

Resiliência agrícola brasileira em um contexto de mudanças climáticas

Lucas Silva Ramos

Doutor em Agronegócios
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
lucas_smramos@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3907-1397>

Leandro Vinícios Carvalho

Professor Doutor em Economia Aplicada
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
leandrocarvalho@ufgd.edu.br
<https://orcid.org/0000-0002-8693-7579>

Jonathan Gonçalves da Silva

Professor Doutor em Economia Aplicada
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
jonathandasilva@ufgd.edu.br
<https://orcid.org/0000-0002-1601-8534>

Roselaine Bonfim de Almeida

Professora Doutora em Economia Aplicada
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
roselainealmeida@ufgd.edu.br
<https://orcid.org/0000-0002-2195-0035>

Resiliência agrícola brasileira em um contexto de mudanças climáticas

RESUMO

Objetivo – o trabalho tem como objetivo analisar como a produtividade agrícola pode ser afetada diante das mudanças climáticas e se a agropecuária brasileira apresenta fontes de resiliência a essas mudanças.

Metodologia – para a análise utilizou-se modelos econométricos de séries temporais, como o Vetor Autorregressivo (VAR) e o Modelo de Correção de Erros Vetoriais (VEC).

Originalidade/relevância – o trabalho é relevante porque aborda os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura no Brasil, tema central para a segurança alimentar e para a formulação de políticas públicas. Sua originalidade está em combinar variáveis como temperatura, pragas, uso de agrotóxicos e produtividade em uma análise econométrica.

Resultados – observou-se que existe uma relação de longo prazo entre as variáveis temperatura, sinistros por pragas, agrotóxicos e produtividade. Por meio da Causalidade de Granger foi possível observar que a temperatura causa tanto mudanças no uso de agrotóxicos quanto mudanças na produtividade, e que choques na variável temperatura causam oscilações na produtividade e no consumo de agrotóxicos.

Contribuições teóricas/metodológicas – ao combinar variáveis como temperatura, pragas, uso de agrotóxicos e produtividade em uma análise econométrica com modelos VEC e causalidade de Granger, essa abordagem contribui para uma compreensão mais integrada dos mecanismos de adaptação do setor agropecuário, conferindo valor analítico ao estudo.

Contribuições sociais e ambientais – o estudo contribui socialmente ao apoiar a segurança alimentar e orientar políticas públicas no Brasil. Também evidencia impactos na saúde pública ao relacionar temperatura e uso de agrotóxicos. No campo ambiental, analisa como mudanças climáticas afetam as pragas. Assim, fornece base para práticas agrícolas mais sustentáveis e resilientes.

PALAVRAS-CHAVE: Agrotóxicos. Mudanças Climáticas. Resiliência.

Brazilian agricultural resilience in the context of climate change

ABSTRACT

Objective – this study aims to analyze how agricultural productivity may be affected by climate change and whether Brazilian agriculture presents sources of resilience to these changes.

Methodology – the analysis employs econometric time series models, such as the Vector Autoregression (VAR) and the Vector Error Correction Model (VEC).

Originality/Relevance – the study is relevant because it addresses the impacts of climate change on agriculture in Brazil, a central issue for food security and public policy formulation. Its originality lies in combining variables such as temperature, pests, pesticide use, and productivity in an econometric analysis.

Results – the findings indicate a long-term relationship among temperature, pest-related losses, pesticide use, and productivity. Through Granger Causality, it was observed that temperature drives changes in both pesticide use and productivity, and that shocks in temperature lead to fluctuations in productivity and pesticide consumption.

Theoretical/Methodological Contributions – by combining variables such as temperature, pests, pesticide use, and productivity in an econometric framework using VEC models and Granger causality, this approach contributes to a more integrated understanding of adaptation mechanisms in the agricultural sector, adding analytical value to the study.

Social and Environmental Contributions – the study contributes socially by supporting food security and informing public policies in Brazil. It also highlights public health implications by linking temperature and pesticide use. Environmentally, it examines how climate change affects pest dynamics, providing a basis for more sustainable and resilient agricultural practices.

KEYWORDS: Pesticides. Climate Change. Resilience.

Resiliencia agrícola brasileña en un contexto de cambio climático

RESUMEN

Objetivo – el trabajo tiene como objetivo analizar cómo la productividad agrícola puede verse afectada por el cambio climático y si el sector agropecuario brasileño presenta fuentes de resiliencia frente a estos cambios.

Metodología – para el análisis se utilizaron modelos econométricos de series temporales, como el Vector Autorregresivo (VAR) y el Modelo de Corrección de Errores Vectoriales (VEC).

Originalidad/Relevancia – el trabajo es relevante porque aborda los impactos del cambio climático sobre la agricultura en Brasil, un tema central para la seguridad alimentaria y la formulación de políticas públicas. Su originalidad radica en combinar variables como temperatura, plagas, uso de agroquímicos y productividad en un análisis econométrico.

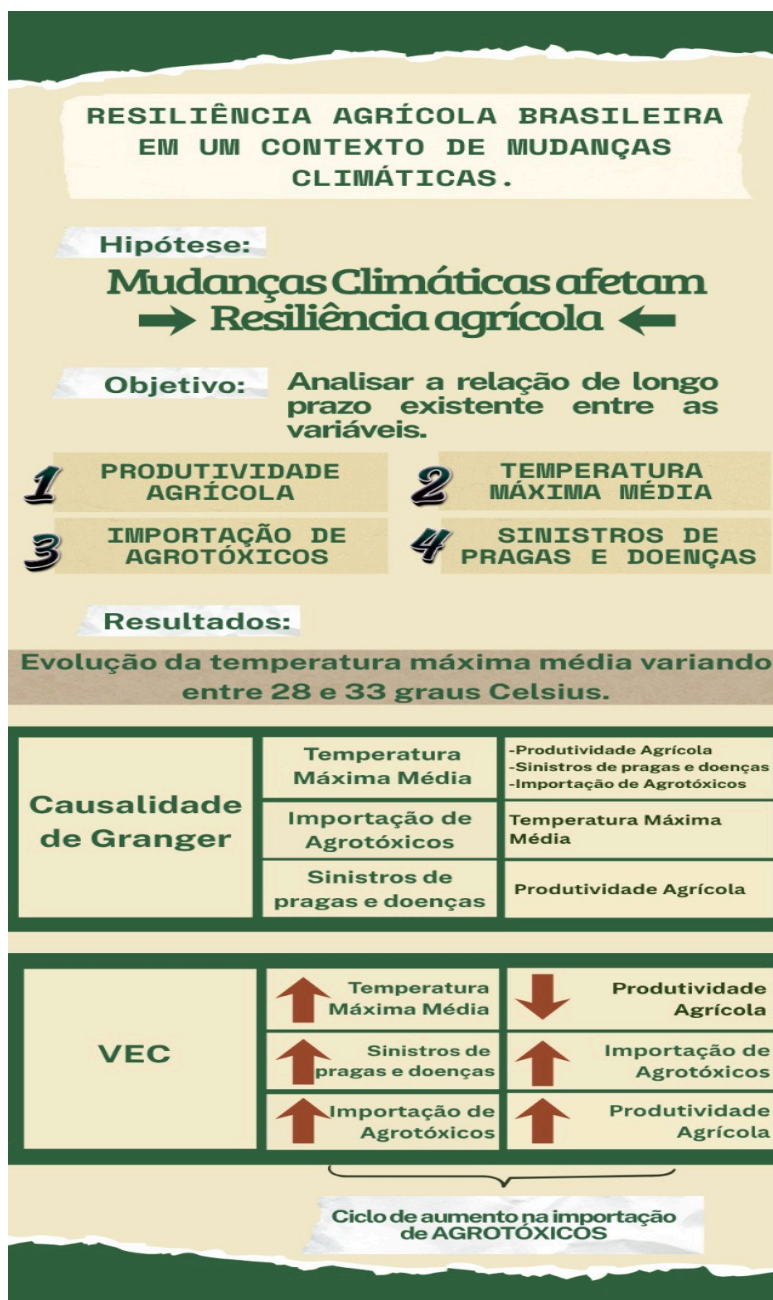
Resultados – se observó que existe una relación de largo plazo entre las variables temperatura, pérdidas por plagas, agroquímicos y productividad. Mediante la Causalidad de Granger se pudo observar que la temperatura provoca cambios tanto en el uso de agroquímicos como en la productividad, y que choques en la variable temperatura generan oscilaciones en la productividad y en el consumo de agroquímicos.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas – al combinar variables como temperatura, plagas, uso de agroquímicos y productividad en un análisis econométrico con modelos VEC y causalidad de Granger, este enfoque contribuye a una comprensión más integrada de los mecanismos de adaptación del sector agropecuario, aportando valor analítico al estudio.

