entre os fatores meteorológicos que mais afetam o desempenho da cultura destacam-se a temperatura do ar, a precipitação e a radiação solar, que influenciam diretamente os processos fisiológicos e o desenvolvimento fenológico das plantas (Sentelhas *et al.*, 2015).

A disponibilidade hídrica, em particular, é considerada o principal fator limitante da produtividade da soja no Brasil. Períodos de déficit hídrico podem comprometer o crescimento vegetativo, reduzir a taxa fotossintética e afetar a formação e o enchimento dos grãos, especialmente durante as fases reprodutivas da cultura (Farias *et al.*, 2007; Sentelhas *et al.*, 2015). Estudos indicam que grande parte das perdas de produtividade observadas na sojicultura brasileira está associada à insuficiência de água ao longo do ciclo produtivo, o que evidencia a elevada sensibilidade da cultura às variações climáticas (Conab, 2014; Farias *et al.*, 2007; Sentelhas *et al.*, 2015).

Além da precipitação, a temperatura exerce influência significativa sobre o metabolismo vegetal e sobre a duração do ciclo da cultura. Temperaturas muito elevadas ou muito baixas podem prejudicar o desenvolvimento das plantas e reduzir a capacidade produtiva das lavouras (Favero, 2025; Pellegrino *et al.*, 2007; Rodrigues, 2008). Dessa forma, a interação entre variáveis climáticas e características agronômicas da cultura determina grande parte do desempenho produtivo da soja. A variabilidade climática, portanto, torna-se um elemento central para compreender as flutuações observadas na produção agrícola.

2.3 *El Niño* e *La Niña*: Fenômenos que redesenham o clima brasileiro

Entre os principais fatores responsáveis pela variabilidade climática global destaca-se o fenômeno *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS), caracterizado por alterações anormais na temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico equatorial. Esse fenômeno apresenta duas fases principais: o *El Niño*, associado ao aquecimento das águas do Pacífico, e a *La Niña*, relacionada ao seu resfriamento (Ferreira *et al.*, 2022).

Essas anomalias térmicas afetam os padrões atmosféricos globais e provocam alterações na circulação dos ventos e na distribuição das chuvas em diversas regiões do planeta. No Brasil, os eventos de ENOS influenciam significativamente o regime de precipitação e temperatura, gerando impactos diferenciados entre as regiões. Em geral, episódios de *El Niño* estão associados ao aumento das chuvas na Região Sul do país, enquanto a *La Niña* tende a intensificar períodos de seca em algumas áreas do território brasileiro (Ferreira *et al.*, 2022).

Como consequência, o ENOS exerce influência direta sobre a variabilidade climática que afeta a produção agrícola, tornando-se um importante fator explicativo para flutuações de produtividade em culturas sensíveis às condições meteorológicas.

2.4 O impacto dos ENOS na sojicultura brasileira

A influência das variáveis climáticas sobre a produção de soja é amplamente documentada na literatura. Eventos extremos, como estiagens prolongadas, ondas de calor ou excesso de precipitação, podem provocar perdas significativas de produtividade e aumentar a instabilidade das safras agrícolas (Ferreira *et al.*, 2022; Jiang; Fortenbery, 2019; Sentelhas *et al.*, 2015).

Estudos indicam que o déficit hídrico ao longo do ciclo produtivo é responsável por grande parte das quebras de rendimento da cultura, podendo provocar redução no crescimento das plantas, queda prematura de flores e abortamento de vagens. Esses efeitos são

particularmente intensos durante o período reprodutivo da soja, quando a demanda por água é mais elevada (Berlato; Fontana, 2003; Farias *et al.*, 2007; Nogueira; Nagai, 1988).

Além disso, fenômenos climáticos de grande escala, como o ENOS, podem alterar significativamente os padrões regionais de precipitação e temperatura, ampliando a variabilidade da produção agrícola. Em determinadas regiões produtoras, como o Sul do Brasil, a ocorrência desses fenômenos está associada a maiores flutuações na produtividade da soja, evidenciando a vulnerabilidade da cultura às oscilações climáticas (Sentelhas *et al.*, 2015).

Os efeitos do ENOS sobre a sojicultura brasileira demonstram a vulnerabilidade da agricultura às variações climáticas globais e reforçam a necessidade de ferramentas e estratégias de gestão capazes de reduzir esses riscos. Nesse contexto, o uso do zoneamento agrícola de risco climático surge como uma importante política pública e instrumento técnico-científico para orientar o plantio em períodos e regiões mais favoráveis, minimizando as perdas e aumentando a resiliência da produção frente à instabilidade do clima.

2.5 Gestão de risco climático na agricultura

Diante da elevada dependência da agricultura em relação às condições climáticas, instrumentos de gestão de risco tornaram-se fundamentais para orientar o planejamento produtivo. Entre essas ferramentas destaca-se o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), desenvolvido no Brasil para identificar períodos e regiões com menor probabilidade de perdas decorrentes de eventos climáticos adversos (Rodrigues, 2008).

O ZARC baseia-se na análise de séries históricas de dados meteorológicos, características do solo e exigências fisiológicas das culturas, permitindo estimar o risco de insucesso produtivo em diferentes regiões e épocas de plantio (Rodrigues, 2008). Essas informações auxiliam produtores, instituições financeiras e formuladores de políticas públicas na definição de estratégias que reduzam a exposição da produção agrícola às variações climáticas (Battisti; Sentelhas, 2015; Sentelhas *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a compreensão das interações entre variáveis climáticas e desempenho produtivo torna-se importante para avaliar os impactos das condições meteorológicas sobre a agricultura. Assim, considerando a relevância dessas relações para a sojicultura brasileira, o presente estudo utiliza um modelo econométrico com dados em painel para analisar como variáveis climáticas, como temperatura e precipitação, e variáveis de produção, como área plantada e quantidade produzida, influenciam o rendimento médio da soja nos principais estados produtores do país.

