

Complexidade econômica nos municípios brasileiros: efeitos sobre as emissões de gases do efeito estufa

Vitor da Silva Marinho*

Christina Rosa Ferreira†

Resumo: Este artigo avalia a relação entre complexidade econômica e emissões de gases de efeito estufa nos municípios brasileiros no período de 2010 a 2019. Os resultados encontrados demonstram que existe uma correlação negativa entre os níveis de emissões e a complexidade dos municípios empregando uma análise de dados em painel. O artigo contribui com uma ampla gama de evidências dessa correlação e inova ao demonstrar tal relação em nível subnacional.

Palavras-chave: Complexidade econômica, Emissões de gases, Municípios brasileiros

Área temática: Economia

*Doutorando em economia – Cedeplar – UFMG - vitormarinho@cedeplar.ufmg.br

†Doutoranda em economia – Cedeplar – UFMG - crf2022@cedeplar.ufmg.br

1 Introdução

A industrialização tem causado um aumento significativo nos níveis de aquecimento global, que aumentou as emissões de gases do efeito estufa. Esse fenômeno tem gerado debates em diversas áreas da ciência, inclusive na economia. Para controlar efetivamente o aquecimento global, é importante entender como essas emissões estão associadas a produtos, métodos produtivos e tecnologias específicas. Essas variáveis estão intimamente relacionadas com a complexidade econômica dos países, que têm recebido cada vez mais atenção da comunidade científica, especialmente por ser um forte indicador do crescimento econômico. (HIDALGO; HAUSMANN, 2009; ROMERO; GRAMKOW, 2021).

Segundo o relatório "Inclusive Green Growth" do Banco Mundial (2012), políticas climáticas ambiciosas são necessárias para conciliar crescimento econômico com proteção ambiental. No entanto, essas políticas têm impacto direto em indicadores como PIB, empregos e produção, estudo dos efeitos no Brasil para buscar conciliar redução de emissões de gases de efeito estufa, crescimento econômico e melhoria do mercado de trabalho.

De acordo com o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), há evidências empíricas que mostram que as Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) são diretamente influenciados pela matriz econômica. Diante disso, é visível um consenso na literatura de que uma maior complexidade econômica gera desdobramentos positivos sobre indicadores ambientais. No entanto, as conclusões são desconstruídas quando se avalia especificamente a relação com as emissões de gases de efeito estufa. (IPCC, 2021).

A literatura fornece inúmeras evidências da relação entre a complexidade econômica e a emissão de GEE. Trabalhos como o de Hidalgo et al. (2007) e Hausmann, Hwang e Rodrik (2007), que exploraram a complexidade econômica de países e regiões. Hausmann e Hidalgo (2014), Mariani et al. (2015) e Gao e Zhou (2018) mostraram como a estrutura da rede de produção e o tipo de atividades econômicas condicionam o crescimento econômico e futura diversificação das economias. Trabalhos como Gozgor e Can (2016), Doğan, Saboori e Can (2019), Neagu (2020), Chu (2021) e Romero e Gramkow (2021) analisaram a conexão entre complexidade econômica e sustentabilidade ambiental.

O presente trabalho tem como objetivo analisar o impacto da mudança estrutural na intensidade de emissão de GEE através das mudanças na complexidade econômica nas mesorregiões brasileiras durante o período de 2010 a 2020. De acordo com (ROVERE et al., 2013), o consumo de energia

se tornou a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa no Brasil após 2020, assim como já ocorre em países desenvolvidos.

Para lidar com essa situação, é necessário implementar políticas climáticas mais amplas e ambiciosas que orientem o desenvolvimento do país em uma trajetória de baixo carbono. No entanto, essas políticas têm um impacto direto na economia do país, afetando indicadores como o crescimento do PIB, geração e perda de empregos, taxa de desemprego, dívida pública e produção setorial. Com base nisso, procura-se responder a seguinte questão: Como os níveis de complexidade econômica afetaram as emissões GEE, entre o período de 2000 a 2020, nos municípios brasileiros.

Diante do que já foi realizado, o presente estudo contribui para a literatura sobre complexidade econômica e emissões de GEE, uma vez que analisa essas questões nos municípios brasileiros. Além disso, acredita-se que os resultados obtidos podem auxiliar na formulação de políticas públicas para promover a sustentabilidade social e ambiental e abordar questões climáticas relevantes.

Este trabalho está organizado em cinco partes, além desta introdução. Na segunda, será apresentado um levantamento das principais literaturas relacionadas à complexidade econômica e emissão de GEE. A terceira parte descreve a metodologia adotada para cálculo de complexidade e econometria. Na quarta parte, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, as considerações finais.