Contribuciones Sociales y Ambientales – el estudio contribuye socialmente al apoyar la seguridad alimentaria y orientar políticas públicas en Brasil. También evidencia impactos en la salud pública al relacionar la temperatura con el uso de agroquímicos. En el ámbito ambiental, analiza cómo el cambio climático afecta a las plagas, proporcionando una base para prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes.

PALABRAS CLAVE: Agrotóxicos. Cambio Climático. Resiliencia.

RESUMO GRÁFICO



1 INTRODUÇÃO

A produção de alimentos no mundo aumentou em função da necessidade humana e foi impulsionada devido aos conhecimentos adquiridos com o tempo, ao preço e a disponibilidade de recursos, porém foi preciso adaptar as diferentes culturas frente as diversidades climáticas (Tilman; Clark, 2014). No último século o crescimento da produção agrícola nos países baseou-se em termos de aumento da área, de investimento em desenvolvimento de tecnologias e de insumos agrícolas, com destaque para o uso de agrotóxicos (Tilman *et al.*, 2011). Estima-se a utilização de aproximadamente 2,5 milhões de toneladas no mundo anualmente, conforme dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (2021).

O Brasil, segundo dados da FAOSTAT (2022), foi o maior consumidor de agrotóxicos em número absoluto no ano de 2022, dado o tamanho da sua produção agropecuária, uma vez que é um dos maiores produtores de soja, milho e cana-de-açúcar; além de ser um dos maiores produtores de suínos, bovinos e de frango. Desta forma, é compreensível que o país seja um dos maiores consumidores de agrotóxicos em volume, contudo, ao relacionar o valor gasto por hectare, o país está atrás de países como o Japão, Alemanha e França (FAOSTAT, 2022).

O uso de agrotóxicos apresenta efeitos discrepantes conforme estudo de Clark e Tilman (2017), pois apresenta risco de intoxicação, por doenças, bem como através da contaminação do solo e do meio ambiente de forma geral. Contudo, o seu uso foi essencial para aumentar a produção de alimentos no mundo, sendo uma das fontes para garantir a segurança alimentar e mitigar os efeitos de pragas.

Sabe-se que as mudanças climáticas poderão alterar a disseminação das pragas, isso, conforme informações do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2021). Desta forma, poderá haver alterações no volume gasto com agrotóxicos, nas doses aplicadas e na eficácia dos defensivos, isso em decorrência das mudanças climáticas (Koleva e Schneider, 2009; Rhodes e Mccarl, 2020).

As consequências ocorridas por meio das questões climáticas poderão afetar a produção, sobretudo por meio de surtos de pragas, conforme Bobea *et al.* (2021), que destacam que a agricultura global se tornou mais vulnerável às mudanças climáticas. Dessa forma, é importante e necessário identificar a relação entre elas e o aumento do surto de pragas no contexto brasileiro, além de analisar as alternativas de manter a produtividade agrícola.

Desta forma, este trabalho analisa a relação de equilíbrio de longo prazo entre a produtividade agrícola, a temperatura máxima média, a importação de agrotóxicos e o sinistro de pragas e doenças, sendo essas duas últimas variáveis, de resiliência em um contexto de mudanças climáticas e surgimento de pragas. Como hipótese central do trabalho, foi analisado se as mudanças no clima afetariam as resiliências agrícolas no contexto brasileiro.

Assim, foram analisadas: i) as trajetórias das variáveis temperatura máxima média, sinistros agrícolas para pragas, produtividade e importação e utilização de agrotóxicos; ii) a relação de longo prazo entre as variáveis e a Causalidade de Granger, permitindo avaliar como as variações de uma variável interferem nas demais; e iii) um modelo de séries de tempo para analisar o comportamento de longo prazo das variáveis selecionadas.

O trabalho está dividido em quatro seções além desta introdução. Na segunda seção apresenta-se a revisão de literatura. Em seguida é apresentada a metodologia utilizada. Na

quarta seção os resultados e as discussões e, por fim, na quinta seção são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 UTILIZAÇÃO DE AGROTÓXICOS E SINISTROS AGRÍCOLAS EM UM CONTEXTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A produção agrícola é influenciada pela tecnologia, pelo investimento, pela gestão, pelos insumos e pelo clima (Embrapa, 2018), sendo esse último um dos fatores sobre o qual o produtor não detém controle. Ademais, o clima está relacionado com a localização das produções das culturas e com infestações de pragas nas lavouras. Desta forma, diante das mudanças climáticas têm-se como algumas de suas consequências perdas na produção e a dispersão de pragas entre as lavouras. Neste sentido, formas de controle de pragas poderão ser utilizadas, por exemplo, através do emprego de agrotóxicos e dos seguros agrícolas como ferramentas para a promoção da resiliência na atividade agropecuária.

As mudanças climáticas afetarão diversos países economicamente, bem como o Brasil, quando consideradas as produções agropecuárias que sofrerão com os novos contextos, podendo haver quedas na produção e comprometer as duplas safras anuais brasileira em algumas regiões, conforme apresentado por Carauta et al. (2021). Devido a isso, as mudanças climáticas atraem a atenção de pesquisadores e dos governos, que buscam mitigar seus efeitos ambientais, econômicos e sociais.

Ao longo do século XX, a introdução de agrotóxicos foi utilizada como principal forma de controle de pragas na agricultura, isso para prevenir, destruir ou mitigar as pragas, em busca de garantir o rendimento das produções agrícolas (Delcour *et al.*, 2015). A resistência das pragas aos agrotóxicos pode ser alterada em função do clima, conforme Zhang *et al.* (2015), o aquecimento climático promove a resistência das pragas a pesticidas através da hibernação, sendo que nos insetos com locais propícios de hibernação, os pesticidas possuíam uma menor eficácia quando comparado a locais sazonais. Ademais, a temperatura afeta a resistência das ervas daninhas a herbicidas (Godar *et al.*, 2015; Matzrafi *et al.*, 2016; Ganie, Jugulam e Jhala, 2017; Stahlman *et al.*, 2018).

Considerando as consequências não uniformes das mudanças climáticas, existem dificuldades para prever todas as ligações entre essas mudanças e o uso de agrotóxicos (Harvell *et al.*, 2002). Entretanto, estudos apontam que em um contexto de alterações no clima, os valores do uso de agrotóxicos, em termos de quantidade e/ou doses, podem ser ampliados, para manter o rendimento das colheitas. Conforme Delcour *et al.* (2015), em termos das mudanças climáticas, o aumento de temperatura global e alterações no regime de chuvas são os principais determinantes da infestação das lavouras por pragas.

Quando relacionado ao uso de agrotóxicos, é evidente que seu padrão varia conforme a cultura, a necessidade do produtor e as condições climáticas (Popp *et al.*, 2013). Além disso, está relacionada à ocorrência de pragas nas áreas onde estão localizadas as lavouras (Bebber et al., 2014); ao custo-benefício da sua utilização (Popp *et al.*, 2011) e às mudanças climáticas (Delcour *et al.*, 2015). Desta forma, os estudos a seguir relacionam as variáveis climáticas ao uso de agrotóxicos.

Diversas são as variáveis climáticas que influenciam a disseminação de pragas e, por consequência, o uso de agrotóxicos. Considerando a temperatura mínima diária e sua correlação com a distribuição e sobrevivência de pragas em regiões temperadas, Ziska *et al.* (2014),

analisaram as aplicações médias de agrotóxicos nessas regiões dos EUA. Os autores encontram uma correlação significativa entre temperatura mínima diária e a quantidade de agrotóxicos por hectare. Assim, existe uma relação entre o clima e a disseminação de pragas. Além do uso de agrotóxicos, outras formas de resiliência, como o seguro agrícola, podem ser utilizadas para suprir as necessidades da produção.