3. Metodologia

Com a finalidade de identificar os determinantes da produtividade da soja no Brasil, este trabalho utilizará um procedimento econométrico de análise de dados em painel. Dessa forma, o objetivo do trabalho consiste em identificar como as variáveis climáticas, temperatura e precipitação, e as variáveis de produção, área plantada e quantidade produzida, atuam sobre o rendimento médio da soja nos estados analisados. Assim, esta seção apresenta a fonte de dados e a metodologia empregada para atingir esse objetivo, estabelecendo o elo entre a base empírica e os procedimentos econométricos adotados.

3.1 Dados

Nesse estudo, serão analisados os estados brasileiros de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Rio Grande do Sul e Paraná no período entre 2011 a 2024. A escolha desses cinco estados se justifica por sua elevada representatividade, pois historicamente concentram a maior parte da produção nacional de soja, abrangendo tanto áreas da Região Centro-Oeste quanto da Região Sul, o que possibilita capturar diferentes condições climáticas e produtivas. No total, foram analisados 1.142 municípios, o que garante uma amostra ampla e representativa da realidade produtiva (Conab, 2014). A escolha do período de 2011 a 2024 foi selecionado por representar a dinâmica produtiva e climática recente do agronegócio, garantindo que a análise de dados em painel utilize informações atuais e suficientes para capturar os efeitos de diversos ciclos de produção e a ocorrência de eventos significativos do fenômeno ENOS e choques de temperatura e precipitação.

Os dados sobre *El Niño* e *La Niña* foram obtidos da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), enquanto as informações de temperatura e precipitação de municípios foram coletadas no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e no Agridempo. Por fim, dados sobre área plantada, produção e rendimento de soja foram extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

As variáveis que serão utilizadas e suas definições são apresentadas na Quadro 1. As variáveis explicativas consideradas foram divididas em dois grupos. Essa divisão foi usada por concentrar em segmentos que influenciam na produção de soja. Os indicadores do grupo 2, variáveis climáticas, foram utilizados pois representam os elementos que irão afetar diretamente o cultivo.

E os indicadores do grupo 1, variáveis de produção, como área plantada e quantidade produzida, são importantes para complementar a análise, uma vez que capturam as características técnicas da produção agrícola. As variáveis explicativas foram selecionadas para

representar as características climáticas e de produção que influenciam o rendimento da soja em uma localidade.

Quadro 1 – Variáveis e suas descrições

Variável	Definição
<i>Variável Dependente</i>	
Rendimento médio	Quantidade de soja produzida, em média, por uma unidade de área.
<i>Variáveis Explicativas</i>	
Variáveis de Produção	
Área Plantada	Extensão de terra utilizada para o cultivo de plantas ou culturas agrícolas
Quantidade Produzida	Quantidade produzida de Soja em um determinado período
Variáveis Climáticas	
Temperatura Mínima	Refere-se a menor temperatura atingida em um dado lugar
Temperatura Máxima	Refere-se a maior temperatura atingida em um dado lugar
Temperatura Média	Representa a média das temperaturas registradas em um determinado período em um dado lugar
Precipitação	Todo conjunto de partículas de água, seja no estado líquido ou sólido, que caem da atmosfera e que atingem a superfície do globo
ENOS	Fenômeno climático de grande escala resultante da interação entre o oceano e a atmosfera na região do Oceano Pacífico Tropical

Fonte: Elaboração própria.

3.2 Dados em painel

O método de dados em painel combina dimensões espacial (municípios) e temporal, permitindo controlar variáveis não observadas constantes no tempo e reduzir o viés de variável omitida, o que enriquece a análise em relação ao uso isolado de séries temporais ou dados em corte transversal (Gujarati; Porter, 2011).

Neste estudo, utiliza-se também um modelo dinâmico de dados em painel, com estimadores de Arellano e Bond (1991), Arellano e Bover (1995) e Blundell e Bond (1998), com destaque para o GMM-Sistema. Esse modelo inclui a variável dependente defasada como explicativa, captando autocorrelação e possíveis problemas de endogeneidade (Arellano, 2003), além de permitir analisar efeitos de defasagem e a persistência da produtividade da soja ao longo do tempo.

Para verificar a validade dos instrumentos no GMM-Sistema, são aplicados o Teste de Hansen e os testes de autocorrelação de Arellano-Bond. No caso dos modelos estáticos, o Teste de Hausman orienta a escolha entre efeitos fixos e aleatórios, definindo a especificação mais adequada para os resultados. Considerando o objetivo do trabalho, é especificado o seguinte modelo para dados em painel:

$$\begin{aligned}
 RendMedio_{it} = & \beta_0 + \beta_1 RendMedio_{it-1} + \beta_2 ÁreaPlantada_{it} \\
 & + \beta_3 QtdProduzida_{it} + \beta_4 TempMínima_{it} + \beta_5 TempMédia_{it} \\
 & + \beta_6 TempMáxima_{it} + \beta_7 PrecipitaçãoTotal_{it} + \beta_8 ENOS_{it-1}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Com a definição da modelagem econométrica presente na Equação 1, esse trabalho parte do princípio de que a ocorrência de fenômenos ENOS em anos anteriores afetam o rendimento médio do ano presente, pois o período de plantio da soja ocorre entre outubro e dezembro de um ano e a colheita entre janeiro e maio do ano seguinte (Conab, 2022).

4. Resultados e discussões

Na presente seção são apresentadas as análises descritivas dos dados utilizados no estudo e os resultados das estimações conforme metodologia descrita anteriormente, tendo como base o período de 2011 a 2024.

4.1 Análise descritiva

Ao analisar o rendimento médio histórico de soja (kg/ha), durante o período de 2011 a 2024, Tabela 1, nos estados de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Paraná e Rio Grande do Sul é possível observar que ocorreu uma variação do valor médio entre 2.158,09 kg/ha (2012) a 3.361,12 kg/ha (2017). Ao analisar os estados de forma separada, é possível verificar que o Mato Grosso do Sul apresentou uma significativa volatilidade no rendimento médio, que oscilou de 2.081,10 kg/ha em 2022 e 3.517,80 kg/ha em 2023.

