CRESCIMENTO ECONÔMICO, EMISSÕES DE CO2 E SUSTENTABILIDADE NO BRASIL: UMA ANÁLISE COMPARATIVA COM BASE EM 60 PAÍSES

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem impulsionado pesquisas sobre os determinantes das emissões de CO2 e seu impacto no desenvolvimento econômico. A relação entre crescimento econômico, consumo de energia e emissões de CO2 é amplamente estudada, especialmente em economias emergentes e desenvolvidas (Souza et al., 2017). Fatores como urbanização, políticas energéticas e desenvolvimento econômico influenciam essa dinâmica (Santos et al., 2012; Asseff et al., 2021).

Estudos indicam que o crescimento econômico geralmente leva ao aumento das emissões de CO2, principalmente em economias dependentes de indústrias intensivas em carbono, como energia e manufatura (Ceretta e Vieira, 2021). No Brasil, o setor de energia, especialmente com base em combustíveis fósseis, e o transporte rodoviário são grandes responsáveis pelas emissões, seguidos pela agropecuária e o desmatamento (Castelão et al., 2021). O uso de energias renováveis e tecnologias eficientes pode ajudar a mitigar essas emissões sem prejudicar o crescimento econômico (Asseff et al., 2021).

Além disso, o risco político no Brasil, marcado por instabilidade e incertezas regulatórias, é um obstáculo à transição para uma economia mais sustentável (Santos et al., 2012). Este estudo, baseado em dados do Banco Mundial, analisou variáveis como população, emissões de CO2 e consumo de energia elétrica per capita em 60 países. Os resultados ajudam a entender como esses fatores afetam o crescimento econômico e fornecem insights valiosos para políticas públicas voltadas à mitigação de emissões e crescimento sustentável (Souza et al., 2017; Asseff et al., 2021).

Estudos recentes destacam o papel crucial das energias renováveis no crescimento sustentável, particularmente nos países do BRICS, onde há avanços significativos na transição para fontes de energia limpa (Fu et al., 2021; Chen et al., 2024). A adoção dessas fontes é uma solução viável para equilibrar crescimento econômico com menores impactos ambientais.

O modelo estatístico utilizado oferece uma ferramenta replicável para diversas economias, facilitando a identificação de políticas eficazes para promover o desenvolvimento sustentável. Dessa forma, este estudo contribui para o desenvolvimento de estratégias que alinhem a redução das emissões de CO2 com o crescimento econômico em países emergentes (Asseff et al., 2021; Fu et al., 2021; Chen et al., 2024).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A relação entre crescimento econômico e emissões de CO2 no Brasil reflete a tendência global de aumento das emissões em setores como a indústria, agricultura e geração de energia. No Brasil, as emissões estão fortemente ligadas ao uso de combustíveis fósseis e à expansão da fronteira agrícola, que resulta em desmatamento. Aproximadamente 70% das emissões do país vêm da agropecuária e mudanças no uso da terra, especialmente o desmatamento (MCTI, 2022). A produção de eletricidade a partir de fontes não renováveis e o transporte rodoviário também são grandes contribuintes para as emissões de gases de efeito estufa (Ceretta et al., 2021). A agropecuária contribui diretamente com emissões de metano e CO2 e indiretamente, ao pressionar áreas de florestas.

A Teoria da Curva Ambiental de Kuznets (EKC) sugere que as emissões aumentam durante as fases iniciais do crescimento econômico e, com o aumento da renda per capita, tendem a diminuir à medida que a sociedade demanda maior proteção ambiental e adota tecnologias mais limpas. No entanto, a aplicabilidade desta teoria ao Brasil é debatida, já que o país continua a enfrentar desafios ambientais graves, como o desmatamento e a expansão

agrícola (Souza et al., 2017). O Brasil, apesar de avanços econômicos, ainda precisa conciliar crescimento com sustentabilidade ambiental.

A transição para fontes renováveis de energia, como solar e eólica, é vista como uma solução promissora para mitigar as emissões de CO2 sem frear o crescimento econômico. Essa transição já está em curso no Brasil e em outros países do BRICS, onde políticas de incentivo a fontes limpas mostram resultados positivos em termos de redução de emissões (Asseff et al., 2021; Fu et al., 2021). Além disso, o uso de tecnologias limpas pode contribuir para a redução da dependência de combustíveis fósseis, permitindo ao Brasil crescer de forma mais sustentável.

