



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Ciências Aplicadas

**JOÃO VICTOR FARINA**

**Análise da transmissão de volatilidade entre *commodities* alimentares e o  
etanol no Brasil**

Limeira  
2025

**JOÃO VICTOR FARINA**

**Análise da transmissão de volatilidade entre *commodities* alimentares e o  
etanol no Brasil**

*Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências  
Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas como  
parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título  
de Mestre em Administração*

Orientador: Daniel Henrique Dario Capitani

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL  
DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO JOÃO  
VICTOR FARINA, E ORIENTADA PELO PROF. DR.  
DANIEL HENRIQUE DARIO CAPITANI.

Limeira  
2025

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) Biblioteca  
da Faculdade de Ciências Aplicadas  
Ana Luiza Clemente de Abreu Valerio - CRB 8/10669

F226a Farina, João Victor, 1999-  
Análise da transmissão de volatilidade entre *commodities* alimentares e o etanol no Brasil / João Victor Farina. – Limeira, SP : [s.n.], 2025.

Orientador: Daniel Henrique Dario Capitani.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Ciências Aplicadas.

1. Etanol. 2. Biocombustíveis. I. Capitani, Daniel Henrique Dario. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Ciências Aplicadas. III. Título.

Informações complementares

**Título em outro idioma:** Analysis of volatility spillover between food commodities and ethanol in Brazil

**Palavras-chave em inglês:**

Ethanol Biomass

Energy

**Área de concentração:** Gestão e Sustentabilidade

**Titulação:** Mestre em Administração

**Banca examinadora:**

Daniel Henrique Dario Capitani [Orientador]

Luiz Eduardo Gaio

Derick David Quintino

**Data de defesa:** 07-08-2025

**Programa de Pós-Graduação:** Administração

**Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**

ODS: 2. Erradicação da fome

ODS: 7. Energia acessível e limpa

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-6426-7404>

- Currículo Lattes do autor: <https://lattes.cnpq.br/2151415930881518>

Daniel Henrique Dario Capitani

Luiz Eduardo Gaio

Derick David Quintino

A Ata da Defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa de Pós-graduação em Administração da Faculdade de Ciências Aplicadas da UNICAMP.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, à minha parceira pelo apoio e aos profissionais da Faculdade de Ciências Aplicadas da Unicamp, que se dedicam à manutenção do Programa de Pós-Graduação em Administração.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Henrique Dario Capitani, pela paciência, disponibilidade e flexibilidade para que este trabalho fosse desenvolvido.

## RESUMO

A transmissão de volatilidade entre *commodities* alimentares e o etanol no Brasil constitui um tema relevante no contexto da integração entre os mercados agrícola e energético. A crescente importância dos biocombustíveis na matriz energética nacional, impulsionada por políticas públicas como o Proálcool e o RenovaBio, demanda uma investigação aprofundada sobre as interações entre os preços do etanol e das principais *commodities* alimentares, nomeadamente milho, soja, trigo, açúcar, arroz e boi gordo. O estudo examina a interconectividade entre estes mercados e os efeitos de choques externos, como crises econômicas e geopolíticas, avaliando, para isso, os dados semanais dos retornos dos preços *spot* dos produtos destacados referente ao histórico de março de 2006 a fevereiro de 2025, além de considerar as variáveis exógenas câmbio e petróleo *Brent*. Eventos como a crise financeira de 2008, a pandemia de COVID-19 e a guerra entre Rússia e Ucrânia são considerados para avaliar o impacto dessas perturbações na dinâmica da volatilidade dos preços. A abordagem metodológica fundamenta-se no modelo econométrico *Time-Varying Parameter Vector Autoregression* (TVP-VAR), que permite a captura de mudanças dinâmicas na interdependência entre os preços das *commodities* ao longo do tempo. Essa modelagem possibilita a análise das variações estruturais nos mercados e da evolução das relações entre os preços do etanol e das *commodities* alimentares em diferentes contextos macroeconômicos. A análise revelou que a transmissão de volatilidade entre os mercados estudados é dinâmica e intensificada em períodos de crise, com o etanol, arroz e trigo atuando predominantemente como receptores de volatilidade, enquanto soja e milho se destacaram como emissores líquidos, especialmente em contextos de instabilidade como a pandemia de COVID-19 e a crise de 2008–2009. Ainda, o petróleo e a taxa de câmbio tendem a influenciar alguns mercados agrícolas no Brasil, especialmente nos ciclos de instabilidade econômica. O etanol, no entanto, pouco influenciou nos demais mercados, independentemente do período considerado. Os resultados indicam que as dinâmicas de transmissão de volatilidade analisadas podem impactar a estabilidade de preços, sobretudo em momentos de crise, no Brasil, com impacto na segurança alimentar.

**Palavras-chave:** Etanol; Biocombustíveis; *Commodities* alimentares; Transmissão de volatilidade; Conectividade dinâmica; Brasil

## ABSTRACT

The transmission of volatility between food commodities and ethanol in Brazil is a relevant topic within the broader context of integration between agricultural and energy markets. The growing importance of biofuels in the national energy matrix, driven by public policies such as Proálcool and RenovaBio, calls for an in-depth investigation into the interactions between ethanol prices and major agricultural commodities, namely corn, soybeans, wheat, sugar, rice, and live cattle. This study examines the interconnectedness of these markets and the effects of external shocks—such as economic and geopolitical crises—by analyzing weekly spot price returns for the aforementioned products from March 2006 to February 2025. In addition, the study incorporates exogenous variables such as exchange rate and Brent crude oil prices. Events like the 2008 financial crisis, the COVID-19 pandemic, and the Russia–Ukraine war are taken into account to assess the impact of such disruptions on the dynamics of price volatility. The methodological approach is based on the Time-Varying Parameter Vector Autoregression (TVP-VAR) econometric model, which captures dynamic changes in the interdependence among commodities prices over time. This modeling enables the analysis of structural shifts in the markets and the evolving relationships between ethanol and agricultural commodities prices under different macroeconomic conditions. The analysis revealed that volatility transmission among the studied markets is dynamic and intensified during crises, with ethanol, rice, and wheat acting predominantly as volatility receivers, while soybeans and corn stood out as net transmitters, especially during periods of instability such as the COVID-19 pandemic and the 2008–2009 crisis. Furthermore, oil and the exchange rate tend to influence certain agricultural markets in Brazil, especially during periods of economic instability. Ethanol, however, had little impact on other markets, regardless of the period considered. The results indicate that the analyzed volatility transmission dynamics can affect price stability, especially during times of crisis in Brazil, with consequences for food security.

**Key words:** Ethanol; Biofuels; Agricultural commodities; Volatility transmission; Dynamic connectedness; Brazil

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Série de tempo dos preço das commodities em análise (valores nominais) .....                                                       | 42 |
| Figura 2 – Variação do retornos dos preços nominais das commodities em análise.....                                                           | 44 |
| Figura 3 – Conexão dinâmica total (2006-2025).....                                                                                            | 49 |
| Figura 4 – Conectividade direcional líquida do período total por produto (2006-2025) .....                                                    | 51 |
| Figura 5 – Conectividade vetorial transmissora do período total por produto (2006-2025) .....                                                 | 52 |
| Figura 6 – Conectividade vetorial receptora do período total por produto (2006-2025) .....                                                    | 52 |
| Figura 7 – Conectividade direcional líquida do período total par a par (2006-2025) .....                                                      | 55 |
| Figura 8 - Conectividade direcional dinâmica par a par do período total (2006-2025) .....                                                     | 56 |
| Figura 9 – Diagrama de rede da interconectividade do sistema (2006-2025).....                                                                 | 57 |
| Figura 10 – Diagrama de rede da interconectividade do sistema para a subsérie crise 2008-2009 .....                                           | 60 |
| Figura 11 – Diagrama de rede da interconectividade do sistema para a subsérie da pandemia de COVID-19 englobando a Guerra Rússia-Ucrânia..... | 64 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Descrição dos dados coletados .....                                                                                       | 41 |
| Tabela 2 – Síntese descritiva dos retornos das séries para o período total de análise .....                                          | 44 |
| Tabela 3 – Síntese descritiva dos retornos das séries para o período da crise 2008-2009 .....                                        | 45 |
| Tabela 4 – Síntese descritiva dos retornos das séries para o período da pandemia de COVID-19 englobando a guerra Rússia-Ucrânia..... | 46 |
| Tabela 5 – Tabela de conectividade média dinâmica da série total (todo o período).....                                               | 48 |
| Tabela 6 – Tabela de conectividade média dinâmica da subsérie crise 2008-2009 .....                                                  | 59 |
| Tabela 7 – Tabela de conectividade média dinâmica da subsérie pandemia de COVID-19 englobando a guerra Rússia-Ucrânia.....           | 61 |

## SUMÁRIO

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....                                                                                           | 12 |
| 1.1 Pergunta de pesquisa .....                                                                               | 17 |
| 1.2 Objetivos .....                                                                                          | 17 |
| 1.3 Justificativa e originalidade.....                                                                       | 17 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA .....                                                                                | 20 |
| 2.1 Relação entre os mercados de biocombustíveis e alimentos .....                                           | 20 |
| 2.2 Relação entre preços de biocombustíveis e alimentos .....                                                | 22 |
| 2.3. Transmissão de volatilidade entre os preços de biocombustíveis e alimentos .....                        | 27 |
| 2.4 Modelos para análise de transmissão de volatilidade e contágio .....                                     | 31 |
| 3 METODOLOGIA .....                                                                                          | 35 |
| 3.1 Modelo de série temporal.....                                                                            | 35 |
| 3.2 Dados e estatística descritiva.....                                                                      | 40 |
| 4 RESULTADOS.....                                                                                            | 47 |
| 4.1 Conectividade geral no modelo TVP-VAR.....                                                               | 47 |
| 4.2 Conectividade durante o período da crise de 2008-2009 .....                                              | 58 |
| 4.3 Conectividade durante o período da pandemia COVID-19 englobando o período da guerra Rússia-Ucrânia ..... | 61 |
| 5 DISCUSSÃO.....                                                                                             | 64 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....                                                                                 | 67 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                           | 71 |

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de cana-de-açúcar desempenhou um papel central na história econômica brasileira, consolidando o país como um dos maiores produtores globais de açúcar e, posteriormente, de etanol. Azevedo e Lima (2016) apresentam uma linha do tempo destacando os principais marcos do segmento. No início do século XX, pode-se destacar a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq), na década de 1930. Na década de 1970, após os choques nos preços do petróleo e seus efeitos em escala global, a criação do Programa Nacional do Alcool (Proálcool) marcou o início de uma transformação estratégica na matriz energética brasileira, promovendo um dos derivados da cana-de-açúcar, o etanol, como alternativa aos combustíveis fósseis em resposta às crises do petróleo e à queda nos preços do açúcar (ROSILLO-CALLE; CORTEZ, 1998; STOLF; OLIVEIRA, 2020). Esse movimento de substituição dos combustíveis fósseis e da promoção dos biocombustíveis contou com forte apoio governamental, incluindo subsídios à produção, desenvolvimento tecnológico e adaptações no mercado automotivo (SOCCOL et al., 2004).

No cenário global, o Brasil se consolidou como o segundo maior produtor de etanol do mundo e líder de produção de etanol derivado especificamente da cana-de-açúcar. No restante do mundo, outras culturas agrícolas ganharam força. Enquanto os Estados Unidos se destacam na produção de etanol de milho, a Europa priorizou o biodiesel a partir de oleaginosas como soja e colza. Essas iniciativas também foram impulsionadas por políticas públicas e acordos internacionais voltados à redução de emissões de carbono e à promoção de energias renováveis. Um dos exemplos mais representativos da participação política foram os mandatos de adições mínimas de etanol e biodiesel aos combustíveis veiculares fósseis no Brasil e Estados Unidos (GOLDEMBERG et al., 2008; WALTER et al., 2014; AZEVEDO; LIMA, 2016).

Entre 2003 e 2011, a área cultivada com cana-de-açúcar no Centro-Sul brasileiro expandiu-se significativamente. O principal motivo para a expansão foi o advento do carro *flex*. A área plantada saltou de aproximadamente 5 milhões de hectares na safra 2001/02, para mais de 9 milhões de hectares na safra 2010/11 (CONAB, 2024). No mesmo período, a produção de etanol saltou de 11,5 bilhões de litros para 27,3 bilhões de litros, estimulada, sobretudo, pelo aumento na demanda do etanol hidratado (UNICA, 2024). Ao final da década de 2010, a produção se estabilizou em torno de 30 bilhões de litros e, na safra 2023/24 atingiu 35,9 bilhões de litros, impulsionada pelo recente aumento na produção de etanol de milho, que correspondeu a 6,2 bilhões

de litros (CONAB, 2024; UNICA, 2024).

No que diz respeito à geografia da expansão canavieira na década de 2000, áreas em São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais foram os principais vetores de crescimento da produção, substituindo predominantemente pastagens (70%) e culturas anuais (25%) (NASSAR et al., 2011; ADAMI et al., 2012). No entanto, o deslocamento indireto de atividades agrícolas para regiões ambientalmente sensíveis, incluindo áreas próximas à Amazônia, gerou preocupações sobre as mudanças indiretas no uso da terra (MANZATTO et al., 2009; PICOLI; MACHADO, 2021).

Os avanços tecnológicos na produção de cana-de-açúcar, como a mecanização da colheita e o aproveitamento de resíduos como a palha e o bagaço, contribuíram para a redução de emissões de gases de efeito estufa e para a sustentabilidade ambiental (WALTER et al., 2014; BORDONAL et al., 2018). Apesar disso, desafios como a degradação do solo, a poluição hídrica e o cultivo de monoculturas intensivas permaneceram (GALDOS et al., 2010; SCARPARE et al., 2016).

Socialmente, a expansão da cana-de-açúcar promoveu o desenvolvimento regional e gerou empregos, especialmente em municípios com usinas de processamento, onde o PIB per capita cresceu acima da média nacional. Contudo, problemas relacionados à migração sazonal e às condições de trabalho não deixaram de chamar a atenção dos pesquisadores desta temática, especialmente no que se refere às condições trabalhistas (MORAES et al., 2015). No entanto, diferentes estudos apontam para uma melhora significativa nas condições de trabalho a partir do século XXI, com aumento da formalização e especialização do trabalho, e redução nas incidências de autos de infração trabalhistas (FERRAZ et al., 2021; CAPITANI et al., 2015).

As referências mencionadas acima, em conjunto, demonstram que, historicamente, o aumento da produção de culturas agrícolas voltadas à produção de biocombustíveis desperta o interesse científico com temas de cunho social, econômico e ambiental. No centro dessas discussões, destacam-se os conceitos de segurança alimentar e mudança no uso da terra, especialmente dentro do contexto da competição entre os biocombustíveis e a produção de alimentos, comumente retratadas como *“Biofuels vs Food”* (SUBRAMANIAM et al., 2020).

A segurança alimentar refere-se à garantia de oferta constante de alimentos a preços acessíveis e de valor nutricional adequado, aspecto fundamental para a estabilidade econômica e social. No contexto da expansão dos biocombustíveis, esse conceito se torna mais complexo, pois as terras destinadas aos biocombustíveis, competem com cultivos voltados à alimentação humana,

direta ou indiretamente (SUBRAMANIAM et al., 2020).

O conceito de mudança no uso da terra é igualmente importante e diz respeito à transição de terras agrícolas para a produção de biocombustíveis, gerando uma reconfiguração em larga escala nos sistemas produtivos e ambientais. Segundo Hesarya et al. (2019), essa conversão de áreas agrícolas inclui não só a ocupação de novas terras, mas também a intensificação de monoculturas, prática que contribui para a degradação do solo e perda de biodiversidade. À medida que a produção de biocombustíveis aumenta, culturas alimentares podem ser deslocadas para áreas menos produtivas, reduzindo a produção total de alimentos e afetando a qualidade do solo. Essas mudanças podem colocar em xeque a sustentabilidade do sistema agroalimentar, evidenciando um dos dilemas entre promover uma fonte de energia renovável e garantir uma oferta de alimentos estável e acessível (HESARYA et al., 2019).

Assim, pode-se afirmar que compreender as externalidades associadas à produção de biocombustíveis é relevante sob a ótica econômica, social e ambiental. Testar as conexões entre mercados de culturas agrícolas alimentares e energéticas partindo de modelos e recortes distintos possuem relevância acadêmica e valor prático. Nesse sentido, diferentes estudos foram conduzidos a partir de modelos econômicos de equilíbrio e, sobretudo, modelos econométricos de séries temporais buscando compreender a relação entre os mercados de biocombustíveis e alimentos.

O estudo de Hochman et al. (2011), por exemplo, utiliza um modelo de equilíbrio parcial para estudar como a expansão dos biocombustíveis pode influenciar os preços dos alimentos, considerando a especulação, políticas comerciais e choques climáticos como variáveis relevantes. Os autores concluem que a produção de biocombustíveis tem potencial para elevar os preços dos alimentos, principalmente quando o efeito dos estoques agrícolas é desconsiderado.

Embora alguns estudos com modelos de equilíbrio apontem para uma relação com algum grau de conflito na avaliação de biocombustíveis versus culturas alimentares, os resultados científicos não são consensuais. Estudos econométricos como os de Campiche et al. (2007) e Kristoufek et al. (2012) sugerem momentos de baixa correlação entre as culturas quando comparada a variável preço e, principalmente, quando avaliam o etanol. Esses estudos demonstram que, em determinadas circunstâncias, a relação entre o preço dos biocombustíveis e dos alimentos é fraca, e que o aumento nos preços dos alimentos está frequentemente associado a pressões inflacionárias de custos, sobretudo dos derivados de petróleo, em vez de uma substituição direta por culturas energéticas. Outros estudos focados em mercados emergentes apontam, também, a

influência da taxa de câmbio nos preços das *commodities* (CAPITANI, 2018). Isso indica que, embora a competição entre biocombustíveis e alimentos seja válida em algumas condições, ela pode ser menos relevante em cenários onde outras variáveis, como políticas de incentivo, choques nos preços do petróleo e disponibilidade de estoques, desempenham papéis mais determinantes.

Somada à variável geográfica, o tempo e o momento em que a volatilidade de preços das *commodities* alimentares e os biocombustíveis são analisados podem ser determinantes para os resultados. Isso ocorre, pois, a interconectividade e a transmissão de volatilidade entre os preços não são estáticas e podem se acentuar em períodos de crises, por exemplo, como a crise financeira global de 2008/09, a pandemia de COVID-19 e, mais recentemente, a guerra entre Rússia e Ucrânia.

Conforme explorado no trabalho de Ajanovic (2011), a transmissão de volatilidade reflete uma conexão profunda entre os mercados de energia e agricultura, onde choques nos preços de combustíveis rapidamente impactam os custos de produção agrícola. Esse efeito é particularmente evidente nas *commodities*, como milho e soja, que servem tanto para alimentação quanto para a produção de biocombustíveis. Nesses casos, o aumento nos preços do petróleo e, por consequência, dos biocombustíveis, eleva os custos de produção de insumos agrícolas, como fertilizantes e transporte, criando um efeito cascata que impacta toda a cadeia produtiva do setor alimentício.

Além disso, os períodos de crise destacam ainda mais a natureza volátil dessa relação. Durante a crise financeira de 2008/09, por exemplo, a volatilidade dos preços das *commodities* energéticas se refletiu nos preços dos alimentos, uma vez que investidores, buscando proteger capital, aumentaram suas posições especulativas em mercados futuros de *commodities*. Esse movimento não só contribuiu como um elemento adicional para um aumento artificial nos preços das *commodities* alimentares, como também influenciou diretamente a inflação e o poder de compra de consumidores ao redor do mundo, incluindo o Brasil. O aumento nos preços de insumos básicos criou um ambiente de custos elevados para produtores locais, pressionando a cadeia produtiva e impactando os preços ao consumidor final (MARTIGNONE, 2024).

De forma semelhante, a pandemia de COVID-19 apresentou um cenário de forte volatilidade. O impacto das medidas restritivas de circulação e a interrupção das cadeias globais de suprimentos geraram flutuações nos preços energéticos, especialmente do petróleo e gás natural, que, por sua vez, afetaram os custos de produção agrícolas. A queda brusca na demanda por combustíveis no início da pandemia causou uma redução nos preços dos biocombustíveis, o que

diminuiu a rentabilidade para os produtores de cana-de-açúcar e aumentou a pressão econômica nas regiões produtoras. Posteriormente, com a retomada econômica, observa-se o efeito inverso. Simultaneamente, o aumento nos preços de alimentos durante a pandemia, impulsionado pela escassez de insumos e pelo aumento dos custos logísticos, exacerbou as preocupações com a segurança alimentar (MANELLI et al., 2024; URAK, 2024).

A guerra entre Rússia e Ucrânia, por sua vez, destaca-se o grau de interdependência global entre os mercados de energia e alimentos. A Rússia é um dos maiores produtores de petróleo e gás natural, além de ser, junto com a Ucrânia, uma das principais fornecedoras de trigo e outras *commodities* alimentares para o mercado internacional, bem como de fertilizantes. O conflito gerou uma série de choques simultâneos nos mercados de energia e grãos, causando elevações nos preços do petróleo, gás natural, do trigo e dos insumos agrícolas, que se refletiram rapidamente no custo de insumos e na inflação global dos alimentos. No Brasil, esses efeitos foram sentidos não apenas nos preços internos dos combustíveis e dos produtos agrícolas, mas também na pressão sobre o poder de compra da população e na capacidade de exportação de produtos agrícolas a preços competitivos (URAK, 2024).

No contexto brasileiro, políticas públicas também desempenham um papel crucial nessa transmissão de volatilidade. A política de preços de combustíveis, que inclui o etanol como substituto da gasolina, cria um canal adicional de transmissão de volatilidade, uma vez que os ajustes nos preços dos combustíveis fósseis afetam diretamente os preços do etanol e, consequentemente, os preços dos produtos agrícolas (RODRIGUES; BACCHI, 2016). Além disso, subsídios e incentivos governamentais para a produção de biocombustíveis impactam a dinâmica do mercado, favorecendo a alocação de terras para culturas energéticas, o que pode agravar a competição com a produção de alimentos (KRISTOUFEK et al., 2012).

Assim, estudar a transmissão de volatilidade e a interconectividade entre os preços do etanol e das *commodities* alimentares no Brasil é essencial para compreender as interações complexas entre esses mercados e fornecer subsídios para políticas que possam atenuar os impactos das flutuações de preços, promovendo maior previsibilidade e estabilidade para produtos alimentares estratégicos. Essa análise é particularmente relevante para a segurança alimentar e para a estabilidade econômica brasileira, em um contexto global de crescente integração entre os mercados e de choques econômicos recorrentes.

### 1.1 Pergunta de pesquisa

Como se dá a transmissão de volatilidade nos preços do etanol e das principais *commodities* alimentares no Brasil e como essa relação de interconectividade se altera em momentos de instabilidade econômica?

### 1.2 Objetivos

O objetivo deste estudo é analisar a transmissão de volatilidade entre os preços do etanol e de diversas *commodities* alimentares graneleiras, como milho, soja, trigo e arroz, bem como outras importantes culturas alimentares – açúcar e boi gordo – no Brasil. Ademais, considera os efeitos de variáveis exógenas, como a taxa de câmbio e o preço internacional do petróleo, uma vez que possuem forte relação com a oferta e custos agrícolas, respectivamente, destacando e comparando os ciclos de crises internacionais após a expansão da produção de etanol no Brasil: a crise financeira de 2008/09, a pandemia de COVID-19 e a guerra entre Rússia e Ucrânia.