Tabela 1 – Rendimento médio histórico da soja (kg/ha) nos municípios dos estados selecionados

Ano	Mato Grosso do Sul	Mato Grosso	Goiás	Paraná	Rio Grande do Sul	Todos
2011	2.599,18	2.659,46	2.562,30	3.243,91	2.699,24	2.841,54
2012	2.175,37	2.795,82	2.756,88	2.328,53	1.550,94	2.158,09
2013	2.727,14	2.849,75	2.813,70	3.168,69	2.662,35	2.872,02
2014	2.575,47	3.048,18	2.717,13	2.727,11	2.644,53	2.717,13
2015	2.887,81	3.089,91	2.611,65	3.165,94	2.994,74	2.988,94
2016	2.970,82	2.877,31	2.796,96	3.018,05	2.979,63	2.951,58
2017	3.243,81	3.285,41	3.191,90	3.504,29	3.351,45	3.361,12
2018	3.457,08	3.299,70	3.200,78	3.466,46	3.157,19	3.296,53
2019	2.697,69	3.327,79	3.110,07	2.887,83	3.233,31	3.076,78
2020	3.284,12	3.453,11	3.335,26	3.628,15	2.007,85	2.966,61
2021	3.426,34	3.367,75	3.354,59	3.376,61	3.314,54	3.353,31
2022	2.081,10	3.526,89	3.452,65	2.199,19	1.633,53	2.324,11
2023	3.517,80	3.670,16	3.576,27	3.632,40	2.092,12	3.073,19
2024	2.697,95	3.153,10	3.331,04	3.081,96	2.878,90	3.033,19

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

No estado do Mato Grosso, sendo o maior produtor de soja do Brasil, também foi possível observar flutuações, com rendimento médio variando entre 2.659,46 kg/ha em 2011 e 3.670,16 kg/ha em 2023. No estado de Goiás é possível observar que o rendimento médio varia de 2.562,30 kg/ha em 2011 a 3.576,27 kg/ha em 2023. A produção no Paraná, um estado tradicional na sojicultura, exibiu consideráveis oscilações no rendimento médio, variando de

2.199,19 kg/ha em 2022 e 3.632,40 kg/ha em 2023. O Rio Grande do Sul, apresentou a maior variabilidade na produtividade, com o rendimento médio oscilando de 1.550,94 kg/ha em 2012 e 3.351,45 kg/ha em 2017.

Parte dessa variabilidade pode ser explicada pela ocorrência de quebras de safra associadas a eventos climáticos extremos, especialmente estiagens e irregularidades no regime de precipitação. No período analisado, dois anos se destacam por apresentarem reduções significativas na produtividade média da soja: 2012 e 2022.

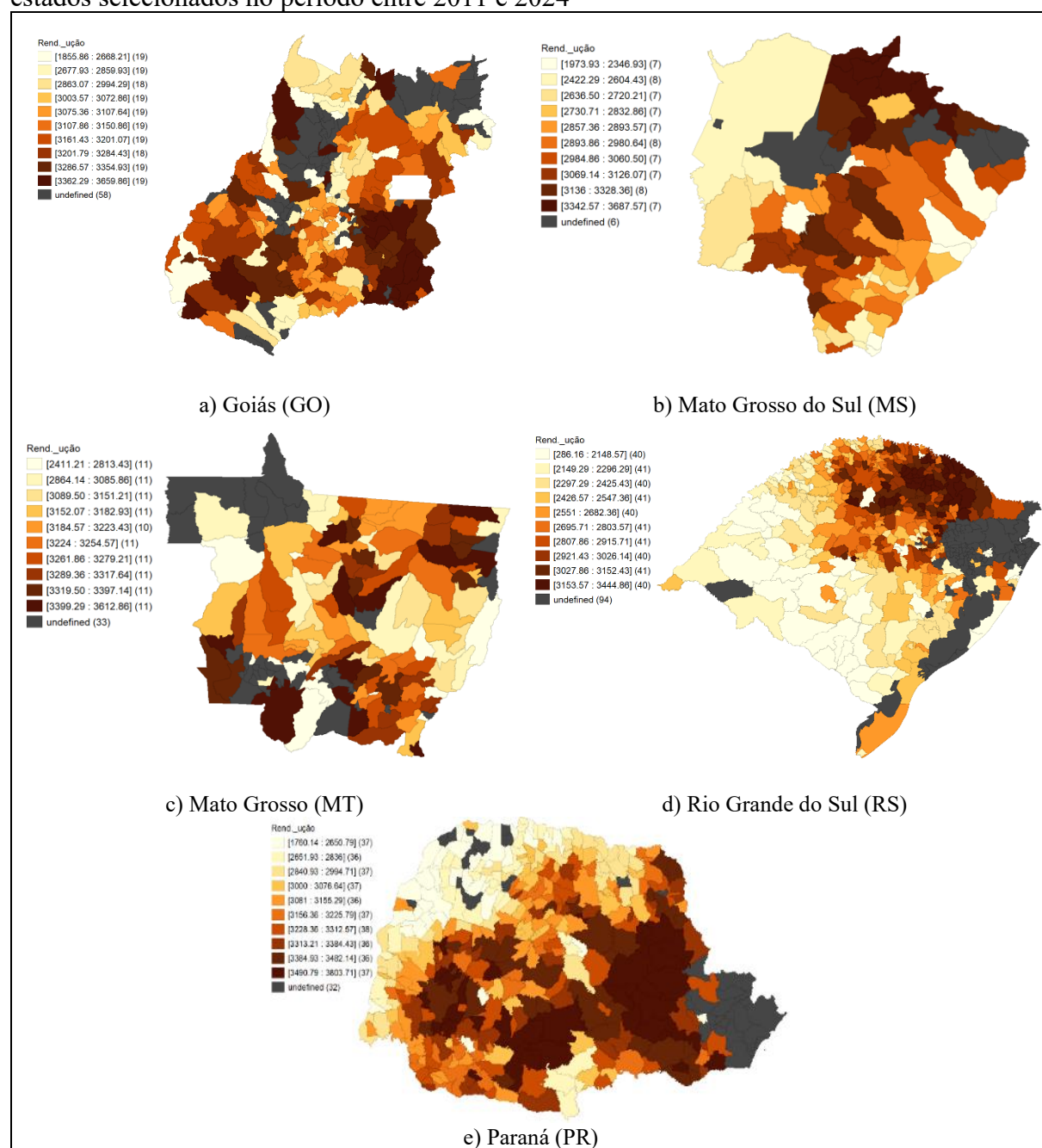
Em 2012, observou-se um dos menores níveis de produtividade da série, refletindo os impactos de condições climáticas adversas registradas em diversas regiões produtoras. Nesse período, a ocorrência de episódios de *La Niña* contribuiu para a redução das precipitações em partes da Região Sul do Brasil, especialmente nos estados do Paraná e Rio Grande do Sul, provocando perdas relevantes na produção agrícola. A redução da disponibilidade hídrica no solo durante fases críticas do desenvolvimento da cultura comprometeu o potencial produtivo das lavouras, contribuindo para a queda de produtividade observada na Tabela 1 (MAPA, 2022).