2 Referencial Teórico

A temática das mudanças climáticas é um dos temas mais relevantes na agenda científica mundial no século XXI. O fenômeno do efeito estufa, que é frequentemente discutido nessas conversas, é responsável pela manutenção da vida como a conhecemos no planeta Terra Almeida (2019). No entanto, o desequilíbrio do efeito estufa, causado pela atividade humana, tem gerado consequências para o equilíbrio dos ecossistemas e, por consequência, para a sociedade humana. Esse contraste tem origem no aumento da concentração de gases estufa na atmosfera, que é continuamente produzido em grandes quantidades por certas atividades humanas. Como resultado, a temperatura terrestre aumentou significativamente, o que é conhecido como aquecimento global. (IPCC, 2007)

Os relatórios recentes do (IPCC, 2021) apontam evidências empíricas de que o aquecimento global é uma consequência direta da matriz econômica atual. Essa tendência tem sido marcada por um aumento significativo e constante da temperatura mundial, especialmente após a industrialização. Esse aquecimento tem gerado diversos riscos, incluindo secas, aumento do nível do mar, impacto na

biodiversidade e problemas de saúde humana. O relatório destaca a urgente necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e frear o processo de aquecimento a 1,5 graus até 2030, para que seja possível manter uma trajetória sustentável a longo prazo. Além disso, o relatório enfatiza que um resultado sustentável está diretamente relacionado ao equilíbrio entre o bem-estar social e a proteção ambiental.

No Brasil a autoridade monetária alerta para os riscos ambientais e afirmar sua posição enquanto regulador do sistema financeiro de catalisar recursos para setores estratégicos na transição para economia de baixo carbono que podem ser benéficos ao desenvolvimento socioeconômico do Brasil. Afirmado sua posição junto a outras entidades internacionais no denominado Network for Greening the Financial System (2022). Um esforço coordenado dos bancos centrais de diversos países em promover uma mudança estável do ponto de vista financeiro para economia de baixo carbono.

O conceito de "janelas verdes de oportunidade" proposto por Lema, Fu e Rabellotti (2020) destaca o papel das instituições como catalisadoras do desenvolvimento sustentável, especialmente na transição para uma economia de baixo carbono. De acordo com os autores, a mudança para um novo sistema financeiro verde envolve inovações na matriz energética e produtiva mundial. Um exemplo disso é a China, que hoje é um dos players mais relevantes nesse cenário, embora isso não fosse uma realidade até poucas décadas atrás. Segundo os autores, as janelas de oportunidade no setor energético se concentram em cinco indústrias: solar, hidroelétrica, eólica, biomassas e outras fontes renováveis.

A Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe - CEPAL (2022) contribui para o debate sobre sustentabilidade com o estudo intitulado "El Big Push para la Sostenibilidad y el Trabajo de los Ingresos", que apresenta um projeto para garantir a manutenção do emprego, da renda e da segurança alimentar em um contexto de transição para uma economia sustentável e justa. Para alcançar esse objetivo, a CEPAL defende uma ampla articulação interinstitucional que possa garantir uma inversão de valores sociais e de formas de produzir. O estudo traz exemplos de casos de sucesso na transição para uma economia sustentável e realiza entrevistas para analisar qualitativamente os impactos dessa transição no emprego.

Uma mudança nas políticas internacionais de utilização de combustíveis fósseis pode resultar em significativas perdas de investimentos para os investidores neste setor, conforme Semieniuk et al. (2022). Isso ocorre devido ao processo de transição para uma economia de baixo carbono, que exige a redução significativa nos níveis atuais de utilização de insumos do petróleo. Essas mudanças podem levar a grandes perdas econômicas para diversos grupos de investidores, especialmente aqueles de

países centrais.

Ripple et al. (2017) alertam para as condições insustentáveis de uso da terra e a necessidade de combater a destruição ambiental por meio de uma conjunção de forças que envolva políticos, cientistas e influenciadores comprometidos com mudanças estruturais na sociedade. Esse apelo encontra respaldo na redução do uso de substâncias que destroem a camada de ozônio e no crescimento do setor de energias renováveis. Os autores propõem uma série de medidas viáveis para a transição a uma sociedade mais sustentável, que incluam investimentos verdes e a migração do capital produtivo para fontes de energia renovável.

A The Royal Society (2020) divulgou um atlas que reúne evidências empíricas sobre as causas das mudanças climáticas. De acordo com o relatório, a temperatura terrestre média aumentou em um grau desde 1990, conforme diversas fontes. Além disso, os níveis de CO₂ têm crescido de forma contínua desde a década de 1970, o que é atribuído à intensificação do consumo energético e da indústria, bem como às mudanças no uso da terra, incluindo o crescente processo de desmatamento.

De acordo com Lapatinas et al. (2019), a complexidade econômica tem uma relação positiva com o Índice de Desempenho Ambiental em 88 países desenvolvidos e em desenvolvimento. No entanto, os autores também encontraram evidências robustas de que a complexidade está associada a uma piora na qualidade do ar e a um aumento nas emissões de CO₂.

Em contrapartida, Romero e Gramkow (2021) sugerem que a complexidade econômica pode reduzir a intensidade das emissões de gases de efeito estufa e as emissões per capita. Os autores propuseram o Índice de Intensidade de Emissão do Produto (PEII), que mostra que produtos sofisticados tendem a reduzir as intensidades de emissão. Esse resultado contribui para a literatura ao evidenciar a relação entre complexidade econômica e emissões de gases de efeito estufa em nível de produto.

Diante da emergência climática, a transição para uma economia de baixo carbono enfrenta diversos desafios econômicos. É crucial entender como as atividades econômicas impactam os níveis ambientais para uma transição segura e sem grandes impactos no bem-estar social. Nesse sentido, este artigo propõe uma análise do impacto das atividades econômicas nas emissões de GEE em para os municípios brasileiros, por meio do cálculo do índice de complexidade das atividades econômicas. Este método, proposto por Romero e Gramkow (2021), apresenta resultados promissores na transição para uma economia de baixo carbono, uma vez que a complexidade econômica pode reduzir os níveis de GEE a nível de produto.

