

DETERMINANTES DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL: UMA ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA E DA ATIVIDADE INDUSTRIAL (1990-2023)

DETERMINANTS OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN BRAZIL: AN ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION AND INDUSTRIAL ACTIVITY (1990-2023)

DETERMINANTES DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN BRASIL: UN ANÁLISIS DEL CONSUMO DE ENERGÍA Y DE LA ACTIVIDAD INDUSTRIAL (1990-2023)

Patrícia Figueiredo Stefani¹, Nilson Luiz da Costa², Geferson Gustavo Wagner Mota da Silva³, Paloma Mattos Fagundes⁴, Gabriel Nunes de Oliveira⁵, Carolina de Matos Nogueira⁶, Bianca Jupiara Fortes Fortes Schardong⁷, Suraia Nasralla Souza⁸

DOI: 10.54899/dcs.v23i87.4598

Recibido: 12/01/2026 | Aceptado: 06/02/2026 | Publicación en línea: 13/02/2026.

RESUMO

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) representam um dos principais desafios ambientais do século XXI, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil. O consumo de energia e a atividade industrial são fatores centrais na dinâmica dessas emissões, influenciando diretamente o desempenho ambiental do país. Este artigo tem como objetivo investigar as principais determinantes das emissões de gases de efeito estufa per capita no Brasil entre 1990 e 2023, com ênfase no papel do consumo de energia e da atividade industrial para estimar o impacto dessas variáveis e discutir suas implicações para políticas públicas voltadas à transição energética e ao desenvolvimento sustentável. Utilizando um modelo econométrico de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) com especificação log-log, estima-se as elasticidades das emissões em relação ao consumo de energia per capita e ao índice real do PIB industrial. São aplicados testes para autocorrelação, heterocedasticidade e multicolinearidade, com correções metodológicas

¹ Doutoranda em Agronegócios, Universidade Federal de Santa Maria, Palmeira das Missões, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: patriciamfstefani@yahoo.com.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1573-8660>

² Doutor em Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural da Amazônia. E-mail: nilson.costa@ufsm.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2000-1521>

³ Doutorando em Agronegócios, Universidade Federal de Santa Maria, Palmeira das Missões, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: geferson_gustavo@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2325-4666>

⁴ Doutora em Agronegócios, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: palomattos@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0150-4422>

⁵ Doutor em Extensão Rural, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: gabriel.n.oliveira@ufsm.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0620-4955>

⁶ Doutora em Agronegócios, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. E-mail: carolina.m.nogueira@hotmail.com Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-9463-2014>

⁷ Pós-Doutora em Agronegócios pela Universidade Federal de Santa Maria, Palmeira das Missões, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: bianca.schardong@ufsm.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0504-7935>

⁸ Doutoranda em Direito, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, Brasil. E-mail: suraianasrallas@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-6536-1695>

apropriadas, visando garantir robustez às inferências. Os resultados são discutidos à luz da literatura e das implicações para políticas públicas voltadas à transição energética e ao desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Emissões de Gases de Efeito Estufa. Consumo de Energia. Atividade Industrial. Brasil. Econometria.

ABSTRACT

Greenhouse gas (GHG) emissions represent one of the main environmental challenges of the 21st century, especially in developing countries like Brazil. Energy consumption and industrial activity are central factors in the dynamics of these emissions, directly influencing the country's environmental performance. This article aims to investigate the main determinants of per capita greenhouse gas emissions in Brazil between 1990 and 2023, with emphasis on the role of energy consumption and industrial activity to estimate the impact of these variables and discuss their implications for public policies aimed at energy transition and sustainable development. Using an econometric model of Ordinary Least Squares (OLS) with a log-log specification, the elasticities of emissions in relation to per capita energy consumption and the real index of industrial GDP are estimated. Tests for autocorrelation, heteroscedasticity, and multicollinearity are applied, with appropriate methodological corrections, aiming to ensure the robustness of the inferences. The results are discussed in light of the literature and the implications for public policies aimed at energy transition and sustainable development.

Keywords: Greenhouse Gas Emissions. Energy Consumption. Industrial Activity. Brazil. Econometrics.

RESUMEN

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) representan uno de los principales desafíos ambientales del siglo XXI, especialmente en países en desarrollo como Brasil. El consumo de energía y la actividad industrial son factores centrales en la dinámica de estas emisiones, influyendo directamente en el desempeño ambiental del país. Este artículo tiene como objetivo investigar los principales determinantes de las emisiones per cápita de gases de efecto invernadero en Brasil entre 1990 y 2023, con énfasis en el papel del consumo de energía y la actividad industrial para estimar el impacto de estas variables y discutir sus implicaciones para las políticas públicas orientadas a la transición energética y el desarrollo sostenible. Utilizando un modelo econométrico de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) con una especificación log-log, se estiman las elasticidades de las emisiones en relación con el consumo de energía per cápita y el índice real del PIB industrial. Se aplican pruebas de autocorrelación, heterocedasticidad y multicolinealidad, con las correcciones metodológicas apropiadas, con el objetivo de garantizar la robustez de las inferencias. Los resultados se discuten a la luz de la literatura y las implicaciones para las políticas públicas orientadas a la transición energética y el desarrollo sostenible.