Situação semelhante foi observada em 2022, ano em que novamente se registraram níveis relativamente baixos de produtividade média, particularmente nos estados da Região Sul. Esse resultado está associado à ocorrência de uma seca severa durante a safra 2021/2022, que afetou intensamente diversas áreas produtoras. No Rio Grande do Sul, por exemplo, a estiagem provocou perdas estimadas em aproximadamente 16% da produção de soja, gerando impactos econômicos negativos expressivos para os produtores e para o setor agrícola regional (MAPA, 2022).

Esses episódios ajudam a explicar as oscilações observadas na produtividade média da soja ao longo do período analisado. Mesmo com os avanços tecnológicos na agricultura brasileira, como o uso de sementes geneticamente melhoradas, mecanização e manejo mais eficiente, a produção agrícola permanece fortemente dependente das condições climáticas. Assim, eventos extremos podem provocar reduções significativas na produtividade e gerar impactos econômicos relevantes para o setor agrícola.

A Figura 1 apresenta a distribuição espacial média do rendimento da soja nos municípios dos estados analisados entre 2011 e 2024. Observa-se uma clara concentração das áreas de maior produtividade em regiões tradicionalmente produtoras de soja no Brasil.

Figura 1 – Distribuição espacial do rendimento médio da soja (kg/ha) nos municípios dos estados selecionados no período entre 2011 e 2024



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Nota: Na categoria *undefined* estão os municípios que não foram incluídos na análise desse trabalho.

No estado de Mato Grosso, os maiores rendimentos concentram-se principalmente nas regiões Norte, Centro Sul e Sudoeste do estado, áreas reconhecidas como importantes polos de produção de soja, com destaque para municípios situados nas regiões de Sorriso, Lucas do Rio Verde e Sinop. Essas áreas apresentam elevada tecnificação agrícola, solos favoráveis e forte integração com cadeias logísticas e agroindustriais.

No Mato Grosso do Sul, os maiores níveis de produtividade concentram-se nas regiões Centro Norte, Leste e Sudoeste do estado, próximas às áreas de Chapadão do Sul, Dourados, Maracaju, São Gabriel do Oeste e Ponta Porã, consideradas polos tradicionais da produção de grãos. Nessas regiões, a combinação de solos férteis e clima favorável contribui para maiores níveis de produtividade média. Em Goiás, a produção de soja se concentra principalmente nas regiões Sul, Noroeste e Centro do estado, abrangendo áreas próximas a Rio Verde, Jataí e Mineiros. Essas regiões fazem parte do chamado cinturão agrícola do Centro-Oeste, caracterizado pela expansão recente da fronteira agrícola e pela elevada adoção de tecnologias de produção.

No Paraná, as áreas de maior rendimento concentram-se nas regiões Oeste, Centro Oriental e Centro Sul do estado, incluindo municípios como Cascavel, Tibagi, Castro e Guarapuava, regiões historicamente consolidadas na produção de soja e com elevada produtividade agrícola. Por fim, no Rio Grande do Sul, observa-se maior concentração da produção nas regiões Noroeste e Nordeste do estado, especialmente nas áreas do Planalto e Missões, que apresentam condições relativamente mais favoráveis ao cultivo da soja em comparação às regiões mais ao sul do estado.

A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis explicativas utilizadas no estudo, incluindo variáveis de produção e variáveis climáticas. Em relação às variáveis produtivas, observa-se elevada heterogeneidade entre os municípios analisados. A área plantada média foi de 23.118 hectares, com desvio padrão elevado (48.105 hectares), indicando grande dispersão entre os municípios produtores. Esse resultado reflete a coexistência de municípios com produção agrícola altamente mecanizada e extensiva, especialmente no Centro-Oeste, e municípios com áreas relativamente menores de cultivo. A quantidade produzida média foi de 72.027 toneladas, também apresentando elevada variabilidade. Esse resultado está diretamente relacionado às diferenças regionais de escala produtiva e ao nível de tecnificação das lavouras.