Um desafio adicional está relacionado ao risco político. A instabilidade política e incertezas regulatórias no Brasil dificultam a implementação de políticas ambientais de longo prazo, essenciais para atrair investimentos em tecnologias verdes e infraestrutura sustentável. A falta de consistência nas regulamentações ambientais compromete o progresso em direção à neutralidade de carbono (Santos et al., 2012; Su et al., 2021).

Para que o Brasil consiga alinhar crescimento econômico com redução de emissões de CO2, é necessário um esforço concentrado em políticas públicas que incentivem a transição energética e o fortalecimento das instituições ambientais. Estudos apontam que, com uma estrutura regulatória clara e investimentos em infraestrutura verde e inovação tecnológica, o Brasil pode seguir uma trajetória de crescimento sustentável, similar à de alguns países desenvolvidos (Santos et al., 2012; Asseff et al., 2021; Fu et al., 2021). O avanço das energias renováveis, a adoção de tecnologias limpas e o fortalecimento de políticas ambientais são essenciais para mitigar as emissões de CO2 e garantir um crescimento econômico sustentável a longo prazo.

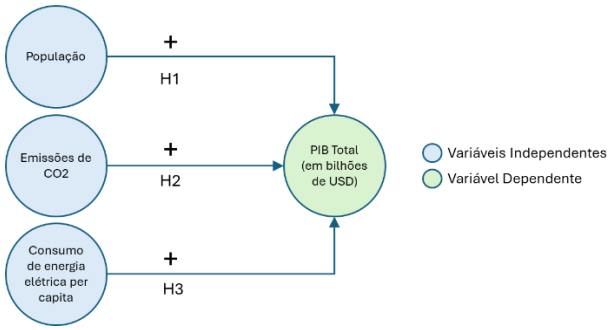
2.1. Crescimento Econômico e Emissões de CO2

A análise da relação entre crescimento econômico e emissões de CO2 no Brasil também é fundamental para identificar as particularidades do país em relação à economia global. Ao contrário de muitos países desenvolvidos, que já alcançaram níveis mais altos de industrialização e, portanto, estão na parte descendente da Curva de Kuznets, o Brasil ainda enfrenta a tarefa de conciliar a expansão econômica com a preservação ambiental. A agricultura, em particular, desempenha um papel contraditório, ao mesmo tempo em que é um dos principais motores do crescimento econômico e também um dos maiores responsáveis pelo desmatamento e pelas emissões de CO2 no país (Asseff et al., 2021; Chen et al., 2024).

Essa discussão teórica evidencia que a relação entre crescimento econômico e emissões de CO2 é multifacetada e envolve fatores que vão desde as políticas de energia e uso da terra até a estabilidade política. A adoção de fontes de energia renováveis, combinada com o fortalecimento das políticas ambientais, pode permitir que o Brasil atinja suas metas de neutralidade de carbono sem sacrificar o crescimento econômico. No entanto, o sucesso dessa transição depende de como o país irá lidar com os desafios estruturais e políticos que continuam a dificultar o desenvolvimento sustentável.

O crescimento econômico de um país, medido pelo Produto Interno Bruto (PIB), é amplamente influenciado por fatores demográficos e ambientais. Entre os principais determinantes estão a população, as emissões de CO2 e o consumo de energia elétrica per capita, todos fortemente relacionados ao desenvolvimento econômico e à sustentabilidade ambiental.

Figura 1 – Teorização e Hipóteses



Fonte: autores.

População: Um aumento da população está geralmente associado a um crescimento econômico, uma vez que mais pessoas contribuem para a produção de bens e serviços. No entanto, essa relação também pode levar a um aumento na demanda por recursos naturais, o que pode impactar negativamente o meio ambiente e aumentar as emissões de CO2.
Emissões de CO2: O aumento das emissões de CO2 reflete o uso de combustíveis fósseis, atividades industriais e o desmatamento. Embora essas atividades sejam motoras do crescimento econômico em muitos países, elas também causam externalidades ambientais negativas que podem impactar a sustentabilidade de longo prazo.
Consumo de energia elétrica per capita: Este fator está diretamente relacionado ao nível de desenvolvimento econômico de um país. Países com maior consumo de energia elétrica per capita tendem a ser mais industrializados e tecnologicamente avançados, o que impulsiona o crescimento econômico. No entanto, um alto consumo de energia baseado em fontes não renováveis aumenta as emissões de CO2.