2.1 Estudos EC

Boleti et al. (2021) também avaliam o desempenho ambiental entre diversos países, mas inovam ao testar especificações diferentes de medidade ambientais como consumo de energia renováveis, qualidade de vida e na qualidade do ar. A partir de um modelo dados em painel contendo 88 países no período de 2002 a 2012 é testada a hipótese de que CE afeta o índice de desempenho ambiental. Seus resultados são robustos e indicam que níveis de complexidade maiores estão associados ao melhor desempenho ambiental e de qualidade de vida, no entanto elevados níveis de sofisticação produtiva tem efeito negativo sobre qualidade do ar como também o consumo de energias renováveis.

Majeed et al. (2022) por sua vez investiga como CE afeta as emissões de CO₂ nos países que compõe a OCDE durante o período 1971 a 2019. A metodologia utilizada é bastante robusta e integra modelo de correção de erros (ECM), mínimos quadrados ordinários totalmente modificados (FMOLS), e regressão quantílica de efeitos fixos (FE-QR). Os resultados são diversos primeiro a longo prazo o aumento da complexidade econômica está positivamente e significativamente associado a redução das emissões de carbono. Já a regressão quantílica revela que nos países com baixas emissões de carbono, o aumento na complexidade econômica tem um impacto mais significativo nas emissões.

()

Ahmad et al. (2021) inova ao avaliar a relação entre CE e uma medida de economia verde impactam sobre a rentabilidade das empresas no Irã. A metodologia adotada foi um modelo de dados em painel que compreende o período de 2014 a 2021 para todas as empresas listadas na bolsa, controlando para efeitos financeiros das empresas como alavancagem, fluxo de caixa e retorno. Os resultados encontrados são significativos e apontam que tanto a complexidade econômica quando o índice verde impactam positivamente na rentabilidade das empresas, sendo a complexidade em maior nível.

3 Materiais e métodos

Nesta seção descreve-se as metodologias utilizadas para avaliar o efeito da complexidade sobre os níveis de emissões municipais. Por fim, é importante ressaltar que todas as análises foram conduzidas utilizando software estatístico, R. A utilização de métodos rigorosos e a consideração cuidadosa das variáveis e controles relevantes de acordo com literatura contribuem para a validade e a robustez desta

Table 1: Revisão de Literatura

Artigo	Nível	Metodologia	Hipotese	Período	Resultados	Classe
The relationship between economic complexity and green economy with earnings management (2023)	Irã	Modelo de dados em painel (EF)	A CE e a economia verde afetam a gestão real e contábil de ganhos?	2014-2021	Existe uma relação positiva e significativa entre a complexidade econômica e a economia verde com a gestão real e contábil de ganhos.	Nacional (Bolsa de Valores)
Economic Complexity and Environmental Performance: Evidence from a World Sample (2021)	Entre Países	Modelo de dados em painel (EF, 2SLS)	CE afeta o desempenho ambiental dos países?	2002-2012	Positivo no IDA e Qualidade de vida, mas negativo na qualidade do ar e consumo de Energia renovável	Mundial
Economic complexities and environmental degradation: evidence from OECD countries	Países da OCDE	Modelo de correção de erros (ECM), mínimos quadrados ordinários totalmente modificados (FMOLS), e regressão quantílica de efeitos fixos (FE-QR)	CE afeta a emissão de CO ₂ ?; curva de Kuznets	1971-2018	Efeitos mais pronunciados da complexidade econômica nas emissões em economias com níveis baixos de emissões de carbono	Regional

pesquisa.

3.1 Complexidade econômica

Por meio do índice de vantagens comparativas reveladas de Balassa (1965) , Hidalgo et al. (2007) apresenta o conceito de espaço do produto. No qual por uma rede de conexões demonstra que produtos de maior complexidade apresentam uma densidade ou proximidade maior dentro do espaço de produção de um país, o oposto também é válido e produtos menos complexos encontram-se nas margens dessas redes. Estes produtos mais complexos por sua vez levam a taxas de crescimento desigual entre os países o motivo pelo qual alguns destes têm renda média superior aos demais. A Equação (1) apresenta como foi calculado a vantagem de exportação de um país.

Vantagem comparativa revelada (VCR):

$$VCR_{mv} = \frac{\sum_p x_{mv}}{\sum_m \sum_p x_{mv}} \quad (1)$$

Onde VCR representa a Vantagem comparativa revelada; X refere-se a quantidade de vínculos de empregos ; e m indica o município de origem; e v refere-se ao vínculo empregatício. Então, t se o VCR= 1 há alta competitividade naquele setor. A Equação (2) mostra o cálculo da diversificação e a Equação (3) apresenta o cálculo da Ubiquidade.

Diversificação:

$$k_{c,0} = \sum_p M_{cp} \quad (2)$$

Ubiquidade:

$$k_{p,0} = \sum_c M_{cp} \quad (3)$$

Hidalgo e Hausmann (2009) a partir do conceito apresentado de vantagem comparativa entre os países propõem um índice que mede a complexidade econômica produtiva. O índice é composto por dois indicadores: um de diversificação que é dado pela quantidade de produtos que o país exporta com vantagem e o de ubiquidade que por sua vez apresentam quantos países exportam determinado produto com vantagem comparativa, dessa forma quanto maior a diversificação produtiva maior a complexidade por outro lado quanto menor a ubiquidade maior o nível de sofisticação.