Tabela 2 – Estatísticas descritivas das variáveis explicativas

Variáveis	Média	Desvio Padrão
Variáveis de Produção		
Área Plantada	23.118,07	48.105,21
Quantidade Produzida	72.027,48	159.611,30
Variáveis Climáticas		
Temperatura Mínima	3,36	5,15
Temperatura Máxima	22,37	2,88
Temperatura Média	37,28	2,52
Precipitação	1.925,19	553,13
ENOS	0,64	0,48

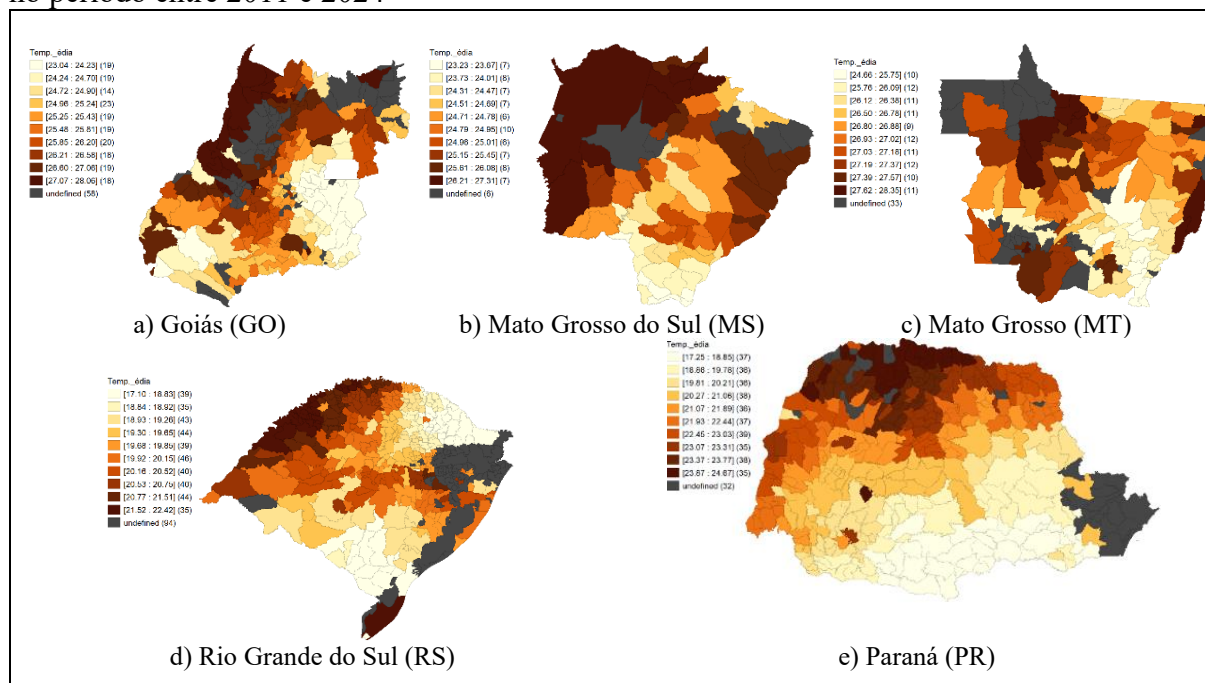
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

No que se refere às variáveis climáticas, a temperatura máxima média observada foi de 22,37 °C, enquanto a temperatura média apresentou valor médio de 37,28 °C, com desvio padrão relativamente baixo, indicando menor variabilidade térmica entre os municípios analisados quando comparado às variáveis produtivas.

A precipitação média anual foi de 1.925,19 mm, apresentando desvio padrão de 553,13 mm, o que evidencia significativa variabilidade espacial da disponibilidade hídrica nas regiões analisadas. Essa variação é particularmente relevante para culturas dependentes de regime pluviométrico adequado, como a soja. Por fim, a variável ENOS (*El Niño*–Oscilação Sul) apresentou média de 0,64, indicando a ocorrência relativamente frequente desses fenômenos climáticos ao longo do período analisado. Esses eventos influenciam diretamente os padrões de precipitação e temperatura no Brasil, podendo afetar o desenvolvimento das culturas agrícolas.

As Figuras 2 e 3 apresentam a distribuição espacial da temperatura média e da precipitação total média nos municípios analisados. A análise conjunta dessas figuras com o mapa de rendimento médio (Figura 1) permite identificar possíveis relações entre as condições climáticas e os níveis de produtividade da soja.

Figura 2 – Distribuição espacial da temperatura média nos municípios dos estados selecionados no período entre 2011 e 2024



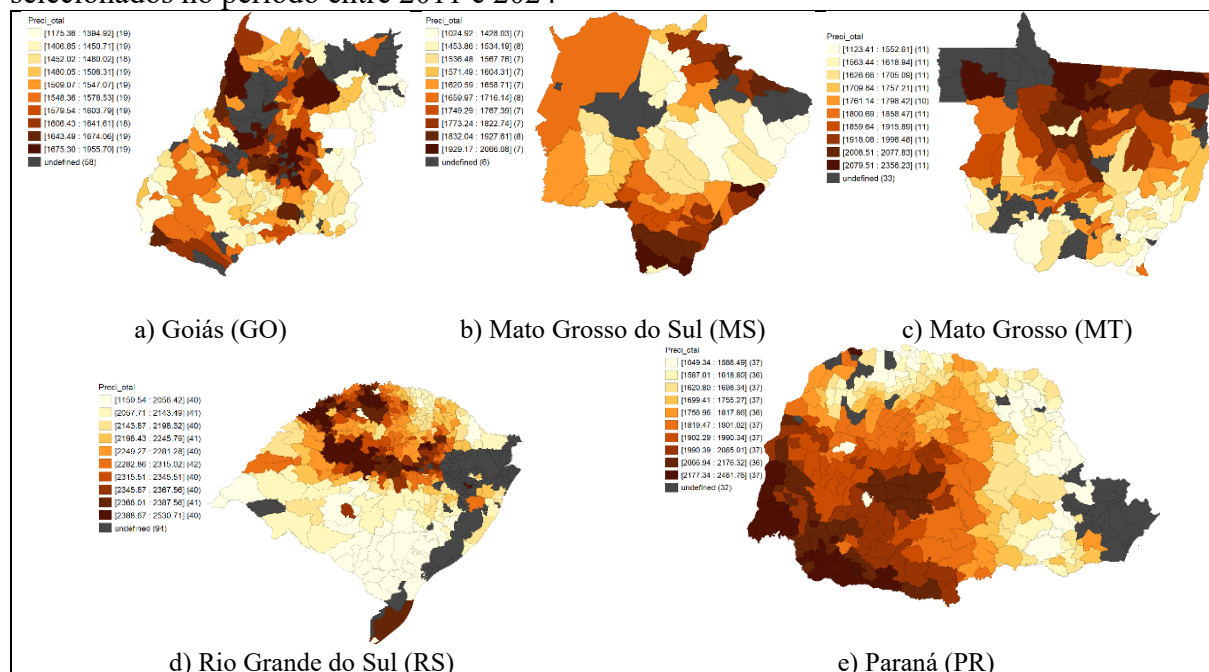
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Nota: Na categoria *undefined* estão os municípios que não foram incluídos na análise desse trabalho.