Dessa forma, buscar responder à pergunta de pesquisa indicando (i) quais *commodities* são transmissoras e quais delas são receptoras de volatilidade quando analisados os retornos de seus preços, destacando, especificamente, a relação entre o etanol e *commodities* alimentares; (ii) quão relevante as variáveis exógenas petróleo e câmbio são para a transmissão de volatilidade dos preços das *commodities* analisadas e (iii) como a interconectividade entre as *commodities* analisadas se comportaram durante a crise de 2008/2009 e os períodos críticos da pandemia de COVID-19 e da guerra Rússia-Ucrânia.

### 1.3 Justificativa e originalidade

A escolha das *commodities* alimentares mencionadas reflete a importância destes produtos no setor agropecuário brasileiro e suas interações com o mercado de biocombustíveis. O etanol, majoritariamente derivado da cana-de-açúcar, é um componente-chave da matriz energética do Brasil, servindo como uma alternativa renovável aos combustíveis fósseis e estando diretamente associado ao mercado de energia. Sua produção e comercialização impactam diretamente a cadeia de valor agrícola, devido à utilização de grandes extensões de terras cultiváveis e à relação com outras culturas de interesse econômico. Na mesma linha, as *commodities* selecionadas representam uma parte significativa da produção agrícola brasileira, tanto para o consumo interno quanto para as exportações, e exercem um papel fundamental na segurança alimentar e na estabilidade econômica do país (MDIC, 2024).

O estudo também está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Organização das Nações Unidas (ONU), em especial ao ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável) e ao ODS 7 (Energia Limpa e Acessível). O ODS 2 visa erradicar a fome e garantir o acesso de todas as pessoas a alimentos seguros, nutritivos e suficientes durante todo o ano, enquanto o ODS 7 busca assegurar o acesso confiável, sustentável e moderno à energia para todos. Ao tratar de questões relacionadas à segurança alimentar e à produção de energia renovável, o trabalho também oferece informações úteis para a formulação de políticas públicas que promovam a sustentabilidade econômica e ambiental, contribuindo para o desenvolvimento equilibrado e inclusivo do Brasil.

Dessa forma, este trabalho se justifica do ponto de vista social, pelo seu alinhamento com as agendas da ODS, sobretudo pelo potencial de fornecer subsídios para o entendimento do comportamento de preços de produtos alimentares essenciais a segurança alimentar. Ademais, a pesquisa se justifica do ponto de vista gerencial, destacando os fatores explicativos da variação das *commodities* e subsidiando os ofertantes e demandantes com análises históricas que podem servir de base para previsão de preço dos seus produtos e de potenciais produtos substitutos dado uma conjuntura de fatores que inclui, por exemplo, variáveis exógenas como o câmbio e o preço do petróleo e a tendência cíclica ou anticíclica do mercado. Ainda, se justifica do ponto de vista político, também fornecendo dados de correlações e transmissões de volatilidade de preço entre produtos para que sejam avaliadas as externalidades, por exemplo, de projetos públicos de investimento em uma cultura específica, ou mesmo como suporte a políticas que demandam da compreensão dos reflexos da volatilidade dos preços agrícolas nos indicadores de preços.

Quanto à originalidade e contribuição acadêmica, este estudo participa da temática “*Biofuels vs Food*”, e se debruça no contexto brasileiro, o segundo maior produtor mundial de etanol. Embora a relação entre biocombustíveis e preços de alimentos tenha sido amplamente discutida a nível global, estudos que se aprofundam nas especificidades do mercado brasileiro são escassos (RAPSOMANIKIS; HALLAM, 2006; BALCOMBE; RAPSOMANIKIS, 2008; KRISTOUFEK et al., 2015; BENTIVOGLIO et al., 2016; CAPITANI, 2018; LIMA et al., 2019). Em específico, poucos estudos abordaram a questão dos efeitos *spillovers* e contágio entre os mercados de biocombustíveis e agrícolas no país, e nenhum utilizou o TVP-VAR para o recorte temporal selecionado (KRISTOUFEK et al., 2015; LIMA et al., 2019). Além disso, os efeitos das recentes crises da pandemia da Covid-19 e conflito Rússia-Ucrânia também foram pouco

explorados na literatura em questão voltada ao mercado brasileiro (PALAZZI et al., 2023; QUINTINO et al., 2023). Portanto, este trabalho, ao explorar modelos de volatilidade aplicados ao mercado nacional, visa preencher essa lacuna, trazendo a originalidade ao trabalho.

A extensão das séries analisadas e a possibilidade de divisões em subséries com características específicas: (i) a crise das *commodities* (2008-2009), (ii) a pandemia de Covid 19, com efeitos práticos a partir de 2020, e posteriormente (iii) a Guerra da Rússia-Ucrânia, em 2022, coloca luz sobre como os mercados se influenciam em momentos de estresse, com restrições na oferta de insumos, menor previsibilidade de demanda e com o aumento de pressões inflacionárias e cambiais. A avaliação de períodos de ruptura da estabilidade, em que se vivenciou novas conexões e contágios entre mercados, demanda um modelo flexível e que seja aderente ao uso de múltiplas variáveis.

A utilização do modelo TVP-VAR (*Time-Varying Parameter Vector Autoregression*) é um dos principais avanços metodológicos deste estudo. Sendo este um modelo de fronteira para o estudo nos mercados de *commodities* alimentares e no uso de modelos de séries temporais na literatura nacional, o TVP-VAR permite capturar a variação de parâmetros ao longo do tempo, o que é particularmente relevante em contextos de alta volatilidade e em economias emergentes como a brasileira. Durante crises econômicas e choques externos, as relações entre variáveis podem mudar significativamente, e o TVP-VAR oferece a flexibilidade necessária para observar essas transformações (UMAR et al., 2022). Por meio desse modelo, é possível identificar momentos críticos em que a transmissão de volatilidade entre os mercados de energia e alimentos se intensifica, bem como quais mercados são transmissores ou receptores de volatilidade ao longo do tempo, fornecendo evidências empíricas robustas para embasar decisões de políticas públicas.

A análise dos padrões de interconectividade entre os mercados de energia e alimentos no Brasil também é um aspecto central deste trabalho. O estudo busca compreender como os preços de biocombustíveis, como o etanol, e das *commodities* alimentares se influenciam mutuamente ao longo do tempo. Essa interação é especialmente relevante durante ciclos econômicos de recessão, quando os choques externos tendem a amplificar as vulnerabilidades do mercado (KAMDEM et al., 2020; ELLEBY et al., 2020; BECKMAN; COUNTRYMAN, 2021; JUST; ECHAUST, 2022). A transmissão de volatilidade é um tema de grande relevância para o Brasil, pois afeta diretamente a estabilidade dos preços dos alimentos e a previsibilidade da oferta de energias renováveis. Compreender esses mecanismos é essencial para o desenvolvimento de políticas que promovam a

resiliência econômica e a segurança alimentar.

Outro diferencial do estudo é a inclusão de variáveis macroeconômicas, como a taxa de câmbio e os preços do petróleo, para capturar a complexidade das interações entre os mercados energéticos e agrícolas. O Brasil é uma economia fortemente influenciada pelo mercado de câmbio devido à dependência das exportações de *commodities* como fonte de receita e mesmo das importações de insumos e maquinários para produção. Ademais, como um país emergente, tende a sofrer impactos cambiais mais significativos em eventos anormais no mercado externo ou crises globais (FRENK; TUBERVILLE, 2011; BABAR et al., 2023). Até mesmo o modelo de precificação da gasolina, produto substituto ao etanol, que por vezes segue o sistema de paridade de preços internacionais, demonstra como o câmbio pode afetar o etanol e as culturas alimentares. Dessa forma, flutuações cambiais são sentidas nos custos de produção e nos preços de exportação, criando um canal adicional de transmissão de volatilidade que interliga os mercados (SHANRESTANI; RAFEI, 2020; YILDRIM et al., 2022). Ao incorporar essas variáveis, o modelo utilizado no estudo oferece uma análise mais abrangente e detalhada, permitindo a identificação de fatores que intensificam ou suavizam as interdependências entre os preços das *commodities* e do etanol.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Relação entre os mercados de biocombustíveis e alimentos**

A relação entre os mercados de biocombustíveis e alimentos é marcada por uma série de interações complexas, que vão além da competição pelo uso da terra. No Brasil, a expansão da produção de etanol e biodiesel tem implicações profundas para a agricultura, especialmente em um contexto geopolítico que incentiva o uso de fontes renováveis de energia. Historicamente, o desenvolvimento dos biocombustíveis foi impulsionado por preocupações com a segurança energética e a sustentabilidade ambiental, mas os impactos sobre a produção de alimentos, preços e segurança alimentar são questões que têm ganhado cada vez mais atenção (BENTIVOGLIO; RASETTI, 2015).

A expansão da produção de cana-de-açúcar no Brasil, especialmente na região Centro-Sul, tem sido acompanhada de mudanças significativas no ambiente. Estudos utilizando imagens de sensoriamento remoto, como os conduzidos por Adami et al. (2012), mostram que a expansão entre

2005 e 2010 ocorreu predominantemente sobre terras de pastagem (70%) e culturas anuais (25%), com impacto mínimo sobre áreas de floresta. Esses resultados corroboram a ideia de que a expansão direta de terras para a produção de biocombustíveis pode evitar o desmatamento, mas ressalta a necessidade de avaliar os impactos indiretos, como o deslocamento de atividades agrícolas e pecuárias para áreas ambientalmente sensíveis (ADAMI et al., 2012).

Ao analisar tais externalidades das políticas de biocombustíveis no Brasil e nos Estados Unidos, Nuñez et al. (2013) destacam que a expansão da produção de etanol pode ser alcançada com a intensificação da pecuária, permitindo a liberação das terras de pastagem para o cultivo de cana-de-açúcar sem necessariamente deslocar a atividade, uma vez que intensificação permitiria o ganho de produtividade. Esse processo, embora eficiente em termos de uso da terra, depende de investimentos em tecnologia e mudanças nos sistemas de produção pecuária, como o uso de confinamento e pastagens melhoradas. Tais transformações podem gerar benefícios econômicos, mas também impõem desafios aos produtores locais devido aos custos iniciais de implementação (NUÑEZ et al., 2013)

Conforme apontado em Subramaniam et al. (2020), os estudos iniciais sobre a mudança no uso da terra focavam em modelar os efeitos da expansão dos biocombustíveis sobre terras destinadas a culturas alimentares utilizando modelos econômicos de equilíbrio geral e parcial para simular os impactos da conversão de terras agrícolas para a produção de matérias-primas energéticas, como cana-de-açúcar e milho.

A metodologia de equilíbrio parcial, segundo Hochman e Zilberman (2011), foi amplamente empregada para analisar impactos setoriais em mercados específicos, concentrando-se nas interações de um setor isolado em resposta a mudanças em variáveis relevantes, como políticas públicas, preços ou demanda. Em estudos que abordaram biocombustíveis e alimentos, o equilíbrio parcial permitiu avaliar as consequências diretas de mudanças na produção ou no preço dos biocombustíveis sobre o mercado agrícola, sem considerar a totalidade dos efeitos intersetoriais. Essa metodologia se baseia em suposições específicas sobre o comportamento das variáveis de interesse, permitindo simplificar as relações e focar em um ou alguns mercados isoladamente, como o agrícola e o de biocombustíveis.

Nos Estados Unidos, palco dos trabalhos iniciais, os estudos concentravam-se no etanol de milho, enquanto na Europa, na sequência, o foco era o biodiesel derivado do óleo de colza. A aplicação desses modelos revelou que a competição pelo uso da terra poderia resultar em pressões

sobre a oferta de alimentos, elevando os preços e gerando preocupações com a segurança alimentar (CHEN; KHANNA, 2013).

À medida que a produção de biocombustíveis se expandiu para outras regiões, como América Latina, África e Sudeste Asiático, a literatura passou a incluir com mais frequência países em desenvolvimento. No caso do Brasil, o artigo de Paris (2018) discute como a expansão contínua das áreas de cultivo de cana-de-açúcar para a produção de etanol impactou a oferta de outras culturas agrícolas, como soja, milho e arroz. O país se tornou um dos principais produtores e exportadores globais de biocombustíveis, e as políticas de incentivo à produção de etanol levaram a uma reconfiguração do uso da terra em várias regiões produtoras, com impactos diretos e indiretos sobre a agricultura e o meio ambiente.

Os resultados apresentados por Paris (2018) e Adami et al. (2012), corroboram estudos anteriores que se utilizaram da análise da mudança do uso da terra no Brasil, como é o caso do trabalho de Nassar et al. (2011). Ainda que a convergência entre autores que se debruçaram sobre o etanol no Brasil possa dar a sensação de um consenso científico e até mesmo de um esgotamento exploratório, o que ocorre é justamente o oposto. Os estudos que focaram na mudança do uso do solo são categóricos ao indicar a necessidade de estudos complementares que quantifiquem o impacto nos preços de cada mercado, aprofundando a análise dessa relação.

## **2.2 Relação entre preços de biocombustíveis e alimentos**

A relação entre os preços dos biocombustíveis e alimentos é um tema central no debate sobre os impactos da expansão dos biocombustíveis na economia global, especialmente em países como o Brasil, onde o etanol de cana-de-açúcar ocupa um papel estratégico na matriz energética.

O papel e a relação das *commodities* alimentares nos mercados de biocombustíveis foi amplamente estudado na literatura. Zhang et al. (2010) e Serra (2011) destacam que a ligação entre os preços do petróleo e dos biocombustíveis intensifica as flutuações nos mercados agrícolas, especialmente em contextos de alta volatilidade. Essas flutuações podem gerar um efeito cascata nos preços dos alimentos. Estes estudos demonstram que o resultado da pressão de insumos da produção de culturas bioenergéticas derivadas do aumento do preço dos combustíveis fósseis pode gerar pulsos inflacionários nos preços dos biocombustíveis. Além disso, estudos como os de Tyner (2010) e Vacha et al. (2013) argumentam que o aumento da produção de biocombustíveis em resposta a políticas energéticas gerou correlações mais fortes entre os mercados de energia e

agricultura, particularmente durante o período de 2006 a 2008.

Capitani e Gaio (2024), reforçam que a intensificação dessa relação se torna ainda mais evidente nestes períodos de crise. Os autores observaram que, no Brasil, a soja e a taxa de câmbio desempenharam um papel central como transmissores líquidos de volatilidade durante crises como a pandemia de COVID-19 e o conflito Rússia-Ucrânia. Esses eventos destacaram a relevância do câmbio como fator explicativo da dinâmica dos preços agrícolas em mercados emergentes, superando a influência dos preços do petróleo em muitos casos. Além disso, a transmissão de volatilidade do petróleo foi mais intensa logo após o início de eventos globais significativos, mas seus efeitos dissiparam mais rapidamente em comparação com os impactos do câmbio.

Pesquisas indicam que, além das *commodities* analisadas por Capitani e Gaio (2024), o milho e a soja consistentemente desempenham um papel central na transmissão de choques de preço devido à sua dupla função como insumos na produção de biocombustíveis e como *commodities* alimentares essenciais (SERRA; ZILBERMAN, 2013). Serra e Zilberman (2013), fazem uma densa revisão de literatura e apontam estudos baseados em modelos de cointegração e séries temporais que demonstram que esses produtos frequentemente estabelecem uma relação de longo prazo com os preços de outras *commodities* alimentares, sendo fortemente influenciados por mudanças nos preços da energia, especialmente do petróleo e do etanol (SAGHAIAN, 2010; SERRA et al., 2011).

A literatura revisada também sugere que, desde o crescimento da indústria de biocombustíveis, a relação entre os mercados de grãos e energia se fortaleceu, criando canais de transmissão de volatilidade. Campiche et al. (2007) encontraram evidências de que os preços do milho e da soja passaram a ser cointegrados com os preços do petróleo bruto, reforçando a tese de que o mercado de biocombustíveis atua como um mecanismo de ligação entre os mercados agrícola e energético. Serra et al. (2011) destacam que o milho responde fortemente às mudanças no mercado de etanol, mas não diretamente às flutuações do mercado de gasolina, reforçando a importância da intermediação dos biocombustíveis nesse processo.

A especulação nos mercados de *commodities* alimentares também tem sido recorrentemente identificada como um fator que amplifica a transmissão de volatilidade entre diferentes mercados. Gilbert (2010) argumenta que a crescente participação de investidores financeiros em contratos futuros de *commodities* alimentares tem intensificado os movimentos de preços e exacerbado a volatilidade. Cooke e Robles (2009) analisaram o impacto da especulação no mercado de milho,

trigo e soja e identificaram que a presença de investidores institucionais contribui para aumentar a interconectividade entre os mercados, potencializando a transmissão de choques de preço.

Além disso, a literatura sugere que o crescimento do mercado de biocombustíveis adicionou uma nova dimensão especulativa ao setor agrícola. Esmacili e Shokoohi (2010) demonstram que os preços do petróleo têm um efeito indireto sobre os preços dos alimentos ao influenciar a percepção dos investidores sobre a rentabilidade dos biocombustíveis. Dessa forma, a relação entre os mercados de energia e de *commodities* alimentares não se limita apenas a fundamentos de oferta e demanda, mas também reflete a dinâmica do mercado financeiro e a influência de grandes fundos de investimento, o que inclui a sua correlação de preços futuros.

Kristoufek et al. (2012) analisaram a relação entre preços de biocombustíveis, petróleo e *commodities* alimentares por meio de métodos estatísticos avançados, como *wavelets* e análise de árvores hierárquicas. Seus achados reforçam que a especulação tem um papel relevante na formação dos preços, especialmente em períodos de alta volatilidade nos mercados financeiros globais. Esses resultados corroboram a necessidade de considerar fatores financeiros na modelagem da transmissão de preços, além dos tradicionais choques de oferta e demanda.

A interdependência entre os mercados de biocombustíveis e alimentos se manifesta de forma mais intensa em períodos de alta volatilidade, como crises econômicas e mudanças significativas nas políticas de incentivo à produção de biocombustíveis. Esses eventos exacerbam a relação entre os preços das *commodities* alimentares e os combustíveis, gerando uma dinâmica complexa que influencia tanto o custo de vida quanto a segurança alimentar (ZHANG et al., 2010; AJANOVIC, 2011).

A crise de 2008 é um dos momentos bases para estas análises de instabilidade. Neste período, a produção de biocombustíveis gerou pressões adicionais nos mercados de alimentos devido à maior competição por recursos como terras e insumos agrícolas. Hochman et al. (2012) ressaltam que os preços elevados das *commodities* alimentares não resultaram apenas do aumento da demanda por biocombustíveis, mas também de fatores como políticas comerciais protecionistas e especulação nos mercados futuros. Esses autores sugerem que o impacto combinado dessas variáveis intensificou os picos de preços nos mercados globais de alimentos, afetando principalmente países em desenvolvimento.

Análises mais recentes, como as de Palazzi et al. (2024), reforçam a relevância de considerar o comportamento dos mercados futuros de *commodities* em períodos de crise global.

Esses mercados não apenas amplificam a volatilidade nos preços agrícolas, mas também desempenham um papel na formação das expectativas dos agentes econômicos, afetando decisões de plantio e investimento.

No contexto brasileiro, a relação entre os preços dos biocombustíveis e alimentos é influenciada por fatores específicos, como a predominância do etanol de cana-de-açúcar e as políticas de preços da Petrobras. Conforme detalhado no trabalho de Kristoufek et al. (2012), o Brasil utiliza o etanol como um substituto direto da gasolina, o que cria um canal de causalidade e de transmissão de preços do setor de energia para o setor agrícola. Quando os preços internacionais do petróleo sobem, há um aumento na demanda por etanol, elevando os preços da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, pressionando os preços de produtos alimentares relacionados, como o açúcar. Essa conexão entre os preços é amplificada quando os custos de insumos agrícolas, como fertilizantes e pesticidas, também são influenciados pelas flutuações nos preços do petróleo.

Em contrapartida às transmissões de volatilidade fortemente identificada entre câmbio e petróleo, o estudo de Kristoufek et al. (2013) sobre mercados emergentes mostrou que, embora o Brasil seja fortemente dependente da cana-de-açúcar para a produção de etanol, seu efeito causal para os preços de alimentos é menos pronunciado do que em mercados como o dos Estados Unidos. Isso ocorre porque, no Brasil, a cana-de-açúcar é predominantemente cultivada em terras menos apropriadas para culturas alimentares essenciais, minimizando a competição direta por recursos agrícolas. Essa dinâmica também foi corroborada por Serra e Zilberman (2013), que identificaram que os impactos dos biocombustíveis sobre os preços dos alimentos variam significativamente de acordo com as condições locais e os sistemas de produção.

Além das especificidades geográficas apresentadas pelos estudos, estes também corroboram que o período de análise contribui para os resultados, assumindo uma variação nas relações entre os preços dos produtos. Momentos de crise acentuam correlações de preços, causando especificidades não observadas em momentos de estabilidade. Os primeiros estudos que se usaram da comparação temporal se voltaram para a crise financeira de 2008/09 (SERRA, 2011; HESARY et al., 2019). Com o histórico recente, a crise da COVID-19 e o conflito entre Ucrânia e Rússia geraram fortes flutuações nos preços das *commodities* em todo o mundo, tendo atraído o interesse de pesquisadores que incluíram tais recortes temporais às suas séries para fins de análise e comparação (MANELLI et al., 2024; URAK et al., 2024).

A pandemia de COVID-19 introduziu uma nova dinâmica nessa relação, como discutido

no estudo de Urak et al. (2024). Com as medidas de restrição ao transporte e as mudanças abruptas nos padrões de consumo, a demanda por combustíveis caiu, resultando em uma queda nos preços do petróleo e, por extensão, nos preços do etanol. Essa redução afetou negativamente a rentabilidade dos produtores de cana-de-açúcar, gerando uma pressão econômica sobre as regiões produtoras e provocando ajustes nos preços de outras *commodities* alimentares. Ao mesmo tempo, as interrupções nas cadeias globais de suprimento levaram a aumentos nos preços de alimentos, exacerbando a insegurança alimentar, especialmente entre as populações mais vulneráveis.

Conflitos geopolíticos, como a guerra entre Rússia e Ucrânia, também impactam significativamente a relação entre os preços de biocombustíveis e alimentos. Conforme analisado por Urak et al. (2024), a guerra desencadeou choques nos mercados globais de energia e grãos, com a Rússia e a Ucrânia sendo grandes exportadores de trigo e outros produtos agrícolas essenciais. Esses choques elevaram os preços dos grãos e dos combustíveis, incluindo o petróleo e seus substitutos renováveis, como o etanol. No Brasil, os efeitos dessas flutuações foram sentidos tanto nos preços internos de combustíveis quanto nos preços de produtos agrícolas, evidenciando a interconectividade dos mercados globais e as vulnerabilidades que surgem em períodos de crise.

Além dos fatores econômicos, a interdependência entre os preços dos biocombustíveis e alimentos envolve aspectos políticos, como as políticas de incentivo à produção de biocombustíveis, que influenciam diretamente o comportamento dos mercados. Conforme discutido por Ajanovic (2011), políticas que incentivam o uso de biocombustíveis, por meio de subsídios ou mandatos de mistura, podem afetar os preços das *commodities* alimentares ao alterar a demanda por matérias-primas utilizadas tanto na produção de energia quanto na alimentação. Isso ocorre porque a alocação de recursos para o cultivo de culturas energéticas pode limitar a oferta de alimentos, elevando seus preços e gerando implicações econômicas e sociais significativas.