A partir da junção destes indicadores os autores propõe o índice de complexidade econômica que mede o nível de sofisticação produtiva de um país ou região dada a vantagem comparativa e a ubiquidade de determinado setor ou produto. Com base nestes indicadores calculou-se o nível de complexidade econômica para os municípios brasileiros a partir de dados de vínculos empregatícios coletados na RAIS para de identificar a relação entre complexidade regional e degradação ambiental.

3.2 Estimação Econométrica

O objetivo deste trabalho é analisar o impacto da mudança estrutural na intensidade de emissão de GEE e nas emissões per capita, por meio das mudanças na complexidade econômica nos municípios brasileiras durante o período de 2010 a 2019. Para que o objetivo proposto seja atendido será utilizado o método econométrico de dados em painel, que de acordo com Baltagi e Baltagi (2008), a estrutura formal para dados em painel permite a união das séries temporais com cortes transversais possibilita os dados em painel, obter um número maior de observações, de modo que os estimadores tendem a serem mais eficientes do ponto de vista estatístico. Sendo assim, é possível considerar os efeitos específicos vinculados às unidades individuais, no caso os estados. Assim, para testar o efeito da complexidade econômica na economia na intensidade de emissão, será estimado a equação (4):

$$\log GEE/Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 ICE_{it} + \beta_2 ICE_{t-1} + \beta_3 X_{it} + \theta_i + t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

Em que, GEE/Y refere-se a intensidade de emissão de GEE, ou seja, total emissões de GEE por unidade de produção; ICE representa o Índice de complexidade econômica; e X é uma matriz de variáveis de controle adicionais. As regressões são realizadas usando dados agrupados para municípios i em diferentes períodos de tempo t . O log indica que a variável está em logaritmo natural e que o modelo utilizado é log-lin, em a variável dependente é logaritmizada e a variável de interesse está nível.

Os betas são os coeficientes estimados, theta são os efeitos fixos do município, t são os efeitos fixos no tempo e ε é o termo de erro. Foi introduzido no modelo uma defasagem na variável ICE, para testar se o efeito sobre intensidade de emissão de GEE funciona com atraso.

Utilizando Romero e Gramkow (2021) como referências serão usadas as quatro variáveis de controle: (i) PIB per capita; (ii) PIB industrial; (iii) população; ; (iv) pecuária. Na Tabela 1 são apresentadas as variáveis utilizadas, a fonte da base de dados e os sinais esperados. Espera-se que a

participação do PIB per capita tenha um impacto positivo nas emissões per capita, mas exerce um impacto negativo na intensidade das emissões. Para as variáveis que representam o consumo de energia elétrica, taxa de urbanização, população e parcela da agricultura espera-se que as variáveis apresentem efeitos positivos nas emissões per capita de GEE.

Tabela 01 demonstra as variáveis, base de dados e sinal esperado para a estimação do impacto da mudança estrutural na intensidade de emissão de GEE nos municípios brasileiros durante o período de 2010 a 2020.

Table 2: Variáveis e fontes

Variáveis	Base de dados	Sinal esperado
Emissões GEE	Sistema de Estimativa de Emissões (SEEG)	
Índice de complexidade	Elaboração dos autores	-
PIB per capita	IBGE	-
PIB Industrial	IBGE	+
População	IBGE	+
Cabeças de Bovinos	IBGE	+

Fonte: Elaboração do autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos, primeiro, será mostrado os resultados referentes ao índice de complexidade econômica calculado e as emissões, posteriormente, os resultados econométricos.

Table 3: Estatísticas Descritivas

Variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
ICE	-0,027	0,997	-3,765	3,170
Gee_total	761975,8	1935715,65	-17399940,49	26293547,78
Pib	902443,2	8727855,001	-19046,434	763597807,9
Pib_pc	18,637	23,334	-1,459	815,697
Pib_ind	181626,2	1133600,377	-2897193	66893050
Pib_agro	30638,68	76503,0003	0	2217314,207
Habitantes	34519,04	183316,0535	781	12252023

A tabela 02 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis analisadas neste estudo. Ao observar os valores médios, desvios padrão, mínimos e máximos de cada variável, podemos obter uma visão abrangente do comportamento e da variabilidade dessas variáveis.

Por exemplo, a variável ICE (Índice de Complexidade Econômica) possui uma média de -0,027 e um desvio padrão de 0,997. Esses valores indicam que, em média, as economias dos municípios apresentam uma complexidade moderada, mas também há uma certa variação nas suas características econômicas. Isso significa que existem municípios com índices mais elevados e outros com índices mais baixos de complexidade econômica.