De forma geral, observa-se que as regiões com maiores níveis de produtividade média tendem a coincidir com áreas que apresentam condições climáticas mais adequadas ao

desenvolvimento da cultura da soja, caracterizadas por temperaturas moderadas e disponibilidade hídrica relativamente estável ao longo do ciclo produtivo.

Figura 3 – Distribuição espacial da média da precipitação total nos municípios dos estados selecionados no período entre 2011 e 2024



Fonte: Elaboração Própria a partir dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Nota: Na categoria *undefined* estão os municípios que não foram incluídos na análise desse trabalho.

4.2 Análise dos Resultados

Nessa seção serão apresentados os resultados dos modelos, com a finalidade de identificar os determinantes da produtividade da soja no Brasil. Além da utilização do estimador GMM-Sistema, também se realizou, com a finalidade de comparação, as mesmas estimativas usando os estimadores de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) e de dados em painel estocástico¹, utilizando a mesma especificação do modelo, incluindo a variável dependente defasada.

Na tabela dos resultados, os valores Arellano e Bond (ar1p) corresponde ao teste de autocorrelação de Arellano-Bond para correlação de primeira ordem para as diferenças dos erros do modelo; da mesma maneira, Arellano e Bond (ar2p) é o teste de autocorrelação de Arellano-Bond para correlação de segunda ordem para as diferenças dos erros do modelo. Os valores dos testes Arellano e Bond (ar1p), Arellano e Bond (ar2p) e do Teste Hansen (de restrição de sobreidentificação) representam os p-valores correspondentes às estatísticas de

¹ O Teste Hausman, para confronto entre modelos de efeitos aleatórios e de efeitos fixos, mostrou, para todas as estimativas, o Modelo de Efeitos Fixos como o mais indicado.

teste. Nas estimativas, também foi usada a opção *collapse* do comando *xtabond2* do *STATA*, para diminuir o número de instrumentos, impedindo situações de propagação de instrumentos, o que enfraqueceria os testes.

Diante disso, a Tabela 3 demonstra os resultados das estimações para o modelo proposto. De acordo com os resultados apresentados, a primeira conclusão importante ao analisar o modelo de Efeito Dinâmico (GMM) é que o rendimento de um ano influencia o ano seguinte, por essa razão foi realizado uma análise de ano defasado.

Tabela 3 – Resultados das regressões dos modelos de painel

Variáveis	Pooling	Erro Padrão	Efeito Fixo	Erro Padrão	GMM	Erro Padrão
Variáveis de Produção						
RendimentoMédio _{it-1}	0,195***	27,300	0,040***	0,008	0,024**	0,012
Área Plantada	- 0,037***	- 55,240	- 0,039***	0,001	- 0,131***	0,009
Quantidade Produzida	0,012***	58,230	0,013***	0,000	0,045***	0,003
Variáveis Climáticas						
Temperatura Mínima	0,626	0,360	- 1,613	1,934	12,299***	4,467
Temperatura Máxima	- 95,922***	- 26,860	- 81,996***	4,258	- 31,578***	6,844
Temperatura Média	68,193***	16,290	63,736***	10,214	- 38,381***	12,498
Precipitação	- 0,046***	- 4,320	- 0,070***	0,012	- 0,020	0,015
ENOS _{it-1}	- 50,124***	- 4,350	- 57,690***	11,133	- 48,524***	9,864
Constante	4544,857***	42,130	4595,578***	235,547	4800,801***	324,880
F(8, 1141) = 6.026,91						
Prob> F = 0,000						
Nº de observações	14.846					
Nº de grupos	1.142					
Nº de instrumento	78					
Arellano e Bond (ar1p)	0,000					
Arellano e Bond (ar2p)	0,03					
Teste Hansen	0,000					

Fonte: Elaboração própria.

Nota: (*) Significante a 10%; (**) Significante a 5%; (***) Significante a 1%.

Ao analisar o impacto defasado do ENOS, é possível observar que irá ocorrer um efeito negativo e significativo sobre o rendimento. Isso significa que ao avaliar de forma defasada, ou seja, quando se observa o ciclo da soja, pode-se afirmar que haverá um impacto negativo na produtividade da soja (Berlato *et al.*, 2024). Esses fenômenos, que incluem as fases quentes (*El Niño*) e frias (*La Niña*), alteram a distribuição de chuvas e condições climáticas e suas respectivas consequências estendem além do ciclo inicial, por essa razão é necessário um planejamento agrícola. Do ponto de vista econômico, isso implica aumento da incerteza, maior risco produtivo e necessidade de instrumentos de proteção, como seguro rural e *hedge* de preços (Ferreira *et al.*, 2022).

Em relação aos fatores térmicos, as temperaturas médias e máximas são extremas e negativas, o que pode ser um fator limitador da produtividade (Battisti; Sentelhas, 2015). É

relevante notar que outras variáveis como Precipitação Total não se mostraram significativas no modelo dinâmico, sugerindo que a variação do rendimento está mais ligada à inércia do ENOS e ao calor extremo. Da perspectiva econômica, a ocorrência recorrente de eventos de calor extremo pode implicar redução da produtividade média e aumento da volatilidade da produção, afetando diretamente a renda agrícola e a estabilidade da oferta de grãos no mercado interno e externo.