Palabras clave: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Consumo de Energía. Actividad Industrial. Brasil. Econometría.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) representam um dos principais desafios ambientais do século XXI, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil (IPCC, 2022; United Nations Environment Programme, 2023).

O consumo de energia e a atividade industrial são fatores centrais na dinâmica dessas emissões, influenciando diretamente o desempenho ambiental do país. Somado a isso, o crescimento populacional e o aquecimento global impõem desafios significativos à formulação de políticas públicas (World Bank, 2023).

A expansão das cidades e o aumento da densidade populacional, frequentemente associados ao desenvolvimento econômico, intensificam a necessidade de estratégias governamentais para mitigar impactos ambientais negativos (Hilber; Palmer, 2014). Historicamente, tais processos ocorrem em paralelo ao desenvolvimento econômico e ao aumento da renda, bem como ao surgimento de danos ambientais — um efeito colateral importante da vida urbana para o meio ambiente (citação). Compreender como essas variáveis afetam as emissões é fundamental para subsidiar políticas públicas voltadas à mitigação das mudanças climáticas e à promoção do desenvolvimento sustentável (Oliveira *et al.*, 2022; Seto *et al.*, 2023).

A indústria brasileira utiliza uma diversidade de fontes energéticas para sustentar suas operações. A eletricidade destaca-se como a principal e mais utilizada, sendo empregada no funcionamento de equipamentos, sistemas de iluminação e controle, podendo ser adquirida de concessionárias ou gerada internamente para consumo próprio. Além disso, o setor industrial faz uso significativo de combustíveis fósseis, como gás natural e carvão, que são essenciais para fornecer energia térmica em processos de aquecimento e geração de vapor (EPE, 2023).

O aumento das emissões de CO₂ está diretamente ligado ao consumo de energia da população mundial. Segundo Goldemberg e Lucon (2007), após a Revolução Industrial, foi preciso usar mais carvão, petróleo e gás, fontes de energia com alto custo tanto de produção quanto de transporte. Além disso, os padrões atuais de produção e consumo de energia ainda são vindos de fontes fósseis, ou seja, resulta em uma considerável emissão de poluentes e gases de efeito estufa, o que poderá pôr em risco o suprimento no longo prazo do planeta (International Energy Agency, 2023).

Nos últimos anos, observa-se um aumento significativo no interesse pela integração de fontes renováveis à matriz energética do setor industrial brasileiro, como energia solar, eólica e biomassa. Essa tendência busca reduzir as emissões de carbono e promover maior sustentabilidade, especialmente na indústria química. A questão das emissões de gases poluentes tornou-se central no debate sobre o consumo energético industrial, já que o setor ocupa a segunda posição entre os maiores emissores de CO₂ por consumo de energia, ficando atrás apenas do setor de transportes (EPE, 2023).

A compreensão dos fatores que influenciam as emissões de GEE é fundamental para o enfrentamento dos desafios ambientais do século XXI, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil. O crescimento populacional, a expansão urbana, o consumo de energia e o desempenho da atividade industrial são elementos centrais na dinâmica dessas emissões, exigindo a formulação de políticas públicas eficazes para mitigar impactos negativos e promover o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, este estudo pretende responder a seguinte questão: Como o consumo de energia per capita e o desempenho da atividade industrial impactam as emissões de gases de efeito estufa per capita no Brasil no período de 1990 a 2023?

O período de 1990 a 2023 foi escolhido para analisar o impacto do consumo de energia *per capita* e da atividade industrial sobre as emissões de gases de efeito estufa no Brasil, pois marca o início dos registros sistemáticos após a Convenção-Quadro da ONU sobre Mudança do Clima. Esse intervalo inclui momentos relevantes da economia e matriz energética brasileira, avanços regulatórios e adoção de fontes renováveis. Além disso, 2023 representa o limite mais recente dos dados disponíveis, refletindo impactos atuais como a pandemia da COVID-19. O recorte está alinhado às práticas científicas para garantir análises robustas e relevantes.