O seguro agrícola é considerado uma estratégia de mitigação aos danos causados por eventos adversos na agropecuária, uma vez que reduzem as perdas de produção e as perdas econômicas (Panda *et al.*, 2017). Assim, o seguro desempenha papel fundamental na promoção da resiliência na agropecuária diante as alterações climáticas. Conforme Falco *et al.* (2014), em um contexto climático instável há o aumento da demanda por seguros na tentativa de atenuar a exposição ao risco na atividade agropecuária.

Buscando relacionar algumas variáveis, Norton *et al.* (2016) examinaram a aplicação de seguro de um índice climático como estratégia de manejo de pragas com dois modelos nos EUA para o milho: o primeiro considera a perda de safra devido a incidência de doenças (seguro cultura); e o segundo garantia pelo uso de agrotóxicos (seguro pesticida). Conforme os autores, a gestão de riscos com seguro de índice meteorológico funcionaria como um complemento às estratégias existentes de gestão de riscos utilizando agrotóxicos.

No contexto brasileiro, Tabosa, Viera Filho e Vasconcelos (2021), analisaram o impacto das políticas de seguro agrícola nas regiões brasileiras, com ênfase na produtividade dos produtores rurais com seguro, tendo como base, dados do Banco Central para os anos de 2016 e 2017. Assim, utilizando o método de *Propensity Score Matching*, os autores chegaram à conclusão de que os produtores rurais com seguros possuíam nível médio de produtividade maior do que os sem seguro.

Assim, em um contexto de alteração climática, em resposta, pode haver o aumento na utilização de agrotóxicos devido aos novos cenários de clima, que por sua vez pode desencadear o aumento na utilização de seguros como forma de resposta. Por fim, as evidências indicam que há uma inter-relação entre produtividade, clima, seguro e uso de agrotóxicos. Desta forma, são apresentadas na sequência, estudos que analisaram estas relações utilizando a metodologia de séries de tempo.

Para exemplificar os diversos campos de estudo, como na área da saúde e nas ciências econômicas, que utilizam do ferramental de séries temporais em suas análises, assim no Quadro 1 são apresentados trabalhos que se utilizaram de séries de tempo com as variáveis de interesse deste estudo.

Quadro 1 – Trabalhos que utilizaram de variáveis de interesse do estudo

Autores	Variáveis, período e objetivos	Principais conclusões
Adami e Ozaki (2012)	Seguros. Janeiro de 2003 a abril de 2011. Prever o comportamento dos prêmios diretos e calcular o montante adequado de subvenção.	Os resultados mostram que os valores alocados ao PSR, em 2011, serão insuficientes para manter a tendência de crescimento do seguro rural.
Dogan e Kan (2019)	Temperatura e rendimento. 1997 a 2016. Efeitos das mudanças de temperatura no rendimento do trigo.	Foi determinada a relação de causalidade de longo prazo entre temperatura e a produtividade do trigo.
Ogino e Bacha (2021)	Agrotóxicos e produtividade. 1990 a 2016. O objetivo do estudo foi analisar o comportamento do consumo de agrotóxicos e a produtividade.	Existem relações de longo prazo entre os consumos de agrotóxicos por hectare de lavouras entre o Brasil, EUA e União Europeia, e o consumo de agrotóxicos e a produtividade das lavouras no Brasil.
Tabosa e Vieira Filho (2021)	Número de apólices, área plantada, importância assegurada e produtividade dos produtores assegurados de 2006 a 2018. Avaliar o impacto do Programa de Subvenção na área plantada e na produtividade dos produtores assegurados no Brasil.	O número de produtores e a importância assegurada impactaram positivamente, no curto prazo, a produtividade do assegurado, sendo esse efeito prorrogado até seis anos, em média.
Chandio <i>et al.</i> , (2022)	Temperatura e Produção. 1988 a 2014. Examinar os impactos das mudanças climáticas (precipitação média anual e a temperatura média anual) na produção de cereais, em Bangladesh	Existem ligações estáveis a longo prazo entre as variáveis. A temperatura tem um efeito na produção de cereais no curto prazo. A causalidade de Granger indicou que não existe uma associação causal bidirecional significativa entre a produção de cereais e temperatura e precipitação. A conexão entre a produção de cereais e a temperatura é unidirecional, mostrando que a produção de cereais é influenciada pela temperatura.
Bomdzele e Molua (2023)	Temperatura, agrotóxicos e produção (cacau). 1961 a 2021	Avaliar a influência dos parâmetros climáticos e não climáticos no desempenho do cacau nos Camarões. Os parâmetros climáticos explicam as variações na produção de cacau. Mais especificamente, os resultados a curto prazo revelam que a temperatura e a quantidade de agrotóxicos aumentam significativamente o rendimento da cultura, enquanto a precipitação o diminui substancialmente.

Fonte: resultado da pesquisa.

As análises de séries de tempo buscam relacionar as variáveis em diversos contextos, sendo utilizadas, por exemplo, para o estudo de análises do passado e presente e auxiliam na previsão de acontecimentos futuros (Vishwas e Patel, 2020). Conforme as evidências encontradas, existe uma relação de longo prazo entre agrotóxicos e produtividade, conforme Ogino e Bacha (2021), o seguro pode aumentar a produção, segundo Tabosa e Vieira Filho (2021) o clima apresenta relação com a produtividade.

Desta forma, este trabalho corrobora com a literatura existente adicionado à análise no contexto brasileiro para as variáveis, com o objetivo principal de analisar o efeito do clima (temperatura) nas variáveis de resiliência apresentadas, além disso, será analisada a produtividade, o que foi pouco explorado para o contexto brasileiro. Assim, na próxima seção apresenta-se a metodologia empregada deste estudo.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho foram analisadas variáveis que apresentam alguma relação no contexto de produção agrícola, mudanças climáticas e possíveis surtos de pragas, utilizando para

esse último, variáveis proxy de sinistros agrícolas para pragas e importação de agrotóxico, sendo essas apresentadas a seguir no Quadro 2. Cabe destacar que a demanda por agrotóxicos é apresentada por meio da quantidade de importação, pois a utilização total de agrotóxicos mensais, no contexto brasileiro não possui séries temporais disponíveis.

Quadro 2 – Variáveis da análise para o período de janeiro de 2013 a dezembro de 2022

Variável	Fonte dos dados e unidade de medida	Definição
Temperatura máxima médias	INMET °C	Logaritmo da média máxima temperatura brasileira.
Importação de agrotóxico	COMEXSTAT Toneladas	Logaritmo da importação de agrotóxicos.
Contratos de sinistro	BANCO CENTRAL Quantidade de contratos	Logaritmo da quantidade de contratos de sinistro de pragas.
Produtividade agrícola*	SIDRA-IBGE Produção por hectare	Logaritmo da produtividade das lavouras.

Fonte: elaborado pelo autor.

Foram selecionadas 34 culturas são: abacate, algodão-arbóreo, algodão-herbáceo, alho, amendoim, arroz, aveia, batata, cacau, café, cana, castanha, centeio, cevada, coco, feijão, fumo, goiaba, laranja, limão, maçã, malva, mamona, mandioca, manga, maracujá, milho, soja, sorgo, tangerina, tomate, trigo e uva, com base no trabalho de Ogino e Bacha (2021).

Ainda, segundo o relatório IPCC, haverá o aumento de temperatura para o Brasil até o final do século XXI, além das mudanças no padrão de incidência de chuvas e nos períodos de secas. Desta forma, como variável climática, foi escolhida no presente trabalho a temperatura média máxima. A temperatura foi realizada a média no contexto brasileiro com base nos dados mensais do INMET. Os valores de contratos de sinistros foram utilizados o número para todas as culturas selecionadas.

3.1 Modelos de VAR e VEC

O VAR (Vetor Autoregressivo) é um método que considera um conjunto de variáveis endógenas e exógenas, onde cada variável é explicada por seus próprios valores defasados e pelos valores defasados das outras variáveis do modelo. Quanto ao modelo, devem ser observadas as relações de causalidade entre as variáveis, considerando sua exogeneidade ou endogeneidade, sendo essa determinação de restrição fundamental para modelos mais complexos (Sims, 1980).