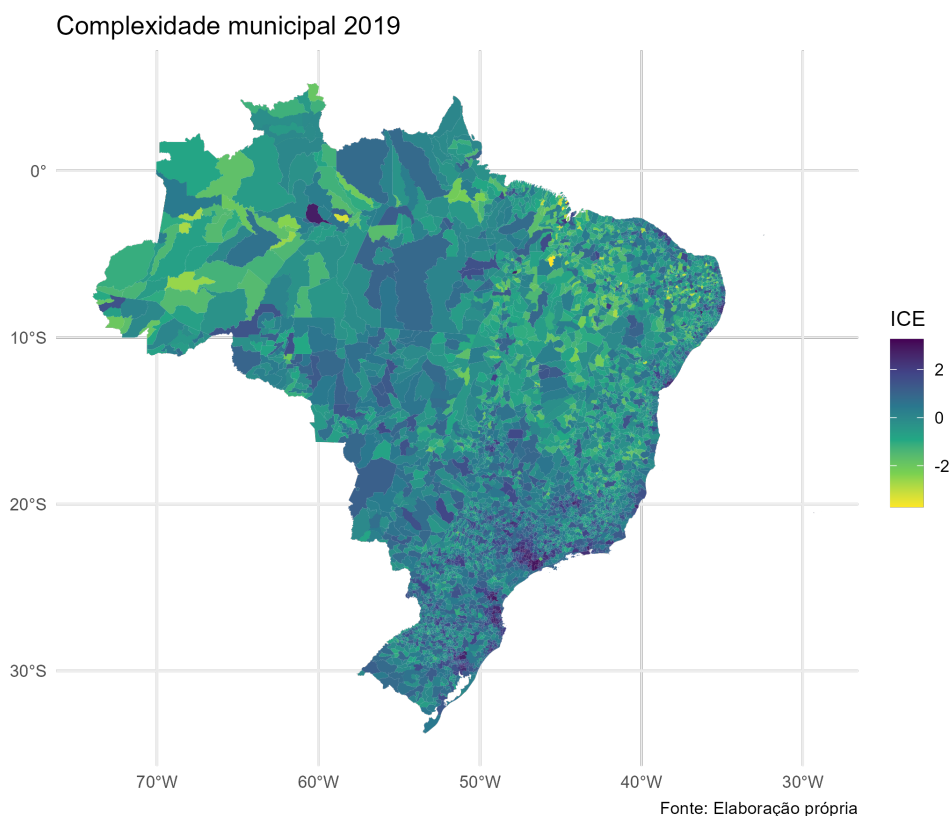
Além disso, outras variáveis como PIB per capita, PIB industrial, PIB agropecuário e Habitantes também apresentam diferentes níveis de média, desvio padrão, mínimo e máximo. Essa variação nos valores reflete a diversidade econômica e demográfica existente nos municípios estudados. Por exemplo, o PIB per capita pode variar de próximos de zero a valores muito altos, indicando a existência de municípios com níveis de desenvolvimento econômico bastante discrepantes.

Essas estatísticas descritivas fornecem um panorama inicial das características das variáveis estudadas, o que auxilia na compreensão das tendências e variabilidades presentes nos dados. Essas informações podem ser úteis para identificar padrões e relações ao realizar análises estatísticas mais aprofundadas, possibilitando uma compreensão mais completa e embasada dos fenômenos econômicos e ambientais em estudo.

4.0.1 Índice de Complexidade Econômica

Os resultados da análise da distribuição espacial do Índice de Complexidade Econômica (ICE) são apresentados na Figura 01, que mostra a complexidade dos municípios brasileiros em 2019. É possível observar uma concentração regional de maior complexidade no sudeste do Brasil e uma menor complexidade no norte e nordeste. No entanto, existem alguns casos atípicos, como Manaus, que ocupa a 23ª posição no ranking de complexidade, com um ICE de 2,78, enquanto a média do estado do Amazonas foi de -0,906. Em relação às emissões proporcionais ao PIB, Manaus também está acima da média estadual, emitindo 9,79 milhões de toneladas de GEE por unidade de PIB, enquanto a capital do estado emite apenas 0,09 milhões de toneladas. Esse caso isolado pode ser explicado pelo fato de Manaus possuir uma zona especial de comércio.