2.1.1. Hipóteses de Pesquisa

A partir desta teorização, podemos propor as seguintes hipóteses:
Hipótese 1 (H1): Existe uma relação positiva entre o tamanho da população e o PIB total, onde um aumento populacional tende a elevar o crescimento econômico, mas também pode aumentar a demanda por recursos naturais, ampliando as pressões ambientais.
Hipótese 2 (H2): As emissões de CO2 têm uma relação positiva com o PIB, uma vez que atividades econômicas intensivas em carbono, como a produção industrial e a agropecuária, estão associadas ao crescimento econômico. No entanto, essa relação pode gerar efeitos colaterais negativos sobre o meio ambiente, comprometendo a sustentabilidade.
Hipótese 3 (H3): O consumo de energia elétrica per capita está positivamente relacionado ao crescimento econômico, já que reflete a industrialização e o avanço tecnológico. Países com maior consumo de energia elétrica per capita tendem a ter um PIB mais elevado. Entretanto, essa relação depende da matriz energética do país — se baseada em fontes renováveis ou não renováveis.

Essas hipóteses fornecem uma estrutura para testar empiricamente a relação entre desenvolvimento econômico e variáveis ambientais e energéticas, possibilitando uma análise mais profunda dos desafios do crescimento sustentável.

3. METODOLOGIA

Este estudo utiliza uma abordagem quantitativa para analisar a relação entre as emissões de CO2, o crescimento populacional, o consumo de energia elétrica per capita e o Produto Interno Bruto (PIB) no Brasil. A seguir, detalham-se as etapas adotadas para a coleta de dados,

o tratamento das variáveis, as técnicas de análise estatística e a modelagem utilizada no R-Studio.

Os dados foram obtidos da base de dados do Banco Mundial (World Bank), uma fonte amplamente reconhecida por disponibilizar informações estatísticas globais confiáveis. A coleta de dados focou em séries temporais e transversais disponíveis para os anos mais recentes, permitindo uma análise precisa do contexto econômico e ambiental do país. Os países analisados foram: China, Índia, Estados Unidos, Indonésia, Paquistão, Brasil, Nigéria, Bangladesh, Federação Russa, Japão, México, Etiópia, Filipinas, Egito, República Árabe, Vietnã, Congo, República Democrática do Congo, Irã, República Islâmica, Turquia, Alemanha, Tailândia, França, Reino Unido, Tanzânia, Itália, África do Sul, Mianmar, Quênia, Coreia, República da Colômbia, Espanha, Argentina, Sudão, Ucrânia, Argélia, Iraque, Canadá, Polônia, Marrocos, Arábia Saudita, Uzbequistão, Angola, Peru, Malásia, Camarões, Austrália, Chile, Equador, Holanda, Tunísia, Haiti, Cuba, Grécia, Suécia, Portugal, Israel, Áustria, Suíça, Paraguai, Dinamarca, Noruega.

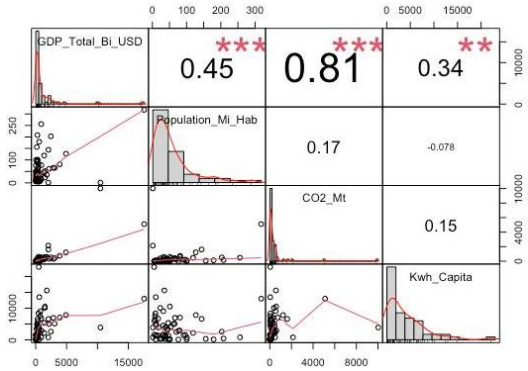
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para garantir a qualidade dos dados e identificar possíveis observações que poderiam distorcer os resultados da análise, foi utilizada a Distância de Mahalanobis. Essa técnica permitiu identificar outliers multivariados com base nas variáveis independentes. Observações com p-valores inferiores a 0,001 foram consideradas outliers. No entanto, como apenas 3 outliers foram identificados, e esse número ficou dentro do limite aceitável de 5%, esses pontos foram mantidos no conjunto de dados.