Os modelos de séries temporais necessitam de averiguação de presença de raiz unitária, assim, foram utilizados os testes de ADF (Dickey; Fuller, 1979), o teste de Phillips e Perron (1988) e o KPSS (Kwiatkowski *et al.*, 1992). Além disso, foi realizado o teste de cointegração pelo método proposto por Johansen (1988), considerando que as séries apresentam cointegração, o Modelo de Vetores Autoagressivos com Correção de Erros é apresentado como mais indicado em substituição ao Vetor Autorregressivo (VAR). Em síntese, o modelo VAR pode ser apresentado como:

$$A_0\Delta X_t = \alpha + \Pi X_t + \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Em que:

$$\Pi = - (I - A_1 - \dots - A_p)$$

$$\Gamma_i = - (A_{t+1} + \dots + A_p)$$

Assim, para $i = 1, \dots$, até a defasagem p . X_t é o vetor com n variáveis para A_1 e A_p são as matrizes de parâmetros ($n \times n$), I é uma matriz identidade ($n \times n$), α é um vetor de constantes, e ε_t são valores não correlacionadas entre si.

Quando as variáveis não são estacionárias, mas apresentam cointegração de ordem d ($I(d)$), o modelo a ser utilizado para a análise é o modelo de Vetores Autorregressões com Correção de Erros (VEC).

Nesta análise, foi utilizado o modelo VEC. A seguir, é apresentado os procedimentos metodológicos do trabalho.

3.2 Testes econométricos de raiz unitária, cointegração e Causalidade de Granger

Com séries estacionárias é permitido proceder inferência estatísticas sobre os parâmetros estimados com base na realização de um processo estocástico, sendo assim, é necessário verificar quais das variáveis utilizadas são estacionárias, pois tal fato assegura que as raízes da equação estejam fora do círculo unitário complexo e que possuam média, variância e covariância constantes ao longo do tempo (LÜTKEPOHL, 2004). No Quadro 3 abaixo são apresentados os testes que foram realizados nas variáveis.

Quadro 3 – Descrição dos Testes de Raiz Unitária

Teste	Descrição	Hipótese Nula
Teste de Dickey e Fuller GLS	Um dos métodos mais recentes a partir do modelo de Dickey e Fuller em que há menor probabilidade de se cometer o erro do tipo II.	$H_0: \gamma = 0$ (tem raiz unitária) $H_1: \gamma < 0$ (AR (1) estacionário)
Teste NG Perron	Neste teste admite-se que já se tenha expurgado alguma possível tendência e também realizar estimativas por meio de simulações Monte Carlo, que possibilitam um considerável ganho.	$H_0: \gamma = 0$ (tem raiz unitária) $H_1: \gamma < 0$ (AR (1) estacionário)
Teste KPSS	O teste KPSS de Kwiatkowski, Phillips, Schimidt e Shin (1992) testa a hipótese nula de estacionariedade da série contra a de presença de raiz unitária, sendo que o erro nesse teste não é considerado um ruído branco.	$H_0: y_t$ é estacionária $H_1: y_t$ é não estacionária.

Fonte: Elaborados pelos autores a partir de Bueno (2008).

Normalmente as variáveis econômicas não são estacionárias, e ao serem diferenciadas, tornam-se integradas de primeira ordem, tal ato de diferenciar as variáveis acaba por gerar a perda de informações de longo prazo, devendo por essa razão ser utilizado o modelo de correção de erros, conforme sugere Engle e Granger (1987) com o intuito de se recuperar estas informações perdidas pela diferenciação das variáveis.

Para identificar a ordem de integração, foi utilizado o teste de Johansen. Conforme Engle e Granger (1987), a cointegração referem-se às análises de longo prazo das variáveis. Enders (2003) argumenta que a combinação linear entre as variáveis for igual a zero, então, há equilíbrio de longo-prazo. Para a presente análise estatística utilizou-se a estatística λ -traço, elaborada por Johansen (1988). Conforme Enders (2003), a estatística λ -traço é realizada por meio de uma matriz que estabelece os efeitos contemporâneos de um choque não antecipado de uma variável sobre outra. Desta forma, averigua-se o número de raízes diferentes de zero na matriz, sendo esse o número de vetores de cointegração entre as variáveis do sistema.

Para a análise da causalidade de Granger, assume-se apenas as causas no presente, com base em dados do passado. Desta forma, a causalidade de Granger (1980), pode ser definido por: o passado que pode causar o presente.

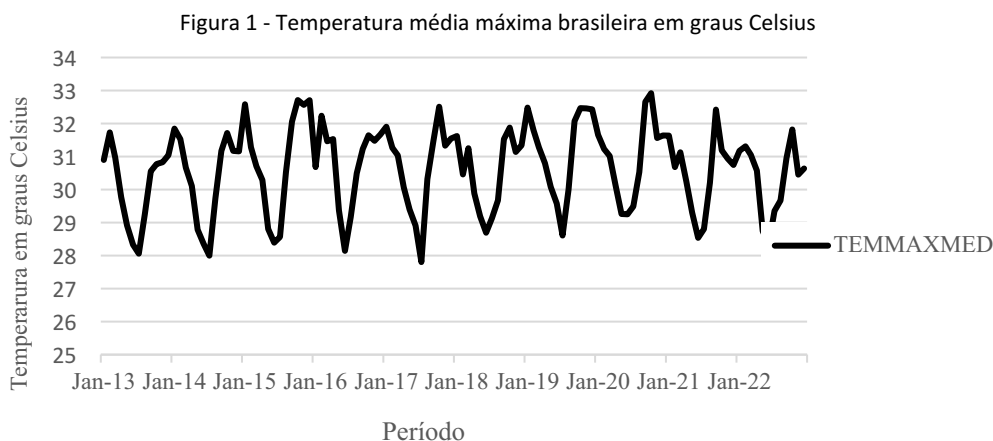
Desta forma, existem quatro casos diferentes de causalidade de Granger que poderão ser apresentados: unilateral de Y para X (a primeira causa a segunda), unilateral de X para Y (a segunda causa a primeira), simultaneidade (uma causa a outra) e independência (sem causalidade).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados do trabalho, primeiramente, são apresentadas as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas no modelo, na sequência os testes econométricos de raiz unitária e de cointegração. Posteriormente, os resultados para as análises econométricas, por fim, as discussões sobre os resultados.

4.1 Análise da estatística descritiva dos dados utilizados

Dentre as variáveis climáticas, foi selecionada a temperatura máxima média, visto que a temperatura no Brasil poderá elevar-se diante das mudanças no clima. A Figura 1 apresenta os valores para o período.

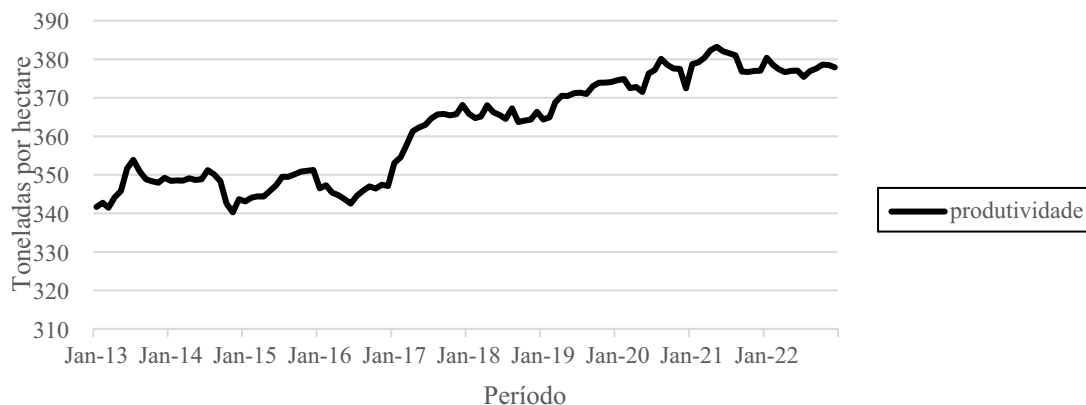


Fonte: Elaborado pelo autor com base dos dados INMET (2023).