O objetivo central busca analisar os principais determinantes das emissões de gases de efeito estufa per capita no Brasil entre 1990 e 2023, com ênfase no papel do consumo de energia e da atividade industrial, utilizando abordagem econométrica para estimar o impacto dessas variáveis e discutir suas implicações para políticas públicas voltadas à transição energética e ao desenvolvimento sustentável. Mais especificamente o estudo almeja estimar as elasticidades das emissões de gases de efeito estufa per capita em relação ao consumo de energia per capita e ao índice real do PIB industrial no Brasil entre 1990 e 2023, utilizando modelo econométrico de mínimos quadrados ordinários (MQO) com especificação *log-log*; (i) aplicar testes estatísticos de diagnóstico (autocorrelação, heterocedasticidade e multicolinearidade) e realizar correções metodológicas para garantir a robustez dos resultados obtidos; (ii) discutir as implicações dos

resultados para políticas públicas voltadas à transição energética, à ampliação de fontes renováveis e à promoção da eficiência industrial no Brasil.

REFERENCIAL TEÓRICO

O presente referencial teórico busca fundamentar a análise sobre as emissões de gases de efeito estufa per capita no Brasil, abordando aspectos essenciais da literatura nacional e internacional. Inicialmente, discute-se o conceito e as dimensões da transição energética, destacando sua relevância no contexto brasileiro frente aos desafios de crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. Em seguida, são explorados os principais determinantes das emissões de GEE, como o consumo de energia, o desempenho industrial e fatores socioeconômicos, evidenciando a complexidade das interações entre desenvolvimento e meio ambiente. Por fim, são apresentados diretrizes e experiências de políticas públicas voltadas à mitigação das emissões, especialmente aquelas relacionadas à eficiência energética, diversificação da matriz energética e integração setorial, elementos considerados estratégicos para orientar a transição rumo a uma economia de baixo carbono e promover o desenvolvimento sustentável no país.

Teoria da Transição Energética

O conceito de transição energética refere-se ao processo de transformação estrutural dos sistemas de produção, distribuição e consumo de energia, caracterizado pela substituição progressiva de fontes fósseis por alternativas renováveis e de menor impacto ambiental (IEA, 2020; Goldemberg; Lucon, 2007). Essa mudança é impulsionada tanto por avanços tecnológicos quanto por pressões regulatórias e sociais, visando a redução das emissões de gases de efeito estufa, a diversificação da matriz energética e o fortalecimento da segurança no suprimento (EPE, 2023; Sovacool, 2016).

Segundo Geels (2011), a teoria da transição energética pode ser compreendida como um processo multidimensional e multiescalar de mudanças sociotécnicas, envolvendo não apenas a substituição de tecnologias, mas também transformações em políticas, mercados, padrões culturais e estruturas institucionais. Destaca-se que as transições energéticas ocorrem por meio de interações entre nichos de inovação, regimes estabelecidos e paisagens socioeconômicas, sendo impulsionadas por pressões externas e internas que reconfiguram o sistema energético em

direção a soluções mais sustentáveis.

No contexto brasileiro, a transição energética ganha relevância diante da necessidade de compatibilizar o crescimento econômico e industrial com o compromisso de mitigar impactos ambientais, promovendo a ampliação do uso de fontes limpas, como a hídrica, eólica, solar e biomassa, e estimulando inovações voltadas à eficiência energética e à descarbonização dos processos produtivos (Observatório do Clima, 2023; EPE, 2023; Goldenberg; Lucon, 2007). Dessa forma, compreender os fundamentos e desafios inerentes à transição energética é fundamental para subsidiar a formulação de políticas públicas eficazes e orientar estratégias empresariais compatíveis com os objetivos de desenvolvimento sustentável (Sovacool, 2016; EPE, 2023).

Determinantes das Emissões de GEE

Diversos fatores influenciam as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil e em outros países em desenvolvimento. Entre os principais, destacam-se o crescimento populacional, o consumo de energia e o desempenho da atividade industrial. Estudos internacionais e nacionais apontam que o aumento da população eleva a demanda por energia, transporte, alimentos e infraestrutura, contribuindo diretamente para o acréscimo das emissões de GEE. Segundo pesquisas recentes, o crescimento populacional está associado ao aumento do consumo de recursos naturais e à expansão urbana, intensificando a pressão sobre sistemas energéticos e industriais (Observatório do Clima, 2023; EPE, 2023; Geels, 2011).

O consumo de energia permanece como um dos principais fatores associados às emissões de GEE, especialmente devido à predominância de fontes fósseis na matriz energética global (IEA, 2023; Observatório do Clima, 2023). Mesmo no Brasil, onde há significativa presença de fontes renováveis, o uso de petróleo e seus derivados ainda responde por uma parcela relevante das emissões totais (EPE, 2023). Pesquisas recentes indicam que o consumo de energia per capita tende a crescer em paralelo ao desenvolvimento econômico, o que contribui para o aumento das emissões de GEE, mesmo em cenários de transição energética e expansão de fontes limpas (IEA, 2023; Observatório do Clima 2023; EPE, 2023).