Foi realizada uma análise da linearidade entre as variáveis, por meio de gráficos de dispersão e do coeficiente de correlação de Pearson. Para isso, foram gerados scatterplots com histogramas, utilizando a função chart.Correlation da biblioteca PerformanceAnalytics no software R. Essa etapa foi fundamental para verificar se as variáveis independentes apresentavam uma relação linear com o PIB, permitindo a aplicação de uma regressão linear múltipla.

Os resultados da análise de regressão indicam uma forte relação positiva entre PIB e emissões de CO2, com um coeficiente de correlação de +0.81, sugerindo que o crescimento econômico está associado ao aumento das emissões. O consumo de energia per capita também apresenta uma correlação positiva moderada com o PIB, com um coeficiente de +0.65, indicando que o uso de energia impulsiona o crescimento, mas em menor escala, como podemos ver na figura 2.

Figura 2 – Scatterplots das Correlações



Fonte: Código R-Studio - autores.

A modelagem foi feita por meio de uma regressão linear múltipla, com o PIB como variável dependente, explicando 81,78% da variabilidade no PIB (R^2 de 0.8178). O modelo foi construído usando o método stepwise, que selecionou as variáveis de população, emissões de

CO2 e consumo de energia elétrica per capita como as mais relevantes. O critério de informação de Akaike (AIC = 852.05) mostrou que o modelo final é o mais parcimonioso, enquanto o teste Durbin-Watson (estatística D-W = 1.92) indicou que não há problemas de autocorrelação. Os baixos valores de VIF sugerem que não há colinearidade significativa entre as variáveis explicativas. O modelo de regressão foi ajustado inicialmente com o método Stepwise bidirecional (avaliação tanto forward quanto backward), partindo de um modelo nulo contendo apenas o intercepto e adicionando as variáveis explicativas.
O modelo final é expresso pela seguinte equação:

$$GDP_Total_Bi_USD = -993.20668 + 1.30658 \cdot Population_Mi_Hab + 14.52181 \cdot CO2_Mt + 0.15906 \cdot Kwh_Capita$$

Os coeficientes das variáveis fornecem informações sobre a magnitude de seu impacto no PIB. O coeficiente para a população (+1.30658) sugere que, para cada aumento de um milhão de habitantes, o PIB cresce em cerca de 1,31 bilhões de dólares. Já o coeficiente das emissões de CO2 (+14.52) indica que, para cada milhão de toneladas de CO2 emitidas, o PIB aumenta em 14,52 bilhões de dólares, sendo essa a variável de maior impacto no modelo. O consumo de energia per capita, com um coeficiente de +0.15906, também tem uma relação positiva com o PIB, mas com impacto relativamente menor.

Os resultados mostram que as emissões de CO2 têm o maior impacto no crescimento econômico, refletindo a importância dos setores industriais e de geração de energia baseados em combustíveis fósseis em muitos países. Em países em desenvolvimento, a queima de combustíveis fósseis e a industrialização intensiva em carbono continuam sendo as principais fontes de crescimento econômico, evidenciando uma forte correlação entre emissões e PIB. No entanto, esse crescimento está frequentemente associado a um custo ambiental elevado, com o aumento das emissões de gases de efeito estufa.

A relação positiva entre o consumo de energia per capita e o PIB sugere que o uso de energia está ligado ao nível de industrialização e modernização das economias. Entretanto, o impacto menor dessa variável no crescimento econômico pode ser explicado pela diversidade da matriz energética nos países estudados. Países que dependem fortemente de fontes de energia renováveis, que geram menos emissões de CO2, podem alcançar crescimento econômico com menores aumentos no consumo de energia. Por outro lado, países que utilizam majoritariamente combustíveis fósseis para geração de energia tendem a ver um maior crescimento econômico, mas às custas de maiores emissões.