Conforme demonstrado na Figura 1, existe um ciclo de temperatura entre as estações, existindo uma variação entre 28°C e 33°C, sendo no contexto brasileiro os verões mais quentes (21 de dezembro a 21 de março) e temperaturas mais baixas no inverno (21 de junho a 23 de setembro).

Conforme apresentado anteriormente, a temperatura apresenta relação com a produção agrícola (Dogan e Kan, 2019; Chandio *et al.*, 2022). Desta forma, a seguir é apresentada a produtividade para o mesmo período na Figura 2.

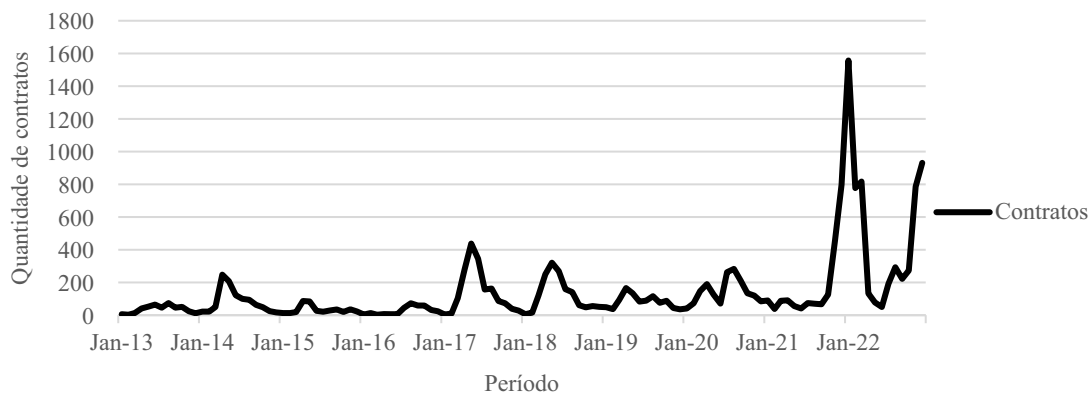
Figura 2 - Produtividade das culturas selecionadas para o período de 2013 a 2022



Fonte: Com base nos dados da Pesquisa Agrícola Municipal (2023).

Conforme apresentado na Figura 2, houve um aumento na produtividade no contexto brasileiro quando considerado o período inicial (2013) ao final (2022) de 10,61%. Os sinistros agrícolas e o agrotóxico podem ser apresentados como fatores que apresentam uma relação com a produtividade (Ogino e Bacha, 2021; Tabosa e Vieira Filho, 2021; Chandio *et al.*, 2022; Bomdzele e Molua, 2023). Assim, a seguir, a Figura 3, apresenta as variáveis de sinistros agrícolas no contexto brasileiro para o mesmo período.

Figura 3 - Quantidade de contratos de sinistro

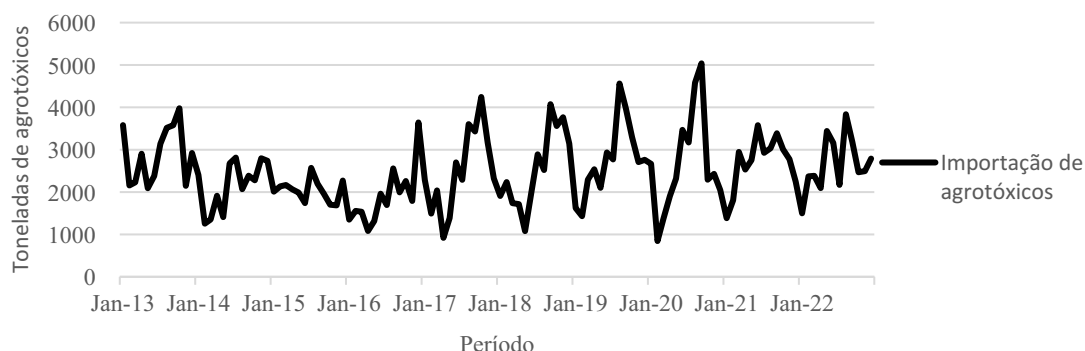


Fonte: Com base dos dados do Banco Central (2023).

Conforme a Figura 3, a quantidade de sinistros para pragas e doenças agrícolas apresentou suas máximas principalmente nos meses de maio. Cabe destacar uma maior expansão no número de contratos no último ano dos dados, sendo as do milho e da cebola as duas principais culturas com evento sinistrante com 7.475 e 206, respectivamente, isso devido a vulnerabilidade das culturas a pragas agrícolas.

O seguro poderá desempenhar papel fundamental como resiliência as mudanças climáticas, assim como o uso de agrotóxico. Desta forma, é apresentada a seguir a quantidade de agrotóxico importada para o mesmo período, na Figura 4.

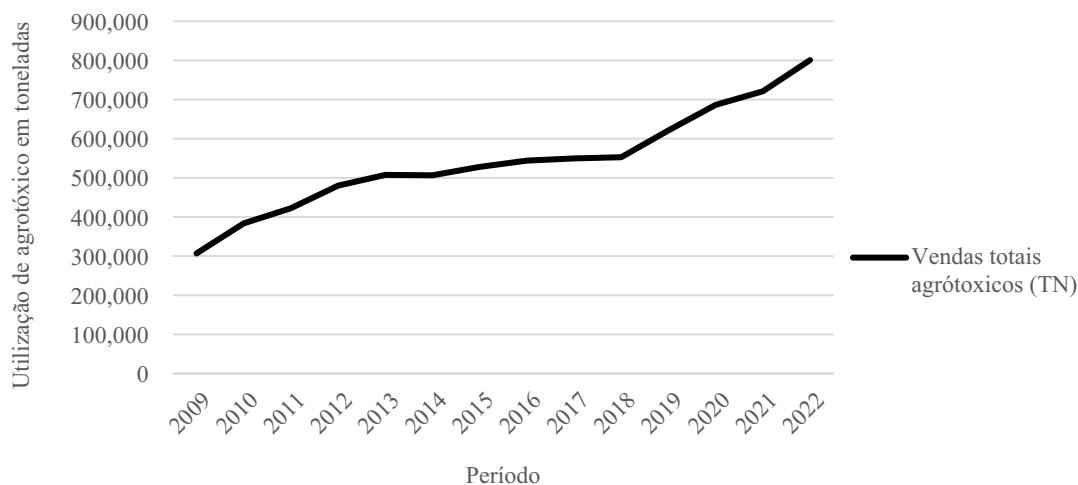
Figura 4 - Quantidade de agrotóxico importado em toneladas para o período de 2013 a 2022



Fonte: Com base dos dados do Comexstat (2023).

Conforme a figura 4, a importação de agrotóxico apresenta valores de até 5.037 toneladas, cabendo destacar uma participação significativa do montante utilizado no contexto brasileiro (produção nacional e importação), na Figura 5 é apresentado essa utilização no Brasil.

Figura 5 - Utilização de agrotóxico no Brasil entre 2009 a 2022.



Fonte: Ibama (2023).

Conforme apresentado na Figura 5, há uma tendência de maior consumo de agrotóxicos no decorrer dos anos. Ainda conforme dados do Ibama (2023), em 2022, a produção nacional representou 664 mil toneladas e a importação de agrotóxicos foi de 283 mil toneladas no mesmo ano, corroborando como uma variável que representa um montante considerável no contexto brasileiro.

4.2 Resultados dos testes de raiz unitária e Cointegração de Johansen

Com relação a estacionariedade das séries apresentadas, foram realizados os testes de DF/GLS, Perron e KPSS para as variáveis produtividade, sinistros, temperatura e agrotóxicos. As variáveis podem ser consideradas estacionárias na primeira diferença ao nível de 10%, para pelo menos dois testes cada. Desta forma, com a estacionariedade averiguada, foi realizado na sequência o teste de cointegração. A existência de cointegração é investigada utilizando a metodologia de Johansen (1988). A seguir, na Tabela 1 é apresentado o resultado da análise.

Tabela 1 - Vetores de cointegração

r_0	λ traço	p-valor
0	*128,8398	0,0000
1	*62,06389	0,0000
2	*22,31163	0,0040
3	1,648354	0,1992

Fonte: Resultado de pesquisa.

Notas: *significativo a 1%, **significativo a 5% e ***significativo a 10%.