A atividade industrial desempenha um papel fundamental na dinâmica das emissões de gases de efeito estufa, especialmente em setores de alta intensidade energética, como a indústria metalúrgica, de cimento e de produtos químicos. Esses segmentos contribuem expressivamente

para o aumento das emissões, tanto pelo elevado consumo de energia quanto pelas características específicas de seus processos produtivos (Zhang *et al.*, 2017; Crippa *et al.*, 2021).

Estudos apontam que a elevação do valor adicionado industrial está associada ao crescimento das emissões, ressaltando que avanços em eficiência energética e inovação tecnológica são essenciais para mitigar tais impactos (IEA, 2021; Sorrel, 2015). Abordagens econométricas, como as propostas por Stern (2010) e Wang *et al.* (2019), reforçam a relação significativa entre consumo de energia, desempenho industrial e emissões per capita, evidenciando a importância de políticas integradas para a redução das emissões no contexto nacional.

Além desses elementos, fatores socioeconômicos, como nível de renda *per capita*, desigualdade social e práticas sustentáveis implementadas localmente, influenciam a eficiência ambiental e as emissões regionais (York *et al.*, 2003; Fan *et al.*, 2006). Portanto, a implementação de políticas públicas voltadas à transição energética, expansão de fontes renováveis e estímulo à eficiência industrial é considerada estratégica para enfrentar os desafios decorrentes do crescimento populacional e do desenvolvimento econômico, promovendo a diminuição das emissões de GEE e favorecendo um caminho sustentável para o Brasil (Raupach *et al.*, 2007; IEA, 2021).

Políticas Públicas para Mitigação das Emissões

A eficiência energética é reconhecida como um elemento-chave para a mitigação das emissões de GEE, especialmente nos segmentos industriais com elevado consumo energético. De acordo com os estudos elaborados por Patterson (1996) e Lomas *et al.* (2012), políticas públicas de eficiência energética podem envolver o estabelecimento de padrões mínimos de desempenho, incentivos tributários para adoção de tecnologias avançadas, linhas de financiamento direcionadas e programas de rotulagem energética. Essas medidas favorecem a redução do consumo energético por unidade produzida, diminuem os custos operacionais e as emissões, além de promover maior competitividade no setor industrial.

A diversificação da matriz energética é vital para assegurar a robustez do sistema e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Segundo as pesquisas de autores com Jacobson, Delucchi (2011) e Sovacool (2009), políticas públicas bem estruturadas nesse campo incluem o planejamento integrado de recursos, suporte a iniciativas de pesquisa e desenvolvimento em

tecnologias emergentes, e criação de instrumentos de mercado que incentivem fontes de energia mais sustentáveis. O aumento da participação de alternativas como hidrelétrica, eólica, solar e biomassa fortalece a segurança do suprimento energético e contribui para o alcance das metas de redução de emissões.

Ainda no contexto dos esforços para reduzir as emissões de GEE e fomentar o desenvolvimento sustentável, destaca-se a importância de articular e integrar políticas públicas entre os setores de energia, indústria e meio ambiente. Essa abordagem sinérgica permite otimizar resultados, potencializar ganhos em eficiência e garantir que as ações de mitigação sejam mais abrangentes e efetivas. Conforme apontam Meadowcroft (2011), Kern e Howlett (2009), a coordenação entre diferentes áreas governamentais é fundamental para superar desafios setoriais, evitar sobreposições e promover soluções inovadoras que alavanquem o progresso rumo a uma economia de baixo carbono.

Expandir programas de eficiência energética nos setores intensivos, com metas e incentivos à inovação tecnológica (Sorrell *et al.*, 2004). Estimular a diversificação e descentralização da matriz com fontes renováveis (Hvelplund, 2006; Lund, 2007). Ampliar incentivos financeiros e regulatórios para pesquisa e tecnologias limpas (Johnstone *et al.*, 2010). Reforçar a regulação ambiental com monitoramento, transparência e participação social (Fiorino *et al.*, 2006). Integrar políticas de energia, indústria e meio ambiente para otimizar resultados em redução de emissões e desenvolvimento sustentável (Meadowcroft, 2011; Kern; Howlett, 2009).

Expandir programas de eficiência energética no setor industrial com metas e incentivos; diversificar a matriz energética incluindo fontes renováveis e descentralização; ampliar incentivos financeiros e regulatórios para tecnologias limpas; reforçar a regulação ambiental com monitoramento, transparência e participação social; e integrar políticas de energia, indústria e meio ambiente para otimizar resultados na mitigação das emissões e desenvolvimento sustentável. Conforme os autores mencionados anteriormente, essas ações em conjunto, visam alinhar o crescimento econômico brasileiro à redução das emissões de GEE, promovendo uma transição energética eficiente e sustentável.