Portanto, a relação entre os preços dos biocombustíveis e alimentos é multifacetada e depende de uma série de fatores, incluindo flutuações nos mercados de energia, mudanças nas políticas econômicas e eventos globais imprevistos, como pandemias e conflitos geopolíticos. Compreender essa interdependência é essencial para desenvolver políticas públicas que possam mitigar os efeitos adversos das flutuações de preços sobre a economia e a segurança alimentar, especialmente em países como o Brasil, onde a matriz energética e a produção agrícola são intrinsecamente conectadas.

Nesse sentido, Trujillo-Barreras et al. (2012) sugerem que o aumento da produção de

biomassa e óleos vegetais para biocombustíveis exacerba a concorrência por insumos agrícolas, gerando implicações globais tanto para a segurança energética quanto para a alimentar. Ao mesmo tempo, estudos como os de Frenk e Turbeville (2011) apontam que choques nos mercados de energia afetam desproporcionalmente os países em desenvolvimento, onde a elasticidade da oferta de alimentos é mais baixa. Assim, entender a interação entre mercados de energia e agricultura é essencial para mitigar os impactos negativos em populações vulneráveis, especialmente em países emergentes como o Brasil

Por fim, a relevância de fatores locais, como o papel do Brasil como grande exportador agrícola e produtor de biocombustíveis, ressalta a necessidade de políticas públicas adaptadas às especificidades nacionais. Segundo Capitani (2018), a expansão da produção de etanol no Brasil não deve ser vista como uma ameaça direta à segurança alimentar, mas sim como uma oportunidade para alavancar a sustentabilidade energética e agrícola. No entanto, essa integração exige um monitoramento constante dos impactos das políticas de preços de combustíveis e câmbio sobre os mercados domésticos e internacionais.

### **2.3. Transmissão de volatilidade entre os preços de biocombustíveis e alimentos**

A transmissão de volatilidade entre os preços dos biocombustíveis e das *commodities* alimentares é um tema amplamente discutido na literatura, especialmente no contexto de choques econômicos globais e mudanças abruptas nos mercados de energia. A volatilidade é transmitida de um mercado para outro por meio de mecanismos econômicos, como custos de produção, políticas de incentivo e especulação nos mercados futuros. Essa transmissão ocorre em várias direções, criando um ciclo de retroalimentação marcado por relações de causalidade (BENTIVOGLIO; RASETTI, 2015).

A transmissão de volatilidade, contudo, é um termo abrangente que engloba processos distintos de variações simultâneas ou consecutivas de preços entre mercados com correlações verificadas. A literatura tipificou estes processos, caracterizando-os com bases em suas especificidades. Dentre estes conceitos, está o *spillover*. O *spillover* se refere às interações econômico-financeiras que um mercado possui sobre outros mercados, ainda que de forma indireta (COASE, 1960). Este conceito pode ser exemplificado pelo efeito de transbordamento de preços existentes em produtos cuja matéria-prima comum sofre um processo de inflação de oferta, por exemplo. O aumento de preços de um produto primário, neste exemplo por conta da sua escassez,

interfere e causa aumentos de preços nos mercados que se utilizam deste produto como matéria-prima. Essa transmissão de volatilidade de preços pode ser tipificada como *spillover*.

O grau de correlação entre as variações de preços entre mercados e a sua perenidade ou intermitência também são características observadas para especificar a transmissão de volatilidade entre produtos distintos. Inter-relações de mercados cuja intensidade se aumenta de forma abrupta e que é marcada por eventos incomuns, como por exemplo choques macroeconômicos, são chamados de contágios. Vale destacar que o aumento, vinculado aos choques macroeconômicos, é uma condição importante, uma vez que se a inter-relação for forte e constante, independente dos choques, tipifica-se como interdependência e não mais como contágio (FORBES; RIGOBON, 2002).

A integração de mercados, por sua vez, acontece quando mercados diferentes estão conectados, fazendo com que seus preços se relacionem e respondam a influências em comum, como o preço de um produto similar ou fatores sazonais. No entanto, modelos simples podem levar a interpretações erradas, já que fatores externos podem dar a impressão de conexão mesmo quando não há comércio real entre os mercados (RAVALLION, 1986).

O conceito de transmissão de preços, por fim, ocorre quando variações em um mercado influenciam outros, como no impacto dos preços internacionais sobre os preços ao consumidor. Esse processo reflete o nível de conexão entre mercados, que pode ser total ou parcial, dependendo de fatores como custos de transação e políticas de mercado. A conectividade, conceito complementar, refere-se à interdependência entre estes mercados, analisando como choques em um setor afetam outros por meio de redes econômicas. No comércio global de *commodities*, por exemplo, uma crise na exportação de milho no Brasil, se não suprida pela oferta de outros países exportadores, pode elevar os preços destes produtos em outras regiões, estimulando a migração para produtos substitutos, como a soja. Esse fenômeno é essencial para entender a segurança alimentar e a estabilidade econômica, já que eventos em um ponto da cadeia de suprimentos podem gerar impactos amplos e inesperados. Essas dinâmicas foram analisadas por Frey e Manera (2007). A combinação dos conceitos de transmissão de preços e conectividades são, então, centrais para o entendimento da transmissão de volatilidade.

Os primeiros estudos sobre a transmissão de volatilidade nos mercados de biocombustíveis, conforme apresentado por Paientko e Amakude (2024), concentraram-se nos Estados Unidos e Europa, onde o etanol de milho e o biodiesel estavam fortemente integrados às cadeias de

suprimento agrícola. Nesses mercados, as flutuações nos preços do petróleo eram transmitidas para os preços do milho e da soja, uma vez que esses grãos eram utilizados tanto para a alimentação quanto para a produção de biocombustíveis. Os resultados mostraram que a transmissão de volatilidade era mais intensa em períodos de alta nos preços do petróleo, o que gerava aumentos nos preços das matérias-primas agrícolas e provocava preocupações com a inflação dos preços dos alimentos.

No Brasil, a dinâmica da transmissão de volatilidade assume características distintas devido ao uso predominante de cana-de-açúcar para a produção de etanol. Como discutido por Xue et al. (2024), embora a cana-de-açúcar não substitua diretamente as culturas alimentares, a expansão das áreas de cultivo de cana pode impactar indiretamente a oferta de alimentos ao redirecionar terras agrícolas para a produção de biocombustíveis. Quando os preços do petróleo aumentam, os preços do etanol tendem a subir, incentivando a expansão das áreas de cultivo de cana, o que pode levar a uma maior pressão sobre outras culturas agrícolas. Essa pressão é transmitida para os preços dos alimentos, afetando principalmente os produtos mais sensíveis a variações nos custos de insumos e terras, como o milho e a soja.

A crise financeira de 2008/09 exemplifica como a transmissão de volatilidade entre os mercados de biocombustíveis e alimentos pode ser intensificada em períodos de turbulência, caracterizados por mudanças macroeconômicas abruptas. Durante esse período, conforme analisado no artigo de Martignone et al. (2024), a especulação nos mercados futuros de *commodities* contribuiu para amplificar a volatilidade dos preços, com os investidores buscando proteção contra a incerteza econômica. No Brasil, os aumentos nos preços do etanol desencadearam uma série de ajustes nos preços de outras *commodities*, como o açúcar e o milho, evidenciando a interconectividade entre os mercados e os efeitos das flutuações globais sobre a economia doméstica. Efeitos na transmissão de volatilidade entre preços de *commodities* também foram sentidos em choques mais recentes, nomeadamente a pandemia de COVID-19 e a Guerra da Ucrânia, em estudos no exterior, conforme indicam Urak et al. (2024).

A interconectividade entre os mercados de biocombustíveis e alimentos tem sido amplamente estudada, especialmente no contexto de crises econômicas e geopolíticas que amplificam a transmissão de volatilidade entre esses setores. Wang et al. (2020) demonstram que a volatilidade nos preços do petróleo, impulsionada por choques econômicos globais, se propaga rapidamente para os mercados agrícolas e financeiros, intensificando a instabilidade das

*commodities* energéticas e alimentares. Esse efeito é particularmente acentuado em períodos de crise financeira, como a de 2008, quando a incerteza global reforçou os mecanismos de transmissão de volatilidade, tornando os mercados agrícolas mais suscetíveis a flutuações externas.

No contexto da pandemia de COVID-19, Dmytrów et al. (2021) analisaram as conexões entre os preços de *commodities* energéticas e os impactos econômicos da crise sanitária. Utilizando a metodologia Dynamic Time Warping (DTW), os autores identificaram que o etanol, o gás natural e as permissões de emissão de CO<sub>2</sub> apresentaram forte correlação com a evolução da pandemia, evidenciando como restrições de mobilidade e retração econômica global reduziram a demanda por combustíveis e desencadearam um efeito cascata sobre os mercados agrícolas, especialmente milho e soja. Quintino et al. (2023) aprofundaram essa análise ao examinar as dinâmicas entre etanol, petróleo e gás natural no mercado norte-americano, demonstrando que, no período pós-pandêmico, o etanol passou a apresentar correlação negativa com o gás natural em curtos prazos. Esse achado reforça a tese de que choques exógenos podem reconfigurar padrões históricos de transmissão de volatilidade entre mercados energéticos e agrícolas.

A relação entre os preços de energia e alimentos não se limita a períodos de crise, mas reflete interdependências estruturais. Saghaian et al. (2018) investigaram a causalidade entre os mercados agrícolas e energéticos, analisando se os preços do petróleo afetam os preços das *commodities* alimentares. Embora tenham identificado uma forte correlação entre esses mercados, os resultados não foram conclusivos quanto a uma relação causal direta, sugerindo que a transmissão de volatilidade pode ser mediada por fatores como estoques globais, subsídios governamentais e taxas de câmbio. Essa complexidade também foi abordada por Cabrera e Schulz (2016), que exploraram os riscos de volatilidade entre os mercados de energia e *commodities* alimentares por meio de modelos econométricos avançados, como DCC-GARCH e modelos de volatilidade multiplicativa. Os autores demonstraram que, no longo prazo, os preços tendem a preservar um equilíbrio, mas no curto prazo os choques de mercado geram efeitos persistentes, elevando a correlação entre biocombustíveis e produtos agrícolas.

Além dos efeitos de crises financeiras e das interconexões estruturais, choques geopolíticos também exercem influência sobre a transmissão de volatilidade entre os mercados agrícola e energético. Capitani e Gaio (2023) analisaram o impacto da guerra entre Rússia e Ucrânia sobre a volatilidade dos preços de *commodities* alimentares, com foco na transmissão de volatilidade entre petróleo, trigo, milho e soja no mercado global e no Brasil. Os autores identificaram um aumento

na transmissão de volatilidade entre petróleo e grãos durante o período de conflito, especialmente no mercado internacional, onde os efeitos foram mais pronunciados devido à importância da Rússia e da Ucrânia na produção global de grãos. No Brasil, entretanto, a transmissão de volatilidade se manteve próxima aos níveis do período pré-conflito, sugerindo que outros fatores, como a taxa de câmbio e a estrutura do mercado doméstico, atenuaram os impactos diretos dos choques internacionais nos preços locais.

Essas análises reforçam a importância de considerar múltiplas variáveis na avaliação da transmissão de volatilidade entre biocombustíveis e alimentos, incluindo não apenas fatores macroeconômicos e estruturais, mas também o contexto geopolítico e a influência de eventos extraordinários. Os padrões de volatilidade observados ao longo do tempo indicam que os mercados agrícolas e energéticos estão cada vez mais integrados, o que exige abordagens sofisticadas para modelagem e previsão de preços, bem como políticas públicas que busquem mitigar os efeitos negativos da volatilidade sobre segurança alimentar e estabilidade econômica.

## 2.4 Modelos para análise de transmissão de volatilidade e contágio

A análise da transmissão de volatilidade e contágio entre os mercados de biocombustíveis e alimentos tem sido uma área de pesquisa bastante explorada, com o uso de modelos econométricos sofisticados que capturam a complexidade das interações dinâmicas. Entre os principais modelos utilizados para essa finalidade estão os modelos GARCH (*Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity*), VAR (Vetores autorregressivos), VECM (Vetores autorregressivos com correção de erros) e, mais recentemente, o TVP-VAR (*Time-Varying Parameter Vector Autoregressions*), que permite uma abordagem mais flexível e robusta ao considerar variações nos parâmetros ao longo do tempo. Esses modelos são essenciais para entender como choques econômicos, políticas públicas e eventos globais afetam os preços de *commodities* alimentares e energéticas, proporcionando *insights* valiosos para a formulação de políticas econômicas.

O modelo GARCH, segundo Wu et al. (2024), foi um dos primeiros a serem utilizados para capturar a transmissão de volatilidade nos mercados de *commodities*. Ele é eficaz na análise da persistência da volatilidade e na avaliação da magnitude dos choques em séries temporais, sendo amplamente aplicado em estudos que analisam a relação entre os preços de combustíveis e alimentos. No entanto, o GARCH apresenta limitações ao lidar com múltiplas variáveis e com a

complexidade das interações entre diferentes mercados, sendo indicado o uso de abordagens mais personalizadas para capturar as interdependências dinâmicas.

Os modelos GARCH também são frequentemente aplicados para estudos com séries temporais com ativos dos mercados financeiros. Esse nicho de aplicação ocorre, pois, este modelo também avança na análise de *spillovers*, dando foco na relação perene entre mercados e os impactos dessas correlações, análise que gera informações relevantes para estudos de construções e diversificações de carteiras, por exemplo (ANTONAKAKIS et al., 2020). Em suma, pode-se dizer que o objetivo do modelo é a variância temporal de um ativo específico, enquanto os modelos de Correlação Condicional (como o CCC e DCC-GARCH) lidam com a interação entre ativos.

Vale esclarecer, porém, que ao tratar dos modelos “GARCH”, refere-se a um grupo de variantes do modelo original, que tem como orientação corrigir parte das limitações do modelo e/ou especificar o modelo para um recorte específico. O modelo seminal, ARCH GARCH, foi derivado para o modelo EGARCH (*Exponential GARCH*), que modela a volatilidade usando uma especificação exponencial, capturando efeitos assimétricos. Na sequência, derivou-se para o modelo OGARCH (*Orthogonal GARCH*), aderindo a possibilidade de decomposição matricial de variância em componentes ortogonais e, por fim, para os modelos APARCH (*Asymmetric Power GARCH*) e FIGARCH (*Fractionally Integrated GARCH*), modelando a volatilidade com funções exponenciais e com integração fracionária, respectivamente (GLOSTEN et al., 1993 ; DING et al., 1993 ; BAILLIE et al., 1996).

As variações dos modelos, contudo, não avançaram definitivamente sobre a principal limitação do modelo – a baixa aderência para lidar com múltiplas variáveis. Para tanto, a literatura caminhou para o uso de modelos de vetores autoregressivos (VAR) e modelos com correção de erros vetoriais (VECM), que permitem analisar simultaneamente as relações de curto e longo prazo entre variáveis interconectadas. Conforme abordado por Just e Echaust (2022), os Modelos Autorregressivos Vetoriais (VAR) são amplamente utilizados para capturar interdependências lineares entre múltiplas séries temporais, sendo especialmente úteis para observar como variáveis econômicas se influenciam mutuamente ao longo do tempo. Em um modelo VAR tradicional, cada variável é expressa como uma combinação linear de seus próprios valores passados e dos valores passados de outras variáveis no sistema. A formulação geral de um modelo VAR(p) é:

$$Y_t = c + A_1Y_{t-1} + A_2Y_{t-2} + \dots + A_pY_{t-p} + \epsilon_t \quad (1)$$

em que  $Y_t$  é um vetor de  $k$  variáveis endógenas no tempo  $t$ ;  $c$  é um vetor de constantes;  $A_i$  são matrizes de coeficientes de dimensão  $k \times k$ ; e  $\epsilon_t$  é um vetor de termos de erro com média zero e matriz de covariância  $\Sigma$ .

Ainda segundo Just e Echaust (2022), uma limitação dos modelos VAR tradicionais é a suposição de que os coeficientes  $A_i$  permanecem constantes ao longo do tempo. Essa suposição pode ser inadequada em contextos em que as relações entre as variáveis evoluem devido a mudanças estruturais, políticas econômicas ou outros fatores dinâmicos, como crises financeiras ou choques externos.

Novamente, com o intuito de endereçar as limitações, surgiram os Modelos Autorregressivos Vetoriais com Parâmetros Variantes no Tempo (TVP-VAR). Nos modelos TVP-VAR, os coeficientes  $A_i$  podem variar ao longo do tempo, o que torna o modelo mais flexível e capaz de capturar melhor as mudanças estruturais nas interações entre as múltiplas variáveis. A formulação de um modelo TVP-VAR é:

$$Y_t = c_t + A1_t Y_{t-1} + A2_t Y_{t-2} + \dots + AP_t Y_{t-p} + \epsilon_t \quad (2)$$

Nesse modelo, os coeficientes  $c_t$  e  $A_i$  variam ao longo do tempo, permitindo que o modelo se adapte a mudanças nos dados de forma dinâmica. A evolução desses coeficientes é frequentemente modelada por processos estocásticos, como caminhadas aleatórias ou processos de média móvel, que representam como os parâmetros respondem a choques ao longo do tempo.

A introdução de parâmetros variantes no tempo nos modelos VAR permite capturar com mais precisão a natureza dinâmica das interações entre variáveis econômicas. Essa abordagem é especialmente útil em análises macroeconômicas e em estudos de transmissão de volatilidade entre mercados, onde as interações podem ser influenciadas por políticas econômicas, choques externos ou mudanças estruturais no mercado (ZHANG et al., 2010).

O modelo TVP-VAR surge, então, como uma solução para essa limitação, permitindo que os coeficientes de resposta às variáveis mudem ao longo do tempo, capturando as mudanças estruturais nas interações entre os preços de biocombustíveis e alimentos (ZHANG et al., 2010). Avaliando a escolha da metodologia frente ao recorte do estudo, vale reforçar que a abordagem é particularmente relevante para analisar períodos de crise, onde as relações entre os mercados

podem se intensificar ou enfraquecer, dependendo das condições econômicas e das políticas públicas em vigor. Por exemplo, o uso do TVP-VAR pode identificar se a transmissão de volatilidade entre os preços do etanol e do açúcar no Brasil se intensificou durante a pandemia de COVID-19, fornecendo *insights* sobre os fatores que amplificam as flutuações de preços.

Por fim, o TVP-VAR também permite a inclusão de variáveis exógenas, como a taxa de câmbio e os preços do petróleo, para modelar melhor os choques externos que afetam os mercados domésticos. Segundo Fang e Shao (2022), a inclusão dessas variáveis é crucial para entender os efeitos indiretos das flutuações nos mercados globais sobre os preços agrícolas e energéticos no Brasil. Por exemplo, uma depreciação cambial pode aumentar os custos de insumos importados, como fertilizantes, elevando os preços das *commodities* alimentares. Da mesma forma, flutuações nos preços do petróleo afetam diretamente os custos de produção de biocombustíveis, criando um canal adicional de transmissão de volatilidade para os preços dos alimentos.

A combinação dos modelos VAR com a atribuição dos mecanismos de parâmetros variáveis no tempo (TVP), foi a construção mais aderente para pesquisas de cunho econômico de longo prazo e com interações de multi-correlações dinâmicas. Isso porque o modelo flexibiliza os parâmetros de correlação entre as variáveis ao longo do tempo com base na sensibilidade de períodos anteriores, ou seja, se adaptando aos cenários dinâmicos e não perpetuando correlações estáticas. Além disso, por ser um modelo VAR, mantém a função de modelar diversas variáveis (FURUOKA et al., 2023).

Outro modelo que ganhou destaque na análise de contágio e transmissão de volatilidade, possuindo a característica de avaliar parâmetros variáveis no tempo, é o TVP-VECM (*Time Varying Parameter Vector Error Correction Model*), que é particularmente útil quando há evidências de cointegração entre as variáveis, indicando uma relação de equilíbrio de longo prazo. O TVP-VECM é capaz de capturar tanto as interações de curto prazo quanto os ajustes em direção ao equilíbrio de longo prazo, fornecendo uma visão abrangente das interdependências entre os preços de biocombustíveis e alimentos. Esse modelo é especialmente relevante para mercados altamente integrados, onde mudanças nos preços de uma *commodity* são rapidamente transmitidas para outras (WU et al., 2024).

Apesar das capacidades dos modelos GARCH, VAR e VECM, o TVP-VAR continua a ser uma escolha preferida para estudos que exigem a análise de mudanças estruturais ao longo do tempo. A flexibilidade do TVP-VAR em capturar variações temporais nos padrões de

interdependência faz dele uma ferramenta poderosa para avaliar os impactos de choques econômicos e políticas públicas em diferentes momentos históricos. O uso de abordagens variantes no tempo é essencial para identificar os períodos em que a transmissão de volatilidade é mais intensa, o que pode ser útil para a formulação de políticas que busquem estabilizar os mercados e mitigar os efeitos adversos sobre a segurança alimentar (ZHANG et al., 2010).

A escolha do modelo de análise deve levar em consideração a natureza das interdependências entre os mercados e a disponibilidade de dados. Modelos mais sofisticados, como o TVP-VAR, exigem séries temporais longas e de alta frequência para capturar as variações nos parâmetros com precisão. Portanto, a aplicação do TVP-VAR neste estudo não apenas contribui para a compreensão das dinâmicas de transmissão de volatilidade no Brasil, mas também fornece uma base sólida para a avaliação das políticas econômicas e energéticas em contextos de alta incerteza.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Modelo de série temporal

Com relação ao modelo, esta dissertação adota a metodologia baseada no modelo *Time-Varying Parameter Vector Autoregression* (TVP-VAR) para investigar a transmissão de volatilidade e a conectividade dinâmica entre os preços dos biocombustíveis e das culturas graneleiras alimentares no Brasil. Essa abordagem econométrica, como detalhada no tópico anterior, permite estimar parâmetros que variam ao longo do tempo, capturando de forma eficaz as mudanças estruturais nas relações entre variáveis durante períodos de crise e em cenários de alta volatilidade.

Matematicamente, a demonstração linear dos modelos VAR está contida na equação 3, onde  $y$  representa um vetor dimensional  $K \times 1$  com  $K$  variáveis no tempo  $T$  e  $B$  e representa uma matriz de coeficientes  $K \times K$ .

$$Y_t = c + B_1 Y_{t-1} + \dots + B_p Y_{t-p} + \epsilon_t \quad (3)$$

Sendo o modelo TVP-VAR uma variação do modelo VAR representado pela equação 2 (reapresentada abaixo), este estudo usou o modelo derivado por Antonakakis et al. (2020).