O teste foi realizado na ordem de: Temperatura média máxima, sinistros, agrotóxicos e produtividade. Cabe destacar que foi realizado o teste (AIC) para definir o número de defasagens do modelo. Como demonstrado na Tabela 2, existem até dois vetores de cointegração para o nível de significância de 10%. Assim é possível inferir que existe uma relação de longo prazo entre as variáveis selecionadas.

4.4 Causalidade de Granger

Em síntese, a Causalidade de Granger analisa se uma variável causa a outra do passado para o presente. Para verificação, foi utilizado os mesmos critérios apresentados anteriormente de sequência dos dados. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Teste de Causalidade de Granger

Hipótese nula	Obs	F-Statistic	Prob
Agrotóxico não causa temperatura	117	17,4865	0,000007
Temperatura não causa agrotóxico		5,62817	0,0047
Temperatura não causa sinistro	117	3,92123	0,0226
Temperatura não causa produtividade	117	2,39272	0,0960
Sinistro não causa agrotóxico	117	3,54483	0,0322

Fonte: resultado da pesquisa. Nível de significância de 10%.

Observando a Tabela 3, é possível afirmar que existem evidências que variações de temperatura causam no sentido de Granger em agrotóxico, sinistro e produtividade. Além disso, sinistro causa agrotóxico e agrotóxico causa temperatura. Os resultados para temperatura e agrotóxicos atendem as expectativas, como argumentado por Zhang (2021), que a temperatura influencia a resistência das pragas, por consequência, influenciaria na utilização de agrotóxico. Assim, como a temperatura impacta a produção (Bomdzele e Molua, 2023; Dogan e Kan, 2019; Chandio *et al.*, 2022).

Desta forma, é possível constatar com base nos resultados da Causalidade de Granger que a temperatura tem efeitos nas variáveis de interesse, assim, diante das mudanças climáticas pode ser esperar alterações nas utilizações das resiliências agrícolas.

4.5 Decomposição da variância do erro de previsão

Na Decomposição da variância do erro de previsão é analisado quanto da variação do erro de previsão é devido ao choque estrutural, na Tabela 3 apresenta os dados para a variável agrotóxico.

Tabela 3 – Decomposição da variância do erro de previsão para agrotóxico

Período	Temperatura	Agrotóxico	Sinistro	Produtividade
1	6,777291	93,22271	0,000000	0,000000
2	18,65252	81,05835	0,062379	0,226742
3	31,04321	66,95513	1,241406	0,760250
4	45,53631	46,87237	6,310157	1,281163
5	51,17738	33,56732	13,86555	1,389744
6	50,36311	27,09062	21,22501	1,321256
7	47,76459	23,83427	27,26157	1,139576
8	45,64282	21,73677	31,63708	0,983331
9	44,52756	20,10859	34,45733	0,906525
10	44,25389	18,91254	35,94663	0,886942

Fonte: Resultado de pesquisa.

Como apresentado na Tabela 3, a importação de agrotóxico pode ser explicada principalmente pela temperatura e pelos sinistros. Quando considerado que os sinistros podem ser utilizados em conjunto com o uso de agrotóxico, é possível identificar a utilização de ambos no contexto de produtividade. Já para a temperatura, como diversas pragas são associadas ao clima, sua resposta aos agrotóxicos pode estar associada a sua variação ao longo do tempo. A seguir, a Tabela 5 apresenta os valores para sinistros.

Tabela 4 – Decomposição da variância do erro de previsão para sinistro

Período	Temperatura	Agrotóxico	Sinistro	Produtividade
1	0,653181	0,079421	95,91291	0,000000
2	0,986883	10,07889	85,19433	0,183771
3	1,221082	17,27510	76,61890	0,521143
4	1,388646	24,48905	69,55205	0,541216
5	1,510161	29,86988	64,96925	0,526074
6	1,597123	32,96361	62,41710	0,474334
7	1,665882	34,68033	61,05260	0,440364
8	1,729916	36,04824	59,96283	0,415516
9	1,795366	37,47027	58,80603	0,391238
10	1,864990	39,01417	57,52674	0,368947

Fonte: resultado da pesquisa.

Para os sinistros, conforme a Tabela 4, é explicado principalmente pelo uso de agrotóxico. Como esperado, existe uma relação entre as variáveis na utilização, primeiramente o uso de agrotóxico, como forma de controle, quando o seu uso não for suficiente, o seguro apresenta-se como fonte de proteção aos produtores. Assim, podendo ser explicado os valores

para a decomposição da variância. Quando considerado o seguro, sua utilização é realizada quando a produção sofre um declínio, assim, pode ser umas das explicações para os resultados dos sinistros na produtividade. Por fim, a temperatura, apesar de apresentar valores explicativos altos para agrotóxico, para os sinistros os valores são menores. A seguir, é apresentado os resultados para a produtividade.

Tabela 5 – Decomposição da variância do erro de previsão para produtividade

Período	Temperatura	Agrotóxico	Sinistro	Produtividade
1	1,055449	0,014052	2,659320	96,27118
2	2,623449	0,721477	4,270411	92,38466
3	4,752202	0,444513	5,746414	89,05687
4	5,095578	0,334069	6,592055	87,97830
5	4,615264	0,285322	7,257282	87,84213
6	4,097388	0,236158	7,501218	88,16524
7	3,657450	0,245148	7,364847	88,73256
8	3,343472	0,331123	7,028582	89,29682
9	3,152957	0,459354	6,652459	89,73523
10	3,065734	0,564876	6,334027	90,03536

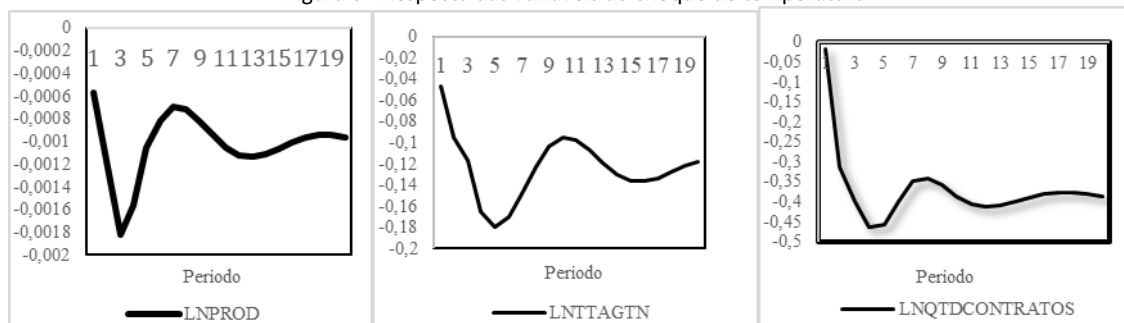
Fonte: resultado da pesquisa.

Conforme apresentado, a produtividade é explicada pela temperatura e pelos sinistros. Quando relacionada a produtividade e agrotóxicos, as pragas podem adquirir resistência a eles. Como demonstrado por Ogino e Bacha (2021), o uso de agrotóxicos diminui a produtividade no contexto brasileiro. Ao relacionar a eficácia dos agrotóxicos, esta relação com a produtividade pode ser explicada por utilizações defasadas dos defensivos, devido as pragas do ano anterior interferir na importação de agrotóxicos no próximo ano. Como demonstrado pelos valores de sinistros, que apresentam como forma de manutenção da produção através do seguro para aqueles produtores que tiveram baixa produtividade. Além disso, a utilização dos defensivos apresenta-se como forma de manter a produtividade, isso é, evitar a perda com os ataques de pragas, não sendo responsável, diretamente, com o aumento de produção.

4.6 Impulso resposta

Com o intuito de analisar as relações entre as variáveis, foi utilizado a função de impulso resposta, quantificando os efeitos de cada variável nas demais e em si. Os resultados são apresentados a seguir, primeiramente, na Figura 6, para choques em temperatura.