MÉTODO

Este estudo emprega uma abordagem quantitativa, baseada em técnicas de econometria, para analisar os determinantes das emissões de gases de efeito estufa (GEE) *per capita* no Brasil

entre 1990 e 2023. Para investigar a relação entre as emissões de gases de efeito estufa (GEE), o consumo de energia e a atividade industrial no Brasil, foi estimado um modelo de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) com uma especificação log-log. Esta forma funcional permite que os coeficientes estimados sejam interpretados diretamente como elasticidades. O modelo estimado para o período de 1990 a 2023 descrito pela Equação 1.

$$\ln(Gee_{pc_t}) = B_0 + B_1 \cdot \ln(Consumo_energia_{pc_t}) + B_2 \cdot \ln(PIB_{Indust_t}) + \varepsilon_t \quad (1)$$

onde

$\ln(Gee_{pc_t})$ é o logaritmo das emissões de GEE per capita no ano t ; $\ln(Consumo_energia_{pc_t})$ é o logaritmo do consumo de energia per capita no ano t ; $\ln(PIB_{Indust_t})$ é o logaritmo do índice real do PIB industrial no ano t ; e ε_t é o termo de erro estocástico.

Foram utilizados dados anuais para o Brasil, cobrindo o período de 1990 a 2023. As informações sobre emissões de GEE per capita e consumo de energia per capita foram obtidas junto ao Banco Mundial (*World Bank*), enquanto os dados referentes ao índice real do PIB industrial foram extraídos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). A escolha dessas fontes se deve à sua credibilidade, abrangência e disponibilidade de séries históricas consistentes para o período analisado.

Todas as análises econométricas foram realizadas no *software EViews*, sob a licença especial temporária para estudante, amplamente utilizado em pesquisas acadêmicas para estimação de modelos de séries temporais, testes de diagnóstico e aplicação de correções robustas. O *EViews* permite a execução de testes estatísticos, estimação de modelos com correção para autocorrelação e heterocedasticidade, além de facilitar a análise gráfica dos resíduos e dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise da Regressão (MQO)

A estimação inicial por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), apresentada na Tabela 1, teve como variável dependente o logaritmo das emissões de CO₂ da agropecuária brasileira no

período de 1990 a 2023. As variáveis explicativas, ambas em logaritmos, correspondem ao valor adicionado do setor agropecuário e ao nível de emprego na agricultura. Os coeficientes estimados para as duas variáveis independentes apresentaram sinais positivos e elevada significância estatística ($p < 0,01$), indicando que o crescimento econômico do setor e a expansão do emprego agrícola estão associados ao aumento das emissões agropecuárias.

Tabela 1. Estimação inicial

Dependent Variable:	LOG(EMISSOES_CO2_AGR)			
Method:	Least Squares			
Date:	10/06/25 Time 17:18			
Sample:	1990 2023			
Included observations:	34			
Variable	Coefficient	Std.Error	T-Statistic	Prob
C	-6.411686	0.892537	-7.183661	0.0000
LOG(VALOR_ADICIONADO_AGRO)	1.364500	0.209663	6.508055	0.0000
LOG(EMPREGO_AGRICULTURA)	0.495567	0.030906	16.03468	0.0000
R-squared	0.920513	Mean dependente var		1.704666
Adjusted R-squared	0.915385	S.D dependente var		0.098745
S.E. of regression	0.028723	Akaike info criterion		-4.178106
Sum squared resid	0.025576	Schwarz criterion		-4.043427
Log likelihood	74.02780	Hannan-Quinn criter		-4.132177
F-statistic	179.5007	Dubin-Watson stat		0.548699
Prob(F-statistic)	0.000000			

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A análise dos resíduos da regressão evidenciou um problema substantivo de autocorrelação serial. A estatística Durbin–Watson observada ($DW = 0,5487$) encontra-se muito distante do valor esperado próximo de 2, indicando forte autocorrelação positiva de primeira ordem. Essa violação da hipótese de independência dos erros estatísticos compromete a validade dos erros-padrão e das estatísticas t, tornando necessária a adoção de procedimentos robustos para garantir a consistência inferencial do modelo.

Diagnóstico de Multicolinearidade

Na tabela 2 a multicolinearidade foi examinada por meio dos Fatores de Inflação da Variância (VIF). Os VIF centrados foram iguais a 1,045 para ambas as variáveis independentes, valores extremamente baixos e próximos ao ideal (1). Esses resultados confirmam que não há

correlação linear preocupante entre os regressores, garantindo que os coeficientes estimados não sofrem distorções provocadas por dependência linear excessiva entre as variáveis explicativas. Dessa forma, a interpretação econômica dos coeficientes permanece válida e confiável.