Figura 1 - Distribuição espacial da complexidade



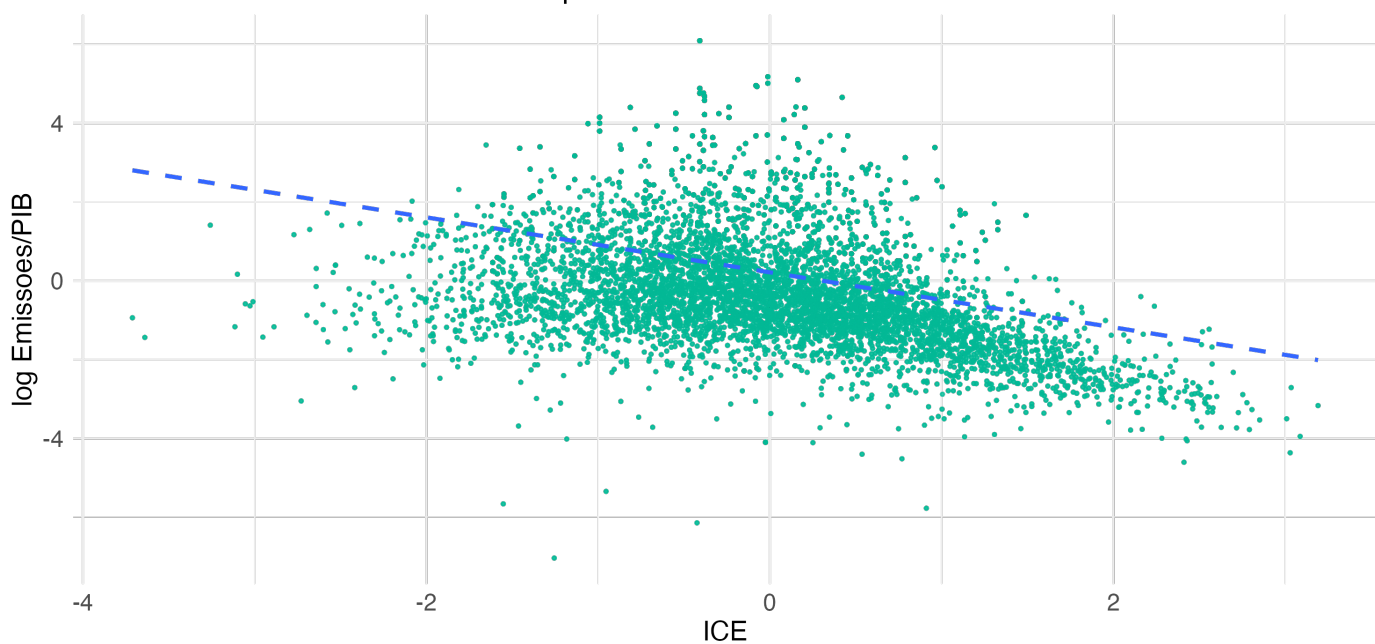
Fonte: Elaboração Própria

Por outro lado, outro caso que chama atenção em termos de taxa de emissões é o município de São Félix do Xingu, no estado do Pará, que apresenta uma taxa de emissão de 12,17%, enquanto a

média estadual é de 4,21%. Além disso, em termos de complexidade, São Félix do Xingu ocupa a 56ª posição entre os municípios do estado e a 3422ª posição entre todos os municípios brasileiros. Em comparação, Diadema, que possui uma classificação mais alta em termos de complexidade, apresenta uma taxa de emissão de 0,03, enquanto São Paulo registra 0,02. É importante ressaltar que São Félix do Xingu tem um nível de emissões de 176 milhões de toneladas, superior ao de São Paulo, que é de 154 milhões de toneladas.

A Figura 02 apresenta a correlação entre a média do índice de complexidade e a intensidade de emissões de gases de efeito estufa no período de 2010 a 2019. Assim como os resultados discutidos na seção de revisão, observa-se que a relação estabelecida na literatura para países também se mantém em nível subnacional, ou seja, uma correlação negativa entre a complexidade econômica dos municípios e o nível de emissões. Essa relação, até então não estabelecida em nível regional, demonstra que municípios mais complexos tendem a emitir uma quantidade menor de GEE em relação ao seu produto, uma vez que o índice de emissões é calculado em relação ao PIB.

Figura 02 - Correlação entre complexidade e emissões
Complexidade e GEE 2010-2019



Elaboração Própria

Fonte: Elaboração Própria

4.1 Resultados Econométricos

Os resultados obtidos nas regressões que utilizam as emissões totais como variáveis dependentes, conforme apresentados na tabela 03, oferecem insights importantes sobre a relação entre o Índice de Complexidade Econômica (ICE) e as emissões. Ao adotar o estimador de Efeitos Fixos, pudemos observar que o ICE é estatisticamente significativo e exibe um sinal negativo nas regressões relacionadas ao PIB e à população. Isso indica que um maior nível de complexidade econômica está associado a uma redução nas emissões totais de gases de efeito estufa em relação ao PIB e ao tamanho da população.

No entanto, é interessante notar que o ICE defasado - considerando um período de tempo anterior - possui um sinal positivo e é estatisticamente significativo a um nível de confiança de 1%. Esse resultado sugere que a complexidade econômica defasada exerce um efeito positivo nas emissões totais, ou seja, à medida que a complexidade aumenta ao longo do tempo, também ocorre um aumento nas emissões. Essa relação pode ser explicada pelo fato de que o crescimento da complexidade econômica geralmente está associado a uma maior atividade produtiva e a um aumento no consumo de recursos, o que pode resultar em maiores emissões de gases de efeito estufa.

É importante ressaltar que, nas regressões referentes às emissões agropecuárias, tanto o ICE quanto o ICE defasado não apresentaram significância estatística. Isso indica que a complexidade econômica não tem um impacto estatisticamente significativo nas emissões provenientes do setor agropecuário.

Em resumo, os resultados apontam para a importância da complexidade econômica na determinação das emissões totais de gases de efeito estufa. Enquanto a complexidade econômica atual mostra um efeito negativo nas emissões, a complexidade defasada exerce um efeito positivo. Essa descoberta destaca a necessidade de considerar a evolução temporal da complexidade econômica ao analisar suas relações com as emissões, a fim de obter uma compreensão mais abrangente dos fatores que influenciam as mudanças climáticas.

Já a tabela 04 apresenta os resultados obtidos considerando as emissões totais como variável dependente. Utilizando o estimador de Efeitos Fixos, observa-se que o ICE é estatisticamente significativo e possui um sinal negativo nas regressões das emissões de gases de efeito estufa, com uma significância de 1%. Os resultados ainda demonstram que o ICE é negativo tanto em nível quanto defasado, o que reforça a robustez dos efeitos da complexidade sobre as emissões totais. Esses resultados são estatisticamente significativos em todos os modelos de efeitos fixos. Ao analisar somente a

relação entre complexidade e emissões, observamos um resultado positivo. No entanto, à medida que são inseridos os controles nas regressões, o efeito se torna negativo. Além disso, a variável de complexidade com um ano de defasagem apresenta um efeito negativo e estatisticamente significativo em todos os modelos analisados. As variáveis de controle, por sua vez, apresentam sinais positivos em relação ao nível total de emissões, com exceção do PIB industrial. No modelo pooled, a complexidade não é significativa tanto em nível quanto defasada.