Diferentemente do VAR tradicional, que assume parâmetros fixos, a modelagem matemática do TVP-VAR permite mudanças estruturais nas relações entre as variáveis.

$$Y_t = c_t + A1_t Y_{t-1} + A2_t Y_{t-2} + \dots + AP_t Y_{t-p} + \epsilon_t \quad (4)$$

Em que  $Y_t$  é um vetor de  $k$  variáveis endógenas no tempo  $t$ ;  $c$  é um vetor de constantes;  $A_i$  são matrizes de coeficientes de dimensão  $k \times k$ ;  $\epsilon_t$  é um vetor de termos de erro com média zero e matriz de covariância  $\Sigma$

A ordem de defasagem ideal do modelo, determinada pelo Critério de Informação Bayesiano (BIC), é definida como 1, conforme representado na Equação 5.

$$Y_t = c + B_t Y_t - 1 + \epsilon_t \quad (5)$$

$$\epsilon_t \sim N(0, \Sigma_t) \quad (6)$$

$$Vec(B_t) = Vec(B_{t-1}) + v_t \quad (7)$$

$$v_t \sim N(0, R_t) \quad (8)$$

Sendo,  $Y_t$ ,  $Y_{t-1}$  e  $\epsilon_t$  vetores dimensionais  $K \times 1$ ,  $B_t$  e  $\Sigma_t$  matrizes dimensionais  $K \times K$ ,  $Vec(B_t)$  e  $V_t$  vetores dimensionais de  $K^2 \times 1$  e  $R_t$  uma matriz dimensional de  $K^2 \times K^2$ .

O modelo baseia-se na ideia de que as séries de preços de *commodities* estão interconectadas e que essas interconexões podem mudar ao longo do tempo. O TVP-VAR permite capturar essas mudanças, proporcionando uma compreensão mais aprofundada de como os mercados reagem a eventos de crise (MISHRA et al., 2023).

Algebricamente, desde que a série temporal esteja enquadrada como estacionária, a equação 2 pode ser reescrita em TVP-VMA( $\infty$ ) como  $Y_t = A_{\infty(B)} \epsilon_t$  onde  $A_{\infty(B)}$  é a matriz das médias móveis do polinômio de defasagem obtida a partir da equação 9.

$$A_{\infty(B)} = [IN - A_{1(B)} - \dots, A_{p(B)}] \quad (9)$$

sendo  $IN$  uma matriz identidade. O parâmetro  $A_{\infty(B)}$  inclui um número infinito de defasagens que são aproximadas por  $A_{h(B)}$  para  $h = 1, \dots, H$  horizontes.

Dado a característica do modelo TVP-VAR, que se utiliza dos coeficientes e covariâncias

de erro variáveis no tempo para estimar o procedimento de conectividade generalizada (DIEBOLD; YILMAZ, 2015), há a dependência de funções generalizadas de resposta ao impulso e de decomposições generalizadas da previsão dinâmica da variância do erro (GIRF e GFEVD, respectivamente e em inglês) desenvolvidas por Pesaran e Shin (1998). Os GIRFs são responsáveis por partir de uma variável de análise e evidenciar o impacto da alteração da variável de análise nas demais variáveis do modelo. Sendo assim, mostra a resposta das variáveis dependentes dado uma volatilidade ou choque na variável analisada.

O GFEVD, por sua vez, evidencia a parcela explicativa de variância que uma variável tem sobre as outras. Com a equação do TVP-VAR demonstrada em média móvel vetorial (VMA), é possível calcular GFEVD.

$$\widetilde{\theta}_{jk,t}(H) = (\Sigma_t)_{kk}^{-1} \sum_{h=0}^H [(Ai_h \Sigma_t)_{jkt}]^2 / \sum_{h=0}^H (Ai_h \Sigma_t Ai_h')_{jj} \quad (10)$$

A variável  $\theta_{jk,t}(H)$  representa a contribuição total dos termos de previsão de erro da variância da variável  $j$  para a variável  $i$  ao longo do horizonte de previsão  $H$ . O numerador da equação 10 captura os efeitos cumulativos dos choques originados na variável  $j$ , enquanto o denominador agrega os efeitos totais acumulados das interconexões dentro da rede. De acordo com a teoria, ambos devem ser normalizados de forma que sua soma resulte em 1. A normalização pode ser expressa pela equação 11.

$$\theta_{jk,t}(H) = \frac{\widetilde{\theta}_{jk,t}(H)}{\sum_{nk} \widetilde{\theta}_{jk,t}(H)} = 1 \quad (11)$$

$$\text{Em que, } \sum_{nk} \theta_{jk,t}(H) = 1 \text{ e } \sum_{j,k=1}^n \theta_{jk,t}(H) = n$$

Para determinar a frequência da conectividade total no modelo TVP-VAR e suas respectivas métricas, realiza-se a decomposição da previsão do erro da variância, conforme definido na equação 11, separando os impactos de curto e longo prazo. A conectividade de frequência dependente do tempo é obtida ao incorporar a conectividade de frequência ao modelo dinâmico TVP-VAR previamente descrito. Assim, ao substituir a abordagem temporal pela análise no domínio da frequência, a decomposição baseada na transformada de Fourier do modelo TVP-

VMA ( $\infty$ ) em (1) pode ser representada da seguinte forma:

$$S_y(\omega) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} E(y_t y'_{t-h}) e^{-i\omega h} = A_i(e^{-i\omega h}) \Sigma_t A_i'(e^{-i\omega h}) \quad (12)$$

Em que,  $i = (-1)^{1/2}$  e  $\omega$  é a frequência de Fourier.

A versão normalizada da frequência GFEVD pode ser representada pela equação 13.

$$\overline{\Phi}_{jk,t}(\omega) = \frac{\widetilde{\Phi}_{jk,t}(\omega)}{\sum_{k=1}^n \overline{\Phi}_{jk,t}(\omega)} \quad (13)$$

onde  $\widetilde{\Phi}_{jk,t}(\omega)$  faz parte do espectro da variável  $jth$  sob a frequência  $\omega$  que é atribuída ao choque na  $kth$  variável.

A análise da conectividade em frequências distintas permite que todas as variações sejam agrupadas dentro da banda  $d$ , oferecendo insights sobre os efeitos *spillover* neste intervalo de frequências. A conectividade, por sua vez, pode ser expressa por meio da integral de  $\overline{\Phi}_{jk,t}(d)$  conforme definido pela seguinte equação:

$$\overline{\Phi}_{jk,t}(d) = \int_a^b \overline{\Phi}_{jk,t}(\omega) d\omega \quad (14)$$

Aqui,  $d = (a, b)$  com  $a, b \in (-\pi, \pi)$  e  $a < b$  ou  $d = (a, b)$  com  $a, b \in (-\pi, \pi)$  e  $a < b$ .

As métricas de conectividade se baseiam na decomposição de variância. O impacto médio de um choque em uma variável específica  $j$  sobre o conjunto de variáveis  $k$  é um indicativo da interconexão da rede. Esse índice é representado pelo Índice de Conexão Total Médio ( $TFCI_{jk}$ ), que mede a quantidade de risco de mercado, avaliando a intensidade dos efeitos *spillover* que uma variável  $j$  transmite para as variáveis  $k$  ou mesmo recebe delas.

O cálculo do  $(TFCI_{jk})$  é obtido pela média da conectividade total ao longo do tempo dentro da rede, denotada como  $TFCI_t(d)$ , onde  $d$  se refere à dimensão da rede. Esse índice é dado pela seguinte fórmula:

$$TFCI_t(d) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n PARA_{j,t}(d) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n DE_{j,t}(d) \quad (15)$$

Neste caso,  $TFCI_t(d)$  representa o Índice de Conexão Total Médio da rede no período  $t$  para a dimensão  $d$ . Já  $PARA_{j,t}(d)$  refere-se ao índice que quantifica a conexão direcional de choques originados na variável  $j$  e transmitidos para as outras variáveis  $k$ ; e  $DE_{j,t}(d)$  mede o efeito dos choques recebidos pela variável  $j$  de outras variáveis  $k$ .

A relação entre os componentes  $PARA_{j,t}(d)$  e  $DE_{j,t}(d)$  é calculada da seguinte maneira:

$$PARA_{j,t}(d) = \sum_{k=1, k \neq j}^n A_{kj,t}(d) DE_{k,t}(d) \quad (16)$$

Em um cenário de interações bilaterais entre mercados, é possível medir a transmissão de riscos entre pares específicos de variáveis por meio da Conexão Direcional Líquida de Frequência Par-a-Par (NPDFC). Esta medida indica a direção e a intensidade com que os choques são transmitidos entre as variáveis, permitindo observar as relações dinâmicas de contágio. Quando o valor de  $NPDFC_{jk,t}(d)$  é positivo, isso implica que um choque em  $j$  afetará  $k$ , enquanto um valor negativo sugere que  $k$  exerce mais influência sobre  $j$ .

Ao analisar esses valores, quando  $NPDFC_{jk,t}(d) > 0$ , verifica-se que um choque na variável  $j$  resultará em um efeito de contágio sobre  $k$ , enquanto quando  $NPDFC_{jk,t}(d) < 0$ , o contrário ocorre: a variável  $k$  transmite choques para  $j$ .

Por fim, para mensurar o nível de conectividade entre pares de variáveis de forma quantitativa, Gabauer (2021) propôs o Índice de Conectividade Par a Par (PCI), que avalia a intensidade dessa interconexão numa escala de 0 a 100. O PCI é calculado com base na decomposição das variâncias de erro de previsão generalizadas (GFEVD), sendo  $K$  o horizonte de previsão do erro. A equação que define o PCI é:

$$[PCI_{ijt}^g(K) = 2 \left( \frac{\widetilde{A}_{ij,t}^g(K) + \widetilde{A}_{ji,t}^g(K)}{\widetilde{A}_{ii,t}^g(K) + \widetilde{A}_{jj,t}^g(K) + \widetilde{A}_{ij,t}^g(K) + \widetilde{A}_{ji,t}^g(K)} \right), \quad 0 \leq PCI_t^g(K) \leq 1] \quad (17)$$

A aplicação do TVP-VAR neste estudo com cálculo de variáveis dinâmicas permite superar

limitações associadas a abordagens tradicionais, como a necessidade de definição arbitrária de janelas móveis. Além disso, possibilita capturar as mudanças nos padrões de conectividade de forma mais precisa em períodos marcados por choques econômicos e geopolíticos, como a pandemia de Covid-19 e o conflito Rússia-Ucrânia. Os resultados obtidos fornecerão insights relevantes sobre as interrelações entre biocombustíveis e *commodities* alimentares, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas de mercado em economias emergentes.

### 3.2 Dados e estatística descritiva

Os dados utilizados nesta análise consistem em séries temporais semanais de preços de milho, soja, trigo, arroz, boi gordo, açúcar, e etanol, disponibilizadas pela página de séries temporais do CEPEA/ESALQ e acessadas via base Refinitiv via LSEG-WORKSPACE. Além disso, foram incluídos os preços *spot* do petróleo *Brent* e a taxa de câmbio USD/BRL (Ptax) como variáveis exógenas, com o objetivo de avaliar os impactos dos mercados globais de energia e do comércio internacional nas *commodities* alimentares brasileiras. A taxa de câmbio foi extraída da página de cotações e boletins do Banco Central e o preço do barril do petróleo *Brent* do IPEADATA, que se utilizou dos dados da *Energy Information Administration* (EIA). A Tabela 1 apresenta a descrição e fonte dos dados.

A frequência dos dados é semanal, com a primeira observação em 24 de março de 2006 e última observação em 28 de fevereiro de 2025, totalizando, assim, 989 observações que geraram 988 retornos. A justificativa para o início da série se encontra na disponibilidade dos dados. É apenas nesta data que o banco de dados do CEPEA/ESALQ oferece a frequência desejada para todas as *commodities* alimentares que fazem parte do recorte deste estudo.

Para o tratamento dos dados e para construção da estatística descritiva das séries, os dados foram tratados, conforme proposto por Akhtaruzzaman, et al. (2021), inicialmente calculando os retornos dos eventos por meio do delta dos logarítimos Newtonianos de cada um dos eventos com defasagem nível 1, justificando, assim, a diferença entre o número de observações e de retornos.

$$r_t = \ln(P_t) - \ln(P_{t-1}) \quad (18)$$

em que  $r_t$  equivale ao retorno do preço do período  $t$  e  $P_t$  é o preço observado da *commodity* no período  $t$ .

Tabela 1 – Descrição dos dados coletados

| Produto      | Descrição                       | Fonte       | Praça         | Volumetria    |
|--------------|---------------------------------|-------------|---------------|---------------|
| Ptax         | Taxa de câmbio comercial compra | BACEN       | Não se aplica | Não se aplica |
| <i>Brent</i> | Petróleo bruto <i>Brent</i>     | IPEADATA    | Não se aplica | Barril        |
| Hidratado    | Etanol hidratado                | CEPEA/ESALQ | SP            | Litro         |
| Açúcar       | Açúcar cristal branco           | CEPEA/ESALQ | SP            | Saca 50Kg     |
| Arroz        | Arroz em casca                  | CEPEA/ESALQ | RS            | Saca 50Kg     |
| Boi Gordo    | Boi gordo                       | CEPEA/ESALQ | SP            | Arroba        |
| Milho        | Milho                           | CEPEA/ESALQ | SP            | Saca 60Kg     |
| Soja         | Soja                            | CEPEA/ESALQ | PR            | Saca 60Kg     |
| Trigo        | Trigo                           | CEPEA/ESALQ | PR            | Saca 60Kg     |

Fonte: elaborado pelo autor.

Com o objetivo de subdividir a série temporal, isolando as observações para períodos de instabilidade econômica, os dados semanais de janeiro de 2008 a dezembro de 2009 foram analisados para o período classificado como a crise de 2008/2009, sabendo que a queda abrupta ocorreu a partir de julho de 2008 com recuperação inicial no primeiro trimestre de 2009. O período da pandemia de COVID-19, por sua vez, ocorreu entre fevereiro de 2020 e abril de 2023, segundo a própria Organização Mundial da Saúde (OMS), período este que também englobou o momento mais crítico da Guerra Rússia-Ucrânia nos mercados de *commodities* (CAPITANI; GAIO, 2024).

As Figuras 1 e 2, mostram, respectivamente o comportamento da variação dos preços, referente às séries estudadas, e de seus retornos. A comparação dos comportamento das curvas evidencia a importância da consideração dos retornos em detrimento dos preços para garantia das características de estacionariedade, que serão demonstradas na sequência. Ainda sobre as figuras 1 e 2, as linhas tracejadas recortam, do período total, os subperíodos de instabilidade econômica destacados neste estudo, sendo o primeiro recorte equivalente ao *boom* das *commodities* e crise internacional (2008-09) e o segundo ao período da pandemia de COVID-19, que também engloba a guerra da Rússia-Ucrânia.

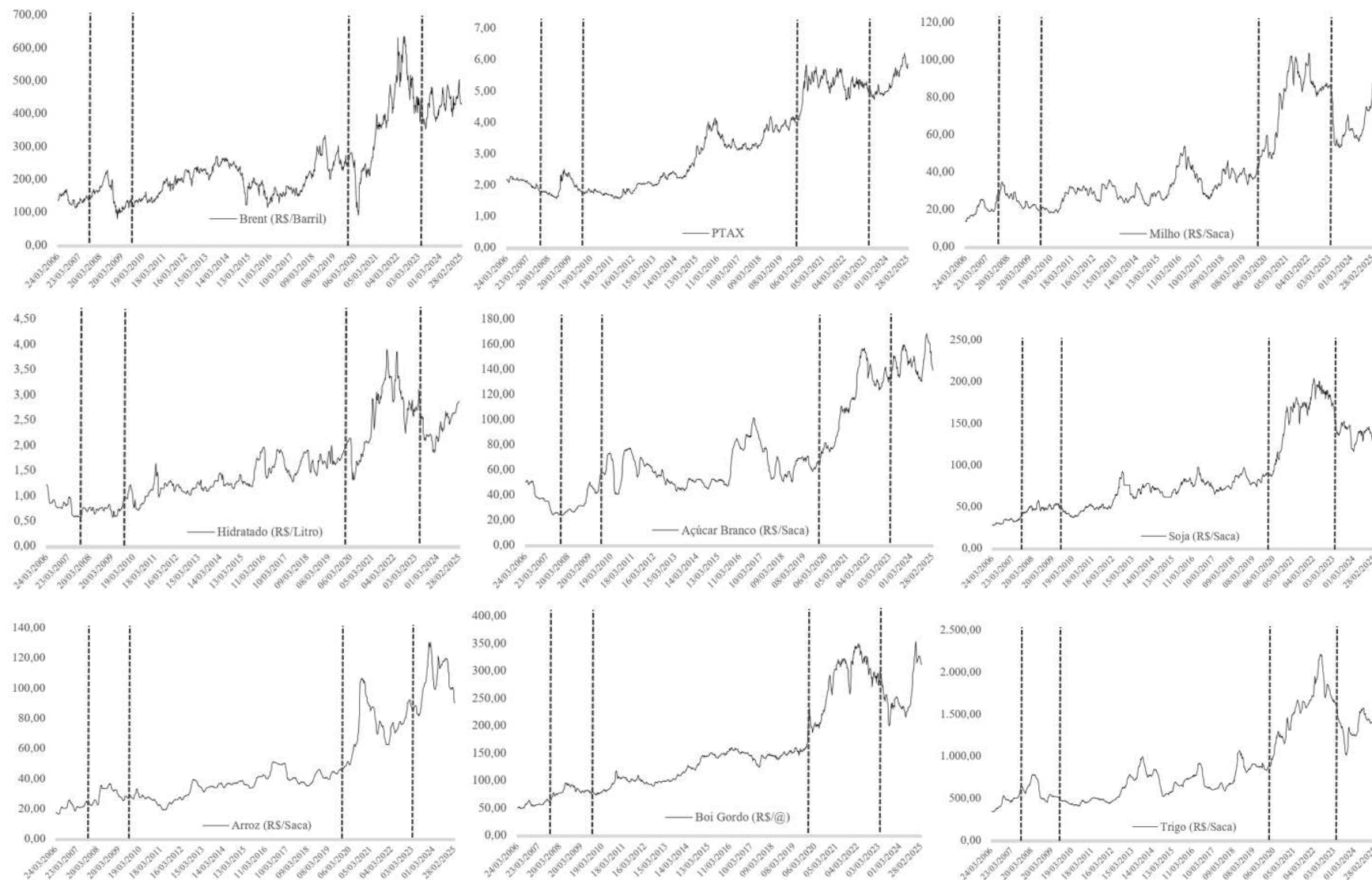


Figura 1 – Série de tempo dos preços das *commodities* em análise (valores nominais)

Fonte: Dados da pesquisa..

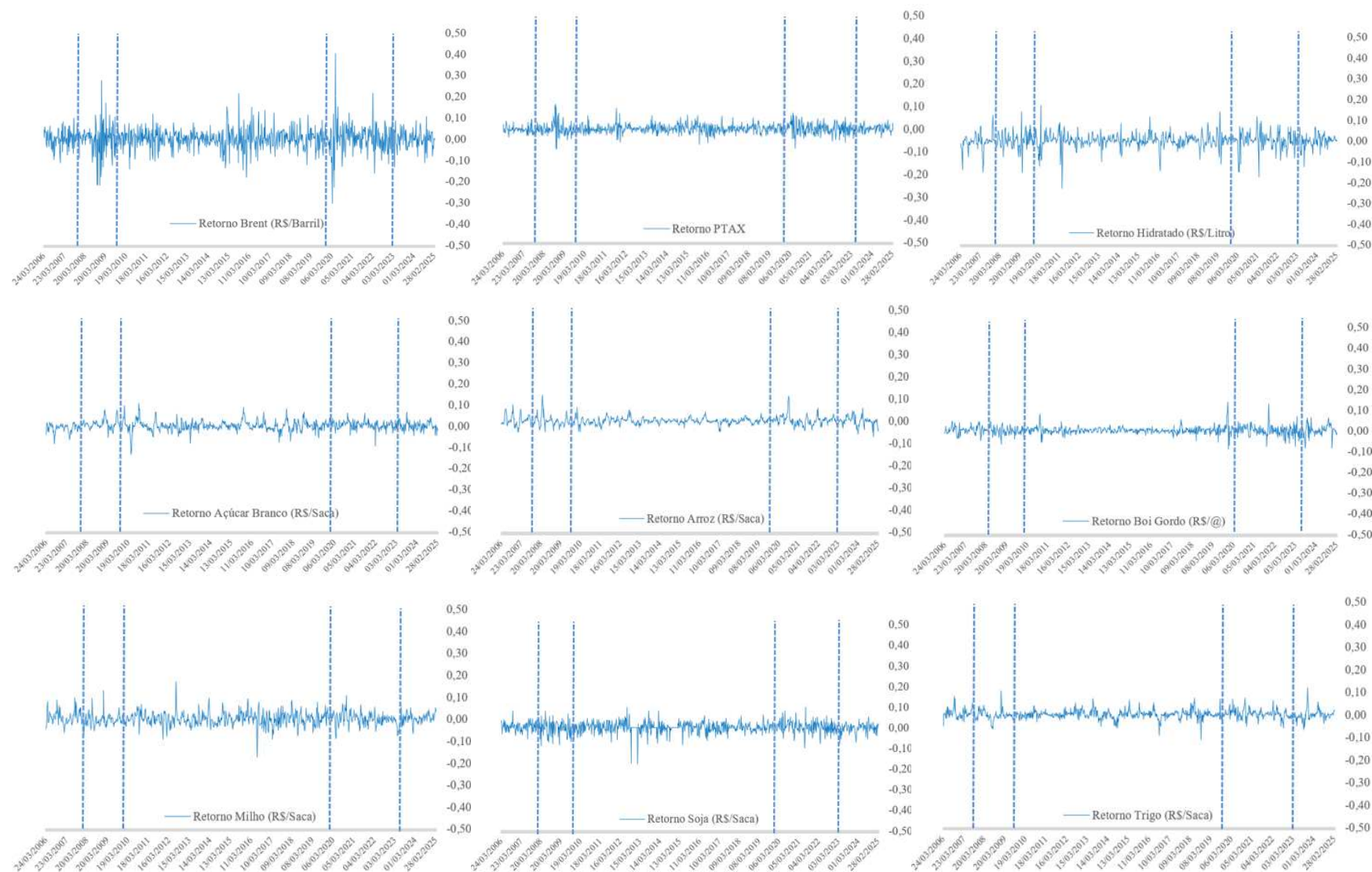


Figura 2 – Variação do retornos dos preços nominais das *commodities* em análise

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 2, apresenta-se a estatística descritiva dos retornos das séries analisadas para todo o período. Observa-se que, as médias apuradas para as séries são próximas a zero com variações menos expressivas no comparativo entre produtos do que, por exemplo, quando se observa o comparativo entre os desvios padrões. A maior volatilidade nos desvios padrões é corroborada pelas diferentes amplitudes verificadas, analisadas através dos dados de mínimos e máximos e também pelo diferente comportamento das curvas apresentadas nos gráficos por *commodity*.