Tabela 2. VIF

Variance Inflation Factors			
Date: 10/06/25 Time 17:06			
Sample: 1990 2023			
Included observations: 34			
Variable	Coefficient Variance	Uncentered VIF	Centered VIF
C	0.796623	32828.99	NA
LOG(CONSUMO_EN)	0.043959	34209.65	1.045975
LOG(PIB_INDUS)	0.000955	767.5787	1.045975

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Teste de Heterocedasticidade

Para avaliar a presença de heterocedasticidade, foi aplicado o teste de White. Os resultados indicaram que não há evidências estatísticas de variância não constante nos resíduos do modelo. As estatísticas $\text{Prob}(F) = 0,2090$ e $\text{Prob}(\text{Obs} \cdot R^2) = 0,1955$, ambas superiores ao nível de significância de 5%, levam à não rejeição da hipótese nula de homocedasticidade. A equação auxiliar dos resíduos ao quadrado reforça essa conclusão, visto que nenhum coeficiente apresentou significância estatística e o R^2 da regressão auxiliar (0,1779) permaneceu bastante reduzido, indicando baixa capacidade explicativa da variância dos resíduos, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Teste de Heterocedasticidade

Heteroskedasticity Test: White				
Null hypothesis: Homoskedasticity				
F-statistic	1.568886	Prob. F(7,8)	0.2090	
Obs*R-squared	6.048623	Prob. Chi-Square(7)	0.1955	
Scaled explained SS	2.882558	Prob. Chi-Square(7)	0.5777	
Teste Equation				
Dependent Variable: RESID^2				
Method: Least Squares				
Date: 10/06/25 Time 17:09				
Sample: 1990 2023				
Included observations: 34				
Variable	Coefficient	Std.Error	T-Statistic	Prob
C	-0.343186	0.402634	-0.852353	0.4010
LOG(CONSUMO_ENERGIA_PC)^2	0.020483	0.022563	0.907828	0.3715
LOG(CONSUMO_ENERGIA_PC)*LOG	-0.037290	0.044523	-0.837541	0.4091
LOG(PIB_INDUS)^2	0.002044	0.005848	0.349425	0.7293
LOG(PIB_INDUS)	0.143308	0.183947	0.779073	0.4422

R-squared	0.177901	Mean dependente var	0.000752
Adjusted R-squared	0.064508	S.D dependente var	0.000818
S.E. of regression	0.000791	Akaike info criterion	-11.31207
Sum squared resid	1.81E-05	Schwarz criterion	-11.08760
Log likelihood	197.3051	Hannan-Quinn criter	-11.23552
F-statistic	1.568886	Dubin-Watson stat	1.621586
Prob(F-statistic)	0.209041		

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Assim, o único problema econométrico identificado na especificação inicial do modelo diz respeito à autocorrelação serial dos erros, ao passo que os pressupostos de homocedasticidade e ausência de multicolinearidade foram atendidos de forma satisfatória.

Resultados com Correção de Newey–West (HAC)

Dada a presença de autocorrelação positiva, procedeu-se à reestimação do modelo utilizando erros-padrão robustos de Newey–West (HAC), com banda fixa de quatro defasagens e kernel de Bartlett. Esse procedimento ajusta a matriz de variâncias e covariâncias de forma consistente na presença de autocorrelação e possíveis formas de heterocedasticidade fraca, assegurando a validade das inferências estatísticas. Demonstrado na tabela 4.

Tabela 4. Correção de Newey–West (HAC)

Dependent Variable:	LOG(EMISSOES_CO2_AGRI)			
Method:	Least Squares			
Date:	10/06/25			
Sample:	Time 17:18			
Included observations:	1990 2023			
HAC standar erros & covariance (Bartlett kernel, Newey-West fixed bandwidth = 4.0000)	34			
Variable	Coefficient	Std.Error	T-Statistic	Prob
C	-6.411686	1.667652	-3.844740	0.0006
LOG(VALOR_ADICIONADO_AGRO	1.364500	0.396985	3.437155	0.0017
LOG(EMPREGO_AGRICULTURA)	0.495567	0.041208	12.02597	0.0000
R-squared	0.920513	Mean dependente var		1.704666
Adjusted R-squared	0.915385	S.D dependente var		0.098745
S.E. of regression	0.028723	Akaike info criterion		-4.178106
Sum squared resid	0.025576	Schwarz criterion		-4.043427
Log likelihood	74.02780	Hannan-Quinn criter		-4.132177
F-statistic	179.5007	Dubin-Watson stat		0.548699
Prob(F-statistic)	0.000000	Wald F-statistic		104.2241
Prob(Wald F-statistic)	0.000000			