O coeficiente da população também apresentou uma relação positiva com o PIB, indicando que o crescimento populacional contribui para o aumento do PIB, embora em menor escala do que as emissões de CO2. Isso reflete a importância da força de trabalho e da demanda interna para o crescimento econômico, mas também mostra que, além do número de habitantes, fatores como a eficiência econômica e os setores produtivos têm papel fundamental no crescimento.

Esses resultados reforçam a necessidade de políticas que conciliem crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. O impacto positivo das emissões de CO2 no PIB, especialmente em setores intensivos em carbono, sugere que políticas de mitigação de emissões são essenciais para alinhar o crescimento econômico com metas de sustentabilidade. A transição para tecnologias limpas e fontes renováveis de energia, já adotada em alguns países, é crucial para reduzir as emissões e promover um crescimento mais sustentável a longo prazo.

5. CONCLUSÃO

Este estudo analisou a relação entre crescimento econômico, emissões de CO2, população e consumo de energia elétrica per capita em 60 países. Os resultados mostraram uma forte correlação positiva entre o aumento das emissões de CO2 e o crescimento do PIB,

especialmente em economias dependentes de setores intensivos em carbono, como a indústria e o setor energético.

Embora o crescimento populacional também tenha uma correlação positiva com o PIB, seu impacto é menos expressivo em comparação com as emissões de CO2. O consumo de energia elétrica per capita apresentou uma influência moderada no crescimento econômico, sugerindo que a matriz energética dos países é determinante para esse impacto.

No Brasil, a agropecuária e o desmatamento são grandes desafios para o desenvolvimento sustentável. O estudo destaca a importância de alinhar o crescimento econômico com a redução das emissões de gases de efeito estufa para atingir metas de neutralidade de carbono. A transição para fontes de energia renováveis e o investimento em tecnologias limpas são cruciais para promover um crescimento sustentável sem prejudicar o meio ambiente.

Entretanto, o estudo tem limitações. Ele utiliza dados de um ponto específico no tempo, sem considerar variações temporais ou eventos inesperados, como crises econômicas. Além disso, foca em variáveis quantitativas, não incorporando o impacto de políticas governamentais e investimentos em tecnologias verdes. A dependência dos dados do Banco Mundial também pode gerar inconsistências, além de não abordar diferenças regionais que podem influenciar as emissões de CO2.

Pesquisas futuras podem incluir uma análise temporal e fatores qualitativos, como regulamentações ambientais e investimentos tecnológicos, para entender melhor como mitigar as emissões sem comprometer o crescimento econômico.

REFERÊNCIAS

Asseff Castelão, R., Souza, C. C., & Frainer, D. M. (2021). Southern Mato Grosso state (Brazil) productive system and its impact on emissions of carbon dioxide (CO2). Environment, Development and Sustainability, 23(4134–4148).

Ceretta, S., & Vieira, E. (2021). Emissões de CO2: Uma análise estrutural dinâmica. Journal of Environmental Economics. https://doi.org/10.1016/j.jecon.2021.06.005

Chen, X., Rahman, S. U., Abdullah, S., Ali, S., & Khalid, S. (2024). Towards Sustainable Development: Examining Renewable Energy Consumption in E-7 Countries. *Heliyon*.

Fu, Q., Álvarez-Otero, S., Sial, M. S., Comite, U., Zheng, P., Samad, S., & Oláh, J. (2021). Impact of renewable energy on economic growth and CO2 emissions—evidence from BRICS countries. *Processes*, *9*(8), 1281. https://doi.org/10.1007/s10068-024-01569-x

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. (2022). Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil: 6ª edição. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. https://www.gov.br/mcti

Santos, G. R., Rebelato, M. G., & Rodrigues, A. L. (2012). Análise da viabilidade econômica de projetos sustentáveis. Revista Brasileira de Economia Sustentável, 8(2), 34–49.

Souza, E. S., Freire, F. S., Campos, E. S., & Pires, J. (2017). Determinantes de emissões de CO2 no Brasil e investigação da hipótese Environmental Kuznets Curve (EKC). Amazônia, Organizações e Sustentabilidade, 6(2), 49–66.

Su, Z. W., Umar, M., Kirikkaleli, D., & Adebayo, T. S. (2021). Role of political risk to achieve carbon neutrality: evidence from Brazil. *Journal of Environmental Management*, *298*, 113463.