As variáveis de produção apontam para desafios estruturais. Enquanto a Quantidade Produzida tem um efeito positivo, refletindo o sucesso do contexto econômico de investimento em tecnologia (Hirakuri, 2020), a Área Plantada apresenta um impacto negativo significativo sobre o rendimento médio. Isso sugere que a contínua expansão da área pode estar ocorrendo em terras de menor qualidade, o que acaba por diluir a produtividade média por hectare (Lazzarotto; Hirakuri, 2009). Esse resultado possui implicações econômicas relevantes, pois aponta para a redução da eficiência produtiva média e aumento do custo marginal de produção.

Dessa forma, os resultados empíricos evidenciaram que a produtividade da soja apresentou variações significativas entre os estados analisados e ao longo dos anos, confirmando a forte influência das condições climáticas sobre o rendimento agrícola. Além disso, a análise econométrica indicou que as variáveis climáticas, em especial temperatura máxima e média, exercem efeitos estatisticamente significativos sobre o rendimento médio da soja, corroborando os resultados de Pellegrino *et al.* (2007) e Rodrigues (2008). Essa relação demonstra que o desempenho da sojicultura brasileira não depende apenas da expansão da área plantada, mas principalmente da estabilidade das condições meteorológicas.

Os efeitos negativos do aumento de temperatura e da deficiência hídrica sobre a produtividade observados no painel reforçam as projeções de redução da área apta ao cultivo sob cenários de aquecimento global. Desse modo, os dados confirmam a importância de políticas públicas como o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), que, conforme apontado por Rodrigues (2008), auxilia na escolha de períodos e regiões de menor risco para o plantio.

Sob a ótica econômica, os resultados obtidos indicam que a variabilidade climática representa um fator de risco significativo para a estabilidade da produção de soja no Brasil. Considerando a importância da cultura para a geração de renda agrícola e para o desempenho das exportações brasileiras, oscilações na produtividade podem gerar impactos relevantes tanto no nível regional quanto nacional.

Por fim, os resultados obtidos dialogam com as projeções climáticas discutidas por Pellegrino *et al.* (2007) e Rodrigues (2008), que apontam para o aumento da frequência e

intensidade de eventos *El Niño* e *La Niña* nas próximas décadas e alertam para possíveis reduções nas áreas aptas ao cultivo da soja em função do aumento das temperaturas e da deficiência hídrica. A observada volatilidade da produtividade durante o período analisado reforça a necessidade de adoção de tecnologias de mitigação e adaptação, como o plantio direto, a integração lavoura-pecuária e o desenvolvimento de cultivares mais resistentes ao estresse hídrico (Balbinot Júnior *et al.*, 2009; Battisti; Sentelhas, 2015). Esses resultados indicam que a resiliência da sojicultura brasileira depende cada vez mais da combinação entre inovação tecnológica e planejamento climático, confirmando a literatura que aponta o clima como fator estruturante da competitividade e da sustentabilidade do agronegócio nacional.

Nesse sentido, a principal contribuição deste estudo reside na integração entre análise econométrica e variáveis climáticas em escala municipal, permitindo compreender de forma mais detalhada os impactos da variabilidade climática sobre a produtividade agrícola. Ao fornecer evidências empíricas sobre a sensibilidade da produção de soja às oscilações climáticas, o trabalho contribui para o aprimoramento das estratégias de adaptação climática e para a formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade e competitividade do agronegócio brasileiro.

5. Considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo analisar os efeitos das oscilações climáticas sobre a produtividade da soja nos principais estados produtores do Brasil, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná e Rio Grande do Sul, no período compreendido entre 2011 e 2024. Para isso, utilizou-se uma base de dados em painel composta por 1.142 municípios, contemplando variáveis climáticas e produtivas relevantes para a determinação do rendimento médio da cultura.

Por meio dos resultados aqui encontrados, verificou-se que o clima é um fator determinante para a produtividade da soja. O modelo de Efeitos Fixos indicou que as temperaturas extremas (máxima) e o excesso de precipitação causam um impacto negativo no rendimento médio. Além disso, com a análise do painel dinâmico foi possível identificar que o impacto defasado do fenômeno ENOS exerce um efeito negativo sobre a produtividade da soja.

Essas evidências reforçam que a instabilidade climática constitui um dos principais desafios para a sojicultura brasileira, dada a sensibilidade da cultura às variações de temperatura e disponibilidade hídrica. Considerando que a soja é uma das principais *commodities* brasileiras e possui papel estratégico no comércio internacional, compreender sua vulnerabilidade às

oscilações climáticas é importante para assegurar competitividade, estabilidade produtiva e sustentabilidade em um cenário marcado por crescente variabilidade térmica e hídrica.

Do ponto de vista econômico, esses impactos se traduzem em maior volatilidade da produção, aumento dos custos operacionais, redução da rentabilidade dos produtores e instabilidade nas exportações, o que pode afetar o equilíbrio da balança comercial brasileira. Considerando que o complexo soja representa parcela expressiva das exportações nacionais, os efeitos climáticos tornam-se um risco macroeconômico relevante.

Diante desse cenário, a adoção de políticas públicas específicas torna-se essencial. Destacam-se: o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), que orienta o calendário de plantio; o Programa de Seguro Rural (PSR), que reduz a exposição financeira dos produtores; o Plano Safra, com linhas de crédito voltadas à inovação tecnológica; o Plano Agricultura de Baixo Carbono (ABC), que incentiva práticas sustentáveis como plantio direto e integração lavoura-pecuária e investimentos em pesquisa via Embrapa, voltados ao desenvolvimento de cultivares resistentes ao estresse climático. Além disso, o fortalecimento da infraestrutura logística, da assistência técnica e dos sistemas de informação climática é importante para aumentar a eficiência e reduzir vulnerabilidades.