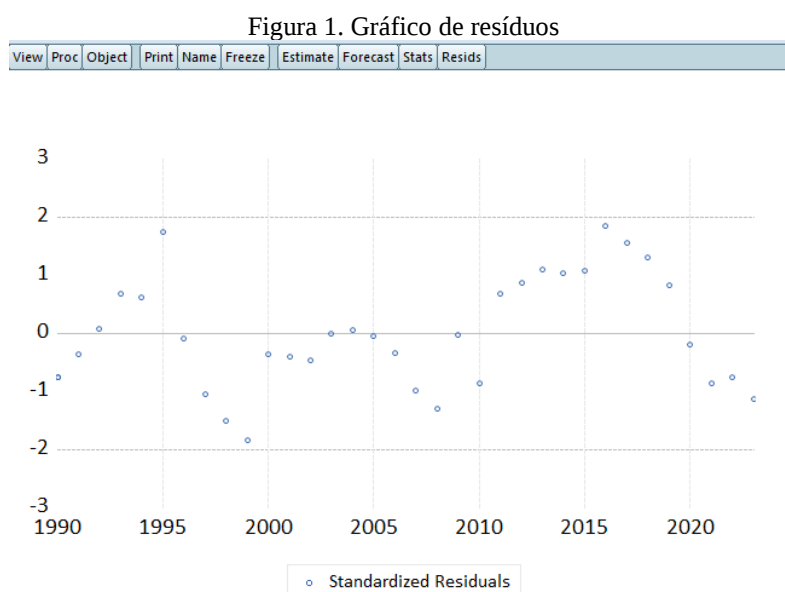
Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A elasticidade das emissões em relação ao consumo de energia *per capita* foi de 1.36, isso significa que um aumento de 1% no consumo de energia está associado a um aumento de 1,36% nas emissões de GEE, um efeito elástico e estatisticamente significativo ($p\text{-valor} = 0.0017$). A elasticidade em relação ao índice do PIB industrial é de 0.50. Isso indica que um aumento de 1% na produção industrial está associado a um aumento de 0,50% nas emissões, um efeito inelástico, porém também altamente significativo ($p\text{-valor} = 0.0000$).

Dessa forma, o modelo final estimado com correção HAC representa a especificação mais apropriada, do ponto de vista econométrico, para explicar as emissões agropecuárias no Brasil no período analisado.

Análise Gráfica dos Resíduos

A análise gráfica dos resíduos padronizados ao longo do tempo revela um padrão claramente não aleatório, reforçando o diagnóstico de autocorrelação previamente identificado pela estatística Durbin–Watson. Observa-se que, em diferentes períodos, os resíduos apresentam movimentos persistentes acima ou abaixo da linha zero, caracterizando *clusters* temporais que violam a hipótese de independência serial. Entre 1990 e 1995, por exemplo, os resíduos permanecem majoritariamente positivos, enquanto no intervalo de aproximadamente 1997 a 2005 predominam valores negativos. A partir de 2010, observa-se novamente um ciclo de resíduos positivos, seguido por nova reversão após 2018.



Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Assim, o gráfico dos resíduos padronizados confirma visualmente o problema de autocorrelação positiva diagnosticado estatisticamente pelo teste de Durbin–Watson ($DW = 0,5487$), justificando plenamente a adoção do método de correção HAC (Newey–West) na reestimação do modelo, de forma a garantir robustez nas inferências e consistência dos erros-padrão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados evidenciam que o consumo de energia *per capita* exerce impacto mais que proporcional sobre as emissões de GEE, refletindo a dependência de fontes fósseis na matriz energética brasileira. A atividade industrial, embora relevante, apresenta impacto menos que proporcional, sugerindo ganhos de eficiência ou transição para setores menos intensivos em carbono. Tais achados corroboram estudos anteriores sobre o papel da energia e da indústria nas emissões nacionais.

A literatura destaca a importância de políticas públicas voltadas à transição energética, ampliação de fontes renováveis e promoção da eficiência industrial. O Brasil, apesar de avanços, ainda enfrenta desafios para alinhar crescimento econômico e redução de emissões, especialmente diante do aumento do consumo energético per capita.

O estudo confirma que o consumo de energia e a atividade industrial são determinantes relevantes das emissões de GEE per capita no Brasil. Políticas que promovam a diversificação da matriz energética e a eficiência industrial são essenciais para a mitigação das emissões e o desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

BANCO MUNDIAL. **World Development Report 2023: Migrants, Refugees, and Societies**. Washington, DC: Banco Mundial, 2023. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2023>. Acesso em: 24 nov. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2032**. Caderno de Demanda de Eletricidade. Superintendência de Estudos Econômicos e Energéticos. EPE – Empresa de Pesquisa Energética, outubro de 2022. Disponível em: Acesso em: 30 de junho de 2023.

CRIPPA, M. *et al.* **CO₂ and Greenhouse Gas Emissions**. Our World in Data, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>. Acesso em: 14 nov. 2025.
EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2023**.