Table 4: Regressões emissões totais

<i>Variavel Dependente : Emissoes Totais (log)</i>						
	Pooled	EF	EF	EF	EF	FE
ice	-0.042 (0.047)	0.510*** (0.013)	0.520*** (0.012)	-0.085*** (0.010)	-0.023** (0.010)	-0.052*** (0.010)
lag(ice, 1)	0.019 (0.021)		-0.042*** (0.005)	-0.062*** (0.006)	-0.064*** (0.006)	-0.070*** (0.006)
log(pib_pc)	0.690*** (0.132)			0.633*** (0.026)	1.110*** (0.023)	0.958*** (0.021)
log(habitantes)	0.737*** (0.071)			0.582*** (0.007)	0.925*** (0.017)	0.849*** (0.015)
log(pib_ind)	-0.189*** (0.051)				-0.303*** (0.012)	-0.270*** (0.010)
log(bovinos)	0.195*** (0.039)					0.186*** (0.003)
Constant	2.581*** (0.733)					

Note:

*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Os resultados ainda indicam que a variável de interesse é negativa tanto em nível quanto defasada, o que apresentam robustez dos efeitos que a complexidade tem sobre as emissões totais. Os resultados da complexidade são estaticamente significativos em todos os modelos de efeitos fixos, quando se regride apenas a complexidade contra as emissões seu resultado é positivo, mas à medida que são inseridos os controles o efeito passa a ser negativo. Por outro lado, a variável de complexidade com lag temporal de um ano tem um efeito negativo e estatisticamente significativo para todos os modelos.

Table 5: Regressões emissões sobre PIB

<i>Variavel Dependente : Emissoes/PIB (log)</i>						
	Pooled	EF	EF	EF	EF	FE
ice	-0.042 (0.047)	-0.505*** (0.009)	-0.489*** (0.008)	-0.085*** (0.010)	-0.023** (0.010)	-0.052*** (0.010)
lag(ice, 1)	0.019 (0.021)		-0.065*** (0.008)	-0.062*** (0.006)	-0.064*** (0.006)	-0.070*** (0.006)
log(pib_pc)	-0.310** (0.132)			-0.367*** (0.026)	0.110*** (0.023)	-0.042** (0.021)
log(habitantes)	-0.263*** (0.071)			-0.418*** (0.007)	-0.075*** (0.017)	-0.151*** (0.015)
log(pib_ind)	-0.189*** (0.051)				-0.303*** (0.012)	-0.270*** (0.010)
log(bovinos)	0.195*** (0.039)					0.186*** (0.003)
Constant	2.581*** (0.733)					

Note:

*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

As variáveis de controle por sua vez apresentam sinais positivos sobre o nível total de emissões, a exceção do PIB industrial. No modelo pooled a complexidade não é significativa tanto em nível quanto defasada.

A tabela 04 por sua vez fornece as regressões tendo como variável dependente as emissões de GEE sobre o PIB municipal, índice de emissões produtiva, a fim de captar a intensidade de emissões produtivas. Os resultados encontrados demonstram que a complexidade é negativa para a intensidade de emissões, resultado esperado assim como apresentado na literatura. Este resultado estiliza o fato de que sistemas produtivos mais complexos são menos danosos ambientalmente, pois ao produzirem produtos mais complexos a associação entre setores de alta complexidade é maior que por sua vez são menos poluentes.(ROMERO; GRAMKOW, 2021)

Alguns controles apresentam resultados não esperados de acordo com a literatura. O logaritmo do PIB per capita apresentam uma variação de sinais, no modelo sem o controle industrial seu sinal é

negativo, mas quando se controla para indústria passa a ser positivo e quando se insere o controle de atividade pecuária seu resultado volta a ser negativo. O PIB per capita e o número de habitantes tem resultados negativos sobre o índice de emissões produtiva. A pecuária por sua vez tem forte efeito sobre as emissões, positiva e estaticamente significativa além de possuir o maior efeito em termos de impacto.

Em resumo, os resultados desta análise destacam a importância da complexidade econômica, densidade populacional, taxa de urbanização e energia renovável na determinação das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, variáveis como PIB per capita, atividade pecuária e número de habitantes também desempenham um papel significativo na intensidade de emissões produtivas. Essas descobertas são relevantes para a formulação de políticas públicas voltadas para a mitigação das mudanças climáticas, destacando a necessidade de incentivar a transição para setores mais complexos e sustentáveis, bem como a promoção do uso de energia renovável e práticas agrícolas mais sustentáveis.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo contribuem significativamente para o entendimento dos efeitos econômicos das emissões de gases de efeito estufa e de suas reduções, alinhando-se aos desafios estabelecidos para alcançar os acordos internacionais de emissões zero.

Uma descoberta importante é a correlação negativa entre os níveis de emissões por produto nos municípios brasileiros, com uma distribuição espacial da complexidade que indica um maior número de municípios de maior complexidade nas regiões Sul e Sudeste. Esses resultados sustentam a hipótese de que economias mais complexas estão associadas a baixas taxas de emissões devido ao seu nível de sofisticação produtiva. Além disso, este estudo contribui para a literatura ao demonstrar que essa correlação negativa também se verifica em economias subnacionais.