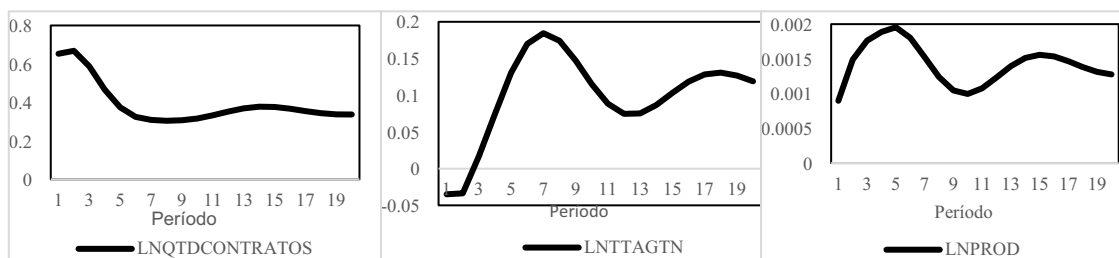
Figura 6 - Resposta das variáveis ao choque de temperatura



Fonte: resultado da pesquisa.

Conforme apresentado na Figura 6, a temperatura apresenta uma relação negativa com a quantidade de contratos de sinistros na maioria dos períodos, já para os agrotóxicos, tem-se uma relação que oscila durante os períodos, sendo a adaptação das pragas uma possível justificativa. Assim, uma primeira interpretação, quando há um aumento na temperatura, a utilização de agrotóxico, método mais utilizado na busca por sua produtividade, poderá oscilar a importação desse produto, isso em função da adaptação das pragas. Por fim, o choque na temperatura na produtividade tem um impacto negativo. A seguir, a Figura 7 apresenta os valores do choque de contratos de sinistros.

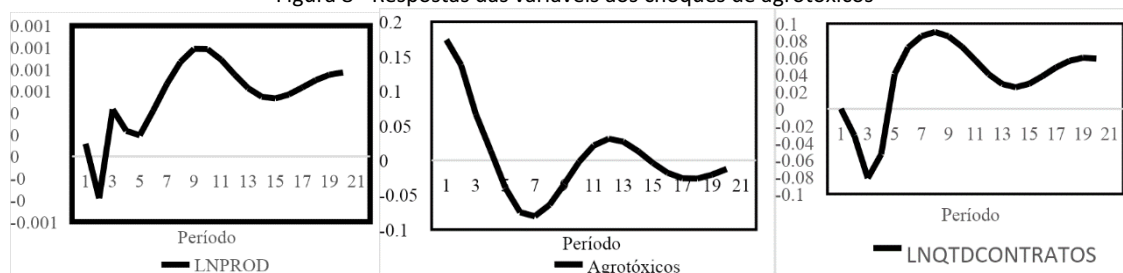
Figura 7 - Respostas das variáveis ao choque de contratos de sinistros



Fonte: resultado da pesquisa.

Como demonstrado na Figura 7, a resposta da variável agrotóxico ao choque de contratos de sinistros para pragas e doenças apresenta uma relação negativa com sinistro no primeiro intervalo, aumentando nos anos posteriores. Assim, é possível concluir que ao considerar a utilização de seguro e o uso de agrotóxicos, em um primeiro momento espera-se um declínio na sua utilização, sendo uma reposta para uma forma de resiliência as pragas. Na sequência, há aumentos na variável agrotóxico resultados semelhantes ao encontrado por Chakir e Hardelin (2010) Mohring *et al.* (2020), que apresentam uma relação positiva entre as variáveis. Cabe ainda destacar a produtividade e sua relação positiva com o choque em sinistros para pragas. Apesar do aumento da variável ser utilizada quando existem perdas nas produções, os resultados mostram que haveria aumento na produtividade. Na sequência, é apresentado o choque de contratos na produtividade na Figura 8.

Figura 8 - Respostas das variáveis aos choques de agrotóxicos



Fonte: resultado da pesquisa.

Um choque na quantidade de agrotóxico tem como resposta o aumento na produtividade a partir do terceiro período. Resultado divergente ao encontrado por Ogino e Bacha (2021). Já a quantidade de contratos oscila entre valores negativos e positivos, considerando que primeiramente as pragas poderão se adaptar aos defensivos, podendo assim, apresentar uma resposta para os resultados. Assim, de um ano para outro poderá impactar na decisão dos produtores no uso de agrotóxicos e defensivos.

Por fim, analisando os resultados para agrotóxico e a produtividade, conforme Reis, Casa e Bianchin (2011), a falta de diversificação de cultivo aumenta as chances de reincidência do ataque de praga ou de doença. Além disso, as pragas poderão adquirir resistência ao uso do mesmo agrotóxico na lavoura, sendo apresentada na oscilação dos resultados.

Entre os resultados encontrados, há evidências que as variações de temperatura causam no sentido de Granger em agrotóxico, sinistro e produtividade. Considerando os resultados buscados nesta análise, este primeiro resultado já evidencia que as mudanças climáticas afetaram a incidência de pragas e a adoção de ações que podem promover a resiliência da atividade agropecuária. Além disso, através da decomposição da variância, foi demonstrado que a importação de agrotóxico pode ser explicada principalmente pela temperatura, enquanto os sinistros pelos agrotóxicos. Visto que para o uso de agrotóxicos é uma das regras para poder se enquadrar no seguro agrícola, seus valores são explicados.

Por fim, os resultados da função Impulso resposta apontam uma relação da temperatura afetando negativamente as demais variáveis, as variáveis sinistros e agrotóxicos apresentam resultados positivos para os períodos finais na produtividade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou as relações climáticas com possíveis fontes de resiliência (sinistros de pragas e agrotóxicos) para manter a produtividade agrícola no contexto brasileiro, isso, considerando abordagens e estudos anteriores relacionados. Foram investigadas as hipóteses de que as mudanças climáticas infeririam na quantidade de sinistros de pragas e doenças e agrotóxico importados no contexto brasileiro, além disso, a relação da produtividade agrícola, nesse novo contexto. Utilizou-se o teste de cointegração de Johansen para verificar se as séries possuem um relacionamento de longo prazo, e a partir da presença de dois vetores de cointegração é possível inferir que há sim uma relação de longo prazo entre a variação nas temperaturas, o número de sinistros, o uso de agrotóxicos e a produtividade agrícola.

Desta forma, seguiu-se com os vetores encontrados para a análise. Além disso, foi analisada a causalidade de Granger, função impulso resposta e a decomposição da variância com dados de janeiro de 2013 a dezembro de 2022. Os resultados encontrados para a causalidade de Granger são possíveis afirmar que variações em temperatura causa no sentido de Granger agrotóxico, sinistro e produtividade. Além disso, sinistro causa no sentido de Granger agrotóxico e agrotóxico causa no sentido de Granger temperatura. Desta forma, confirma-se que existe uma relação entre temperatura e as resiliências, em um contexto de mudanças climáticas poderão ser acentuadas

Para a decomposição da variância, a importação de agrotóxico pode ser explicada principalmente pela temperatura e pelos sinistros. A produtividade é respondida principalmente pela temperatura e pelos sinistros. Já o uso de sinistro é explicado principalmente pelo uso de agrotóxico.

Por fim, a função impulso resposta demonstra que um choque na temperatura apresenta uma relação negativa com a quantidade de contratos de sinistros e agrotóxicos. Ao passo que a resposta da variável agrotóxico ao choque de contratos apresenta uma relação negativa com sinistro. Por fim, é apresentado o choque de contratos na produtividade. Sendo que o aumento no número de contrato de sinistro aumenta a produtividade.

Os resultados desta análise buscam demonstrar como as fontes de resiliência de agrotóxico e seguro agrícola são e poderão ser afetadas diante dos contextos das mudanças climáticas, no caso aqui nesse trabalho representada pela temperatura média máxima. Neste sentido, foi observado que há uma relação de longo prazo entre as variáveis (cointegração) e assim pode-se dizer que é aceita a hipótese levantada no presente trabalho de que a temperatura tem influência nas variáveis de resiliência aqui definidas como a importação de agrotóxicos e o número de sinistros.

Contudo, entre as limitações do trabalho está a indisponibilidade de séries históricas das variáveis de interesse, como o uso de agrotóxico por mês, sendo substituída pela importação. Assim, utilizando outras *proxies*, poderão ser encontrados novos resultados que irão contribuir com a literatura existente, e, assim, comparar com este trabalho. Desta forma, essa é a sugestão para novas pesquisas.