- EPE. Estudos Socioambientais: **Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/meio-ambiente/emissoes-de-gases-de-efeito-estufa>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- FAN, Y.; LIU, L.-C.; WU, G.; WEI, Y.-M. **Analysis of Energy Efficiency of China's Industry Sector**. *Energy*, v. 31, n. 12, p. 2220-2232, 2006.
- FIORINO, D. J. Environmental Governance and Democratic Legitimacy. **Public Administration Review**, v. 66, n. 3, p. 294-304, 2006.
- GEELS, F. W. **The multi-level perspective on sustainability transitions**: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 1, n. 1, p. 24-40, 2011.
- GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia e meio ambiente no Brasil**. *Estudos avançados*, v. 21, p. 7-20, 2007.
- HILBER, C. A. L.; PALMER, C. **Urban Development and Air Pollution**: Evidence from a Global Panel of Cities. *SSRN Electronic Journal*, n. 175, 2014.
- HVELPLUND, F. **Renewable energy and the need for local energy markets**. *Energy Policy*, v. 34, n. 12, p. 1197-1206, 2006.
- IEA-INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2020**. Paris: IEA 2020.
- IEA-INTERNATIONAL ENERGY AGENCY . **World Energy Outlook 2021**. Paris: IEA, 2021.
- IEA-INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023.
- IPEA. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- IPCC. Climate Change 2022: **Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- JACOBSON, M. Z.; DELUCCHI, M. A. **Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I**: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, v. 39, n. 3, p. 1154-1169, 2011.
- JOHNSTONE, N.; HAŠČIČ, I.; POPP, D. **Renewable energy policies and technological innovation**: Evidence based on patent counts. *Environmental and Resource Economics*, v. 45, n. 1, p. 133-155, 2010.
- KERN, F.; HOWLETT, M. **Implementing transition management as policy reforms**: A case study of the Dutch energy sector. *Policy Sciences*, v. 42, n. 4, p. 323-343, 2009.

LEMOS, M. C.; AGRAWAL, A. **Environmental governance**. Annual Review of Environment and Resources, v. 31, p. 297-325, 2006.

LOMAS, K. J.; *et al.* **The impact of retrofitting homes with energy efficiency measures on air quality and energy use: A case study**. Energy and Buildings, v. 50, p. 170-181, 2012.

LUND, H. **Renewable energy strategies for sustainable development**. Energy, v. 32, n. 6, p. 912-919, 2007.

MEADOWCROFT, J. **Engaging with the politics of sustainability transitions**. Environmental Innovation and Societal Transitions, v. 1, n. 1, p. 70-75, 2011.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

OLIVEIRA, A. P.; *et al.* **Compreendendo os determinantes das emissões de gases de efeito estufa: implicações para políticas públicas**. Revista Brasileira de Políticas Ambientais, v. 17, n. 2, p. 123-145, 2022.

PATTERSON, M. G. **What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues**. Energy Policy, v. 24, n. 5, p. 377-390, 1996.

RAUPACH, M. R. *et al.* **Global and Regional Drivers of Accelerating CO2 Emissions**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 104, n. 24, p. 10288-10293, 2007.

SCIELO BRASIL. **Emissões de gases de efeito estufa e eficiência ambiental no Brasil**. Nova Economia, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/neco/a/r5yxTNfpKqCtgBNxKwKFCDF/?format=html>. Acesso em: 10 nov. 2025.

SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

SETO, K. C.; *et al.* **Urbanização, emissões de carbono e sustentabilidade global**. Environmental Research Letters, v. 18, n. 4, p. 045001, 2023.

SORRELL, S.; *et al.* **The economics of energy efficiency: Barriers to cost-effective investment**. Cheltenham: Edward Elgar, 2004.

SORRELL, S. **Reducing Energy Demand: A Review of Issues, Challenges and Approaches**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 47, p. 74-82, 2015.

SOVACOO, B. K. **The importance of comprehensiveness in renewable electricity and energy-efficiency policy**. Energy Policy, v. 37, n. 4, p. 1529-1541, 2009.

SOVACOO, B. K. **How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions**. Energy Research & Social Science, 13, 202-215, 2016.

STERN, D. I. **Modeling International Trends in Energy Efficiency and Carbon Emissions.** Environmental Economics and Policy Studies, v. 12, n. 1, p. 35-54, 2010.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Emissions Gap Report 2023.** Nairobi: United Nations Environment Programme, 2023.

WANG, Q.; SU, M.; LI, R.; PENG, M. **The Effects of Urbanization and Industrialization on Decoupling Economic Growth from Carbon Emissions.** A Case Study of China. Sustainability, v. 11, n. 3, p. 692, 2019.

YORK, R.; ROSA, E. A.; DIETZ, T. STIRPAT. **IPAT and ImPACT:** Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts. Ecological Economics, v. 46, n. 3, p. 351-365, 2003.

ZHANG, Y.; WANG, C.; WANG, F.; SU, B. **Decomposition of Energy-Related Carbon Emissions in China:** An Empirical Analysis Based on Provincial Panel Data. Journal of Cleaner Production, v. 142, p. 755-764, 2017.