Diante dos desafios que enfrentados para tornar as economias mais sustentáveis, a complexidade econômica pode revelar caminhos viáveis para o desenvolvimento de emprego e renda de forma ambientalmente responsável. Os resultados apresentados neste estudo abrem novas possibilidades de pesquisa, visando uma compreensão mais aprofundada da sofisticação produtiva em âmbitos regionais e seus impactos ambientais.

Essas descobertas têm implicações importantes para o desenvolvimento de políticas públicas que visam a transição para uma economia verde, destacando a importância de promover a complexidade econômica e a sofisticação produtiva como estratégias para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, os resultados destacam a necessidade de abordagens regionais e subnacionais para enfrentar os desafios ambientais, considerando as características específicas de cada área.

Referências

- AHMAD, M. et al. An environmental impact assessment of economic complexity and energy consumption: Does institutional quality make a difference? *Environmental Impact Assessment Review*, v. 89, p. 106603, jul. 2021. ISSN 0195-9255. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925521000536>>.
- ALMEIDA, J. *A sociologia e as mudanças climáticas*. [S.l.]: SciELO Brasil, 2019. 9–17 p.
- BALASSA, B. Trade Liberalisation and "Revealed" Comparative Advantage. *The Manchester School*, v. 33, n. 2, p. 99–123, maio 1965. ISSN 1463-6786, 1467-9957. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9957.1965.tb00050.x>>.
- BALTAGI, B. H.; BALTAGI, B. H. *Econometric analysis of panel data*. [S.l.]: Springer, 2008. v. 4.
- BOLETI, E. et al. Economic Complexity and Environmental Performance: Evidence from a World Sample. *Environmental Modeling & Assessment*, v. 26, n. 3, p. 251–270, jun. 2021. ISSN 1573-2967. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10666-021-09750-0>>.
- CEPAL, N. El big push para la sostenibilidad y la dinámica del empleo, el trabajo y los ingresos: el trabajo en el contexto de la transformación social y ecológica de la economía brasileña. CEPAL, 2022.
- CHU, L. K. Economic structure and environmental Kuznets curve hypothesis: new evidence from economic complexity. *Applied Economics Letters*, v. 28, n. 7, p. 612–616, abr. 2021. ISSN 1350-4851, 1466-4291. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13504851.2020.1767280>>.
- DOĞAN, B.; SABOORI, B.; CAN, M. Does economic complexity matter for environmental degradation? An empirical analysis for different stages of development. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 31, p. 31900–31912, nov. 2019. ISSN 0944-1344, 1614-7499. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11356-019-06333-1>>.
- GOZGOR, G.; CAN, M. Export product diversification and the environmental Kuznets curve: evidence from Turkey. *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 23, n. 21, p. 21594–21603, nov. 2016. ISSN 1614-7499.
- HAUSMANN, R.; HWANG, J.; RODRIK, D. What you export matters. *Journal of economic growth*, Springer, v. 12, p. 1–25, 2007.
- HIDALGO, C. A.; HAUSMANN, R. The building blocks of economic complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, n. 26, p. 10570–10575, jun. 2009. Publisher: Proceedings of the National Academy of Sciences. Disponível em: <<https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.0900943106>>.
- HIDALGO, C. A. et al. The Product Space Conditions the Development of Nations. *Science*, v. 317, n. 5837, p. 482–487, jul. 2007. Publisher: American Association for the Advancement of Science. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1144581>>.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021. Disponible em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>>.

LAPATINAS, A. et al. MPRA Paper, *Economic complexity and environmental performance: Evidence from a world sample*. 2019. Disponible em: <<https://mpra.ub.uni-muenchen.de/92833/>>.

LEMA, R.; FU, X.; RABELLOTTI, R. Green windows of opportunity: latecomer development in the age of transformation toward sustainability. *Industrial and Corporate Change*, Oxford University Press, v. 29, n. 5, p. 1193–1209, 2020.

MAJEED, M. T. et al. Economic complexities and environmental degradation: evidence from oecd countries. *Environment, Development and Sustainability*, Springer, v. 24, n. 4, p. 5846–5866, 2022.

NEAGU, O. Economic Complexity and Ecological Footprint: Evidence from the Most Complex Economies in the World. *Sustainability*, v. 12, n. 21, p. 9031, jan. 2020. ISSN 2071-1050. Number: 21 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponible em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/21/9031>>.

RIPPLE, W. J. et al. World scientists' warning to humanity: a second notice. *BioScience*, Oxford University Press, v. 67, n. 12, p. 1026–1028, 2017.

ROMERO, J. P.; GRAMKOW, C. Economic complexity and greenhouse gas emissions. *World Development*, v. 139, p. 105317, mar. 2021. ISSN 0305-750X. Disponible em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X20304447>>.

ROVERE, E. L. L. et al. Brazil beyond 2020: From deforestation to the energy challenge. *Climate Policy*, Taylor & Francis, v. 13, n. sup01, p. 70–86, 2013.

SEMIENIUK, G. et al. Stranded fossil-fuel assets translate to major losses for investors in advanced economies. *Nature Climate Change*, Nature Publishing Group UK London, v. 12, n. 6, p. 532–538, 2022.