Tabela 2 – Síntese descritiva dos retornos das séries para o período total de análise

|                  | Média   | Desvio-padrão | Máx     | Mín      | Curtose | Assimetria | JB*    | ADF   P-valor |
|------------------|---------|---------------|---------|----------|---------|------------|--------|---------------|
| <b>Ptax</b>      | 0,00103 | 0,02080       | 0,10793 | -0,08860 | 2,98    | 0,39       | 24,81  | 5,861e-12     |
| <b>Brent</b>     | 0,00121 | 0,05351       | 0,40387 | -0,30417 | 6,57    | 0,06       | 524,56 | 4,373e-26     |
| <b>Hidratado</b> | 0,00085 | 0,03556       | 0,17159 | -0,22766 | 5,39    | -0,75      | 328,35 | 1,318e-38     |
| <b>Açúcar</b>    | 0,00100 | 0,02292       | 0,10503 | -0,13429 | 4,79    | -0,21      | 140,13 | 8,071e-30     |
| <b>Arroz</b>     | 0,00166 | 0,01860       | 0,11725 | -0,07062 | 5,53    | 1,00       | 428,92 | 3,056e-20     |
| <b>Boi Gordo</b> | 0,00186 | 0,01952       | 0,13829 | -0,08923 | 6,79    | 0,36       | 612,54 | 2,831e-45     |
| <b>Milho</b>     | 0,00183 | 0,02876       | 0,17166 | -0,17155 | 3,38    | 0,22       | 14,32  | 5,006e-46     |
| <b>Soja</b>      | 0,00162 | 0,02682       | 0,09937 | -0,17519 | 4,43    | -0,72      | 170,32 | 7,425e-70     |
| <b>Trigo</b>     | 0,00147 | 0,02013       | 0,12022 | -0,11125 | 4,60    | 0,35       | 126,17 | 1,108e-16     |

Fonte: Dados da pesquisa.

\*Nota: Teste Jarque-Bera demonstram ainda p-valores que não permitem rejeitar a hipótese nula de simetria da série.

Ainda sobre à Tabela 2, pode-se verificar os dados de curtose, assimetria, o teste de raiz unitária e o teste de normalidade de Jarque-Bera (JB). A análise combinada da curtose com as média e desvio padrão das séries indica que os retornos possuem, sobretudo para o boi gordo e petróleo, picos de variação, mas com ciclos de retornos com constância dadas as médias para todas as séries, inclusive, muita próximas a zero e com desvios padrões máximos de 0,053, para o *Brent*.

Os dados de amplitude confirmam as maiores variações, indicadas pela curtose, para os retornos do *Brent* e do etanol. Como esperado, os retornos indicam séries assimétricas com médias deslocadas. O etanol hidratado e a soja indicaram as menores assimetrias de retornos (inferiores a -0,70) e o arroz a maior assimetria de retorno, equivalente a 1,00.

O teste de Jarque-Bera (JB), por sua vez, confirmam a não normalidade das séries, com os menores valores verificados para os retornos do milho e da ptax (14,32 e 24,81, respectivamente) e com o maior valor para o boi gordo, com 612,54, e pelo *Brent* com 524,56. Em linhas gerais, a análise dos indicadores apresentados nesta estatística descritiva indicam não normalidade dos retornos, com médias constante próximas a zero e deslocadas corroboradas pelas assimetrias. A curtose e o teste Jarque-Bera (JB) indicam picos de volatilidade presentes de maneira mais relevante para o *Brent*, hidratado, boi gordo e para o arroz.

Com relação ao teste de raiz unitária, relevante para confirmação estacionariedade dos retornos, o teste de Dickey-Fuller aumentado (ADF) confirmou a estacionariedade para significância de 5%. O teste foi rodado no software Gretl desconsiderando intercepto e tendência, uma vez que são séries de retornos dos preços.

As tabelas 3 e 4, apresentadas abaixo, demonstram os resultados dos mesmos testes estatísticos aplicados, agora, aos retornos das subséries da crise das *commodities*, entre janeiro de 2008 e dezembro de 2009, e do período da pandemia de COVID-19, contemplando também a guerra Rússia-Ucrânia, respectivamente. Assim, os dados evidenciados abaixo indicam a dispersão, normalidade e estacionariedade dos períodos entre as linhas tracejadas nos gráficos de preços e retornos indicados nas figuras 1 e 2 deste trabalho.

Tabela 3 – Síntese descritiva dos retornos das séries para o período da crise 2008-2009

|                  | Média    | Desvio-padrão | Máx     | Mín      | Curtose | Assimetria | JB*     | ADF   P-valor |
|------------------|----------|---------------|---------|----------|---------|------------|---------|---------------|
| <b>Ptax</b>      | -0,00016 | 0,03030       | 0,10793 | -0,08860 | 3,37    | 0,91       | 140,79  | 1,729e-27     |
| <b>Brent</b>     | -0,00174 | 0,07206       | 0,27542 | -0,21716 | 3,08    | -0,26      | 11,42   | 0,02210       |
| <b>Hidratado</b> | 0,00383  | 0,03895       | 0,14125 | -0,15160 | 2,66    | -0,18      | 10,12   | 1,256e-11     |
| <b>Açúcar</b>    | 0,00946  | 0,02167       | 0,07617 | -0,05590 | 1,99    | 0,73       | 129,40  | 0,01007       |
| <b>Arroz</b>     | 0,00221  | 0,02517       | 0,11725 | -0,04782 | 5,16    | 1,65       | 641,77  | 5,217e-6      |
| <b>Boi Gordo</b> | 0,00068  | 0,01820       | 0,04351 | -0,06631 | 1,03    | -0,25      | 169,74  | 6,536e-10     |
| <b>Milho</b>     | -0,00462 | 0,02628       | 0,13059 | -0,07036 | 7,60    | 1,69       | 1.343,2 | 2,496e-8      |
| <b>Soja</b>      | -0,00066 | 0,03433       | 0,07927 | -0,08984 | 0,09    | -0,40      | 374,61  | 8,755e-24     |
| <b>Trigo</b>     | -0,00312 | 0,02108       | 0,10701 | -0,06331 | 7,43    | 0,90       | 942,93  | 7,768e-5      |

Fonte: Dados da pesquisa.

\*Nota: Teste Jarque-Bera demonstram ainda p-valores que não permitem rejeitar a hipótese nula de simetria da série.

Tabela 4 – Síntese descritiva dos retornos das séries para o período da pandemia de COVID-19 englobando a guerra Rússia-Ucrânia

|                  | Média   | Desvio-padrão | Máx     | Mín      | Curtose | Assimetria | JB*    | ADF   P-valor |
|------------------|---------|---------------|---------|----------|---------|------------|--------|---------------|
| <b>Ptax</b>      | 0,00094 | 0,02567       | 0,07222 | -0,08634 | 0,34    | -0,07      | 291,97 | 2,161e-12     |
| <b>Brent</b>     | 0,00296 | 0,07419       | 0,40387 | -0,30417 | 6,65    | 0,36       | 569,24 | 9,802e-24     |
| <b>Hidratado</b> | 0,00207 | 0,04277       | 0,11718 | -0,17248 | 2,93    | -0,93      | 142,15 | 1,584e-12     |
| <b>Açúcar</b>    | 0,00393 | 0,01909       | 0,06096 | -0,09516 | 3,97    | -0,70      | 120,29 | 5,709e-4      |
| <b>Arroz</b>     | 0,00323 | 0,02221       | 0,11321 | -0,04341 | 6,28    | 1,65       | 890,75 | 5,183e-4      |
| <b>Boi Gordo</b> | 0,00209 | 0,02485       | 0,12889 | -0,07578 | 4,18    | 0,31       | 73,32  | 2,059e-24     |
| <b>Milho</b>     | 0,00147 | 0,02852       | 0,10844 | -0,09009 | 1,65    | -0,11      | 77,18  | 1,037e-9      |
| <b>Soja</b>      | 0,00280 | 0,02970       | 0,09937 | -0,09908 | 1,17    | -0,10      | 139,71 | 8,759e-36     |
| <b>Trigo</b>     | 0,00273 | 0,02025       | 0,07467 | -0,05870 | 1,76    | 0,34       | 82,36  | 9,815e-13     |

Fonte: Dados da pesquisa.

\*Nota: Teste Jarque-Bera demonstram ainda p-valores que não permitem rejeitar a hipótese nula de simetria da série.

Quando comparada as médias entre o período total e os subperíodos, pode-se destacar uma mudança de tendência para algumas culturas. Durante a crise de 2008/2009, milho, soja e trigo apresentaram médias de retornos negativas, corroborando as quedas verificadas nos gráficos de preço, demonstrando inversão da tendência das séries dessas *commodities* agrícolas. Os derivados da cana-de-açúcar, entretanto, demonstraram tendência contrária, com médias múltiplas vezes superiores ao período total. No período da pandemia COVID-19 e guerra Rússia-Ucrânia, as médias também preservaram tendência de alta, com destaque para os derivados da cana-de-açúcar e o arroz.

No que diz respeito ao desvio-padrão, as subséries se mostraram mais voláteis que o período total analisado, destacando as variáveis exógenas (câmbio e petróleo) em ambos subperíodos, a soja na crise de 2008/09 e o boi gordo no período da pandemia de COVID-19 e guerra Rússia-Ucrânia. Houve, contudo, exceções ao aumento de volatilidade. O açúcar e o milho, nas duas subséries, e o boi gordo durante o período 2008/09 tiveram desvios-padrões dos retornos menos expressivos.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Conectividade geral no modelo TVP-VAR

A Tabela 3 apresenta os desdobramentos do modelo TVP-VAR, cuja estrutura evidencia, em cada célula, a proporção da interconectividade de uma variável (destacada nas linhas), que é atribuída à influência de outra variável (destacada na coluna). Isso significa que os valores informados nas interseções quantificam o quanto cada variável contribui para explicar os movimentos das demais no sistema.

A coluna intitulada “*FROM*” agrega a influência recebida por uma variável, somando as contribuições percentuais das demais variáveis sobre ela. Em contrapartida, a linha “*TO*” consolida o impacto que uma variável exerce sobre todas as outras, revelando seu grau de relevância na transmissão de volatilidade para o conjunto de variáveis. A linha “*INC OWN*” combina a participação de uma variável sobre si mesma e sua influência conjunta sobre o restante das variáveis, funcionando como uma medida da importância total da variável no modelo. Por fim, a linha “*NET*” resulta do balanço entre o montante que a variável influencia e o quanto é influenciada, permitindo distinguir variáveis predominantemente emissoras de volatilidade, destacadas com valores positivos, das predominantemente receptoras de volatilidade, destacadas como negativos.

A tabela de conectividade média total indica que, para o sistema como média, tanto o etanol quanto o açúcar, ambos derivados da cana-de-açúcar, são receptores de volatilidade, com valores *NET* de -3,99 e de -2,41. Isso significa dizer, especialmente para o etanol, que a transmissão de volatilidade nos preços não se deu tendo o etanol como transmissor na avaliação da série total. Pelo contrário, o etanol, na média do sistema, recebeu volatilidade das demais culturas agrícolas, com destaque para o próprio açúcar e o milho, além do *Brent*. Apesar da linha *NET* expor o resultado líquido das médias, analisando os pares, o etanol segue sendo receptor nas interações individuais com todas as culturas alimentares. Essas relações serão melhores expostas nos gráficos de pares, adiante.

Tabela 5 – Tabela de conectividade média dinâmica da série total (todo o período)

|           | Ptax   | Brent  | Hidratado | Açúcar | Arroz | BoiGordo | Milho  | Soja   | Trigo | FROM        |
|-----------|--------|--------|-----------|--------|-------|----------|--------|--------|-------|-------------|
| Ptax      | 80,20  | 6,10   | 1,11      | 0,84   | 0,71  | 0,99     | 1,56   | 7,37   | 1,12  | 19,80       |
| Brent     | 9,20   | 82,76  | 0,85      | 1,07   | 0,73  | 0,45     | 1,17   | 2,69   | 1,08  | 17,24       |
| Hidratado | 1,38   | 3,99   | 84,28     | 3,94   | 1,33  | 1,08     | 2,58   | 0,59   | 0,85  | 15,72       |
| Açúcar    | 0,88   | 1,49   | 5,79      | 85,37  | 1,16  | 0,86     | 1,79   | 1,52   | 1,13  | 14,63       |
| Arroz     | 3,01   | 0,89   | 0,92      | 2,04   | 84 56 | 1,21     | 2,17   | 3,56   | 1,64  | 15,44       |
| Boi Gordo | 1,31   | 0,67   | 0,99      | 1,53   | 0,85  | 89,69    | 3,09   | 0,85   | 1,01  | 10,31       |
| Milho     | 1,89   | 1,47   | 1,04      | 0,97   | 1,29  | 3,04     | 79,36  | 8,87   | 2,06  | 20,64       |
| Soja      | 7,75   | 3,13   | 0,48      | 0,88   | 1,41  | 0,80     | 6,88   | 77,06  | 1,62  | 22,94       |
| Trigo     | 2,61   | 1,60   | 0,55      | 0,95   | 2,28  | 1,70     | 5,44   | 3,66   | 81,21 | 18,79       |
| TO        | 28,03  | 19,33  | 11,73     | 12,22  | 9,76  | 10,13    | 24,68  | 29,12  | 10,51 | 155,50      |
| Inc. Own  | 108,23 | 102,09 | 96,01     | 97,59  | 94,32 | 99,82    | 104,04 | 106,18 | 91,72 | cTCI/TCI    |
| NET       | 8,23   | 2,09   | -3,99     | -2,41  | -5,68 | -0,18    | 4,04   | 6,18   | -8,28 | 19,44/17,28 |
| NPT       | 8,00   | 7,00   | 1,00      | 2,00   | 2,00  | 3,00     | 5,00   | 6,00   | 2,00  |             |

Fonte: Dados da pesquisa.

Dessa maneira, o resultado das médias dinâmicas dos sistema indica um potencial das variáveis exógenas como transmissoras de volatilidade líquida para as culturas alimentares. O etanol, no entanto, não demonstrou, na série total, transmissão líquida positiva, ou seja, não apresentou relevância para o efeito contágio dos retornos das culturas agrícolas. Por sua vez, os retornos do etanol foram influenciados pelo petróleo, principalmente, seguido do açúcar.

Outras *commodities* agrícolas também influenciaram os mercados domésticos em magnitudes mais expressivas, se comparadas ao etanol. A soja e o milho foram transmissores líquidos de volatilidade. A soja foi uma forte transmissora para o mercado de milho, seguido dos mercados de trigo e arroz. O milho teve maior efeito de transmissão para a soja e o trigo, seguido do mercado de boi gordo. Tais relações mostram uma forte associação entre os mercados de grãos, com a soja sendo a maior transmissora, seguida do milho, enquanto o trigo e o arroz recebem volatilidade desses mercados.

A Figura 3, apresentada abaixo, demonstra graficamente a conexão dinâmica total durante toda a série com os períodos contidos dentro linhas tracejadas sendo os subperíodos da crise de 2008-2009 e da pandemia de COVID-19 englobando a guerra Rússia-Ucrânia.



Figura 3 – Conexão dinâmica total (2006-2025)

Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se, primeiramente, que a conectividade dinâmica nesses mercados oscila bastante ao longo do período total, indicando que, de fato, as relações entre as variáveis são dinâmicas ao longo do tempo, apresentando características distintas a depender do recorte. Analisado o primeiro período de recorte (janeiro de 2008 a dezembro 2009), pode-se observar movimentações abruptas no início do recorte seguido também de uma queda repentina, com recuperação parcial. A série também é precedida de um período de alta correlação entre o sistema, sinalizando uma movimentação prévia na transmissão de volatilidade entre os mercados de *commodities*, que cede no início da crise econômica global em meados de 2008 e logo volta a aumentar, com os picos nos preços internacionais e em suas variações dos preços, como também observado nas figuras 1 e 2, previamente apresentadas.

Em fevereiro de 2020, início do segundo recorte, a série sofre sua maior alta na correlação dentre todo o período analisado. O início da pandemia aumentou de forma relevante a conectividade média total dentre os mercados, mantendo em patamares elevados praticamente durante todo o período crítico da pandemia, seguindo um queda sequencial até o final da série.

Em linhas gerais, o gráfico indica que os períodos de instabilidade econômica propiciaram

aumentos expressivos na transmissão de volatilidade entre os mercados de *commodities* no Brasil, o mercado cambial e o mercado global de petróleo. Estes ciclos se diferenciam dos demais períodos da série, com indicações de aumento de volatilidade e tornando a relação entre os preços das culturas e das variáveis exógenas mais interconectados.

Para uma melhor ilustração dos resultados estimados para cada mercado, a Figura 4 apresenta a conectividade direcional líquida do período total por produto. Para além da corroboração dos resultados anteriores, a partir dos gráficos é possível destacar ainda o perfil das *commodities* alimentares como predominantemente receptoras de volatilidade na maior parte do período analisado, às exceções do milho e da soja, majoritariamente transmissores ao longo de todo o período. Especificamente, o milho apresentou a característica de transmissor de forma mais constante, mostrando ciclos de maior volatilidade durante o período da crise de 2008-2009, entre 2012 a 2016 e, posteriormente, após a pandemia da Covid-19. A soja, por sua vez, passou a ser predominantemente transmissora em meados de 2016 e teve com um pulso relevante durante o período da pandemia de COVID-19, atingindo um grau de transmissão de volatilidade relevante, se comparado aos demais mercados das *commodities* agropecuárias brasileiras em análise.

O etanol, por sua vez, mostrou uma relação antagônica ao longo dos ciclos de instabilidade econômica, mostrando maior grau de recepção de volatilidade. Após a pandemia da Covid-19, pode-se notar que o etanol se consolidou como um forte receptor frente aos demais mercados em análise, corroborando os resultados indicados na Tabela 5, com choques advindos especialmente do mercado global de petróleo. Com relação à constância no perfil da interconectividade do sistema, o trigo e arroz foram as culturas que se mantiveram por mais tempo como receptoras de volatilidade, tendo como um dos principais transmissores a variável exógena câmbio.

A Figura 4, por ser a representação da conectividade direcional líquida por variável, pode ainda ser desmembrada em vetores representados pelas Figura 5 e Figura 6, sendo a primeira a parcela dominante da relação de contágio da variável com o sistema, ou seja, a representação da variável como transmissora de volatilidade para as demais, e a segunda como a parcela passiva da relação de contágio com as demais variáveis do sistema, sendo assim, a receptora de volatilidade. Ainda que a análise global das variáveis não se altere, as ilustrações apresentadas nas Figuras 5 e 6 são relevantes por demonstrar o grau de participação de cada variável analisada em todos os mercados em análise. Analisar as variáveis apenas por sua conectividade líquida pode subdimensionar sua relevância no sistema caso a participação da variável seja expressiva tanto na

transmissão, como na recepção de volatilidade, de forma que seu resultado líquido não seja tão perceptível, a despeito de sua importância para o sistema analisado.

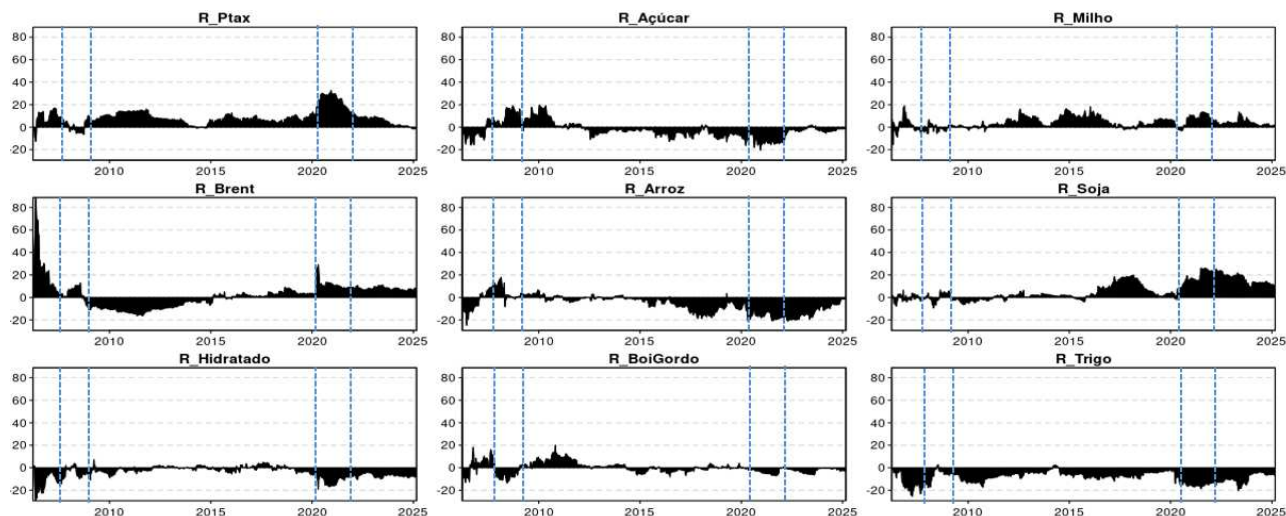


Figura 4 – Conectividade direcional líquida do período total por produto (2006-2025)

Fonte: Dados da pesquisa.

Este é o caso, por exemplo, do petróleo *Brent*. Na Figura 4, que apresenta sua conectividade líquida, o seu papel no sistema parece ser subdimensionado. Contudo, quando avaliada suas relações de interconectividade em vetores, a variável se revela como receptora (Figura 6) e como transmissora (Figura 5) de volatilidade relevante para o sistema.

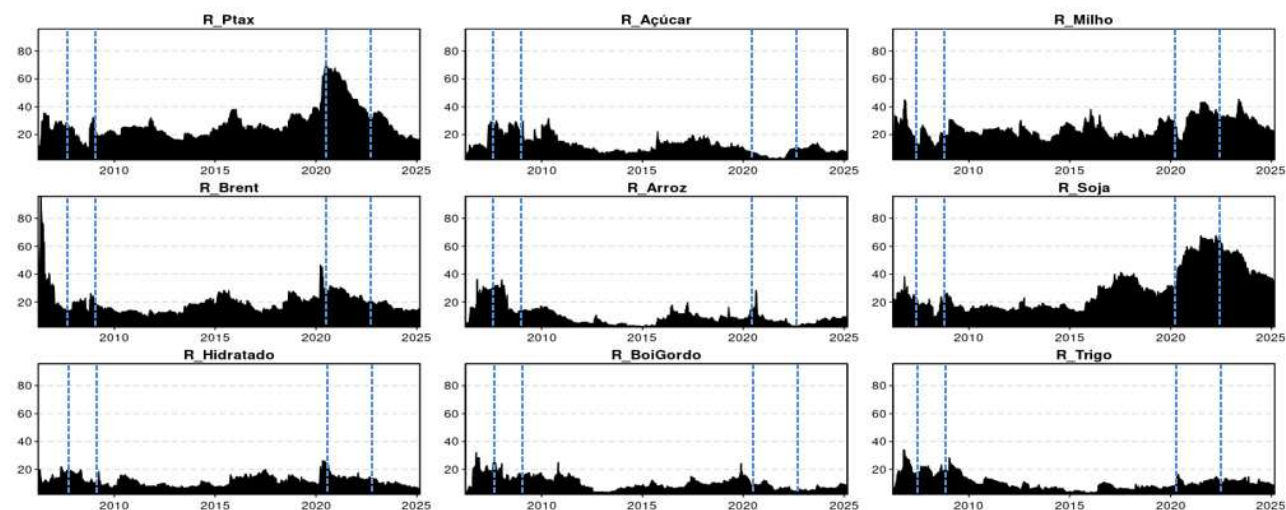


Figura 5 – Conectividade vetorial transmissora do período total por produto (2006-2025)

Fonte: Dados da pesquisa.