Contudo, este estudo apresenta limitações que devem ser reconhecidas. Entre elas destacam-se a disponibilidade e a qualidade dos dados meteorológicos municipais, a utilização de dados climáticos anuais, que não captam variações intraestacionais relevantes, e a representação simplificada da variável ENOS, que não considera a intensidade dos eventos. Além disso, a ausência de variáveis agronômicas específicas, como práticas de manejo, nível tecnológico, fertilidade do solo e incidência de pragas e doenças, pode restringir a abrangência da análise.

Diante dessas limitações, pesquisas futuras podem avançar por meio da utilização de dados climáticos com maior resolução temporal, da incorporação de modelos espaciais e da inclusão de variáveis agronômicas e tecnológicas. Também se destaca o potencial de estudos que integrem projeções climáticas e agrícolas para estimar impactos futuros das mudanças climáticas sobre a sojicultura, bem como a inclusão de variáveis econômicas relacionadas aos custos de produção, preços e estratégias de gestão de risco.

Referências

AGRITEMPO – **Sistema de Monitoramento Agrometeorológico**. Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br/>. Acesso em: 17 maio 2025.

ALLIPRANDINI, L. F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P. F.; CAVASSIM, J. E.; GABE, H. L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M. N.; OLIVEIRA, M. A. R. de; PITOL, C.; PRADO, L. C.; STECKLING, C. Understanding Soybean Maturity Groups in Brazil: Environment, Cultivar Classification, and Stability. **Crop Science**, v. 49, n. 3, p. 801-808, maio/jun. 2009.

ARELLANO, M. **Panel Data Econometrics**. Oxford university press, 2003.

ARELLANO, M.; BOND, S. Some Tests of Specification for Panel Data: Monte Carlo Evidence and an Application to Employment Equations. **The review of economic studies**, Wiley-Blackwell, v. 58, n. 2, p. 277-297, 1991.

ARELLANO, M.; BOVER, O. Another Look at the Instrumental Variable Estimation of Error-Components Models. **Journal of Econometrics**, v. 68, n. 1, p. 29-51, 1995. ISSN 0304-4076.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; MORAES, A. D.; VEIGA, M. D.; PELISSARI, A.; DIECKOW, J. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, v. 39, n. 6, p. 1925-1933, 2009.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Drought tolerance of Brazilian soybean cultivars simulated by a simple agrometeorological yield model. **Experimental Agriculture**, v. 51, p. 2. p. 285-298, 2015.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003. 110 p.

BLUNDELL, R.; BOND, S. Initial Conditions and Moment Restrictions in Dynamic Panel Data Models. **Journal of econometrics**, Elsevier, v. 87, n. 1, p. 115-143, 1998.

COÊLHO, J. D. SOJA. **Caderno Setorial ETENE**, v. 7, 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 12, décimo segundo levantamento, setembro 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil 2022**. 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**. v. 1, safra 2013/14, n. 6, sexto levantamento, março/2014.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 8 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 48).

FAVERO, G. R. **Influência dos Eventos Climáticos Atípicos de Precipitação e Temperatura sobre a Produção de Grãos no Estado do Paraná no período de 1974 a 2022**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas), Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Francisco Beltrão, 2025.

FERREIRA, G. L. M.; TONIN, J. M.; ALVES, A. F. Impacts of El Niño southern oscillation on hedge strategies for Brazilian corn and soybean futures contracts. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, p. e250643, 2022.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica**: 5ª Edição. Porto Alegre. AMGH Editora, 2011.

HIRAKURI, M. H. O contexto econômico da produção de soja. In: SEIXAS, C. D. S. et al. (Eds.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. Cap. 1, p. 15-31.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Produção Agrícola Municipal. **Tabela 1612 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias.** Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 17 maio 2025.

JIANG, J.; FORTENBERY, T. R. El Niño and La Niña induced volatility spillover effects in the U.S. soybean and water equity markets. **Applied Economics**, v. 51, n. 11, p. 1133-1150, 2019.

LANDGRAF, L. Brasil lidera e é referência no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para produção de soja. **Embrapa Soja**. 2023.

LAZZAROTTO, J. J.; HIRAKURI, M. H. **Evolução e Perspectivas de Desempenho Econômico Associadas com a Produção de Soja nos Contextos Mundial e Brasileiro.** Londrina: Embrapa Soja, 2009. 57 p. (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937; n. 319).

MAPA. **Histórico de Perdas na Agricultura Brasileira 2000-2021.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Secretaria de Política Agrícola, 2022.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Niño 3.4 SST Index.** Disponível em: <https://www.noaa.gov/>. Acesso em: 06 set. 2025.

NOGUEIRA, A. D. S. S.; NAGAI, V. Deficiência hídrica simulada nos diferentes estádios de desenvolvimento de um cultivar precoce de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 47, p. 9-14, 1988.

PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; MARIN, F. R. Mudanças Climáticas Globais e a Agricultura no Brasil. **Revista Multiciência**, Campinas, n. 8, p. 139-162, maio 2007.

RIO, A.; SIBALDELLI, R. N. R.; CRUSIOL, L. G. T.; CARVALHO, J. F. C.; FERREIRA, L. C.; NEIVERTH, W.; PROCOPIO, S. O.; ALMEIDA, A. M. R.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela soja em dois arranjos de plantas. In: **JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA**, 8., 2012, Londrina. Anais... Londrina: Embrapa Soja, 2012. p. 17-19.

RODRIGUES, R. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil.** São Paulo, 2008.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; ZENI, R.; RODRIGUES, L. A. Clima e produtividade da soja: efeitos nas produtividades potencial, atingível e real clima e produtividade. **Boletim de Pesquisa**. Fundação MT, n. Jan. 2015, p. 1-15, 2015.

SILVA, F.; BORÉM, A.; SEDIYAMA, T.; CÂMARA, G. **Soja: do plantio à colheita.** 2. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2022.

VIEIRA FILHO, J. E. R. **A Cadeia produtiva de soja e o desenvolvimento econômico e regional no Brasil.** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). Texto para Discussão, n. 3042, 2024.