REFERÊNCIAS

ADAMI, A.; OZAKI, V. **Modelagem estatística dos prêmios do seguro rural**. *Revista de Política Agrícola*, v. 21, n. 1, p. 60-75, 2012.

BOBEA, A.; AULT, T. R.; CARRILLO, C. M. et al. **Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth**. *Nature Climate Change*, v. 11, p. 306–312, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>.

BOMDZELE, E. J.; MOLUA, E. L. **Assessment of the impact of climate and non-climatic parameters on cocoa production: a contextual analysis for Cameroon**. *Frontiers in Climate*, v. 5, 1069514, 2023. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1069514>.

BUENO, R. L. S. **Econometria de séries temporais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

CARAUTA, M.; PARUSSIS, J.; HAMPF, A.; LIBERA, A.; BERGER, T. **No more double cropping in Mato Grosso, Brazil? Evaluating the potential impact of climate change on the profitability of farm systems**. *Agricultural Systems*, v. 190, 103104, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103104>.

CHAKIR, R.; HARDELIN, J. **Crop insurance and pesticides in French agriculture: an empirical analysis of multiple risks management**. *Working Paper 2010/04*. Paris: INRA, 2010.

CHANDIO, A. A.; JIANG, Y.; FATIMA, T.; AHMAD, F.; AHMAD, M.; LI, J. **Assessing the impacts of climate change on cereal production in Bangladesh: evidence from ARDL modeling approach**. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, v. 14, n. 2, p. 125–147, 2022. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-10-2020-0111>.

CLARK, M.; TILMAN, D. **Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice**. *Environmental Research Letters*, v. 12, 064016, 2017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6cd5>.

DELCOUR, I.; SPANOGHE, P.; UYTENDAELE, M. **Literature review: Impact of climate change on pesticide use**. *Food Research International*, v. 68, p. 7–15, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.09.030>.

DICKEY, D.; FULLER, W. **Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root**. *Journal of the American Statistical Association*, v. 74, p. 427–431, 1979.

DOĞAN, H. G.; KAN, A. **The effect of precipitation and temperature on wheat yield in Turkey: a panel FMOLS and panel VECM approach**. *Environment, Development and Sustainability*, v. 21, p. 447–460, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0298-5>.

EMBRAPA. **Agrotóxicos no Brasil**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meio-ambiente/qualidade/dinamica/agrotoxicos-no-brasil>. Acesso em: 10 abr. 2026.

- ENDERS, W. **Applied econometric time series**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- ENGLE, R. F.; GRANGER, C. W. J. **Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing**. *Econometrica*, v. 55, n. 2, p. 251–276, 1987.
- FALCO, S.; ADINOLFI, F.; BOZZOLA, M.; CAPITANIO, F. **Crop insurance as a strategy for adapting to climate change**. *Journal of Agricultural Economics*, v. 65, n. 2, p. 485–504, 2014.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). FAOSTAT: pesticides use. Rome, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- GANIE, Z.; JUGULAM, M.; JHALA, A. **Temperature influences efficacy, absorption, and translocation of 2,4-D or glyphosate in glyphosate-resistant and glyphosate-susceptible common ragweed and giant ragweed**. *Weed Science*, v. 65, n. 5, p. 588–602, 2017. <https://doi.org/10.1017/wsc.2017.32>.
- GODAR, A. S.; VARANASI, V. K.; NAKKA, S.; PRASAD, P. V. V.; THOMPSON, C. R. et al. **Physiological and molecular mechanisms of differential sensitivity of Palmer amaranth to mesotrione at varying growth temperatures**. *PLOS ONE*, v. 10, n. 5, e0126731, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126731>.
- HARVELL, C. D.; MITCHELL, C. E.; WARD, J. R.; ALTIZER, S.; DOBSON, A. P.; OSTFELD, R. S.; SAMUEL, M. D. **Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota**. *Science*, v. 296, n. 5576, p. 2158–2162, 2002.
- IPCC. **Summary for Policymakers**. In: IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- JOHANSEN, S. **Statistical analysis of cointegration vectors**. *Journal of Economic Dynamics and Control*, v. 12, p. 231–254, 1988.
- KOLEVA, N. G.; SCHNEIDER, U. A. **The impact of climate change on the external cost of pesticide applications in US agriculture**. *International Journal of Agricultural Sustainability*, v. 7, n. 3, p. 203–216, 2009. DOI: 10.3763/ijas.2009.0459.
- KWIATKOWSKI, D. et al. **Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root**. *Journal of Econometrics*, v. 54, p. 159–178, 1992.
- LÜTKEPOHL, H.; KRÄTZIG, M. **Applied time series econometrics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- MATZRAFI, M. et al. **Climate change increases the risk of herbicide-resistant weeds due to enhanced detoxification**. *Planta*, v. 244, n. 6, p. 1217–1227, 2016. DOI: 10.1007/s00425-016-2577-4.
- MÖHRING, N. et al. **Crop insurance and pesticide use in European agriculture**. *Agricultural Systems*, v. 184, p. 102902, 2020. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.102902.
- NORTON, M. et al. **Applying weather index insurance to agricultural pest and disease risks**. *International Journal of Pest Management*, v. 62, n. 3, p. 195–204, 2016. DOI: 10.1080/09670874.2016.1184773.
- OGINO, C. M.; BACHA, C. J. C. **Usos de agrotóxicos nas agropecuárias do Brasil, Estados Unidos e União Europeia**. *Organizações Rurais & Agroindustriais*, v. 23, p. e1687, 2021. Disponível em: <https://www.revista.dae.ufla.br/index.php/ora/article/view/1687>
- PANDA, A. et al. **Adaptive capacity contributing to improved agricultural productivity at the household level**. In: NINAN, K. N.; INOUE, M. (org.). *Building a Climate Resilient Economy and Society*. Cham: Springer, 2017. p. 41–58.
- POPP, J. **Cost-benefit analysis of crop protection measures**. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, v. 6, n. 1, p. 105–112, 2011. DOI: 10.1007/s00003-011-0677-4.
- POPP, J. et al. **Pesticide productivity and food security: a review**. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 33, n. 1, p. 243–255, 2013. DOI: 10.1007/s13593-012-0105-x.
- REIS, E. M.; CASA, R. T.; BIANCHIN, V. **Controle de doenças de plantas pela rotação de culturas**. *Summa Phytopathologica*, v. 37, n. 3, p. 85–91, 2011.

- RHODES, L. A.; MCCARL, B. A. **Uma análise dos impactos climáticos nos gastos com herbicidas, inseticidas e fungicidas.** *Agronomy*, v. 10, n. 5, p. 745, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10050745.
- SIMS, C. A. **Macroeconomics and reality.** *Econometrica*, v. 48, n. 1, p. 1–48, 1980.
- STAHLMAN, P. W. et al. **Reduced translocation of glyphosate and dicamba in combination contributes to poor control of *Kochia scoparia*.** *Scientific Reports*, v. 8, p. 5330, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-23742-3.
- TABOSA, F. J. S.; VIEIRA FILHO, J. E. R.; VASCONCELOS, D. **Impacto do seguro agrícola na produtividade: uma avaliação regional no Brasil.** *Revista de Política Agrícola*, v. 30, n. 1, p. 85–?, 2021.
- TABOSA, F. J. S.; VIEIRA FILHO, J. E. R. **Análise espacial do programa de subvenção ao prêmio do seguro rural (PSR).** *Revista Econômica do Nordeste*, v. 52, n. 1, p. 27–43, 2021.
- TILMAN, D. et al. **Global food demand and the sustainable intensification of agriculture.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 108, p. 20260–20264, 2011. DOI: 10.1073/pnas.1116437108.
- TILMAN, D.; CLARK, M. **Global diets link environmental sustainability and human health.** *Nature*, v. 515, p. 518–522, 2014. DOI: 10.1038/nature13959.
- VISHWAS, G.; PATEL, R. **Time series analysis with Python.** Birmingham: Packt Publishing, 2020.
- ZHANG, C. et al. **Overuse or underuse? An observation of pesticide use in China.** *Science of the Total Environment*, v. 538, p. 1–6, 2015. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.031.
- ZISKA, L. H. **Increasing minimum daily temperatures are associated with enhanced pesticide use in cultivated soybean.** *PLoS ONE*, v. 9, n. 6, e98516, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.009851.