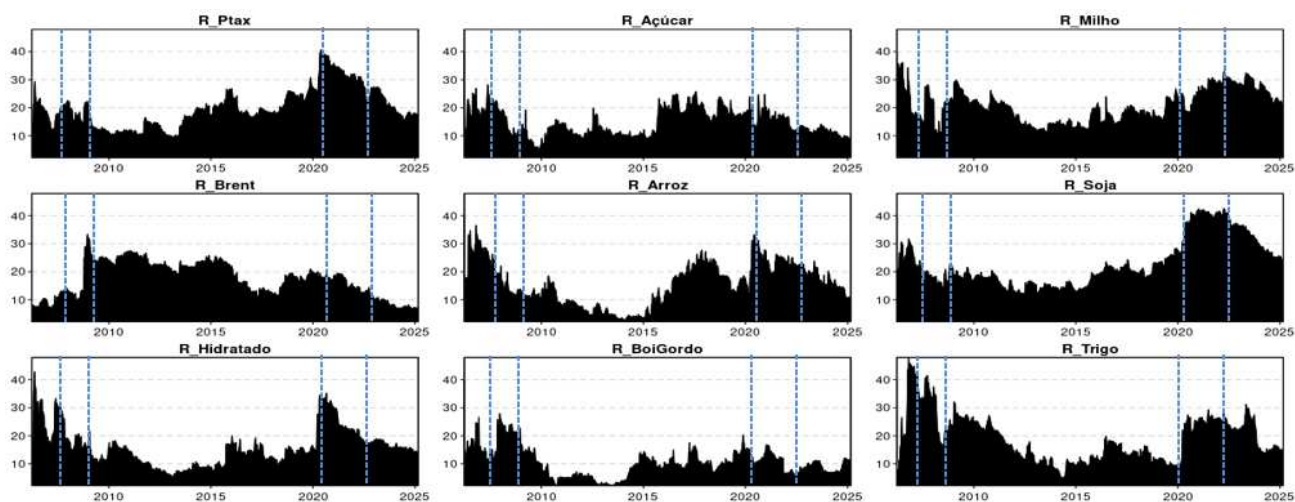


Figura 6 – Conectividade vetorial receptora do período total por produto (2006-2025)

Fonte: Dados da pesquisa.

Para o petróleo *Brent*, milho e soja, considerando as escalas dos gráficos, é possível verificar que suas posições como transmissores são de fato mais relevantes que o potencial de contágio das demais variáveis, sobretudo após 2020, como mostra a Figura 5. Vale destacar que essas variáveis também recebem volatilidade de forma expressiva no sistema, inclusive entre si, como demonstra a Figura 6. Isso significa dizer que, além de suas posições centrais de transmissoras, estes mercados também incrementam a interconectividade do sistema ao serem importantes receptores de volatilidade. Ainda sobre as Figuras 5 e 6, o trigo, por sua pouca capacidade de contagiar o sistema, expresso na Figura 5, acaba por se caracterizar como um forte receptor líquido, mesmo que não seja o principal receptor vetorial de volatilidade, como indica a Figura 6.

A Figura 7, exibida na sequência, demonstra as relações de interconectividade par a par para as variáveis envolvidas no sistema. A primeira variável indicada no cabeçalho das imagens somado ao vetor do gráfico (se positivo ou negativo) indica a relação de dominância ou passividade sobre a segunda variável. Por exemplo, no primeiro gráfico da parte superior esquerda da Figura 7, indica-se a relação de interconectividade entre o câmbio, indicado pela *Ptax*, e o petróleo, pelo *Brent*, ambos avaliados por seus retornos. No início da série é possível verificar que o câmbio recebe a transmissão de volatilidade do *Brent* até que essa relação se inverte, em meados de 2008, com o *Brent* sendo a variável passiva. Essa relação de dominância se mantém dessa forma, quase que ininterruptamente, até o final da série.

Dando destaque às relações com o etanol, foco central dessa pesquisa, vale destacar sua alta passividade com o *Brent* (terceira linha da segunda coluna das ilustrações da Figura 7), mantendo-se por quase todo o período como receptor de volatilidade e de forma bastante acentuada durante o período de pandemia de COVID-19 e da guerra Rússia-Ucrânia, perdurando até o final da série. Vale destacar também que suas relação par a par com as *commodities* alimentares avaliadas por este estudo também são de passividade. Com exceção do açúcar (quarta linha da terceira coluna da Figura 9), *commodity* a qual o etanol se coloca como transmissor de volatilidade a partir de 2010, as demais culturas alimentares não demonstraram receber efeito *spillovers* do etanol de forma relevante ao longo das séries. De forma oposta, o milho e a soja demonstraram ter mais influência no efeito contágio de outras culturas alimentares do que o etanol, sendo os retornos do milho, inclusive, uma das relações par a par que mais afetaram os retornos do etanol ( sétima linha da primeira coluna da Figura 7).

Ainda com relação à Figura 7, a soja demonstrou uma forte relação de contágio com o trigo durante todo o período analisado. Outra relação relevante e constante ao longo do período foi a do milho com o trigo, sendo o trigo e receptor de volatilidade. O milho, uma vez mais, também se destacou quando avaliado o par a par com o boi gordo. A relação entre ambos manteve-se relevante ao longo de quase todo período analisado, porém, com uma inversão de vetor. No início de 2009, o boi gordo inverteu o gráfico de conectividade direcional líquida, tornando-se transmissor. Em meado de 2011 a relação volta à configuração do início da série com o milho sendo o transmissor e levando esse vetor de contágio, com baixa variação, até o final da série ( sétima linha da terceira coluna da Figura 7).

Em complemento à Figura 7, a Figura 8 demonstra o índice de conectividade par a par para as variáveis envolvidas no sistema. Se a figura 7 tem como objetivo indicar o vetor da interconectividade de cada uma das variáveis, a Figura 8 indica a expressividade, ou seja, o grau de intensidade da relação. Observa-se que as relações de maior intensidade se concentram nos pares câmbio e soja, etanol hidratado e açúcar e milho e soja. O milho, também nessa análise, mostrou-se um forte vetor sendo a variável mais interconectada com boi gordo, soja e trigo.

O câmbio, em sua relação com o petróleo *Brent* e com a soja, demonstra as interconectividades mais expressivas no sistema (primeira linha, colunas 1 e 2 – Figura 7). Isso ocorre pois os três mercados acima mencionados, e como apresentado anteriormente nas Figuras 5 e 6, participam do sistema de rede de conexões em ambos os vetores (como receptoras e

transmissoras), ainda que mantenham sua interconectividade líquida como transmissora.

A relação milho e soja (quarta linha, sexta coluna) também apresenta a mesma característica. O etanol e o açúcar, receptores para o sistema, possuem forte relação entre si (primeira linha, sexta coluna), com um grau de contágio representativo entre si, explicado pela forte correlação no processo produtivo.

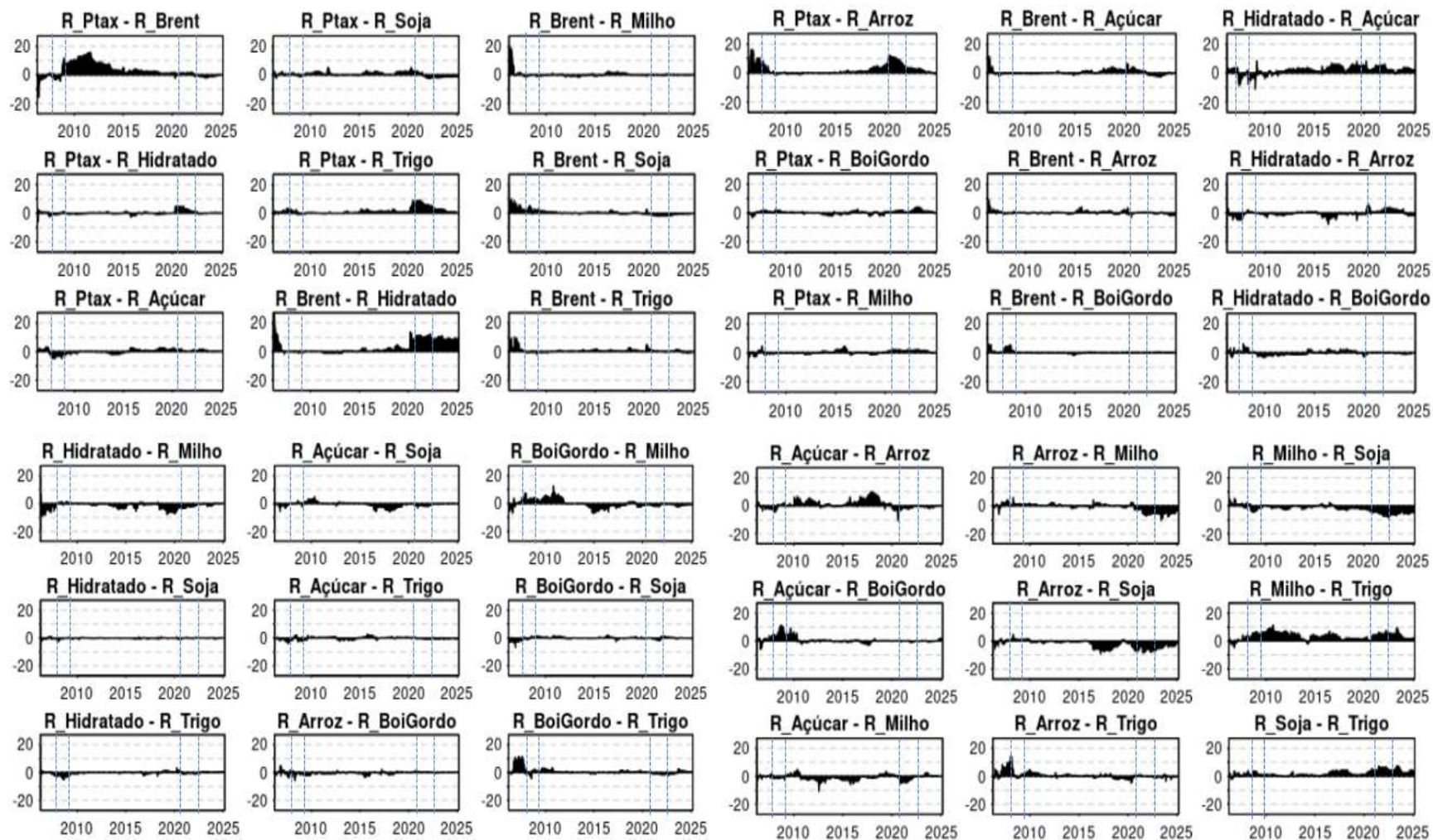


Figura 7 – Conectividade direcional líquida do período total par a par (2006-2025)

Fonte: Dados da pesquisa.

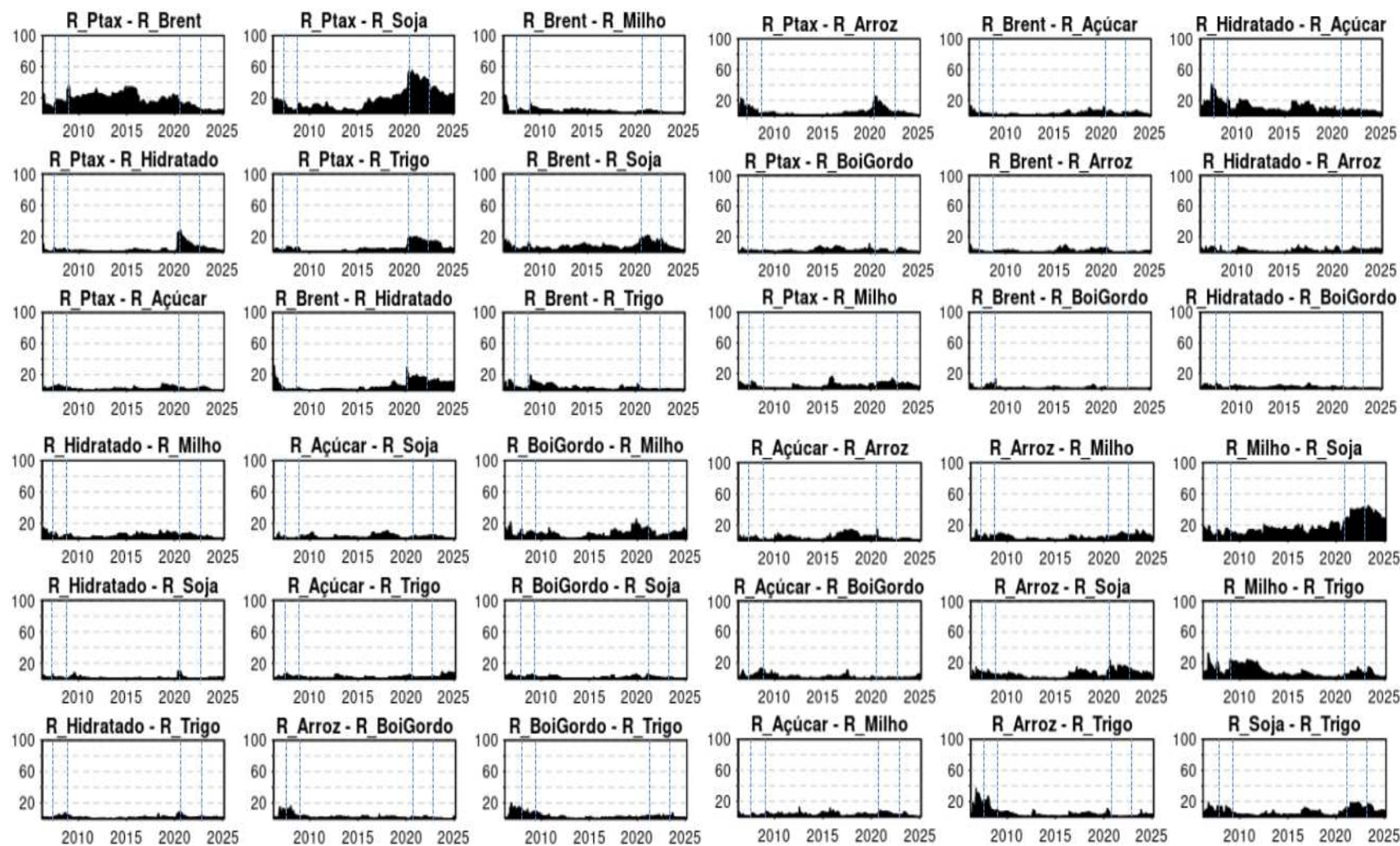


Figura 8 – Conectividade direcional dinâmica par a par do período total (2006-2025)

Fonte: Dados da pesquisa

Por fim, a Figura 9 demonstra as interconectividades do sistema no formato de diagrama. As variáveis representadas pelos círculos amarelos são as variáveis que sofrem com o efeito contágio do sistema. As azuis, por sua vez, são aquelas que transmitem volatilidade. A intensidade das conexões é representada pelas larguras das setas que conectam as variáveis.

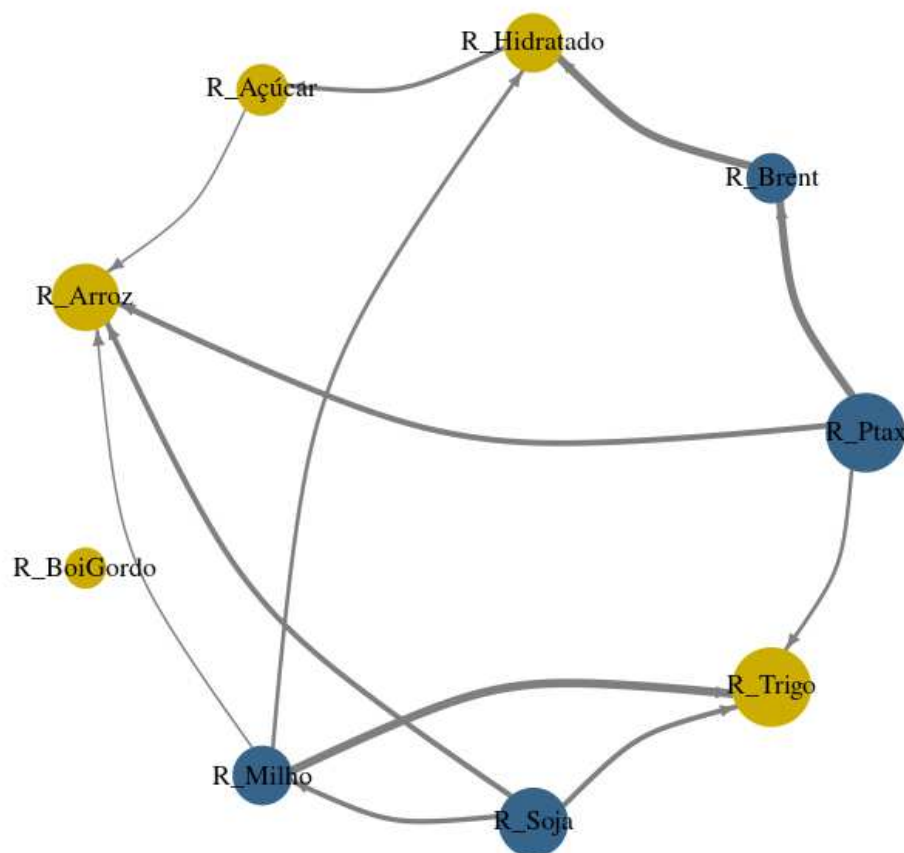


Figura 9 – Diagrama de rede da interconectividade do sistema (2006-2025)

Fonte: Dados da pesquisa.

De forma geral, os resultados da média de conectividade ao longo de todo o período analisado indicam que o etanol e o açúcar atuam predominantemente como receptores de volatilidade, com destaque para a forte relação entre si, dada a similaridade de seu processo produtivo, sendo derivados de uma mesma cultura, onde a moagem da cana deve ser destinada à produção de açúcar ou de etanol. Observa-se, ainda, que o etanol é impactado pelo petróleo e pelo milho. O petróleo, por sua vez, mantém baixa interconexão com os demais mercados. A taxa de

câmbio teve efeito transmissor forte, porém, ao se analisar a relação mais significativa com os demais mercados, revela influência mais significativa sobre os mercados de trigo e arroz. Por fim, o milho e a soja são importantes transmissores ao longo de todo o ciclo de análise, com forte conectividade com os demais mercados graneleiros (trigo e arroz), além de uma efeito transmissor mútuo. O boi gordo, por sua vez, mostra-se pouco interconectado com outros mercados.

## 4.2 Conectividade durante o período da crise de 2008-2009

Os resultados apresentados neste tópico analisam a interconectividade entre os retornos das variáveis no período compreendido entre janeiro de 2008 e dezembro de 2009. Como destacado anteriormente, esta subsérie se diferencia das demais devido à elevada volatilidade observada no período da crise internacional e do *boom* das *commodities*, entre 2008-2009.

A Tabela 6, que apresenta a conectividade média dinâmica para o período, permite observar que, além do aumento na intensidade da interconectividade do sistema como um todo, houve mudanças importantes nas relações entre as variáveis analisadas, se comparado ao observado para todo o período amostral (2006-2025), como apresentado na tabela 5. O principal mercado agrícola a ser destacado na subsérie, e foco deste estudo, é o etanol. Durante este intervalo temporal, observa-se uma alteração expressiva no papel do etanol dentro do sistema. O produto, que na série total se comportou como receptor líquido de volatilidade, atuou como transmissor líquido de volatilidade para todas as *commodities* agropecuárias analisadas, incluindo o próprio açúcar. O indicador *NET* do etanol foi de 5,32 neste recorte (ante -3,99 no período total), posicionando-se como o segundo maior transmissor líquido de volatilidade no período 2008/09, atrás apenas do petróleo *Brent*. Em especial, nesse período o etanol teve um efeito transmissor mais significativo sobre o milho, embora o efeito líquido positivo não seja tão expressivo, dada a transmissão inversa entre os dois mercados.

O petróleo *Brent* tem papel de destaque como transmissor de volatilidade, o que já era observável nas figuras 6 a 10. Os mercados mais impactados por seu efeito contágio foram, em ordem de magnitude, o milho, a soja e o trigo, seguidos pelo boi gordo e pelo açúcar. No caso do boi gordo, os resultados revelam um aumento expressivo em sua vulnerabilidade aos efeitos contágio durante o período de crise analisado. Se no período amostral de 2006 a 2025, o boi gordo apresentou um indicador *NET* de -0.18, no ciclo da crise de 2008-09, esse indicador foi de -14.27, indicando sua forte recepção de volatilidade dos demais mercados. Essa dinâmica é particularmente

influenciada por sua relação com o açúcar e o petróleo. A correlação significativa com o açúcar pode estar relacionada à competição por área no ciclo de expansão da cana-de-açúcar — um fenômeno observado nesse período e que possivelmente provocou efeitos indiretos sobre a cadeia produtiva de carnes.

Tabela 6 – Tabela de conectividade média dinâmica da subsérie crise 2008-2009

|           | Ptax   | Brent  | Hidratado | Açúcar | Arroz | BoiGordo | Milho | Soja   | Trigo | FROM        |
|-----------|--------|--------|-----------|--------|-------|----------|-------|--------|-------|-------------|
| Ptax      | 84,65  | 6,77   | 1,34      | 0,31   | 1,60  | 0,31     | 1,83  | 2,73   | 0,45  | 15,35       |
| Brent     | 9,46   | 73,82  | 0,27      | 0,72   | 0,55  | 1,28     | 3,58  | 3,13   | 7,18  | 26,18       |
| Hidratado | 0,99   | 0,76   | 86,02     | 1,65   | 1,40  | 1,20     | 4,65  | 2,19   | 1,12  | 13,98       |
| Açúcar    | 0,33   | 3,04   | 2,55      | 83,89  | 1,74  | 2,04     | 2,49  | 0,81   | 3,13  | 16,11       |
| Arroz     | 1,02   | 1,56   | 2,75      | 1,19   | 84,04 | 0,72     | 6,24  | 1,17   | 1,31  | 15,96       |
| Boi Gordo | 0,95   | 4,42   | 2,47      | 10,13  | 1,00  | 71,46    | 2,30  | 5,96   | 1,31  | 28,54       |
| Milho     | 1,45   | 5,41   | 6,90      | 2,04   | 5,75  | 2,04     | 63,13 | 6,67   | 6,60  | 36,87       |
| Soja      | 2,68   | 8,28   | 1,43      | 2,05   | 1,27  | 4,26     | 4,09  | 74,74  | 1,22  | 25,26       |
| Trigo     | 0,27   | 8,16   | 1,59      | 1,10   | 0,75  | 2,40     | 9,93  | 3,74   | 72,06 | 27,94       |
| TO        | 17,14  | 38,40  | 19,30     | 19,18  | 14,07 | 14,27    | 35,12 | 26,40  | 22,32 | 206,19      |
| Inc. Own  | 101,79 | 112,21 | 105,32    | 103,07 | 98,11 | 85,73    | 98,24 | 101,13 | 94,39 | cTCI/TCI    |
| NET       | 1,79   | 12,21  | 5,32      | 3,07   | -1,89 | -14,27   | -1,76 | 1,13   | -5,61 | 25,77/22,91 |
| NPT       | 3,00   | 7,00   | 6,00      | 2,00   | 4,00  | 1,00     | 5,00  | 5,00   | 3,00  |             |

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao se analisar o diagrama de rede da interconectividade do sistema para subsérie, apresentado na Figura 10, observa-se que para o período de crise entre 2008/09, as variáveis exógenas também atuam como transmissoras de volatilidade. No entanto, diferentemente da série total (2006-2025), o petróleo aparece com maior proeminência que a própria taxa de câmbio, consolidando-se como o principal vetor de contágio do sistema. Além disso, verifica-se que o etanol e o açúcar, neste recorte, assumem papéis ativos na propagação de choques, indicando uma maior associação do setor sucroenergético com os mercados energéticos internacionalmente.

O milho, que na série completa alternou entre posições de neutralidade e leve transmissão de volatilidade, no recorte temporal de 2008/09, apresenta-se como um receptor líquido, embora de forma menos expressiva que o boi gordo ou o arroz. A soja, ainda que na interconectividade

líquida seja transmissora, mantém-se como uma das *commodities* mais impactadas quando analisado apenas o vetor de contágio, reforçando sua interconectividade aos mercados analisados, especialmente ao petróleo *Brent*.

Outro aspecto relevante observado no diagrama é o isolamento do arroz em relação às demais variáveis. Durante o período da crise, esta *commodity* não apresentou interações significativas com os demais mercados analisados, destacando-se por sua baixa integração com o restante do sistema.

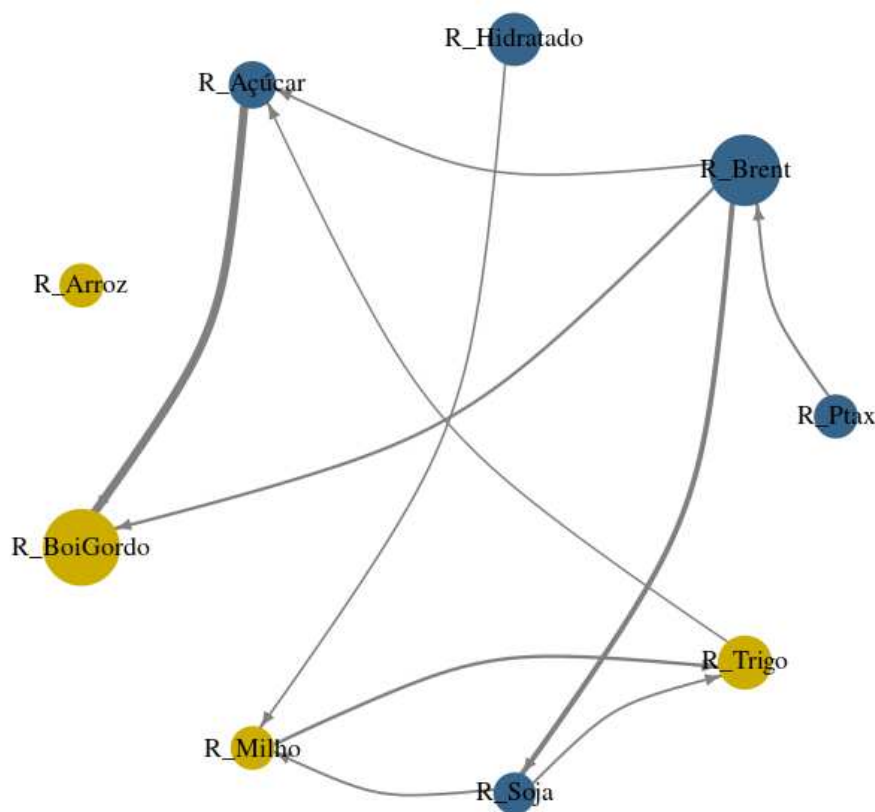


Figura 10 – Diagrama de rede da interconectividade do sistema para a subsérie crise 2008-2009

Fonte: Dados da pesquisa.

Por fim, o diagrama evidencia outras relações importantes neste ciclo, não observadas quando analisado todo o período amostral. Destacam-se, especialmente, a relação entre açúcar e boi gordo, e entre o petróleo *Brent* e a soja. Ambas ganham relevância no contexto de crise, ilustrando como choques exógenos reconfiguram as interconectividades entre *commodities*

analisadas.

### 4.3 Conectividade durante o período da pandemia COVID-19 englobando o período da guerra Rússia-Ucrânia

Para os retornos avaliados durante o período de fevereiro de 2020 e abril de 2023, subsérie que engloba o período da pandemia de COVID-19 e o ciclo inicial da guerra Rússia-Ucrânia, novamente há alterações nas relações de interconectividade no sistema, se comparado à série completa (2006-2025), ou ao recorte amostral da crise de 2008/09. A média das conectividades para o referido período estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Tabela de conectividade média dinâmica da subsérie pandemia de COVID-19 englobando a guerra Rússia-Ucrânia

|              | Ptax   | Brent  | Hidratado | Açúcar | Arroz  | BoiGordo | Milho  | Soja   | Trigo  | FROM        |
|--------------|--------|--------|-----------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|-------------|
| Ptax         | 64,42  | 3,11   | 5,08      | 2,58   | 0,29   | 0,43     | 1,98   | 17,76  | 4,36   | 35,58       |
| Brent        | 1,46   | 86,48  | 2,97      | 1,02   | 0,31   | 0,21     | 1,19   | 5,46   | 0,89   | 13,52       |
| Hidratado    | 6,44   | 13,34  | 70,34     | 5,53   | 0,36   | 0,77     | 1,03   | 1,03   | 1,15   | 29,66       |
| Açúcar       | 3,11   | 2,12   | 5,52      | 78,11  | 0,56   | 1,94     | 3,87   | 3,65   | 1,12   | 21,89       |
| Arroz        | 2,48   | 0,71   | 2,63      | 1,07   | 73,20  | 1,49     | 8,64   | 9,27   | 0,49   | 26,80       |
| Boi<br>Gordo | 1,67   | 0,48   | 0,91      | 0,75   | 1,13   | 83,44    | 3,62   | 3,20   | 4,79   | 16,56       |
| Milho        | 3,41   | 1,57   | 1,07      | 0,42   | 1,46   | 1,96     | 71,01  | 17,58  | 1,52   | 28,99       |
| Soja         | 16,02  | 4,66   | 0,68      | 1,82   | 2,57   | 1,42     | 11,76  | 56,92  | 4,14   | 43,08       |
| Trigo        | 8,50   | 2,49   | 1,44      | 1,20   | 1,24   | 2,63     | 6,01   | 9,72   | 66,77  | 33,23       |
| TO           | 43,10  | 28,48  | 20,31     | 14,39  | 7,92   | 10,85    | 38,11  | 67,66  | 18,47  | 249,29      |
| Inc. Own     | 107,52 | 114,97 | 90,65     | 92,50  | 81,13  | 94,29    | 109,12 | 124,58 | 85,24  | cTCI/TCI    |
| NET          | 7,52   | 14,97  | -9,35     | -7,50  | -18,87 | -5,71    | 9,12   | 24,58  | -14,76 | 31,16/27,70 |
| NPT          | 6,00   | 7,00   | 4,00      | 3,00   | 1,00   | 2,00     | 4,00   | 8,00   | 1,00   |             |

Fonte: Dados da pesquisa.

As variáveis exógenas (taxa de câmbio e petróleo) aparecem como uma das principais

protagonistas na ponta transmissora, com volatilidades líquidas demonstradas pelos indicadores *NET* de 7.52 para o câmbio e 14.97 para o petróleo *Brent*. Se na série total o câmbio apresentou maior relevância no sistema e na subsérie da crise de 2008-2009 esse papel foi exercido pelo petróleo, no recorte da pandemia e da guerra Rússia-Ucrânia, contudo, ambos figuram dividindo o protagonismo na ponta ativa do efeito contágio em conjunto com a soja, que apresentou um índice *NET* de 24.58, sendo o maior índice líquido do sistema neste período.

Com relação ao etanol, sua característica novamente é alterada para a subsérie, retomando o papel de receptor de volatilidade. Essa posição vai em linha com o apurado no período total e diverge do resultado da subsérie da crise de 2008-2009. Vale destacar, ainda, sua relevância no sistema com índice *NET* de -9.35, sendo o terceiro maior receptor líquido. O açúcar seguiu o movimento do etanol, passando também a ser receptor de volatilidade no recorte.

Ainda analisando a Tabela 7, focando agora nas intersecções entre os pares, as variáveis exógenas seguem sendo destaques. O petróleo passa a incorrer em uma forte relação de contágio com o etanol, sendo o principal transmissor para este produto, além de ser a relação mais forte do sistema para subsérie. Ainda sobre o petróleo, sua relação foi de transmissor de volatilidade para a quase totalidade das *commodities* agropecuárias, com destaque para o início do período com posterior arrefecimento, como observa-se nas Figuras 5 à 8. Com exceção da soja, o câmbio apresentou o mesmo efeito do petróleo para as *commodities* agropecuárias, porém em menor grau.

Por fim, entre as demais *commodities*, o arroz se mostrou um receptor relevante, recebendo contágio do milho e da soja. A soja, por outro lado, foi o principal transmissor do grupo, exercendo o efeito contágio sobre o trigo e o milho, além do próprio arroz. A relação milho e soja é também bastante interessante pois, apesar da soja ser a principal transmissora do sistema, sua relação líquida com o milho é negativa.

Em suma, a Figura 11 apresenta o diagrama de interconectividade entre os mercados em análise no período após o início da pandemia da Covid-19 até meses após a deflagração do conflito militar entre a Rússia e a Ucrânia. Observa-se uma forte intersecção entre os mercados graneleiros (soja, milho, trigo e arroz) e os mercados energéticos (etanol e petróleo).

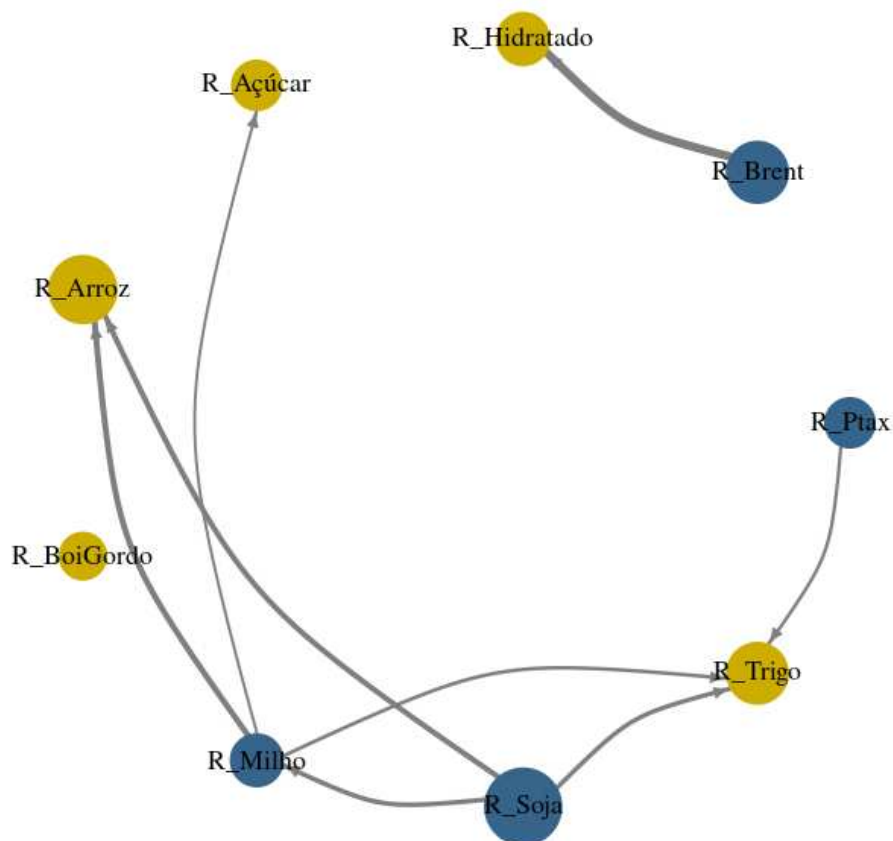


Figura 11 – Diagrama de rede da interconectividade do sistema para a subsérie da pandemia de COVID-19 englobando a Guerra Rússia-Ucrânia

Fonte: Dados da pesquisa.

De forma sintética, a dinâmica entre os mercados para subsérie mostra que o etanol se tornou um dos principais receptores de volatilidade, sendo mais impactado pelas variações do petróleo *Brent*, seguido pelo câmbio e pelo açúcar. A conexão entre o *Brent* e o etanol é especialmente forte, indicando que esses dois mercados estão bastante interligados. O açúcar também se associa mais ao etanol, mas sem uma relação clara de quem influencia quem, podendo-se afirmar que ambos os mercados se auto transmitem volatilidade. Já a soja passa a transmitir volatilidade para outros mercados, principalmente milho e trigo.

O câmbio, por sua vez, aumenta sua interação com os demais ativos, com destaque para a forte ligação com a soja, além de conexões relevantes com o trigo e o etanol. Por fim, trigo e arroz aparecem como grandes receptores líquidos de volatilidade, ou seja, são mercados que mais

absorvem os efeitos vindos de outros. O boi gordo, por fim, mostrou-se isolado do sistema para subsérie, diminuindo sua expressividade com relação aos demais períodos analisados.

## 5 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com o modelo TVP-VAR revelaram dinâmicas relevantes e, em alguns aspectos, inéditas no contexto brasileiro, ao demonstrar a complexa rede de interações entre o etanol e as principais *commodities* alimentares. De modo geral, confirmou-se que o etanol opera predominantemente como receptor líquido de volatilidade, sobretudo quando exposto aos choques oriundos do petróleo *Brent*, da taxa de câmbio e, com menor intensidade, do açúcar. A forte associação com o petróleo reforça o argumento da literatura de que há uma interligação estrutural entre os mercados de energia e os biocombustíveis, conforme sugerem Fang e Shao (2022), Palazzi et al. (2023) e Balcilar et al. (2021). O petróleo, nesse sentido, consolidou-se como principal vetor externo de contágio, capaz de influenciar, com maior intensidade, tanto os preços do etanol quanto os de outras *commodities* analisadas durante os períodos de crises globais avaliadas.

O câmbio, por sua vez, revelou crescente protagonismo na dinâmica de transmissão de volatilidade. Tradicionalmente menos explorado na literatura internacional voltada a países desenvolvidos, a taxa de câmbio aparece aqui como uma variável relevante para os mercados emergentes, como destacam Capitani e Gaio (2024). No caso brasileiro foi possível identificar uma forte relação do câmbio com a soja, o que poderia ser esperado por se tratar de uma cultura com grande foco em exportação. Porém, observa-se que o câmbio também se apresentou relação significativa com o trigo e o etanol, sugerindo que a flutuação cambial atua como canal de transmissão de choques externos que repercutem diretamente sobre preços nacionais. Esses achados são coerentes com estudos que indicam o câmbio como transmissor relevante de volatilidade, sobretudo em cenários de desvalorização monetária e aumento dos preços internacionais de insumos e alimentos (Dmytrów et al., 2021; Yildirim et al., 2022).

O comportamento do açúcar também se destaca por sua interdependência com o etanol, especialmente nos períodos em que os preços dos biocombustíveis são pressionados pela política de paridade de preços da gasolina ou por variações no mercado internacional de petróleo. Embora apresente certa estabilidade relativa, o açúcar se comporta de forma instável em relação ao etanol, bem como a outras *commodities*, por vezes transmissor, por vezes receptor de volatilidade,

característica também apontada no estudo de Dutta (2018).

No que diz respeito às *commodities* alimentares, a soja e o milho demonstraram seu papel como transmissores líquidos de volatilidade, com destaque para o milho nos episódios de elevação do preço do petróleo, o que está em linha com a literatura que os reconhece como insumos centrais tanto na cadeia alimentar quanto na energética (Serra & Zilberman, 2013; Campiche et al., 2007; Saghaian et al., 2018). O trigo e o arroz, por outro lado, consolidam-se como grandes receptores líquidos de volatilidade, evidenciando sua vulnerabilidade aos choques. Este último, em especial, apresenta comportamento ainda não observado em outros estudos na literatura, posicionando-se como um dos principais receptores líquidos de volatilidade no mercado brasileiro, evidenciando sobretudo os choques mais recentes, no período pós-pandemia. Ainda sobre as relações entre as *commodities* alimentares, a relação milho e trigo foi duradoura ao longo dos registros de análise, o que pode indicar uma crescente interconexão, potencialmente explicada, por exemplo, pela sobreposição dos períodos de produção com a evolução da produção da segunda safra do milho.

Ao focar a análise por subperíodos, foi possível observar que os episódios de instabilidade, especificamente a crise das *commodities* de 2008–2009, a pandemia de COVID-19 e a guerra Rússia-Ucrânia, amplificaram a conectividade entre os mercados, alterando inclusive os papéis tradicionais de algumas *commodities*. Durante a pandemia, por exemplo, o etanol absorveu volatilidade de forma mais intensa, especialmente a oriunda do petróleo e do câmbio, enquanto o trigo e o arroz responderam de forma acentuada aos choques de aumento de preços, conforme discutido também por Urak et al. (2024) e Manelli et al. (2024). Já durante a crise de 2008–2009, foi a soja quem liderou a transmissão de volatilidade, enquanto o açúcar passou a exercer papel mais relevante como transmissor, em parte por seu vínculo com o etanol e, segundo Serra (2011), pela maior especulação nos mercados futuros naquele momento.

Essas repetições reforçam a regularidade descrita por diversos autores em contextos de crise. A transmissão de volatilidade entre mercados agrícolas e energéticos se intensifica, e o petróleo tende a assumir papel central nesse efeito contágio (Palazzi et al., 2023; Fang & Shao, 2022). Mesmo quando o etanol se posiciona como transmissor, o petróleo frequentemente apresenta uma influência superior, atuando como agente sistêmico com forte capacidade de indução de choques em diferentes mercados.

A comparação dos resultados com a literatura evidencia um alinhamento significativo, tanto com estudos clássicos, quanto com pesquisas recentes. Zhang et al. (2010) e Serra (2011) já haviam

discutido que os biocombustíveis poderiam amplificar a transmissão de volatilidade, especialmente em contextos de crise. No Brasil, Kristoufek et al. (2012) e Capitani (2018) destacaram o papel institucional da política de preços da Petrobrás e dos mandatos de mistura como determinantes da relação entre etanol, alimentos e combustíveis fósseis. Os achados de Serra e Zilberman (2013) sobre o papel da soja e do milho como emissores de volatilidade também são reforçados pelas evidências empíricas deste estudo.

Novamente sobre o que diz respeito à crise de 2008/09, os resultados desta dissertação convergem com a literatura internacional, que identificou o etanol como transmissor de volatilidade nesse contexto. Saghaian et al. (2018) apontaram a presença de transmissão assimétrica de choques entre etanol, milho e petróleo nos EUA, enquanto Dutta (2018), no caso brasileiro, identificou relações não lineares que indicam uma atuação mais ativa do etanol em momentos críticos. Nos períodos de instabilidades pós-pandemia, nota-se a convergência com estudos internacionais que observaram os efeitos de contágio do petróleo sobre as *commodities* agrícolas e energéticas (Dmytrów et al., 2022; Farid et al., 2022; Quintino et al., 2023; Palazzi et al., 2023), e da importância de se considerar o câmbio nas análises para mercados emergentes (Yildirim et al., 2022).

A contribuição original reside, portanto, na explicitação do comportamento diferenciado do etanol ao longo do tempo e sob distintas conjunturas. Ao contrário de parte da literatura que retrata o etanol como agente passivo ou de influência limitada sobre os preços agrícolas, os resultados aqui apresentados mostram que sua função como transmissor ou receptor de volatilidade depende fortemente do ciclo econômico, do comportamento do petróleo e da dinâmica cambial, reforçando a importância das variáveis exógenas que se mostraram, uma vez mais, mais relevantes que qualquer efeito contágio proporcionado pelo etanol. A evidência de que, mesmo nas crises, o etanol se manteve majoritariamente como receptor líquido de volatilidade é um ponto de destaque e contribui para aprofundar a compreensão sobre sua posição na rede de interconectividade entre alimentos e energia. O mesmo se aplica à posição do arroz como *commodity* altamente sensível e pouco estudada.

Os resultados da análise geral sugerem que os mercados agrícolas e energéticos brasileiros estão estruturalmente interconectados e fortemente expostos a choques externos. A intensidade dessas conexões varia ao longo do tempo, com claros picos de conectividade durante episódios críticos como a pandemia e a guerra, em conformidade com estudos como os de Farid et al. (2022)

e Dmytrów et al. (2021).

Ainda relacionando os achados com a literatura internacional, Hung (2021), ao investigar a conectividade entre os preços do petróleo bruto e de *commodities* agrícolas, identificou intensificação nos efeitos de transbordamento durante a pandemia da COVID-19. O trabalho evidencia que, em momentos de crise, os choques de preços do petróleo afetam com maior intensidade os mercados agrícolas, o que corrobora com as evidências deste trabalho quanto à elevação da interconectividade nos períodos de instabilidade, como o da pandemia e o da guerra entre Rússia e Ucrânia.

Complementarmente, Janda e Kravec (2022) analisaram a transmissão de preços entre combustíveis, biocombustíveis e *commodities* alimentares nos mercados do Brasil, Estados Unidos e União Europeia, por meio de modelos VECM aplicados à série temporal entre 2003 a 2020. Os autores destacam que a interdependência entre o etanol e o açúcar no mercado brasileiro é mais robusta em comparação com os efeitos encontrados no mercado de etanol de milho dos Estados Unidos. Esses achados reforçam o papel do etanol brasileiro como receptor de volatilidade nos choques energéticos globais, o que é consistente com os resultados deste estudo, sobretudo nos momentos de crise energética internacional.

Por fim, os resultados obtidos de maneira geral reforçam a necessidade de atenção constante sobre o comportamento do etanol como elo entre os mercados de energia e de alimentos. A interconectividade evidenciada indica que políticas públicas voltadas ao setor energético como subsídios, mandatos de mistura ou alterações na política de preços da Petrobrás, podem ter repercussões importantes sobre a segurança alimentar, especialmente em produtos mais vulneráveis a choques de mercado, como o arroz e o trigo. Ademais, o papel da taxa de câmbio como transmissor recorrente de volatilidade reforça a importância de políticas macroeconômicas coordenadas, capazes de mitigar os efeitos negativos da instabilidade internacional sobre os preços internos dos alimentos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação buscou analisar a transmissão de volatilidade entre o etanol e as principais *commodities* alimentares no Brasil, considerando também os efeitos de choques externos como a crise financeira de 2008/09, a pandemia de COVID-19 e a guerra entre Rússia e Ucrânia. Por meio

da aplicação do modelo TVP-VAR, foi possível capturar a evolução dinâmica das relações entre os mercados alvo da pesquisa ao longo do tempo, destacando o comportamento entre esses ativos e como tal comportamento se intensifica em períodos de instabilidade.

Os resultados revelaram que, no contexto brasileiro, o etanol atua predominantemente como receptor líquido de volatilidade, especialmente em relação ao petróleo e à taxa de câmbio. As *commodities* alimentares, por sua vez, apresentaram papéis distintos. A soja e o milho foram consistentemente identificadas como emissores líquidos de volatilidade, enquanto arroz e trigo se destacaram como receptores líquidos de volatilidade. A influência do petróleo sobre os mercados agrícolas e de biocombustíveis mostrou-se mais relevante ao longo dos períodos de crise, reafirmando seu papel central como transmissor de choques. A taxa de câmbio também teve papel relevante, particularmente no período da pandemia, influenciando especialmente as culturas voltadas à exportação.

Em geral, apesar da forte expansão na produção do etanol no Brasil e sua consolidação no mercado internacional, os resultados deste trabalho não permitem inferir que o etanol brasileiro apresentou efeito transmissor sobre os mercados de *commodities* agrícolas no país após esse período e, tampouco, não se pode afirmar que os períodos de crise afetam de forma significativa essa relação. O único período de maior transmissão se deu no ciclo de crise internacional em 2008-09, porém, as evidências demonstram um efeito correlacionado ao forte efeito de transmissão do petróleo sobre os mercados de *commodities* agrícolas e energéticas de uma forma generalizada neste período.

Desta forma, o estudo corrobora com pesquisas anteriores que não encontraram essa evidência de relação entre os mercados de biocombustíveis e alimentos no Brasil, trazendo novos elementos dessa percepção ao avaliar o contexto das últimas duas décadas, perpassando pelo período da expansão canavieira no início do século XXI e avaliando os potenciais impactos derivados das crises internacionais nos mercados de *commodities* desde então.

Ademais, o estudo contribui com as ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável) e ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ao se debruçar em questões relacionadas à percepção do arranjo produtivo agrícola e suas conexões com os impactos nos preços e volatilidade, bem como à questões que possuem interface com sustentabilidade econômica da cadeia sucroenergética. Neste sentido, os resultados deste estudo podem ser utilizados, parcialmente, como direcionadores de políticas públicas e políticas setoriais que estimulem a expansão de uma matriz energética

sustentável no país, e que mitiguem os potenciais efeitos de crises econômicas e garantam o acesso da população à produção agropecuária doméstica.

Ainda que os achados desta pesquisa contribuam com evidências empíricas relevantes sobre os padrões de conectividade e transmissão de volatilidade no Brasil, algumas limitações metodológicas e empíricas devem ser consideradas. Primeiramente, o estudo se restringe à utilização de dados semanais, o que pode suavizar ou ocultar choques pontuais que seriam melhor capturados com maior granularidade temporal, como séries diárias. Ainda sobre a frequência, pode-se afirmar que o período da guerra Rússia-Ucrânia não foi plenamente isolado uma vez que, em restringindo-o, o número de observações semanais não seria suficiente para aplicação do modelo da pesquisa, tendo sido necessário, então, mantê-lo em conjunto ao período da pandemia de COVID-19.

Em segundo lugar, o escopo da análise esteve limitado geograficamente ao Brasil e a um conjunto específico de ativos, especificamente o etanol, milho, soja, trigo, arroz, açúcar e boi gordo, excluindo outras *commodities* e contextos geoeconômicos que poderiam ampliar o entendimento dos mecanismos de contágio.

Adicionalmente, a opção por empregar exclusivamente o modelo TVP-VAR, embora justificada pela sua capacidade de capturar dinâmicas temporais e relações não constantes entre variáveis, limita a comparação com abordagens alternativas. O uso de modelos como o GARCH, DCC-GARCH ou modelos de causalidade não linear, poderia complementar os achados com métricas de volatilidade ou assimétrica, ampliando a robustez das conclusões. Destaca-se, também, que a análise não incorporou elementos microeconômicos ou estruturais, como mudanças tecnológicas, estoques para controle de preços ou políticas públicas específicas, que poderiam ter efeitos sobre os padrões de volatilidade observados.

Dada às limitações, sugere-se que pesquisas futuras avancem na aplicação de modelos alternativos, com especial atenção aos efeitos assimétricos de choques positivos e negativos em períodos de crise; a utilização de frequências temporais mais elevadas, como dados diários, especialmente para análise de eventos críticos ou períodos curtos de forte instabilidade; e a ampliação do recorte geográfico e setorial, contemplando outras *commodities* relevantes e mercados internacionais, visando tornar possível comparações regionais e a análise da interdependência entre países, por exemplo.

Por fim, há espaço para estudos que incorporem indicadores institucionais e políticos, como

políticas de subsídio, ou mesmo políticas de controle de preço de produtos substitutos (o caso, por exemplo, da gasolina), preços administrados ou mandatos de mistura, dentre outras ações que possam afetar substancialmente os canais de transmissão de volatilidade. Essas sugestões visam não apenas aprimorar e complementar os achados que colaboram para compreensão teórica do tema, mas também oferecer subsídios mais assertivos para formulação de políticas públicas que equilibrem os objetivos de segurança alimentar, sustentabilidade energética e estabilidade macroeconômica. Ademais, a recente forte expansão da produção de etanol de milho no Brasil, ainda em curso, demanda um estudo futuro que analise os potenciais efeitos de transmissão entre os mercados aqui analisados, com destaque para sua relação com o trigo.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SUGAWARA, L. M.; MELLO, M. P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. *Sustainability*, v. 4, p. 574–585, 2012. <https://doi.org/10.3390/su4040574>.

AJANOVIC, A. Biofuels versus food production: does biofuels production increase food prices? *Energy*, v. 36, n. 4, p. 2070–2076, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.019>.

AKHTARUZZAMAN, M.; BOUBAKER, S.; SENSOY, A. Financial contagion during COVID–19 crisis. *Finance Research Letters*, v. 38, 101604, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2020.101604>.

ANTONAKAKIS, N.; CHATZIANTONIOU, I.; GABAUER, D. Refined measures of dynamic connectedness based on time-varying parameter vector autoregressions. *Journal of Risk and Financial Management*, v. 13, n. 4, p. 84, 2020. <https://doi.org/10.3390/jrfm13040084>.

AZEVEDO, A. N. G.; LIMA, B. G. A. O papel da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira. *Revista Direito Ambiental e Sociedade*, v. 6, n. 1, p. 77–100, 2016.

BABAR, M.; AHMAD, H.; YOUSAF, I. Returns and volatility spillover between agricultural commodities and emerging stock markets: new evidence from COVID-19 and Russian-Ukrainian war. *International Journal of Emerging Markets*, ahead-of-print, 2023. <https://doi.org/10.1108/IJOEM-02-2022-0226>.

BAILLIE, R. T.; BOLLERSLEV, T.; MIKKELSEN, H. O. Fractionally integrated generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, v. 74, n. 1, p. 3–30, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(95\)01749-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4076(95)01749-6).

BALCILAR, M.; GABAUER, D.; UMAR, Z. Crude oil futures contracts and commodity markets: new evidence from a TVP-VAR extended joint connectedness approach. *Resources Policy*, v. 73, 102219, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102219>.

BALCOMBE, K.; RAPSOMANIKIS, G. Bayesian estimation and selection of nonlinear vector error correction models: the case of the sugar–ethanol–oil nexus in Brazil. *American Journal of*

*Agricultural Economics*, v. 90, n. 3, p. 658–668, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8276.2008.01136>.

BECKMAN, J.; COUNTRYMAN, A. The importance of agriculture in the economy: impacts from COVID-19. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 103, n. 5, p. 1595–1611, 2021. <https://doi.org/10.1111/ajae.12212>.

BENTIVOGLIO, D.; FINCO, A.; BACCHI, M. R. P. Interdependencies between biofuel, fuel and food prices: the case of the Brazilian ethanol market. *Energies*, v. 9, n. 6, 464, 2016. <https://doi.org/10.3390/en9060464>.

BENTIVOGLIO, D.; RASETTI, M. Biofuel sustainability: review of implications for land use and food price. *Italian Review of Agricultural Economics (REA)*, v. 70, n. 1, p. 7–31, 2015.

BORDONAL, R. D. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; DE FIGUEIREDO, E. B.; DE OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 38, p. 1–23, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>

BOX-STEFFENSMEIER, J. M. Cointegration and error correction models. In: \_\_\_\_\_. *Time series analysis for the social sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

CABRERA, B. L.; SCHULZ, F. Volatility linkages between energy and agricultural commodity prices. *Energy Economics*, v. 54, p. 190–203, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.11.018>.

CAMPICHE, J.; BRYANT, H.; RICHARDSON, J.; OUTLAW, J. Examining the evolving correspondence between petroleum prices and agricultural commodity prices. *American Agricultural Economics Association Annual Meeting*, 2007. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.9881>.

CAPITANI, D. H. D.; GAIO, L. E. H. Volatility transmission in agricultural markets: evidence from the Russia-Ukraine conflict. *International Journal of Food and Agricultural Economics*, v. 11, n. 2, p. 65–82, 2023. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.334707>.

CAPITANI, D. H. D. Biofuels and food: can Brazilian ethanol production affect domestic food prices? *Economia Aplicada*, v. 22, n. 1, p. 141–162, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11606/1980->

5330/ea124294.

CAPITANI, D. H. D.; GAIO, L. E. Dynamic connectedness and volatility spillover in the Brazilian agricultural market in the context of the COVID-19 pandemic. *Estudos Econômicos (São Paulo)*, v. 54, n. 4, e53575446, 2024. <https://doi.org/10.1590/1980-53575446dclg>.

CAPITANI, D. H. D.; GOMES, M.; WALTER, A.; LEAL, M. Condições de trabalho na atividade canavieira brasileira. *Revista de Política Agrícola*, v. 24, ago. 2015.

CHEN, X.; KHANNA, M. Food vs. fuel: the effect of biofuel policies. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 95, n. 2, p. 289–295, 2013. <https://doi.org/10.1093/ajae/aas039>.

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

COOKE, B.; ROBLES, M. Recent food prices movements: a time series analysis. *International Food Policy Research Institute (IFPRI) Discussion Paper*, n. 00942, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Série histórica das safras. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 2024.

DIEBOLD, F. X.; YILMAZ, K. Trans-Atlantic equity volatility connectedness: US and European financial institutions, 2004–2014. *Journal of Financial Econometrics*, v. 14, n. 1, p. 81–127, 2015. <https://doi.org/10.1093/jjfinec/nbv021>.

DING, Z.; GRANGER, C. W. J.; ENGLE, R. F. A long memory property of stock market returns and a new model. *Journal of Empirical Finance*, v. 1, n. 1, p. 83–106, 1993. [https://doi.org/10.1016/0927-5398\(93\)90006-D](https://doi.org/10.1016/0927-5398(93)90006-D).

DMYTRÓW, K.; LANDMESSER, J.; BIESZK-STOLORZ, B. The connections between COVID-19 and the energy commodities prices: evidence through the Dynamic Time Warping method. *Energies*, v. 14, n. 13, 4024, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14134024>.

DUTTA, A. Cointegration and nonlinear causality among ethanol-related prices: evidence from Brazil. *GCB Bioenergy*, v. 10, p. 335–342, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12495>.

ELLEBY, C.; DOMÍNGUEZ, I. P.; ADENAUER, M. Impacts of the COVID-19 pandemic on the

global agricultural markets. *Environmental and Resource Economics*, v. 76, p. 1067–1079, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00473-6>.

ESMAEILI, A.; SHOKOOHI, Z. Assessing the effect of oil price on world food prices: application of principal component analysis. *Energy Policy*, v. 39, n. 2, p. 1022–1025, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.004>.

FANG, Y.; SHAO, Z. The Russia-Ukraine conflict and volatility risk of commodity markets. *Finance Research Letters*, v. 50, 103264, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2022.103264>.

FARID, S.; NAEEM, M. A.; PALTRINIERI, A.; NEPAL, R. Impact of COVID-19 on the quantile connectedness between energy, metals and agriculture commodities. *Energy Economics*, v. 109, 105962, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105962>.

FERRAZ, D.; OLIVEIRA, F. C. R.; REBELATTO, D. A. N.; PYKA, A. Mechanization in sugarcane production and other agricultural activities: an econometric analysis of employment and income. *Gestão & Produção*, v. 28, n. 4, e5768, 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2021v28e5768>.

FORBES, K. J.; RIGOBON, R. No contagion, only interdependence: measuring stock market comovements. *The Journal of Finance*, v. 57, n. 5, p. 2223–2261, 2002. <https://doi.org/10.1111/0022-1082.00494>.

FRENK, D.; TUBERVILLE, W. Commodity index traders and the boom/bust cycle in commodities prices. *Better Markets*, Washington-DC, 2011. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1945570>.

FREY, G.; MANERA, M. Econometric models of asymmetric price transmission. *Journal of Economic Surveys*, v. 21, n. 2, p. 349–415, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6419.2007.00507.x>.

FURUOKA, F. Transmission of risks between energy and agricultural commodities: frequency time-varying VAR, asymmetry and portfolio management. *Resources Policy*, v. 81, 103339, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103339>.

GALDOS, C. O.; SEABRA, J.; NOGUEIRA, L.; BONOMI, A. Trends in global warming and human health impacts related to Brazilian sugarcane ethanol production considering black carbon

emissions. *Applied Energy*, v. 104, p. 576–582, 2013.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.002>

GILBERT, C. How to understand high food prices. *Journal of Agricultural Economics*, v. 61, n. 2, p. 398–425, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.2010.00248.x>.

GLOSTEN, L. R.; JAGANNATHAN, R.; RUNKLE, D. E. On the relation between the expected value and the volatility of the nominal excess return on stocks. *The Journal of Finance*, v. 48, n. 5, p. 1779–1801, 1993. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1993.tb05128.x>.

GOLDENBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, v. 36, n. 6, p. 2086–2097, 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.028>.

HELMİ, M. H.; ÇATIK, A. N.; AKDENİZ, C. The impact of central bank digital currency news on the stock and cryptocurrency markets: evidence from the TVP-VAR model. *Research in International Business and Finance*, v. 65, 101968, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2023.101968>.

HESARYA, F. T.; RASOULINEZHADB, E.; YOSHINOC, N. D. Energy and food security: linkages through price volatility. *Energy Policy*, v. 128, p. 796–806, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.043>.

HOCHMAN, G.; RAJAGOPAL, D.; TIMILSINA, G.; ZILBERMAN, D. The role of inventory adjustments in quantifying factors causing food price inflation. *Policy Research Working Paper*, n. WPS 5744, World Bank, 2011.

HUNG, N. T. Oil prices and agricultural commodity markets: evidence from pre and during COVID-19 outbreak. *Resources Policy*, [S.l.], v. 73, p. 102236, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102236>.

JANDA, K.; KRAVEC, P. *VECM modelling of the price dynamics for fuels, agricultural commodities and biofuels*. Kiel; Hamburg: ZBW – Leibniz Information Centre for Economics, 2022.

JUST, M.; ECHAUST, K. Dynamic spillover transmission in agricultural commodity markets:

what has changed after the COVID-19 threat? *Economics Letters*, v. 217, 110671, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2022.110671>.

KAMDEM, J. S.; ESSOMBA, R. B.; BERINYUY, J. N. Deep learning models for forecasting and analyzing the implications of COVID-19 spread on some commodities markets volatilities. *Chaos, Solitons and Fractals*, v. 140, 110215, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110215>.

KRISTOUFEK, L.; JANDA, K.; ZILBERMAN, D. Price transmission between biofuels, fossil fuels, and agricultural commodities. *Energy Economics*, v. 34, n. 1, p. 181–189, 2012. DOI: 10.17221/223/2021-AGRICECON.

KRISTOUFEK, L.; JANDA, K.; ZILBERMAN, D. Correlations between biofuels and related commodities before and during the food crisis: a taxonomy perspective. *Energy Economics*, v. 34, n. 5, p. 1380–1391, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.06.016>.

LIMA, C. R. A.; MELO, G. R.; STOSIC, B.; STOSIC, T. Cross-correlations between Brazilian biofuel and food market: ethanol versus sugar. *Physica A*, v. 513, p. 687–693, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.08.080>.

MANELLI, A.; PACE, R.; LEONE, M. Russia–Ukraine conflict, commodities and stock market: a quantile VAR analysis. *Journal of Risk and Financial Management*, v. 17, n. 1, p. 29, 2024. <https://doi.org/10.3390/jrfm17010029>.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

MARTIGNONE, G. M. B. Leadership shift in the global soybean market: dynamic connectedness approach (TVP-VAR). *Heliyon*, v. 10, n. 16, 2024. [//doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36071](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36071).

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS – MIDC. Comex Vis. Brasília, 2024. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/comex-vis>. Acesso em: 2024.

MISHRA, A. K.; PANDA, P.; PRADHAN, A. K.; SMARK, C. Uncertainties and dynamic connectedness among sectors: a case of the USA, India, France, Germany and Russia. *Australasian Business, Accounting and Finance Journal*, v. 18, n. 3, p. 168–201, 2024.

<https://doi.org/10.14453/aabfj.v18i3.10>.

MORAES, J. C. B. D. Utilização da cinza de folha de cana-de-açúcar como material pozolânico em matrizes cimentantes. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, São Paulo, 2015.

NASSAR, A. M.; HARFUCH, L.; BACHION, L. C.; MOREIRA, M. R. Biofuels and land-use changes: searching for the top model. *Interface Focus*, v. 1, p. 224–232, 2011. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2010.0043>.

NUÑEZ, H. M.; ÖNAL, H.; KHANNA, M. Land use and economic effects of alternative biofuel policies in Brazil and United States. *Agricultural Economics*, v. 44, n. 1, p. 487–499, 2013. <https://doi.org/10.1111/agec.12032>.

PAIENTKO, T.; AMAKUDE, S. Interconnected markets: unveiling volatility spillovers in commodities and energy markets through BEKK-GARCH modelling. *Analytics*, v. 3, n. 2, p. 194–220, 2024. <https://doi.org/10.3390/analytics3020011>.

PALAZZI, R. B.; ASSAF, A.; KLOTZE, M. C. Dynamic connectedness between energy markets and the Brazilian cash market: an empirical analysis pre- and post-COVID-19. *Journal of Futures Markets*, p. 1–30, 2023. <https://doi.org/10.1002/fut.22463>.

PARIS, A. On the link between oil and agricultural commodity prices: do biofuels matter? *International Economics*, v. 155, p. 48–60, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2017.12.003>.

PESARAN, H. H.; SHIN, Y. Generalized impulse response analysis in linear multivariate models. *Economics Letters*, v. 58, n. 1, p. 17–29, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0165-1765\(97\)00214-0](https://doi.org/10.1016/S0165-1765(97)00214-0).

PICOLLI, M. C. A.; MACHADO, P. G. Land use change: the barrier for sugarcane sustainability. *Biofuels, Bioproducts and Biorefineries*, v. 15, p. 1591–1603, 2021. <https://doi.org/10.1002/bbb.2270>.

QUINTINO, D.; OGINO, C.; HAQ, I. U.; FERREIRA, P.; OLIVEIRA, M. An analysis of dynamic correlations among oil, natural gas and ethanol markets: new evidence from the pre- and post-COVID-19 crisis. *Energies*, v. 16, n. 5, 2349, 2023. <https://doi.org/10.3390/en1605234>.

RAPSOMANIKIS, G.; HALLAM, D. Threshold cointegration in the sugar-ethanol-oil price system in Brazil: evidence from nonlinear vector error correction models. *Commodity and Trade*

*Policy Research Working Paper*, n. 22, FAO: Rome, 2006.

RAVALLION, M. Testing market integration. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 68, n. 1, p. 102–109, 1986. <https://doi.org/10.2307/1241654>.

RODRIGUES, L.; BACCHI, M. R. P. Light fuel demand and public policies in Brazil, 2003–2013. *Applied Economics*, v. 48, n. 54, p. 5300–5313, 2013. <https://doi.org/10.1080/00036846.2016.1176115>.

ROSILLO-CALLE, F.; CORTEZ, L. A. B. Towards Proálcool II—A review of the Brazilian bioethanol programme. *Biomass and Bioenergy*, v. 14, n. 2, p. 115–124, 1998. [https://10.1016/S0961-9534\(97\)10020-4](https://10.1016/S0961-9534(97)10020-4).

SAGHAIAN, S. The impact of the oil sector on commodity prices: correlation or causation? *Journal of Agricultural and Applied Economics*, v. 42, n. 4, p. 477–485, 2010. <https://doi.org/10.1017/S1074070800003667>.

SAGHAIAN, S.; NEMATI, M.; WALTERS, C.; CHEN, B. Asymmetric price volatility transmission between U.S. biofuel, corn, and oil markets. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, v. 43, n. 1, p. 46–60, 2018. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/44840974>. Acesso em: 24 jun. 2025.

SCARPARE, F. V.; HERNANDES, T. A. D.; RUIZ-CORRÊA, S. T.; KOLLN, O. T.; DE CASTRO GAVA, G. J.; DOS SANTOS, L. N. S.; VICTORIA, R. L. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 4576–4584, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.107>.

SERRA, T.; ZILBERMAN, D. Biofuel-related price transmission literature: a review. *Energy Economics*, v. 37, p. 141–151, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.02.014>.

SERRA, T.; GOODWIN, B. K.; FEATHERSTONE, A. M. Biofuel market volatility and its effects on commodity prices. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, v. 36, n. 2, p. 269–285, 2011.

SOCOL, C. R.; VANDENBERGHE, L. P. S.; COSTA, B.; WOICIECHOWSKI, A. L.; CARVALHO, J. C.; MEDEIROS, A. B. P. Brazilian biofuel program: an overview. *Journal of*

*Scientific & Industrial Research*, v. 64, p. 897–904, 2004.

STOLF, R.; OLIVEIRA, A. P. R. The success of the Brazilian alcohol program (Proálcool)—A decade-by-decade brief history of ethanol in Brazil. *Engenharia Agrícola*, v. 40, n. 2, p. 243–248, 2020. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p243-248/2020>.

SUBRAMANIAM, Y.; MASRON, T. A.; AZMAN, N. H. Biofuels, environmental sustainability, and food security: a review of 51 countries. *Energy Research & Social Science*, v. 68, 101549, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101549>.

TAGHIZADEH-HESARY, F.; RASOULINEZHAD, E.; YOSHINO, N. Energy and food security: linkages through price volatility. *Energy Policy*, v. 128, p. 796–806, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.043>.

TRUJILLO-BARRERAS, A.; MALLORY, M.; GARCIA, P. Volatility spillovers in U.S. crude oil, ethanol, and corn futures markets. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, v. 37, n. 2, p. 247–262, 2012.

TYNER, W. E. The integration of energy and agricultural markets. *Agricultural Economics*, v. 41, p. 193–201, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2010.00500.x>.

UMAR, Z.; ALWAHEDI, W.; ZAREMBA, A.; VO, X. V. Return and volatility connectedness of the non-fungible tokens segments. *Journal of Behavioral and Experimental Finance*, v. 35, 100692, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jbef.2022.100692>.

URAK, F. Confluence of COVID-19 and the Russia-Ukraine conflict: effects on agricultural commodity prices and food security. *Borsa Istanbul Review*, v. 24, n. 3, p. 506–519, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.bir.2024.02.008>.

VACHA, L.; JANDA, K.; KRISTOUFEK, L.; ZILBERMAN, D. Time–frequency dynamics of biofuel–fuel–food system. *Energy Economics*, v. 40, p. 233–241, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.06.015>.

WALTER, A.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; LEAL, M. R. L. V.; SEABRA, J. E. A.; CUNHA, M. P. Brazilian sugarcane ethanol: developments so far and challenges for the future. *WIREs Energy and Environment*, v. 3, p. 70–92, 2014.

<https://doi.org/10.1002/9781118957844.ch24>.

WU, Y. Time-frequency volatility connectedness between fossil energy and agricultural commodities: comparing the COVID-19 pandemic with the Russia-Ukraine conflict. *Finance Research Letters*, v. 55, 103866, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.103866>.

XUE, H. Spatial price transmission and dynamic volatility spillovers in the global grain markets: a TVP-VAR-connectedness approach. *Foods*, v. 13, n. 20, p. 3317, 2024. <https://doi.org/10.3390/foods13203317>

YILDRIM, D. Ç.; ERDOGAN, F.; TARI, E. N. Time-varying volatility spillovers between real exchange rate and real commodity prices for emerging market economies. *Resources Policy*, v. 76, 102586, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102586>.

ZHANG, Z. Food versus fuel: what do prices tell us? *Energy Policy*, v. 38, n. 1, p. 445–451, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.034>.